



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

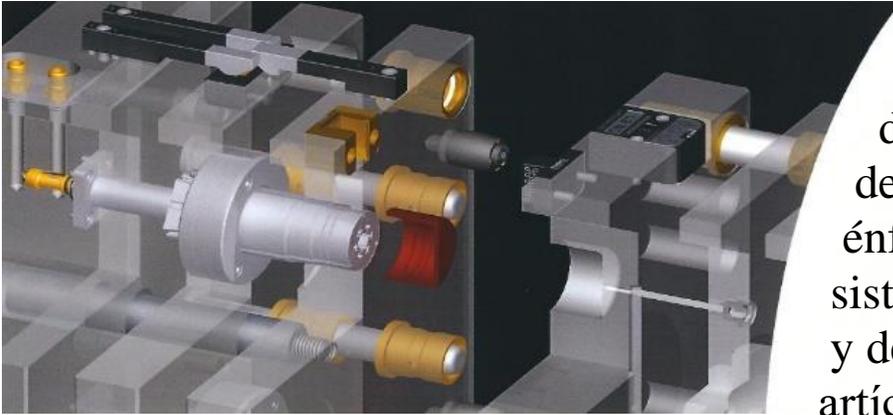
**FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DEL
DISEÑO DE MOLDES DE INYECCIÓN, CON
ÉNFASIS EN LOS SISTEMAS DE EXPULSIÓN
Y DESMOLDEO DE ARTÍCULOS PLÁSTICOS**

Autor(es)

John Jaime Coronado García

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento Mecánica.
Medellín, Colombia
2019





“Fundamentos de ingeniería del diseño de moldes de inyección, con énfasis en los sistemas de expulsión y desmoldeo de artículos plásticos”

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Por:

John Jaime Coronado García

Asesor:

Ph.D. Pedro León Simanca



Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica
2019

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	iii
Lista de Tablas	xi
Lista de Figuras	xii
Lista de Símbolos	xxv
Glosario	xxvi
Descripción	xxix
Justificación	xxxiii
Industria de Moldes en Colombia: Pasado Cercano	xxxiii
Industria de Moldes en Colombia: Presente	xxxiv
Objetivos	xxxvi
Objetivo General	xxxvi
Objetivos Específicos	xxxvi
Introducción	xxxvii
Contexto	xxxvii
Contenido y Alcance del Trabajo	xxxvii
1 Tipos de Plásticos y Aspectos de Interés Sobre su Reología	44
1.1 Tipos de Plásticos de Uso Común	44
1.1.1	Peso molecular. 46
1.1.2	Termoplásticos (no reticulados). 49
1.1.2.1	Estructura amorfa. 50
1.1.2.2	Estructura Cristalina o Semicristalina. 51
1.1.3	Termoestables (reticulados). 52
1.1.3.1	Elastómeros. 53
1.1.3.2	Termofijos. 55
1.1.4	Copolímeros y mezclas de polímeros. 57
1.1.5	Aditivos aplicables a los polímeros. 58
1.1.5.1	Plastificantes. 58
1.1.5.2	Ignifugantes o retardadores de llama. 58
1.1.5.3	Estabilizantes. 59
1.1.5.4	Agentes antiestáticos. 59
1.1.5.5	Rellenos. 59

1.1.5.6	Espumantes. _____	61
1.2	Propiedades y Comportamiento de los Polímeros _____	61
1.2.1	Propiedades físicas. _____	61
1.2.1.1	Densidad y gravedad específica. _____	61
1.2.1.2	Elasticidad. _____	63
1.2.1.3	Plasticidad. _____	63
1.2.1.4	Ductilidad. _____	64
1.2.1.5	Tenacidad (Dureza). _____	64
1.2.1.6	Fragilidad. _____	65
1.2.1.7	Sensibilidad a la entalla. _____	65
1.2.1.8	Isotropía. _____	70
1.2.1.9	Anisotropía. _____	70
1.2.1.10	Absorción de agua. _____	71
1.2.1.11	Contracción de molde. _____	71
1.2.2	Propiedades mecánicas. _____	73
1.2.2.1	Esfuerzo normal. _____	73
1.2.2.2	Deformación normal. _____	73
1.2.2.3	Curva esfuerzo - deformación. _____	74
1.2.3	Fluencia (Creep). _____	76
1.2.3.1	Introducción. _____	76
1.2.3.2	Experimentos de fluencia. _____	76
1.2.3.3	Curvas de fluencia. _____	77
1.2.3.4	Relajación de esfuerzos. _____	78
1.2.4	Propiedades impacto. _____	79
1.2.5	Propiedades térmicas. _____	80
1.2.5.1	Punto de fusión (Melting point). _____	81
1.2.5.2	Temperatura de transición vítrea. _____	81
1.2.5.3	Temperatura de deflexión bajo carga. _____	81
1.2.5.4	Coefficiente de expansión térmica. _____	81
1.2.5.5	Conductividad térmica. _____	82
1.2.5.6	Influencia térmica en las propiedades mecánicas. _____	82
1.2.6	Comparación de las propiedades de los materiales. _____	84
1.3	Reología Básica de los Polímeros Fundidos _____	87
1.3.1	Introducción a la reología. _____	87
1.3.1.1	Comportamiento pseudoplástico de polímeros (shear thinning). _____	88
1.3.1.2	Esfuerzos normales en flujo de cizalla. _____	89
1.3.1.3	Numero de Deborah. _____	91
1.3.1.4	Reología del curado de termoestables. _____	93
1.3.1.5	Reología en suspensiones. _____	94
1.3.1.6	Modelos de flujo viscoelástico. _____	95
1.3.2	Reometría. _____	95
1.3.2.1	Índice de fluidez en fundido. _____	96
1.3.2.2	Viscosímetro capilar. _____	96

1.3.2.2.1	Cálculo de la viscosidad usando las ecuaciones Bagley y Weissenberg-Rabinowitsch	98
1.3.2.2.2	Aproximación a la viscosidad usando el método de viscosidad representativa	101
1.3.2.3	Reómetro de cono y plato.	102
2	Proceso de Transformación	104
2.1	Mezclado	104
2.1.1	Mezclado distributivo.	106
2.1.1.1	Efecto de la orientación.	107
2.1.2	Mezclado dispersivo.	110
2.1.2.1	Rotura de los aglomerados de partículas.	111
2.1.2.2	Rotura de las gotas de fluido.	113
2.1.3	Dispositivos de mezclado.	117
2.1.3.1	Mezcladores estáticos.	117
2.1.3.2	Mezcladores Banbury.	119
2.1.3.3	Mezclador tipo Co-kneader.	121
2.2	Influencia de las Condiciones de Proceso en las Propiedades de la Pieza Moldeada	122
2.2.1	Orientación durante el moldeo por inyección.	122
2.2.2	Efecto del molde.	123
2.2.3	Medida de la orientación.	124
2.2.4	Factores que influyen en la orientación.	125
2.2.5	Efecto de la orientación en la contracción y las propiedades.	126
2.2.5.1	Contracción diferencial.	127
2.2.5.2	Efecto de las condiciones de procesado en la contracción.	127
2.2.5.3	Factores que ocasionan el alabeamiento.	128
2.2.5.4	Como evitar el alabeamiento.	129
2.2.6	Contracción térmica.	130
2.2.6.1	Efecto de las condiciones térmicas de procesado en la contracción.	131
2.3	La Máquina de Inyección.	133
2.3.1	Unidad de inyección y plastificación.	134
2.3.2	Unidad de potencia.	135
2.3.2.1	Sistema de potencia eléctrico.	137
2.3.2.2	Sistema de potencia hidráulico.	138
2.3.3	Unidad de cierre.	139
2.4	Características Principales de la Máquina	140
2.4.1	Capacidad de cierre.	141
2.4.2	Dimensiones de molde.	145
2.4.3	Recorrido de apertura del molde.	148
2.4.4	Capacidad de inyección.	148
2.4.5	Presión de inyección.	149
2.4.6	Capacidad de plastificación.	150
2.4.7	Velocidad de inyección.	151

2.5	Proceso de Inyección	152
2.5.1	Ciclo de inyección.	155
2.5.1.1	Tiempo de inyección (<i>ti</i>).	158
2.5.1.2	Tiempo de aplicación de la presión de sostenimiento o pospresión (<i>tp</i>).	160
2.5.1.3	Tiempo de plastificación (<i>tf</i>).	160
2.5.1.4	Tiempo de solidificación o de enfriamiento (<i>ts</i>).	161
2.5.2	Estimación de la presión de inyección y la fuerza de cierre.	165
2.5.3	Tensiones residuales en una pieza inyectada.	169
2.6	Procesos Especiales de Moldeo por Inyección	170
2.6.1	Inyección multicolor.	171
2.6.2	Inyección multicomponente.	171
2.6.3	Coinyección.	172
2.6.4	Inyección asistida por gas (GAIM).	173
2.6.5	Inyección – compresión (ICM).	174
2.6.6	Moldeo por inyección reactiva (RIM).	175
2.7	Equipos Auxiliares de Proceso	177
2.7.1	Diseños especiales de tornillos.	177
2.7.1.1	Tornillos para PVC rígido.	177
2.7.1.2	Tornillos para elastómeros.	177
2.7.1.3	Tornillos con cabezas mezcladoras.	178
2.7.1.4	Tornillos con zona de mezclado prolongada.	179
2.7.1.5	Tornillos y barriles con desgasificación.	180
2.7.1.6	Equipos de secado.	181
2.7.2	Válvulas de bloqueo de flujo (antirretorno).	182
2.7.2.1	Válvula de anillo.	183
2.7.2.2	Válvula de bola.	184
2.7.3	Boquillas de inyección.	184
2.7.3.1	Tipos de boquillas de cierre.	187
3	Metodologías para el Desarrollo de un Proyecto de Transformación de Plástico	191
3.1	Metodología de Ingeniería de Diseño	191
3.1.1	Criterio PDS (especificaciones de diseño de producto).	192
3.2	Método Tradicional de Fabricación de Moldes	194
3.3	Metodología de Diseño para la Manufactura y Ensamble (DFMA)	195
3.3.1	Implementación DFMA en el proceso de transformación de plásticos.	197
3.3.2	Definición integral para modelado de funciones (IDEF-0).	198
3.3.3	Proceso de modelado IDEF-0.	198
3.4	Modelo General IDEF-0 para la Manufactura de Moldes de Inyección	200
3.4.1	Propósito del modelo IDEF-0.	200
3.4.2	Contenido y enfoque del modelo IDEF-0.	201
3.4.3	Modelo general IDEF-0.	201

3.4.4	Guía de actividades del modelo. _____	204
3.4.5	Conclusiones del modelo DFMA. _____	208
4	<i>Características Básicas para el Diseño Técnico de los Productos Plásticos</i> _____	213
4.1	Recordando las Propiedades de los Materiales _____	213
4.2	Selección del Plástico Adecuado para el Proyecto _____	215
4.3	Diseño Estructural de Artículos Termoplásticos _____	216
4.3.1	Espesores de pared constante. _____	216
4.3.1.1	Geometrías de piezas difíciles de moldear. _____	221
4.3.1.2	Ángulos de desmoldeo (Wall Draft Angle). _____	222
4.3.1.3	Redondeos. _____	225
4.3.1.4	Diseño de cilindros (Bosses) para ensamble. _____	225
4.3.2	Diseño de refuerzos o costillas. _____	228
4.4	Métodos de Ensamble de Piezas Plásticas _____	230
4.4.1	Fijación permanente. _____	231
4.4.1.1	La soldadura de placa caliente. _____	231
4.4.1.2	Estampación en frío. _____	232
4.4.1.3	Unión con disolvente. _____	234
4.4.1.4	Método de unión adhesiva. _____	235
4.4.1.5	Soldadura ultrasónica o por ultrasonido. _____	239
4.4.1.6	Soldadura por vibración. _____	246
4.4.1.7	Soldadura por fricción (giro). _____	249
4.4.1.8	Soldadura electromagnética. _____	251
4.4.2	Fijación removible. _____	255
4.4.2.1	Tornillos autorroscantes. _____	256
4.4.2.2	Ensamble por interferencia o ajuste a presión. _____	258
4.4.2.3	Encaje o ajuste a presión. _____	262
4.4.2.3.1	Juntas de encaje a presión circulares. _____	262
4.4.2.3.2	Junta de encaje a presión en voladizo. _____	267
4.4.2.3.3	Pautas de diseño de pestillo de ajuste a presión en voladizo. _____	273
4.4.2.3.4	Flexión admisible para retenciones en voladizo (δ). _____	277
4.4.2.3.5	Fuerza de ensamblaje de viga de cierre en voladizo (W). _____	279
4.4.2.3.6	Consideraciones de diseño y materiales. _____	281
4.5	Diseño Básico para Bisagras (<i>Living Hinges</i>) _____	281
4.5.1	Diseño clásico para PP y PE. _____	282
4.6	Análisis Reológico del Producto _____	284
4.6.1	Etapas del proceso. _____	285
4.6.1.1	Definición modelo 3D. _____	285
4.6.1.2	Mallado. _____	286
4.6.1.3	Definición de variables del proceso. _____	288
4.6.1.4	Cálculo. _____	288

4.6.1.5	Post-procesado. _____	289
4.6.2	Ejemplo aplicado de análisis reológico. _____	289
4.6.2.1	Modelado y mallado del aro. _____	289
4.6.2.2	Estudio de llenado. _____	291
4.6.2.2.1	Resultado del análisis. _____	292
4.6.2.2.2	Conclusiones. _____	299
4.6.2.3	Análisis de deformaciones. _____	300
4.6.2.3.1	Resultado del análisis. _____	300
4.6.2.3.2	Conclusiones. _____	302
4.6.2.4	Análisis de refrigeraciones. _____	302
4.6.2.4.1	Resultado del análisis. _____	302
4.6.2.4.2	Conclusiones. _____	305
4.7	Consejos de Diseño y Posibles Soluciones a Problemas en el Artículo Durante la Inyección _____	306
4.7.1	Consideraciones generales. _____	306
4.7.2	Piezas moldeadas. _____	307
4.7.3	Plásticos extruidos. _____	309
4.7.4	Selección del material. _____	309
4.7.5	Refuerzos o nervios. _____	310
5	Moldes de Inyección _____	311
5.1	Partes del Molde de Inyección _____	311
5.2	Los Diferentes Tipos de Moldes de Inyección _____	313
5.2.1	Moldes de dos placas. _____	317
5.2.2	Moldes de tres placas. _____	318
5.2.3	Moldes según el tipo de inyección. _____	320
5.2.3.1	De inyección externa. _____	320
5.2.3.2	De inyección interna. _____	321
5.2.3.3	De inyección "Subgate" Subterráneo. _____	322
5.2.4	Moldes de patines. _____	324
5.2.5	Otros tipos de molde. _____	327
5.3	Funciones Básicas del Molde y sus Sistemas _____	330
5.3.1	Sistema de guiado. _____	330
5.3.2	Sistema de cavidades de molde. _____	336
5.3.3	Sistema de colada. _____	338
5.3.3.1	Colada fría. _____	338
5.3.3.1.1	Colada de boquilla fría. _____	339
5.3.3.1.2	Colada de boquilla caliente. _____	340
5.3.3.2	Colada caliente. _____	341
5.3.3.2.1	Colada full caliente. _____	344
5.3.3.2.2	Colada semi-caliente. _____	345
5.3.3.3	Normas de selección de boquillas para colada caliente. _____	347

5.3.4	Sistemas de canales de entrada y gates. _____	349
5.3.4.1	Inyección directa a rama. _____	350
5.3.4.2	Directrices de diseño de los canales de la rama. _____	351
5.3.4.3	Tipos de puntos de inyección para la llegada a la cavidad “Pitorros de cavidad”_	355
5.3.5	Sistemas de respiración o de evacuación de aire. _____	359
5.3.6	Sistemas de refrigeración o calefacción. _____	361
5.3.6.1	Factores que afectan la refrigeración del molde. _____	363
5.3.6.2	Ubicación de los canales de enfriamiento. _____	364
5.3.6.3	Espacio entre canales de enfriamiento. _____	366
5.3.6.4	Análisis de remoción de calor del molde. _____	366
5.3.6.5	Diferentes tipos de piezas refrigeradas y elementos comerciales de refrigeración. _____	370
5.3.7	Sistema de expulsión y desmoldeo. _____	375
5.3.7.1	Línea de partición de molde. _____	376
5.3.7.1.1	Línea de partición plana. _____	376
5.3.7.1.2	Línea de partición no plana. _____	378
5.3.7.1.3	Balance de líneas o superficies de partición de molde. _____	381
5.3.7.2	Sistemas típicos de extracción. _____	382
5.3.8	Sistemas de acople del molde a la máquina inyectora. _____	386
5.3.8.1	Alineación de moldes. _____	386
5.3.8.2	Alineación con el eje de la unidad plastificadora. _____	386
5.3.8.3	Alineación interna. _____	387
5.3.8.4	Fijación del molde a máquina. _____	390
5.3.8.4.1	Fijación con tornillos. _____	390
5.3.8.4.2	Fijación con bridas. _____	391
5.4	Selección de Materiales y Tratamientos Térmicos y/o Superficiales _____	391
5.4.1	Materiales recomendados para la fabricación de moldes. _____	392
5.4.1.1	Acero pre-templado para moldes y porta-moldes. _____	392
5.4.1.2	Acero de temple. _____	392
5.4.1.3	Aceros resistentes a la corrosión _____	393
5.4.2	Procesos de mecanizado típicos usados para la fabricación de moldes. _____	393
5.4.3	Tratamientos térmicos recomendados. _____	395
5.4.4	Tratamientos termoquímicos. _____	396
5.4.5	Tratamientos superficiales. _____	396
6	<i>Sistemas de Expulsión y Desmoldeo en los Moldes de Inyección</i> _____	399
6.1	Consideraciones Generales y Definiciones _____	403
6.2	Requerimientos Básicos para Cualquier Método de Expulsión. _____	406
6.2.1	Características de expulsión. _____	407
6.2.2	Longitud del expulsor de la máquina. _____	408
6.2.3	Tipos comunes de vástagos de expulsión en moldes _____	408
6.2.3.1	Vástago central. _____	409
6.2.3.2	Puente de expulsión. _____	410

6.3	Tipos comunes de Sistemas de Expulsión y Desmoldeo de Artículos	410
6.3.1	Sistema de expulsión por pin o expulsor	410
6.3.2	Sistema de expulsión por cuchillas.	411
6.3.3	Sistema de expulsión por válvula mecánica	411
6.3.4	Sistema de expulsión por aire.	412
6.3.5	Sistema de expulsión por placa.	413
6.4	Expulsión en Dos o Más Etapas	413
6.5	Sistemas de Desenrosque para el Desmoldeo de Artículos	416
6.6	Desmoldeo de Artículos Mediante Núcleos (Machos) Colapsibles o Expandibles	419
6.6.1	Machos colapsibles radiales.	419
6.6.2	Machos colapsibles axiales.	424
6.6.3	Cavidades expandibles.	426
6.7	Sistemas de Apertura del Molde	427
6.7.1	Jaladores o "klinkens" de apertura.	427
6.7.2	Limitadores de recorrido que producen fuerzas de expulsión.	430
6.7.3	Expulsión de la rama usando klinkens y limitadores.	430
6.8	Patines o Correderas. Características de Diseño	431
6.9	Métodos de Expulsión Especiales	437
6.9.1	Sistemas para moldes de pisos (Stack Molds).	437
6.9.2	Correderas especiales.	439
Conclusiones		442
Referencias		444
Bibliografía		453
Anexos		454
Anexo A: Siglas de Polímeros		454
Anexo B: Comparación de Propiedades para Algunos Plásticos de Uso Común		459
Anexo C: Stacks Molds.		460
Anexo D: Profundidad de Ventilación H al Borde de Cavidad para Tipos Comunes de Resinas		461
Anexo E: Materiales Recomendados para Moldes Marca Uddehom®-Assab®. Ver en línea		462
Anexo F: Tabla de Materiales y Equivalencias para Marca Uddehom®-Assab®. Ver en línea		464
Anexo G: Propiedades de Procesamiento de Algunos Materiales Plásticos		465
Anexo H: Ejemplo de Descripción de Aperturas de un Sistema Simple de Expulsión de Molde		466

Lista de Tablas

Tabla 1. Valores de densidad típicos de Polímeros. _____	62
Tabla 2. Coeficiente de expansión térmica de los metales y Polímeros comunes. _____	83
Tabla 3. Comparación de las propiedades genéricas de los materiales. _____	86
Tabla 4. Índices de fluidez, índices de consistencia y constantes dependientes de la temperatura para termoplásticos comunes. _____	89
Tabla 5. Mezclas de polímeros comunes. _____	106
Tabla 6. Intervalo de valores de propiedades físicas. _____	122
Tabla 7. Efecto del molde y de las variables de procesamiento sobre la orientación y la anisotropía. _____	126
Tabla 8. Factores que influyen en el alabeamiento. _____	129
Tabla 9. Efecto de la orientación sobre algunas propiedades. _____	130
Tabla 10. Condiciones que afectan la contracción. _____	132
Tabla 11. Valores típicos de las características fundamentales de una máquina inyectora. _____	141
Tabla 12. Fuerza de cierre requerida para algunos termoplásticos. _____	145
Tabla 13. Datos requeridos para determinar el tiempo de enfriamiento de algunos polímeros. _____	162
Tabla 14. Condiciones de secado para algunos materiales. _____	180
Tabla 15. Proceso de diseño y sus principales características. _____	192
Tabla 16. Descripción de las Características principales de las Especificaciones de Diseño del Producto (PDS). _____	193
Tabla 17. Comparación tiempos totales de desarrollo de proyecto, modelo actual y modelo DFMA. _____	209
Tabla 18. Comparación tiempos de manufactura y ensamble estimados con tiempos reales. _____	211
Tabla 19. Resultados de Caso 123 casos de estudio Publicados que muestran mejoras por la aplicación de Software DFMA. _____	211
Tabla 20. Lista de chequeo para el diseño de artículos. _____	217
Tabla 21. Espesores nominales recomendados. _____	220
Tabla 22. Conicidades (draft) para distintos ángulos de inclinación. _____	224
Tabla 23. Disolventes usados para unir algunos polímeros termoplásticos. _____	235
Tabla 24. Familias de adhesivos para termoplásticos. Guía de características para la selección. _____	236
Tabla 25. Profundidad de enganche circular interno. _____	266
Tabla 26. Ecuaciones para Vigas Cantiléver o voladizo. _____	276
Tabla 27. Coeficiente de fricción. _____	280
Tabla 28. Características del mallado del aro. _____	290
Tabla 29. Resultados del análisis de refrigeración. _____	304
Tabla 30. Diferencia de temperatura en los circuitos de refrigeración. _____	304
Tabla 31. Tablas Afnor para tolerancias de artículos para diferentes materiales. _____	308
Tabla 32. Conductividad térmica de materiales para moldes. _____	364
Tabla 33. Propiedades del fluido refrigerante de circulación y limpieza. _____	369
Tabla 34. Equivalencia de rugosidad DVI. _____	405
Tabla 35. Comparación de Propiedades para Algunos Plásticos de Uso Común. _____	459
Tabla 36. Profundidad de Ventilación H al Borde de Cavidad para Tipos Comunes de Resinas. _____	461
Tabla 37. Propiedades de Procesamiento de Algunos Materiales Plásticos. _____	465

Lista de Figuras

Figura 1. Artículos plásticos y medio de transformación (molde).	xxix
Figura 2. Sistema comercial para la expulsión de un artículo con una retención de difícil desmoldeo. (Progressive Components International Corporation, 2018).	xxx
Figura 3. Esquema de una máquina de moldeo por inyección con pistón.	xxx
Figura 4. Algunos sistemas típicos de expulsión y desmoldeo, usados en moldes pequeños. (Menges & Mohren, 2001).	xxxi
Figura 5. Ejemplo de tipos de canales para el llenado de artículos. (Beaumont, 2004).	xxxviii
Figura 6. Diferentes sistemas y componentes de una máquina de inyección de tornillo. (Beltran & Marcilla, 2012, p.178).	xxxviii
Figura 7. Análisis reológico de un producto plástico; muestra la distribución de temperatura, con respecto a la ubicación del punto de inyección. (Beaumont, 2004).	xl
Figura 8. Esquema típico de distribución de los elementos y sistemas de un molde de inyección. (Progressive Components International Corporation., 2018).	xli
Figura 9. Cavidades de molde en aceros especiales para moldes de transformación de plástico Distribuidos por Böhler. (Böhler, 2000, p.7).	xlii
Figura 10. Ejemplo de sistema de expulsión y desmoldeo comercial. (Progressive Components International Corporation, 2018, p. C-12).	xliii
Figura 11. Representación esquemática de: A) monómero de etilen, B) polímero de polietileno. (Osswald & Rudolph, 2015, pp.25-26).	44
Figura 12. Representación simbólica de una molécula de polietileno. (Osswald & Rudolph, 2015, p.26).	45
Figura 13. Influencia del peso molecular en las propiedades mecánicas. (Menges & Osswald, 2012, p. 51).	46
Figura 14. Relación entre el peso molecular, la temperatura y las propiedades típicas de un termoplástico. (Menges & Osswald, 2012, p.52).	47
Figura 15. Distribución del peso molecular de un termoplástico típico. (Menges & Osswald, 2012, p.53).	48
Figura 16. Esquema de la estructura molecular del polietileno con diferentes densidades. (Menges & Osswald, 2012, p.59).	48
Figura 17. Cadenas moleculares para polímeros amorfos: cadenas moleculares. (Menges & Osswald, 2012).	50
Figura 18. Representación esquemática de la estructura molecular general y la disposición ordenada en los materiales semicristalinos. (Menges & Osswald, 2012, p.63).	51
Figura 19. Cadenas moleculares por fases para polímeros semicristalinos. (Sánchez et al, 2003, p.29).	52
Figura 20. Termoestables: entrecruzamientos. (Sánchez et al., 2003, p.23).	53
Figura 21. Cadenas poliméricas de un trozo de caucho no estirado. (Rave, 2003).	54
Figura 22. Cadenas poliméricas de un trozo de caucho estirado. (Rave, 2003).	55
Figura 23. Resumen de la clasificación de los polímeros. (Rave, 2003).	56
Figura 24. Representación esquemática de diferentes copolímeros. (Menges & Osswald, 2012, p.74).	57
Figura 25. Concepto de elasticidad. (Tres, 2014, p.15)	63
Figura 26. Concepto de plasticidad. (Tres, 2014, p.16)	64
Figura 27. Concepto de ductilidad. (Tres, 2014, p.16).	64

Figura 28. Concepto de tenacidad o dureza: (a) material tenaz; (b) material frágil o quebradizo. (Tres, 2014, p.17)	64
Figura 29. Concepto de fragilidad. (Tres, 2014, p.17).	65
Figura 30. Sensibilidad de muesca creada por ranuras y agujeros (Tres, 2014, p.18).	65
Figura 31. Factor de concentración de esfuerzos, k , para barras planas cargadas en tensión o compresión. (Tres, 2014, p.19)	67
Figura 32. Factor de concentración de esfuerzos, k , para barras planas cargadas en flexión. (Tres, 2014, p.20).	68
Figura 33. Factor de concentración de esfuerzos, k , para barras planas cargadas en flexión. Tres, 2014, p.20).	68
Figura 34. Factor de concentración de esfuerzos, k , para varillas cargadas en tensión o compresión. Tres, 2014, p.21).	69
Figura 35. Factor de concentración de esfuerzos, k , para varillas cargadas en flexión. Tres, 2014, p.21).	69
Figura 36. Isotropía. $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$. (Tres, 2014, p.22).	70
Figura 37. Anisotropía. $\sigma_x \neq \sigma_y \neq \sigma_z$. (Tres, 2014, p.22).	70
Figura 38. Absorción de agua. (Tres, 2014, p.23).	71
Figura 39. Contracción. (Tres, 2014, p.24).	72
Figura 40. Esfuerzo normal. (Tres, 2014, p.25).	74
Figura 41. Deformación. (Tres, 2014, p.26).	74
Figura 42. Curva típica esfuerzo – deformación. (Tres, 2014, p.27).	75
Figura 43. Curva de esfuerzo-deformación, metal vs plástico. (Tres, 2014, p.27).	75
Figura 44. Experimentos de fluencia. (Tres, 2014, p.28).	76
Figura 45. Curvas isócronas de esfuerzo-deformación. (Tres, 2014, p.29).	77
Figura 46. Esfuerzo constante, deformación vs logarítmica del tiempo. (Tres, 2014, p.30).	78
Figura 47. Modulo aparente (fluencia) (Tres, 2014, p.30).	78
Figura 48. Experimento de esfuerzo-relajación. (Tres, 2014, p.31).	79
Figura 49. Prueba de impacto Izod. (Tres, 2014, p.32).	80
Figura 50. Prueba de impacto Charpy. (Tres, 2014, p.32).	80
Figura 51. Influencia de la temperatura sobre las curvas esfuerzo-deformación. (Tres, 2014, p.36).	84
Figura 52. Propiedades de algunos polímeros de uso común. (Osswald & Giménez, 2008).	85
Figura 53. Representación esquemática de un reómetro de plato deslizante. (Osswald & Giménez, 2008, p. 64).	88
Figura 54. Curva de viscosidad reducida para un LDPE a una temperatura de referencia de 150°C. (Osswald & Giménez, 2008, p.65).	88
Figura 55. Coeficiente del primer esfuerzo normal para un LDPE fundido a una temperatura de referencia de 150°C. (Osswald & Giménez, 2008, p.71)	90
Figura 56. Representación esquemática del hinchamiento del material durante la extrusión. (Osswald & Giménez, 2008, p.71)	91
Figura 57. Varias formas obtenidas en polímeros extruidos bajo fractura del fundido. (Osswald & Giménez, 2008, p.73)	92
Figura 58. Grado de curado en función del tiempo para una resina de viniléster sometida a diferentes temperaturas isoterma de curado. (Osswald & Giménez, 2008, p.75).	93
Figura 59. Viscosidad en función del grado de curado para una resina de viniléster sometida a diferentes temperaturas isoterma de curado. (Osswald & Giménez, 200, p.75)	94
Figura 60. Incremento de la viscosidad en función de la fracción volumétrica de carga para un poliestireno y un LDPE. (Osswald & Giménez, 2008, p.76).	95

Figura 61. Diagrama esquemático de un reómetro de extrusión utilizado para medir índice de fluidez de un fundido. (Menges & Osswald, 2012, p.139).	96
Figura 62. Diagrama esquemático de un viscosímetro capilar. (Menges & Osswald, 2012, p.141).	97
Figura 63. Diagrama esquemático de flujo de presión a través de un tubo.	98
Figura 64. Diagrama esquemático de flujo de presión a través de un tubo. (Menges & Osswald, 2012, p.141).	99
Figura 65. Representación de Bagley para dos velocidades de cizalla. (Menges & Osswald, 2012, p.142).	100
Figura 66. Distribución de la velocidad de deformación en los fluidos newtonianos y no-newtonianos que fluyen a través de un capilar.	101
Figura 67. Distribución de la velocidad de deformación en los fluidos newtonianos y no-newtonianos que fluyen a través de un capilar. (Menges & Osswald, 2012, p.144).	102
Figura 68. Mecanismos que intervienen en la morfología obtenida en mezclas de polímeros. (Menges & Osswald, 2012, p.180).	105
Figura 69. Resultados experimentales del mezclado distributivo en un equipo de flujo de Couette y esquema del sistema final de mezclado. (Menges & Osswald, 2012, p.181).	107
Figura 70. Mezclado distributivo en equipo de flujo de Couette. (Menges & Osswald, 2012, p.182).	108
Figura 71. Efecto de la orientación inicial de la superficie sobre el mezclado distributivo. (Menges & Osswald, 2012, p.183).	108
Figura 72. Esquema de la deformación y la reorientación de Couette. (Menges & Osswald, 2012, p.183).	110
Figura 73. Desintegración de aglomerados de partículas durante el flujo. (Menges & Osswald, 2012, p.184).	111
Figura 74. Fuerza aplicada a un aglomerado de dos partículas en el flujo de cizallamiento simple. (Menges & Osswald, 2012, p.185).	111
Figura 75. Fuerza aplicada a un aglomerado de dos partículas sometido a flujo elongacional. (Menges & Osswald, 2012, p.185).	112
Figura 76. Desintegración de una gota de aceite de ricino de 0,35 mm de diámetro en una matriz newtoniana de aceite de silicona. Representación gráfica a partir de fotografías tomadas cada segundo. (Menges & Osswald, 2012, p.187).	114
Figura 77. Número de capilaridad crítico para la ruptura de la gota en función de la relación de viscosidad para un flujo de cizalladura simple y un flujo elongacional 2-D. (Menges & Osswald, 2012, p.188).	115
Figura 78. Tasa de crecimiento de las perturbaciones en las interfaces como una función de relación de viscosidad. (Menges & Osswald, 2012, p.188).	116
Figura 79. Esquema de deformación de gotas en el flujo de corte simple. (Menges & Osswald, 2012, p.189).	116
Figura 80. Diagrama esquemático de un mezclador estático de Kenics. (Menges & Osswald, 2012, p.190).	117
Figura 81. Líneas de corriente simulados dentro de una sección del mezclador estático de Kenics. (Menges & Osswald, 2012, p.191).	118
Figura 82. Evolución experimental del proceso de mezclado de dos polímeros coloreados en un mezclador estático tipo Kenics. (Menges & Osswald, 2012, p.191).	119
Figura 83. Esquema de un mezclador estático dispersivo.	119
Figura 84. Diagrama esquemático de un mezclador de tipo Banbury. (Menges & Osswald, 2012, p.191).	120
Figura 85. Fracción de negro de humo sin dispersar negro, de tamaño aproximado de 9 μm , en función del tiempo de mezclado dentro de un mezclador Banbury. (O) indica los resultados experimentales y las predicciones teóricas (línea continua); la línea discontinua representa la fracción de agregados más pequeños que 500 nm. (Menges & Osswald, 2012, p.192).	120
Figura 86. Diagrama esquemático de un mezclador tipo Co-kneader. (Menges & Osswald, 2012, p.194).	121
Figura 87. Orientación de cadenas durante el flujo de polímeros. (Sánchez et al., 2003, p.61).	123

Figura 88. Anisotropía provocada por la orientación de cadenas durante el flujo de polímeros. (Adaptado de Sánchez et al., 2003, p.61).	123
Figura 89 Gradiente de orientación en una pieza moldeada. (Sánchez et al., 2003, p.62).	124
Figura 90. Efecto de las variables de inyección sobre la orientación. (Sánchez et al., 2003, p.65).	126
Figura 91. Contracción diferencial como causa de alabeamiento de una pieza moldeada circular. (Sánchez et al., 2003, p.67).	127
Figura 92. Condiciones que afectan la contracción. (Sánchez et al., 2003, p.73).	132
Figura 93. Partes fundamentales de una máquina inyectora. (Rosato, 1986, citado en Sánchez et al., 2003, p.77).	133
Figura 94. Esquema de la unidad de plastificación. (Menges & Osswald, 2012, p.211).	134
Figura 95. Consumo de potencia de los principales movimientos involucrados en un ciclo de inyección típico. (Johannaber, 1982, citado en Sánchez et al., 2003, p.79).	136
Figura 96. Diseño típico de un sistema de potencia eléctrico para la rotación del tornillo. (Sánchez et al., 2003, p.81).	137
Figura 97. Diseño típico de un sistema de potencia hidráulico para la rotación del tornillo. (Sánchez et al., 2003, p.83).	139
Figura 98. Unidad de cierre con un mecanismo de rodillera. (Menges & Osswald, 2012, p.212).	139
Figura 99. Unidad de cierre hidráulica. (Menges & Osswald, 2012, p.212).	140
Figura 100. Área proyectada de una pieza moldeada. (Sánchez et al., 2003, p.107).	142
Figura 101. Piezas con diferentes recorridos de flujo. (Sánchez et al., 2003, pp. 108).	143
Figura 102. Fuerza de cierre requerida en función del espesor de la pieza y del recorrido de flujo de material. (Sánchez et al., 2003, pp. 109).	144
Figura 103. Dimensiones máximas y mínimas de un molde según el sistema de cierre utilizado. (Sánchez et al., 2003, p.111).	146
Figura 104. Dimensiones de montaje de molde placa móvil. (Arburg, s.f.).	147
Figura 105. Dimensiones de montaje de molde placa fija. (Arburg, s.f.).	147
Figura 106. Relación entre diámetro de tornillo, presión de inyección y capacidad de inyección. (Sánchez et al., 2003, p.114).	149
Figura 107. Esquema de una máquina de moldeo por inyección. (Menges & Osswald, 2012, p.206).	152
Figura 108. Plastificación del material plástico. (Sánchez et al., 2003, p.120).	153
Figura 109. Inyección del material hacia el molde. (Sánchez et al., 2003, p.121).	154
Figura 110. Apertura del molde y extracción de la pieza. (Sánchez et al., 2003, p.121).	154
Figura 111. Secuencia de etapas que tienen lugar durante un ciclo completo de inyección. (Menges & Osswald, 2012, p.207).	155
Figura 112. Representación de dos ciclos de inyección diferentes en un diagrama P-v-T. (Menges & Osswald, 2012, p.209).	156
Figura 113. Diagrama de moldeo. (Menges & Osswald, 2012, p.210).	157
Figura 114. Ciclo de moldeo por inyección. (Menges & Osswald, 2012, p.208).	158
Figura 115. Relación del tiempo de enfriamiento con el espesor de la pieza para una temperatura determinada del fundido, molde y pieza. (Sánchez et al., 2003, p.143).	164
Figura 116. Secuencia de duración de las diferentes etapas del ciclo de inyección. (Sánchez et al., 2003, p.144).	164
Figura 117. Representación planar de una pieza moldeada por inyección. (Osswald & Giménez, 2008, p.156).	166

Figura 118. Fuerza de cierre adimensional en función de las variables adimensionales. (Osswald & Giménez, 2008, p.157).	167
Figura 119. Fuerza de cierre adimensional en función de las variables adimensionales. (Osswald & Giménez, 2008, p.157)	167
Figura 120. Presión de inyección adimensional en función de las variables adimensionales. (Osswald & Giménez, 2008, p.158).	168
Figura 121. Presión de inyección adimensional en función de las variables adimensionales. (Osswald & Giménez, 2008, p.158).	168
Figura 122. Corrección de la fuerza de cierre para el área proyectada. (Osswald & Giménez, 2008, p.159).	169
Figura 123. Comparación entre los esfuerzos de compresión aplicados sobre la superficie de una placa inyectada de PMMA, calculados a partir de la ecuación (2.22) y determinados experimentalmente. (Osswald & Giménez, 2008, p.160).	170
Figura 124. Diagrama esquemático de un molde giratorio utilizado para producir piezas moldeadas por inyección de multicolor o de múltiples componentes. (Menges & Osswald, 2012, p.217).	171
Figura 125. Diagrama esquemático de moldeo por inyección multicomponente usando la técnica de tiro 1 con macho adelante y tiro 2 con macho atrás. (Menges & Osswald, 2012, p.217).	172
Figura 126. Esquema del proceso de coinyección. (Menges & Osswald, 2012, p.218).	173
Figura 127. Diagrama esquemático de una máquina de moldeo por inyección típica, adaptada para el moldeo por inyección asistida por gas con un complemento en el cilindro de compresión de gas y equipos accesorios. (Osswald., Turng & Gramann. 2007, citados en Menges & Osswald, 2012, p.221).	174
Figura 128. Esquema del proceso de moldeo por inyección-compresión. (Osswald., Turng and Gramann. 2007, citados en Menges & Osswald, 2012, p.222).	175
Figura 129. Proceso de moldeo por inyección reactiva (RIM). (Sánchez et al., 2003, p.101).	175
Figura 130. Diseño típico de una cabeza mezcladora. (Sánchez et al, 2001, p.151).	178
Figura 131. Diseño de un tornillo con zona de mezclado prolongado. (Rosato, 1986, citado en Sánchez et al, 2001, p.152).	179
Figura 132. Esquema de las diferentes zonas de un tornillo con desgasificación o venteo. (Sánchez et al, 2001, p.154).	181
Figura 133. Diseño típico de un equipo secador para plásticos. (Rosato, 1986, citado en Sánchez et al, 2001, p.155).	182
Figura 134. Diseño de cabeza antirretorno de flujo para materiales de alta velocidad. (Johannaber, 1982, citado en Sánchez et al, 2001, p.156).	183
Figura 135. Válvula de anillo. (Sánchez et al, 2001, p.157).	183
Figura 136. Válvula antirretorno de bola (Sánchez et al, 2001, p.158).	184
Figura 137. Ajuste del radio de la boquilla sobre el bebedero. (Sánchez et al., 2001, p.160).	185
Figura 138. Ajuste del diámetro interior de la boquilla con el bebedero. (Sánchez et al, 2001, p.160).	186
Figura 139. Mecanismo de descompresión de la máquina. (Sánchez et al, 2001, p.161).	186
Figura 140. Boquilla cónica. (Sánchez et al, 2001, p.162).	187
Figura 141. Boquilla de flujo libre. (Sánchez et al, 2001, p.162).	187
Figura 142. Boquilla de flujo libre. (Sánchez et al, 2001, p.163).	188
Figura 143. Boquilla con válvula de aguja. (Sánchez et al, 2001, p.164).	188
Figura 144. Boquilla con válvula cónica y muelle. (Sánchez et al, 2001, p.165).	189
Figura 145. Boquilla accionada externamente. (Johannaber,1982, citado en Sánchez et al, 2001, p.165).	189
Figura 146. Características principales del documento PDS. (Flores, 2009, p.2).	192

Figura 147. Proceso de diseño tradicional de moldes para inyección de termoplásticos. (Kazmer, 2007).	194
Figura 148. Diagrama de las etapas de la ingeniería concurrente empleando técnicas DFMA. (Flores, 2009, p.14).	196
Figura 149. Modelo Jerárquico de descomposición de Funciones IDEF-0. (Haines & Evers, 1990, citado en Flores, 2009, p.7).	199
Figura 150. Modelo Fundamental de componentes IDEF-0. (Bancroft, 1989, citado en Flores, 2009, p.7).	199
Figura 151. Modelo General IDEF-0 para la manufactura de moldes de inyección de termoplásticos. (Flores, 2009, p.16).	203
Figura 152. Diseño de esquina en paredes perpendiculares. (Campo, 2006, p.211).	218
Figura 153. Diseño de pared gruesa vs diseño de pared delgada uniforme con refuerzos proporcionales. (Campo, 2006, p.211).	218
Figura 154. Diseño de paredes no uniformes vs diseño de paredes uniformes. (Campo, 2006, p.211).	219
Figura 155. Diseño de paredes no uniformes vs diseño de paredes uniformes. (Campo, 2006, p.211).	219
Figura 156. Diseño de paredes no uniformes vs diseño de paredes uniformes. (Campo, 2006, p.211).	219
Figura 157. Diseño de espesor de pared para el flujo de material. (Kazmer, 2007, p.28).	220
Figura 158. Diseño problemático de una bandeja rectangular. (Campo, 2006, p.212).	221
Figura 159. Diseño problemático de una caja cuadrada. (Campo, 2006, p.212).	221
Figura 160. Bobina (carreta) eléctrica de diseño problemático. (Campo, 2006, p.212).	222
Figura 161. Diseño de una viga en "U" problemática. (Campo, 2006, p.212).	222
Figura 162. Diseño de la viga una viga estructural problemática. (Campo, 2006, p.212).	222
Figura 163. Pared con ángulo de desmoldeo en la cavidad del molde. (Campo, 2006, p.13).	224
Figura 164. Radios recomendados para el diseño. (González, s.f., p.162).	225
Figura 165. Cilindros con espesor de pared problemáticos y diseño recomendado. (Campo, 2006, p.223).	226
Figura 166. Cilindro de paredes gruesas que causan problemas que se pueden resolver mediante el uso de dos tornillos pequeños. (Campo, 2006, p.223).	226
Figura 167. Cilindros moldeados conectados a una pared posterior. (Campo, 2006, p.223).	227
Figura 168. Moldeado de cilindros conectados a una esquina. (Campo, 2006, p.223).	227
Figura 169. Diseño típico de cilindros. (Kazmer, 2007, p.30).	228
Figura 170. Diseño efectivo de refuerzos. (Kazmer, 2007, p.29).	228
Figura 171. Tres diseños de costilla según la aplicación final. (Campo, 2006, p.215).	229
Figura 172. Ahorro potencial de costes mediante el diseño de una estructura de nervios.	230
Figura 173. Secuencia del proceso del método de soldadura por placa caliente. (Campo, 2006, p.410).	231
Figura 174. Algunos diseños de uniones para soldadura por placa caliente. (Campo, 2006, pp.412-413).	232
Figura 175. Diseño básico del herramental y diseño de la pieza para el proceso. (Campo, 2006, p.406).	233
Figura 176. Etapas del proceso de estampación o remachado expandido en frío. (Campo, 2006, p.406)	233
Figura 177. Etapas de proceso para el método de bridado ranurado en frío. (Campo, 2006, p.407).	233
Figura 178. Etapas de proceso para el método de remachado plano en frío. (Campo, 2006, p.407).	234
Figura 179. Esquema de la soldadura por ultrasonido. (Ojeda, 2012).	241
Figura 180. Componentes básicos y sus funciones, un proceso de soldadura por ultrasonido.	243
Figura 181. Variaciones de diseño de soldadura por ultrasonidos de cizallamiento básico. (Campo, 2006, p.490).	244
Figura 182. Tipo de concentradores de energía. (Campo, 2006, p.492).	245
Figura 183. Concentrador de energía diseño de escalones. (Campo, 2006, p.493).	245

Figura 184. Diseño de la articulación de la lengüeta y del surco del director de energía 90 °. (Campo, 2006, p.493).	245
Figura 185. Otros ejemplos de concentradores de energía. (Campo, 2006, p.494).	246
Figura 186. Ejemplos de aplicación de la soldadura por vibración. (Campo, 2006, p.467).	247
Figura 187. Articulación circular "V" con diseños de trampa de rebaba. (Campo, 2006, p.472).	248
Figura 188. Articulación de extremo no circular con diseños de trampa de rebaba. (Campo, 2006, p.473).	248
Figura 189. Secuencia básica del proceso de soldadura por fricción o giro. (Campo, 2006, p.476).	249
Figura 190. Diseño de junta de soldadura giratoria para cilindros de pared delgada. (Campo, 2006, p.481).	250
Figura 191. Diseño de junta de soldadura giratoria para cilindros de pared gruesa. (Campo, 2006, p.481).	250
Figura 192. Junta de soldadura por giro con diseños de trampa de destello. (Campo, 2006, p.481).	251
Figura 193. Principio de la soldadura electromagnética. (Campo, 2006, p.459).	252
Figura 194. Proceso de soldadura electromagnética. (Campo, 2006, p.459).	252
Figura 195. Diseños de juntas para soldadura electromagnética. (Campo, 2006, p.463).	253
Figura 196. Unión de lengüeta y ranura. (Campo, 2006, p.464).	254
Figura 197. Junta plana-plana. (Campo, 2006, p.464).	255
Figura 198. Junta de paso. (Campo, 2006, p.464).	255
Figura 199. Junta por cizalla para tres componentes. (Campo, 2006, p.464).	255
Figura 200. Tipo de carga causada por un tornillo autorroscantes. (Campo, 2006, p.428).	256
Figura 201. Diseño básico de sujeciones termoplásticas y tornillos autoperforantes. (Campo, 2006, p.430).	256
Figura 202. Mango a presión. (Campo, 2006, p.437).	258
Figura 203. Manómetro de la llanta. (Campo, 2006, p.437).	259
Figura 204. Diseño de junta de termoplástico y prensa de metal. (Campo, 2006, p.438).	261
Figura 205. Encaje a presión de guarda plástica para rodamiento. (Campo, 2006, p.445).	263
Figura 206. Encaje a presión de guardas plásticas para engranaje. (Campo, 2006, p.445).	264
Figura 207. Diseños Rótula circular de encaje a presión. (Campo, 2006, p.445).	264
Figura 208. Diseños de juntas de ajuste a presión circular. (Campo, 2006, p.445).	264
Figura 209. Diseños de enganches circulares internos para ajuste a presión. (Campo, 2006, p.446).	265
Figura 210. Diseños de enganches circulares externos para ajuste a presión. (Campo, 2006, p.446).	265
Figura 211. Sección del perfil de enganches circulares internos de fijación. (Campo, 2006, p.446).	266
Figura 212. Enganches cónicos en voladizo para unión a presión permanente. (Campo, 2006, p.447).	268
Figura 213. Enganches esféricos en voladizo para unión a presión permanente. (Campo, 2006, p.447).	268
Figura 214. Enganches anulares de encaje a presión en voladizo. (Campo, 2006, p.447).	268
Figura 215. Válvula de presión, pestillo en voladizo con ajuste a presión y anillo en "O". (Campo, 2006, p.447).	269
Figura 216. Conmutador montado mediante pestillos en voladizo a presión. (Campo, 2006, p.447).	269
Figura 217. Dispositivo con dos pestillos en voladizo a presión. (Campo, 2006, p.447).	269
Figura 218. Dispositivo de plástico con cuatro pestillos de encaje a presión en voladizo. (Campo, 2006, p.448).	270
Figura 219. Combinación de dos pares de pestillos a presión. (Campo, 2006, p.448).	270
Figura 220. Diseños de pestillo a presión en voladizo. (Campo, 2006, p.448).	271
Figura 221. Diseños de pestillo de doble ajuste en voladizo. (Campo, 2006, p.448).	271
Figura 222. Diseño de enganches anulares en voladizo para fijación permanentes a presión. (Campo, 2006, p.448).	271

Figura 223. Diseño de enganches anulares en voladizo para fijación removible a presión. (Campo, 2006, p.449).	272
Figura 224. Dispositivo de plástico con seis pestillos anulares de ajuste a presión en voladizo. (Campo, 2006, p.449).	272
Figura 225. Ejemplo de tapa de válvula de calentador con pestillos de ajuste a presión anulares. (Campo, 2006, p.449).	273
Figura 226. Ejemplo de engranaje helicoidal partido montado con cuatro enganches anulares anulares. (Campo, 2006, p.449).	273
Figura 227. Vigas de cierre a presión en voladizo, diferencias de diseño. (Campo, 2006, p.450).	275
Figura 228. Modelo matemático de cierre a presión en voladizo. (Campo, 2006, p.450).	275
Figura 229. Curvas anulares para determinar C1 y C2, constantes de la Tabla 27. (Campo, 2006, p.456).	277
Figura 230. Tensión permisible para polímeros no reforzados. (Campo, 2006, p.452).	278
Figura 231. Relación entre la deflexión y la fuerza de montaje. (Campo, 2006, p.453).	279
Figura 232. Diagrama para determinar $\mu + \tan\theta_1 - \mu\tan\theta$. (Campo, 2006, p.453).	280
Figura 233. Diseño de bisagra para PP y PE: (a) antes y (b) después de flexionar 180°. (Tres, 2014, p.218).	283
Figura 234. Valores típicos para el diseño de bisagras para PP y PE para aplicaciones en general. (Tres, 2014, p.219).	283
Figura 235. Etapas en el análisis de simulación reológica. (Gómez, 2010, p.67).	284
Figura 236. Modelo sólido, modelo mallado y simulación. (Gómez, 2010, p.68).	285
Figura 237. Localización del punto de inyección. (Gómez, 2010, p.71).	286
Figura 238. Tipos de mallado (fibra neutra, fusión y 3D). (Gómez, 2010, p.69).	287
Figura 239. Izq: mallado con fibra neutra. (Gómez, 2010, p.70). Der: mallado 3D. (Gómez, 2010, p.72).	288
Figura 240. Modelo CAD 3D. Modelo mallado, densidad 0,02 y espesor 0.9 mm. (Gómez, 2010, p.72).	290
Figura 241. Reparación automática de mallado. (Gómez, 2010, p.73).	291
Figura 242. Llenado de la pieza con Moldflow. (Gómez, 2010, p.74).	292
Figura 243. Secuencia de llenado del aro. (Gómez, 2010, p.75).	293
Figura 244. Presión durante la etapa de llenado y perfil de inyección. (Gómez, 2010, p.76).	294
Figura 245. Temperatura de avance plástico (C°). (Gómez, 2010, p.76).	294
Figura 246. Temperatura de avance del flujo (C°) y líneas de soldadura. (Gómez, 2010, p.77).	295
Figura 247. Atrapamientos de aire. (Gómez, 2010, p.78).	296
Figura 248. Orientación del flujo plástico en la superficie del artículo. (Gómez, 2010, p.78).	296
Figura 249. Orientación del flujo plástico en la superficie del artículo. (Gómez, 2010, p.79).	297
Figura 250. Gráfica Fuerza de cierre vs tiempo. Valores. (Gómez, 2010, p.81).	299
Figura 251. Análisis de las deformaciones. (Gómez, 2010, p.83)	301
Figura 252. Circuitos de refrigeración del aro. (Gómez, 2010, p.85).	302
Figura 253. Temperatura en los circuitos de refrigeración. (Gómez, 2010, p.85).	303
Figura 254. Temperatura top. (Gómez, 2010, p.87).	305
Figura 255. Máxima temperatura de la pieza. (Gómez, 2010, p.87).	305
Figura 256. Clasificación de termoplásticos. (Hasenauer, et al., s.f., p.4).	309
Figura 257. Geometría recomendada para el diseño de nervios. (Hasenauer, et al., s.f., pp.12-14).	310
Figura 258. Distribución típica de los elementos de un molde 1. (Marquez, s.f., p.2).	312
Figura 259. Distribución típica de los elementos de un molde 2.	313
Figura 260. Esquema de clasificación y desarrollo metódico y planificado clásico para de moldes de inyección. (Unger Gastrow, 1998, p.1).	315

Figura 261. Representación básica de un molde de 2 placas. (Meusburger Georg GmbH & Co KG, s.f.).	317
Figura 262. Esquema de apertura de molde de dos placas. a) molde cerrado. b) molde abierto. (Castrejón, 2019, p.114).	318
Figura 263. Representación básica de un molde de tres placas. (Meusburger Georg GmbH & Co KG, s.f.).	319
Figura 264. Esquema de apertura de molde tres placas. a) Molde cerrado. b) Molde abierto. (Lidomar, 2012).	319
Figura 265. Ejemplo de punto de inyección externo central. Elaboración propia.	320
Figura 266. Ejemplo de punto de inyección externo central. Elaboración propia.	321
Figura 267. Ejemplo de punto de inyección interno central. Elaboración propia.	321
Figura 268. Ejemplo de elementos auxiliares para lograr la expulsión de un artículo con punto de inyección interno. Elaboración propia.	322
Figura 269. Ejemplo de inserto de inyección para contornos bajos, no apto para plásticos reforzados. (Meusburger, s.f.).	323
Figura 270. Ejemplo de inserto de inyección para contornos bajos, no apto para plásticos reforzados. (Meusburger, s.f.).	323
Figura 271. Representación básica de un molde de patines. (Meusburger, s.f.).	324
Figura 272. Ejemplo de movimiento de patín cerrado (der) y abierto (izq). Elaboración propia.	325
Figura 273. Ejemplo de patín con cuatro cavidades mecanizadas directamente (izq). Patín insertado (der). Elaboración propia.	325
Figura 274. Ejemplo de macho colapsible diseñado para una aplicación específica. Elaboración propia.	326
Figura 275. Ejemplo de corredera estándar comercial. Página típica de un catálogo de proveedor comercial. (CUMSA, 2011, p.1.04).	327
Figura 276. Esquema del proceso de extrusión soplado. (Ojeda, 2012).	328
Figura 277. Esquema del proceso de inyección soplado para una máquina de tres estaciones. (Ojeda, 2012).	328
Figura 278. Ejemplo de molde apilado (stack mold). (Niigon Machines, 2015).	329
Figura 279. Ejemplo de molde de coinyección. (Niigon Machines, 2015)	330
Figura 280. Guías y bujes para alineación de moldes. Ejemplo de disposición interna en el molde. Elaboración propia.	331
Figura 281. Apertura de molde. Muestra guías principales y placa flotante de molde lado inyección. (Izq) Ejemplo de un requerimiento de guía rectangular lateral central por peso (der). Elaboración propia.	331
Figura 282. Apertura de molde de tres placas (vista superior). Mostrando un sistema de guiado típico. Elaboración propia.	332
Figura 283. Algunos elementos de guiado comerciales suministrados por proveedores internacionales. (Meusburger, s.f.).	333
Figura 284. Algunos elementos de centrados comerciales suministrados por proveedores internacionales. (Meusburger, s.f.).	334
Figura 285. Ficha técnica de un elemento de centrado comercial, suministrado por el proveedor, para implementarlo en un molde objeto de diseño. (Meusburger, s.f.).	335
Figura 286. Esquema de molde con cavidades de artículo grabadas directamente en las placas del molde. (SoloStocks, 2000-2019).	336
Figura 287. Esquema de versión típica para una tapa. Elaboración propia.	336
Figura 288. Esquema de versión típica para análisis de ajustes. Elaboración propia.	337
Figura 289. Esquema típico de una colada con boquilla fría.	339
Figura 290. Esquema típico de una colada fría con boquilla caliente. Elaboración propia.	341
Figura 291. Esquema de ensamble típico de un sistema de colada caliente. (Husky, 1993, p.5).	342

Figura 292. Esquema de canales balanceados en una colada caliente. (Husky, 1993, p.6).	343
Figura 293. Esquema de canales balanceados en una colada caliente. (Husky, 1993, p.6).	344
Figura 294. Esquema en plano de ensamble de una colada full caliente. Elaboración propia.	345
Figura 295. Ejemplo de colada caliente de 6 puntos. (Xiamen DTG Tech co. Ltda., 2019)	345
Figura 296. Ejemplo de colada caliente de 4 puntos para molde de ocho cavidades con colada semi-caliente, que produce 4 ramas por cada dos cavidades. Elaboración propia.	346
Figura 297. Ejemplo de clasificación de boquillas para coladas calientes según el tipo de punto de inyección. (Husky, 1993, p. 2.7).	348
Figura 298. Diseño típico de rama de colada fría para un molde de 16 cavidades y tres placas. Elaboración propia.	349
Figura 299. Pitorro de boquilla para inyección directa a rama. (Menges & Mohren P., 2001, p.150).	350
Figura 300. Ejemplo de bebedero o elemento comercial para pitorro de boquilla suministrado por proveedor de estándares comerciales. (Meusburger, s.f.).	351
Figura 301. Distribuidor en estrella (A) y distribuidor en anillo (B). (Unger, 1998,p.4).	352
Figura 302. Longitud de colada desigual (A) y longitud de colada constante (B). (Unger, 1998,p.4).	352
Figura 303. Tipos de secciones de canal de rama más usuales y en orden de eficiencia de flujo (Eastman Corporate Headquarters, 2017, p.15).	353
Figura 304. Definición de la geometría recomendada del canal de rama. (Eastman Corporate Headquarters, 2017).	353
Figura 305. En la imagen se muestran elementos para analizar el desbalance térmico de la rama. (Beaumont, 2004, pp. 95-96).	354
Figura 306. Diseño de una colada cónica directa al a cavidad. (Unger, 1998, p.3).	355
Figura 307. Diseño típico de colada con entrada a cavidad tipo capilar. (Unger, 1998, p.3).	356
Figura 308. Detalle de cavidad con “calota” para esconder punto de inyección alto. Elaboración propia.	356
Figura 309. Colada tipo paraguas. (Unger, 1998, p.3).	357
Figura 310. Diseño típico de colada tipo disco. (Unger, 1998, p.3).	357
Figura 311. Diseño de punto. (Menges & Mohren P., 2001, p.211).	358
Figura 312. Diseño de punto. (Menges & Mohren P., 2001, p.211).	358
Figura 313. Ejemplo de diseño de ventilación de una cavidad con apertura perpendicular a la línea de unión (in). (Campo, 2006, p.677).	359
Figura 314. Ejemplo práctico de salidas de aire en un macho. Elaboración propia.	360
Figura 315. Ejemplo de salidas de aire para piezas rectangulares y circulares. (Campo, 2006, p.678).	360
Figura 316. Ejemplo de salidas de aire con molde abierto y cerrado, comunicadas al exterior del molde. (Campo, 2006, p.681).	361
Figura 317. Perfil de temperatura de la superficie por diámetro de canal, ubicación, espaciado y temperatura del fluido de enfriamiento. (Campo, 2006, p.620).	365
Figura 318. Perfil de temperatura de la superficie por diámetro de canal, ubicación, espaciado y temperatura del fluido de enfriamiento. (Eastman Chemical Company, 2017, p.15).	366
Figura 319. Sistema de enfriamiento de macho con inserto de núcleo de varilla de cobre sólido. (Campo, 2006, p.634).	370
Figura 320. Refrigeración en machos, A) refrigeración por bafle (lamina deflectora). B) refrigeración por bafle (lamina deflectora en espiral). C) refrigeración por inserto entrada central, salida externa en espiral. (Campo, 2006, pp.635-636).	371

Figura 321. Hembra redonda con refrigeración insertada con placa base de enfriamiento de ranura espiral. (Campo, 2006, p.631).	371
Figura 322. Refrigeración en machos, refrigeración por capilar (tubo central). Eastman Chemical Company, 2017, p.10).	372
Figura 323. Refrigeración en machos, refrigeración por capilar (tubo central). (Campo, 2006, p.630).	372
Figura 324. Inserto de cavidad profunda con tres niveles de enfriamiento del canal. (Campo, 2006, p.632).	373
Figura 325. Esquema de recorrido de flujo de Inserto redondo, cavidad profunda sistema de canales de enfriamiento. (Campo, 2006, p.632).	373
Figura 326. Algunos elementos típicos de Refrigeración. Catalogo típico de proveedor. Progressive Components International Corporation., 2018, pp. 122-133).	374
Figura 327. Placa para cuatro cavidades con un circuito con refrigeración en serie. (Campo, 2006, p.630).	375
Figura 328. Refrigeración típica de machos con elementos Meusburger. Izq.) Conexión en serie. Der) conexión en paralelo. (Meusburger Georg GmbH & Co KG, s.f.)	375
Figura 329. Ejemplo de línea de unión plana y localización de la cavidad. (Campo, 2006, p.607).	377
Figura 330. Ejemplo de línea de unión plana y localización de la cavidad. (Campo, 2006, p.607).	377
Figura 331. Línea de unión de molde plana típica, para diferentes formas moldeadas. (Campo, 2006, p.608).	378
Figura 332. Línea de partición del molde perfilado. (Campo, 2006, p.608).	378
Figura 333. Línea de partición de molde angular. (Campo, 2006, p.608).	379
Figura 334. Línea de partición de molde compleja. (Campo, 2006, p.609).	379
Figura 335. Línea de partición de molde escalonada. (Campo, 2006, p.609).	381
Figura 336. Línea de partición de molde escalonada. (Campo, 2006, p.610).	382
Figura 337. Recopilación de sistemas comunes de métodos de expulsión, usados en moldes pequeños. (Menges & Mohren, 2001, pp.401-405).	385
Figura 338. Alineación con la unidad plastificadora. Mediante anillo localizador o disco de centrado. (Menges & Mohren, 2001, p.475).	387
Figura 339. Alineación de la unidad plastificadora (continuación). (Menges & Mohren, 2001, p.475).	387
Figura 340. Ensamble de perno y camisa guía. (Menges & Mohren, 2001, p.476).	388
Figura 341. Pernos guía. (Menges & Mohren, 2001, p.476).	388
Figura 342. Dimensión de las camisas. (Menges & Mohren, 2001, p.478).	389
Figura 343. Montaje de guía y buje en el molde. (Menges & Mohren, 2001, p.478).	389
Figura 344. Distribución de perforaciones de placa fija máquina inyectora. (Arburg, s.f.).	390
Figura 345. Diferentes tipos de bridas para fijación de molde a máquina y ejemplo de molde montado en inyectora. (Cemasa, 2008-2019)	391
Figura 346. Diferentes tipos de bridas para fijación de molde a máquina y ejemplo de molde montado en inyectora. (Continuación). (Focus Technology Co., Ltd , 2019).	391
Figura 347. Combinaciones de materiales para piezas de moldes con deslizamiento. Elaboración propia.	397
Figura 348. Vista lateral de la apertura del molde. (Kazmer, 2007, p.259).	399
Figura 349. Vista lateral del molde con actuadores accionados. (Kazmer, 2007, p.260).	400
Figura 350. Vista lateral del molde con varilla desmontable de reajuste. (Kazmer, 2007, p.260).	401
Figura 351. Vista lateral del molde cerrando. (Kazmer, 2007, p.261).	401
Figura 352. Esquema de instalación de resortes de retorno de placa flotante.	402
Figura 353. Esquema general de un molde de Expulsión por placa flotante (o paralelas) mediante expulsores. Catálogo online de DME mold components (DME, 2013, p.290).	402
Figura 354. Fotografía de una regla de rugosidades. Elaboración propia.	404

<i>Figura 355. Ficha parcial de una máquina de inyección 370ª. (Arburg, s.f.).</i>	409
<i>Figura 356. Eexpulsión mediante vástago central. Elaboración propia.</i>	409
<i>Figura 357. Expulsión mediante puente expulsor de vástago doble. Elaboración propia.</i>	410
<i>Figura 358. Sistema de expulsión por pin. (Campo, 2006, p.612).</i>	411
<i>Figura 359. Sistema de expulsión por cuchillas. (Campo, 2006, p.613).</i>	411
<i>Figura 360. Sistema de expulsión por válvula mecánica. (Campo, 2006, p.613).</i>	412
<i>Figura 361. Expulsión por aire comprimido. (Campo, 2006, p.614).</i>	412
<i>Figura 362. Expulsión por placa. (Campo, 2006, p.615).</i>	413
<i>Figura 363. Doble etapa de expulsión hacia adelante.</i>	414
<i>Figura 364. Doble etapa de expulsión por barras. Hacia adelante juntas - freno delantera - sigue trasera. (Progressive Components International Corporation., 2018, pp.215-216).</i>	415
<i>Figura 365. Doble etapa de expulsión por barras. Hacia adelante delantera - freno delantera - sigue trasera. (Continuación). (Meusburger Georg GmbH & Co KG, s.f.).</i>	416
<i>Figura 366. Esquema de molde de desenrosque. (Menges & Mohren, 2001, p. 453).</i>	416
<i>Figura 367. Esquema de molde de desenrosque con cilindro hidráulico. (Menges & Mohren, 2001, p. 454).</i>	417
<i>Figura 368. Esquema de molde de desenrosque con tuerca de control de altura. (Menges & Mohren, 2001, p. 457).</i>	418
<i>Figura 369. Elementos comerciales para sistemas típicos de desenrosque. Cremallera adaptada a pistón hidráulico y en posición de trabajo con los machos roscados. (Milacron, 2019).</i>	419
<i>Figura 370. Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna.</i>	420
<i>Figura 371. Esquema de funcionamiento usual de un macho colapsible para una rosca interna y su relación con las aperturas de molde. (Progressive Components International Corporation, 2018, p.195/l-1)</i>	421
<i>Figura 372. Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. (Progressive Components International Corporation., 2018, p. 200/l-6).]</i>	422
Figura 373. <i>Esquema de desmoldeo de una rosca externa lateral. (Progressive Components International Corporation., 2018, p.202/l-8).</i>	422
Figura 374. <i>Esquema de desmoldeo de una rosca interna central. (Progressive Components International Corporation., 2018, p.202/l-8).</i>	423
Figura 375. <i>Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. (Progressive Components International Corporation., 2018, p.202/l-8).</i>	423
Figura 376. <i>Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. (Progressive Components International Corporation., 2018, p.205/l-11)</i>	424
Figura 377. <i>Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. Molde cerrado. (Progressive Components International Corporation., 2018, p.203/l-9).]</i>	425
Figura 378. <i>Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. Macho colapsado. (Progressive Components International Corporation., 2018, p.203/l-9).</i>	425
Figura 379. <i>Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. (Progressive Components International Corporation., 2018, p.203/l-9).</i>	426
Figura 380. <i>Esquema de funcionamiento de macho expandible para enganche interno. (Progressive Components International Corporation., 2018, p.206/l-12 – 207/-l208).</i>	427
<i>Figura 381. Esquema de funcionamiento de “Klinken” y descripción de componentes. 1, 2 Líneas de apertura del molde, a Barra de pestañas, b Barra de liberación, c pin seguidor, d pin de pivote, e Resorte, f pata de parada o apoyo, g plato flotante. (Menges & Mohren, 2001, p.441).</i>	428
Figura 382. <i>Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. Elaboración propia.</i>	429

Figura 383. Esquema de Klinken comercial. (Strack Norma GmbH & Co. KG., 2019).	429
Figura 384. Esquema de posición y funcionamiento de limitadores de recorrido. B ₁ y B ₂ . (Menges & Mohren, 2001, p.440).	430
Figura 385. Esquema de del sistema de extracción de rama de un molde de tres placas y sus elementos básicos. (Menges & Mohren, 2001, p.440).	431
Figura 386. Presentación esquemática de un conjunto de pasador de leva. 1 bloque de techos, 2 placa de molde, 3 placa de sujeción, 4 guías inclinadas, 5 patines, 6 placa de molde, 7 placa de soporte. (Menges & Mohren P., 2001, p.462).	432
Figura 387. Diseño con elevador. 1 bloque de techo, 2 placa de molde, 3 elevadores, 4 patines, 5 placas de molde. (Menges & Mohren P., 2001, p.462).	432
Figura 388. Esquema de del sistema de extracción de rama de un molde de tres placas y sus elementos básicos. (Menges & Mohren P., 2001, p.463).	433
Figura 389. Esquema de del sistema de extracción de rama de un molde de tres placas y sus elementos básicos. (Menges & Mohren P., 2001, p.463).	434
Figura 390. Fuerza de apertura en función del tiempo sobre una guía inclinada. (Menges & Mohren P., 2001, p.464).	435
Figura 391. Esquema de ensamble y funcionamiento de un sistema de patines. Paquete suministrado por el proveedor externo DME®. (DME, 2019, p.369).	436
Figura 392. Fuerza de apertura en función del tiempo sobre una guía inclinada. (Menges & Mohren P., 2001, p.465).	436
Figura 393. Fuerza de apertura en función del tiempo sobre una guía inclinada. (Menges & Mohren P., 2001, p.465).	437
Figura 394. Representación de molde de pisos. Manivelas de apertura. (Niigon Machines, 2015).	438
Figura 395. Stack Mold con sistema de posicionamiento central por cremalleras y piñones. (DME, 2019, p.C42).	438
Figura 396. Detalle del Sistema de posicionamiento central con piñon y cremallera, de un Stack Molds. (DME, 2019, p.C42).	439
Figura 397. Stack Mold con sistema de posicionamiento central por tornillo sin fin y tuerca helicoidal. (DME, 2019, p.112-113).	439
Figura 398. Corredera rectangular con pivote circular para giro angular. (Progressive Components International Corporation., 2018, p.53/D-1).	440
Figura 399. Corredera rectangular con deslizamiento para movimiento angular paralelo. (Progressive Components International Corporation., 2018, p.178/H-10).	440
Figura 400. Imagen de referencia para un molde de pisos. (Mold Hotrunner Solutions Inc., 2018).	460
Figura 401. Materiales Recomendados para Moldes Marca Uddehom®-Assab®. (Uddeholm, 2009).	463
Figura 402. Tabla de Materiales y Equivalencias para Marca Uddehom®-Assab®. (Axxecol S.A., s.f.).	464

Lista de Símbolos

Símbolo	Definición
T _g	Transición vítrea
T _s	Temperatura de reblandecimiento
σ	Esfuerzo normal
ε	Deformación
HDT	Temperatura de deflexión bajo carga
CLTE	Coeficiente de expansión lineal o contracción térmica

Glosario

- **Canal principal (Sprue):** se refiere al canal por donde fluye el polímero desde la boquilla de la inyectora hasta la distribución del material a las cavidades.
- **Canales secundarios (Runners):** son los canales para el recorrido del polímero en el proceso de inyección desde el final del canal principal hasta las compuertas de las cavidades.
- **Cavidad (Cavity):** el espacio generado entre las dos partes del molde, lo cual forma la figura de la parte deseada. En la mayoría de los casos, los moldes cuentan con más de una cavidad, permitiendo fabricar partes idénticas en el mismo tiempo de procesado.
- **Ciclo de inyección o de procesado:** el tiempo necesario para realizar un ciclo completo de manufactura. El tiempo de ciclo es el tiempo necesario para fabricar una sola parte. En ocasiones, se pueden producir múltiples partes por cada ciclo de procesado, como es el caso del moldeo por inyección, debido a que los moldes comúnmente poseen múltiples cavidades.
- **Rama o Colada:** se refiere a todo el sistema de distribución del polímero (sistema de llenado), desde la boquilla de la inyectora hasta las cavidades, incluyendo el canal principal, los canales secundarios y las compuertas.
- **Compuertas (Gates):** conexión de los canales secundarios hasta las cavidades del molde.
- **Disparo (Shot):** cantidad de material que se inyecta en un molde. El volumen del disparo incluye el volumen de todas las cavidades que conforman el molde y la rama o sistema por donde el material corre para las cavidades. Comúnmente el volumen del disparo es menor que la capacidad de disparo de la máquina.
- **Inyectora:** hace referencia a la máquina empleada en el proceso de inyección de plásticos.
- **Punto de inyección:** es la ubicación en la superficie del producto de plástico por donde se hará fluir el material para el llenado de las cavidades, donde se ubican las compuertas del sistema de colada.
- **Rechupe (Sink Marks):** una marca en la superficie del producto plástico como hundimiento en el proceso de inyección, debido a la contracción del material después de haberse procesado.
- **Temperatura de transición vítrea:** es la temperatura en la que el polímero cambia sus propiedades, de tal forma que se transforma de un estado sólido a un material huloso comenzando a fluir.

- **Líneas de soldadura (Weld Lines):** son las marcas en el producto plástico debidas a la unión de dos frentes de flujo, de tal forma que uno se encuentra con el otro en el proceso de llenado, marcando el producto con líneas como cordones de soldadura. Normalmente se producen en los barrenos y cajas del producto o donde se encuentran obstrucciones para el flujo libre del material.
- **Efecto diésel:** es cuando aparecen marcas negras o quemaduras en la pieza moldeada. Esto es causado, en la mayoría de los casos, porque las piezas no están totalmente llenas en esas zonas. Este efecto se debe a una mala ventilación, el aire no puede escapar o no se desplaza rápidamente hacia las comisuras, quedando comprimido y aumentando la temperatura a niveles muy altos.
- **Acción lateral:** *Una parte del molde que se coloca en su sitio cuando el molde se cierra, mediante un deslizador accionado por una corredera. Habitualmente, las acciones laterales se utilizan para resolver una contrasalida o, en ocasiones, para permitir una pared exterior sin ángulo. A medida que el molde se abre, la acción lateral se va separando de la pieza permitiendo así su expulsión. También se denomina "corredera".*
- **Aditivo:** *Substancia que modifica las propiedades del plástico en diferentes formas.*
- **Agente Compatibilizador:** *Aditivo que permite que dos o más materiales existan asociados indefinidamente en solución. Por ejemplo, pueden permitir la mezcla de resina virgen con materiales de postconsumo recuperados. Los agentes compatibilizadores se usan generalmente para obtener productos con propiedades especiales.*
- **Agente de Desmoldeo:** *Aditivo que se aplica a las cavidades de los moldes para facilitar la salida de los productos formados.*
- **Agente Nucleante:** *Una sustancia química que proporciona sitios o semillas para la formación de estructuras cristalinas en resinas fundidas.*
- **Alabeo:** *La curvatura o el dobléz de una pieza al enfriarse. Surge a causa de las tensiones, ya que las partes de la pieza se enfrían y se encogen a velocidades distintas. Las piezas que se fabrican utilizando resinas rellenas también presentan alabeo por el modo en que se alinean los rellenos durante el flujo de la resina. Los rellenos y la resina matriz suelen encogerse a velocidades distintas, y las fibras alineadas pueden añadir tensiones anisotrópicas.*
- **Antiestático:** *(1) Método o substancia que evita la estática. (2) Agentes adicionados a una formulación para evitar que se acumulen cargas estáticas sobre la pieza terminada.*
- **Barril de Extrusión:** *Porción tubular de un extrusor dentro del cual rota el tornillo.*

- **Biaxial:** Referente a dos ejes. Cuando una película se estira biaxialmente, a lo largo y ancho.
- **Biopolímero:** Polímero soluble en agua generado por la acción de una bacteria sobre un hidrocarburo, la viscosidad del compuesto es semejante a la del agua, pero puede incrementarse añadiendo un ion de cromo.
- **Bomba de Dosificación:** Bomba de engranajes que se adiciona a los equipos de extrusión para garantizar un flujo constante de resina fundida, a presión constante.
- **Boquilla caliente:** Canal de alimentación principal de la unidad de inyección al canal de moldeo.
- **Cabezal de Extrusión:** También denominado dado de extrusión, es el elemento de la máquina extrusora que le da forma a la resina fundida antes de entrar a la sección de enfriamiento o congelación. El cabezal convierte el flujo cilíndrico que le entrega el barril de extrusión a una forma geométrica específica con dimensiones estables y de manera continua.

Descripción

La técnica de moldeo por inyección tiene que cumplir y satisfacer la creciente demanda de productos plásticos de alta calidad, haciendo que este tenga un precio económico. Esto es factible sólo si el diseñador del molde puede controlar adecuadamente el proceso de moldeo, que la configuración de la pieza se adapte a las características del material moldeado y a la respectiva técnica de transformación; además, que en el molde se satisfagan los requisitos de exactitud y calidad de la superficie; por lo tanto, los moldes de inyección tienen que ser hechos dimensionalmente con la máxima precisión y se espera de ellos que proporcionen un funcionamiento fiable y totalmente repetible, a pesar de estar bajo cargas extremas durante el proceso de inyección. Igualmente se espera que presenten una larga vida útil para compensar la inversión de capital y un diseño que minimice los costos de mantenimiento durante el servicio. En la Figura 1 se muestra un mecanismo de transformación de artículos plásticos.



Figura 1. Artículos plásticos y medio de transformación (molde).

La fiabilidad y la vida útil se determinan principalmente por el material o materiales usados, los tratamientos térmicos y las operaciones de mecanizado durante la fabricación del molde de inyección (Menges & Mohren, 2001).

Uno de los aspectos de vital importancia en el diseño de moldes de inyección, está en los sistemas de expulsión y desmoldeo del artículo plástico, estos dependen de la configuración geométrica del artículo y del tipo de retención u obstáculo que esté presente para ser desalojado del molde. Los equipos de eyección suelen estar accionados mecánicamente por la carrera de apertura de la máquina inyectora. Si este simple arreglo no es suficiente, la expulsión se puede realizar con mecanismos que asistan a ésta, tales como: mecanismos comerciales, sistemas neumáticos o hidráulicos e incluso combinaciones de éstos en casos muy complejos.

En el caso de expulsiones de accionamiento manual, éstos solo se encuentran en moldes pequeños o moldes prototipo y también pueden ser usados para pequeñas series y bajas

fuerzas de expulsión o cuando no tenga importancia, ni el tiempo, ni la precisión del ciclo (Menges & Mohren , 2001). En la Figura 2 se puede observar el ejemplo de un sistema comercial para la expulsión de un artículo con una retención de difícil desmoldeo.

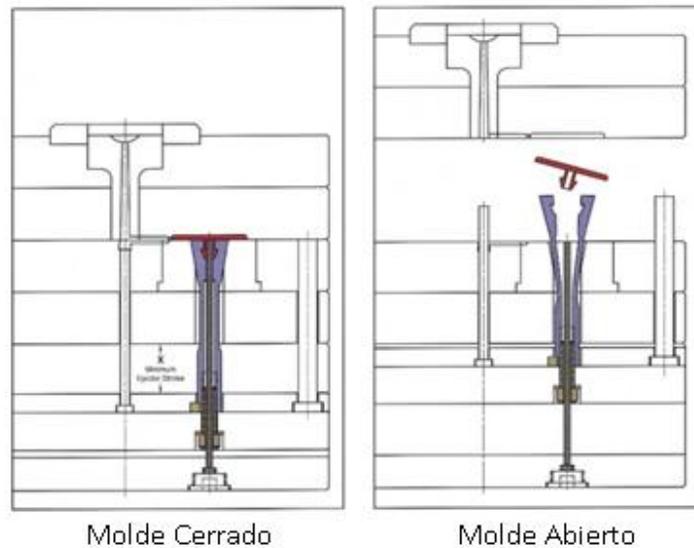


Figura 2. Sistema comercial para la expulsión de un artículo con una retención de difícil desmoldeo. (Progressive Components International Corporation, 2018).

El sistema de expulsión está normalmente ubicado en el lado móvil o placa móvil de la máquina inyectora y es accionado por ésta y la condición para usarlo, es por supuesto, que el artículo plástico quede del mismo lado que el sistema de expulsión de la máquina. Caso contrario, cuando el artículo queda en el lado fijo de la máquina, se necesitan sistemas de desmoldeo más elaborados, como los mencionados anteriormente (Menges & Mohren, 2001). A continuación, en la Figura 3 se muestra un esquema de una máquina de moldeo por inyección con pistón y en la Figura 4, algunos sistemas típicos de expulsión y desmoldeo, usados en moldes pequeños.

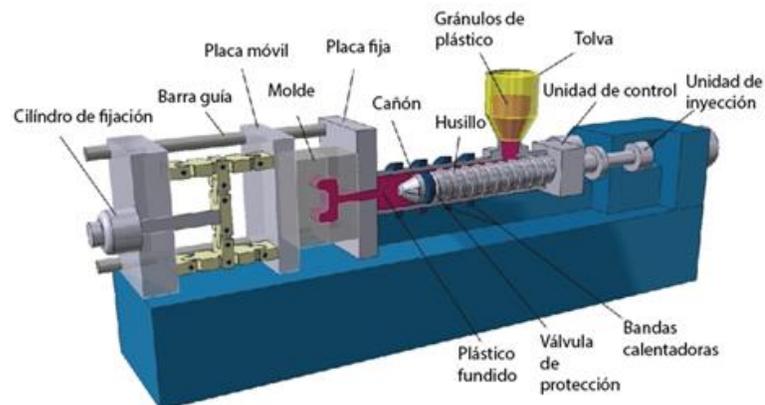


Figura 3. Esquema de una máquina de moldeo por inyección con pistón.

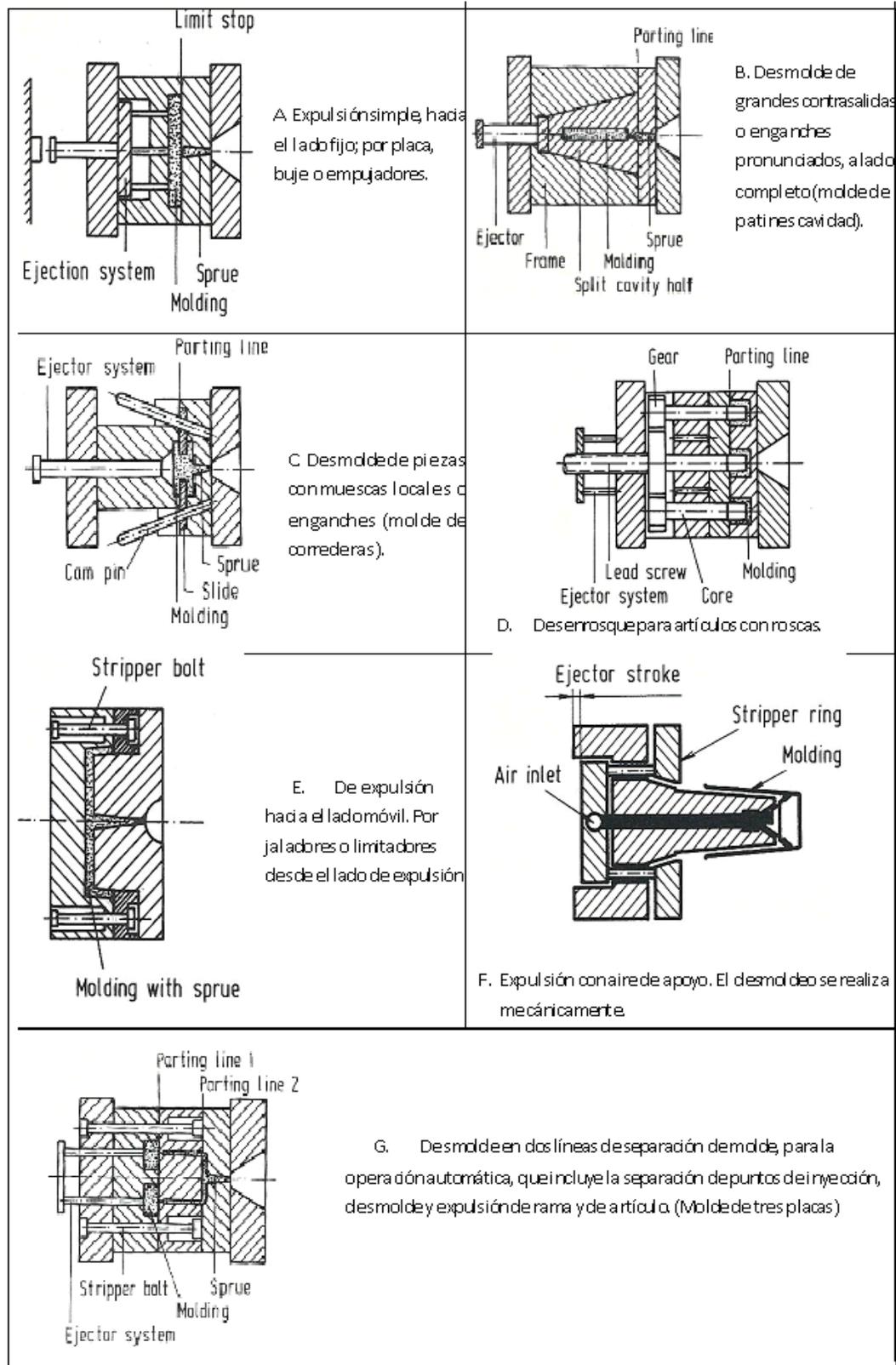


Figura 4. Algunos sistemas típicos de expulsión y desmoldeo, usados en moldes pequeños. (Menges & Mohren, 2001).

Finalmente debe considerarse que los artículos muy grandes o de gran longitud, se pueden desmoldar empujándolos hacia fuera, pero sin ser expulsados por completo. Ellos se retiran manualmente o mediante robot después de haber aflojado (Menges & Mohren, 2001).

Comercialmente existen muchos tipos de sistemas de expulsión, tanto para acondicionar a nuestros diseños, como para montaje directo, pero estos limitan el diseño del molde a los requerimientos del sistema a usar. Es de tener en cuenta que la observación y análisis de sistemas de expulsión tanto comerciales como implementados en otros moldes, ayudan mucho en el diseño de nuevos sistemas por combinación.

Justificación

Industria de Moldes en Colombia: Pasado Cercano

Un estudio realizado en el año 2005 por la Universidad Eafit de Medellín, concluyó que la fabricación de moldes en el ámbito nacional es todavía muy pequeña si se compara con los resultados de los diez principales países productores a nivel mundial. Sin embargo, el análisis también destacó el repunte y crecimiento de este proceso en el último lustro y enfatizó que uno de los aspectos más importantes de la industria nacional para mejorar su nivel competitivo, fue la incorporación de nueva tecnología. En efecto, el 50% de la maquinaria utilizada en 2005 para la manufactura de moldes, se había adquirido antes de un año y la mayoría correspondía a tecnología CNC. El estudio señala que la demanda mensual de fabricación de moldes de inyección en Colombia es de 50 unidades aproximadamente, con un promedio de \$40 millones por molde. La planificación de esta producción se hace bajo pedido y con la infraestructura que tiene el país dedicada a la fabricación de moldes de pequeño y mediano tamaño, se suple perfectamente la demanda nacional.

Frente al mercado, el informe también explica que el avance de la competitividad nacional ha repercutido favorablemente en la disminución del consumo de moldes importados, los cuales superaban el 50% del total en el 2000 y para el 2002 cayó a un 32%. Los principales factores que motivaron el crecimiento de la preferencia por el producto local fueron: mejoría de la calidad, disminución del tiempo de entrega y mejoría en el servicio Pre y Post venta; además de los altos precios de las piezas importadas. En general, los proveedores extranjeros suministran moldes de gran tamaño (1.000 mm × 1.000 mm × 1.000 mm), pues la mayoría de los fabricantes colombianos no cuentan con la capacidad de elaboración, lo que tiene poco efecto en el sector ya que no es el nicho de la producción nacional

Otros resultados del estudio fueron:

- El 62% de los materiales utilizados por los fabricantes de moldes son importados, debido a la calidad y garantías ofrecidos por los proveedores extranjeros.

- Más del 85% de las empresas cumplen todas las políticas de calidad interna, donde la verificación de éstas se encuentra a cargo de personal integrado a un programa de reuniones sistemáticas
- Más del 65% de las empresas cuentan con un departamento de diseño y la mayoría de ellas utiliza software especializado.
- Sólo el 20% de las fábricas en el medio tienen o conocen un software que les permita conocer un dato preciso del precio del molde.
- El 80% de las empresas manufactureras de moldes prestan servicio postventa y mantenimiento de moldes.
- El 31% de las empresas usuarias de moldes no actualizan su maquinaria desde hace dos o tres años, mientras que el 19% adquirió maquinaria nueva en los últimos cuatro años.
- Aunque el 78% de las empresas afirman estar exportando moldes, el 22% restante expresan no exportar por falta de contactos en el exterior y por los costos competitivos del mercado internacional (Guarín & Paramo, 2002, citados en 2009, p.36).

Industria de Moldes en Colombia: Presente

Al realizar un análisis actual de la industria del plástico y considerando la situación global, vemos que la historia no ha cambiado mucho. Hoy en día la producción nacional de moldes sigue siendo baja con respecto a la de otros países, además se registran moldes asiáticos incursionando en el mercado.

Desde el punto de vista de las empresas, se asevera que es difícil conseguir mano de obra calificada y con las bases necesarias para realizar un buen trabajo en el área del diseño de moldes de inyección, esto puede deberse al enfoque dado por las universidades sobre el tema, además de la poca bibliografía en español presente en el medio. Como dice el informe realizado en la universidad Eafit de Medellín, un buen porcentaje de las empresas y pequeños molderos, todavía trabajan de manera empírica y el conocimiento adquirido no se tecnifica y por lo general no trasciende los alcances de empresas o talleres.

También se sigue presentando el fenómeno de la importación de materiales metálicos para moldes, dada la baja calidad y poca producción en el mercado interno, lo mismo sucede con los tratamientos térmicos y recubrimientos metálicos; aunque es de reconocer que se han realizado avances en este tema durante los últimos tres años por empresas nacionales.

Uno de los propósitos del trabajo de grado que sucederá a este anteproyecto, será disminuir la brecha entre lo teórico y lo empírico en el diseño de moldes de inyección, y se constituirá en una fuente de consulta confiable, a la vez que sea una guía inicial para el desarrollo de proyectos educacionales o industriales, dentro y fuera del Alma Mater.

Objetivos

Objetivo General

Proponer los fundamentos básicos y generales, aplicados en la ingeniería del diseño de moldes de inyección para artículos plásticos, haciendo énfasis en los sistemas de expulsión y desmoldeo de dichos artículos.

Objetivos Específicos

Conocer los diferentes tipos de materia prima típica a utilizar en la transformación de plásticos, tanto para los artículos como para los moldes de inyección.

- Acceder a conocimientos básicos acerca de las máquinas inyectoras y los periféricos requeridos en los procesos de inyección.
- Definir un procedimiento secuencial para la caracterización y diseño viable de un producto plástico, así como determinar de forma preliminar el tipo de molde requerido para su producción y la estimación aproximada de su costo.
- Ofrecer las pautas necesarias para lograr un diseño de molde óptimo tanto en costo como en fiabilidad y rendimiento, enfocando ello en una buena selección de materiales y tratamientos térmicos y superficiales para las piezas del molde.
- Realizar un análisis y presentación específica, acerca de los sistemas de expulsión y desmoldeo para diferentes artículos plásticos, que ejemplifique el uso de estos desde el punto de vista del diseño y a partir del uso de sistemas estándares de diferentes proveedores nacionales e internacionales.
- Aportar conocimientos prácticos y teóricos para el diseño de moldes en la transformación de plásticos por inyección.
- Proveer un documento de acceso a la información básica para el desarrollo del proceso de inyección de plásticos, desde la concepción del proyecto (artículo plástico), hasta el desarrollo del molde de inyección, apto para la producción.

Introducción

Contexto

Son muchas las variables que afectan el proceso de transformación del plástico: efectividad, productividad y vida del molde. Es importante tener claras dichas variables y poseer un método de trabajo que nos lleve a lograr el objetivo deseado del conjunto, máquina inyectora – molde – artículo plástico.

Estos conceptos no solo son importantes para los diseñadores de moldes, sino para cualquier persona que esté involucrada en la planeación, compra y operación de un molde de inyección.

Son infinitos los posibles tipos de artículos que se nos podrían presentar e innumerables las soluciones de moldeo que se podrían implementar para la obtención de estos. Pero realizando un buen análisis de las variables existentes y desarrollando la combinación y buena aplicación de los conceptos básicos, para cada uno de los sistemas que se deben tener en consideración en el diseño del proceso de transformación, pueden obtenerse excelentes resultados en el proyecto emprendido.

En atención a lo anterior, se propone el desarrollo de los siguientes temas, donde serán presentados los aspectos teórico-prácticos, aplicados de una forma secuencial para el desarrollo de un proyecto de transformación de plásticos, en busca de los mejores resultados posibles y fundamentados en las experiencias obtenidas por la interacción directa con la industria del plástico.

Contenido y Alcance del Trabajo

Inicialmente se abordará el tema de los materiales plásticos que se podrán usar en la elaboración de productos mediante la transformación por inyección, se expondrán los tipos y sus propiedades, cómo se pueden identificar, cómo se comportan reológicamente, cuáles factores afectan dicho comportamiento y qué debe considerarse para lograr su transformación.

Luego se abordará la reología de los plásticos en general y específicamente la del material a usar, lo cual es vital para la toma de decisiones posteriores acerca de los sistemas de llenado del molde de inyección a trabajar. Por ejemplo, qué tipo de canal de alimentación usar, cuál

es la posición del punto de inyección más adecuado para el artículo, cuál debería ser la temperatura del molde, la presión de inyección, entre otros interrogantes que se expondrán durante el desarrollo del tema. En la Figura 5 se pueden observar dos ejemplos de tipos de canales para el llenado de artículos para exponer un ejemplo.



Figura 5. Ejemplo de tipos de canales para el llenado de artículos. (Beaumont, 2004).

Además de conocer acerca de los plásticos, debe comprenderse lo concerniente a la máquina que se utilizará para la transformación de estos, lo que involucra describir los principales sistemas que la componen y los parámetros a tener en cuenta en cada uno (unidad de cierre, unidad de inyección y cilindro de calefacción); además de los tipos comunes de máquinas de las que se puede disponer.

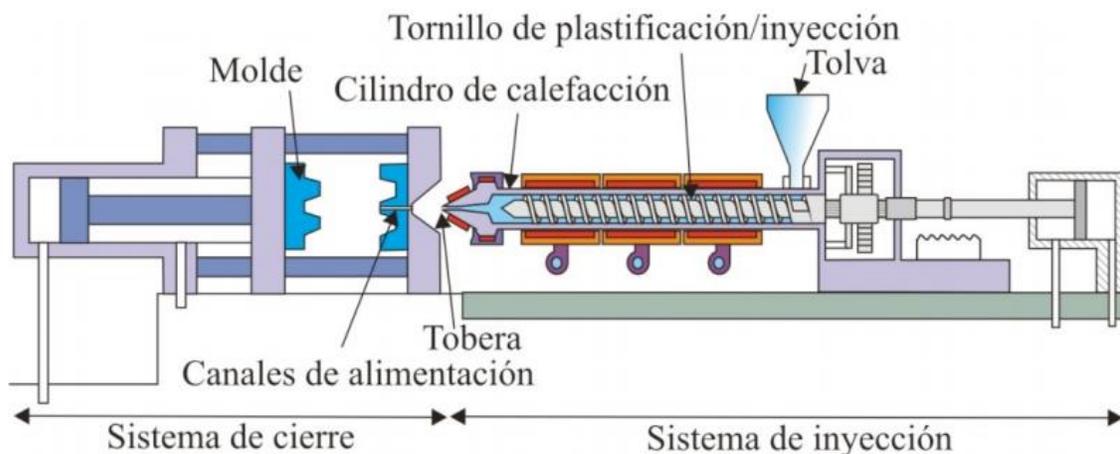


Figura 6. Diferentes sistemas y componentes de una máquina de inyección de tornillo. (Beltran & Marcilla, 2012, p.178).

Para complementar se exponen los principios del proceso de inyección, orientado a sus parámetros de calidad y formación de las piezas; los valores de presión de inyección, post presión y presión interna del molde y se presentan, además, algunos de los perfiles de temperatura para ciertos plásticos (Arburg, 2006). A manera de ilustración, la Figura 6 muestra diferentes sistemas y componentes de una máquina de inyección de tornillo.

Del conocimiento de lo anterior dependen las cualidades y calidad de la pieza inyectada, pues estas son determinadas por el proceso de formación en el molde.

A partir de los conocimientos adquiridos en las etapas anteriores, se traza un camino a seguir para desarrollar un proyecto de transformación de plástico. Kazmer (2007), describe el proceso de fabricación de moldes, donde plantea que las características principales que deben considerarse del producto, para manufacturar el molde son: las dimensiones, los espesores, el material y la cantidad requerida de producción; así mismo, asegura que una vez reunida esta información, se debe desarrollar un diseño preliminar del molde que consiste en la estimación de los costos de manufactura, los ciclos de procesado, la fuerza de sujeción y la velocidad de producción de la maquinaria.

Luego se desarrolla el diseño de cada uno de los sistemas que componen el molde y cuando el diseño está terminado, se guía en la preparación de la información para el departamento de fabricación, determinando tiempos y costos de manufactura.

Se presenta un análisis de esta secuencia de actividades y se detallada, para que sea de fácil implementación en cualquier proyecto de transformación de plástico con moldes de inyección.

Siguiendo con la línea temática, en la siguiente esta etapa se plantean los métodos de análisis y validación del artículo plástico, a partir de los requerimientos del cliente o del producto y se trazan los métodos para la selección del plástico que mejor se adecúa al artículo. Uno de estos métodos es el análisis reológico mediante software de elementos finitos (MoldFlow, NX, etc.), de los cuales se puede obtener información para determinar características del artículo, que influirán directamente el diseño del molde. Tales como: posible ubicación del punto de inyección, llenado de la pieza, distribución de temperaturas, presiones, líneas de flujo, posibles líneas de unión, aires atrapados, deformaciones, entre otros (Beaumont, 2004).

La Figura 7 muestra la distribución de temperatura, con respecto a la ubicación del punto de inyección observado a través de un análisis reológico de un producto plástico.

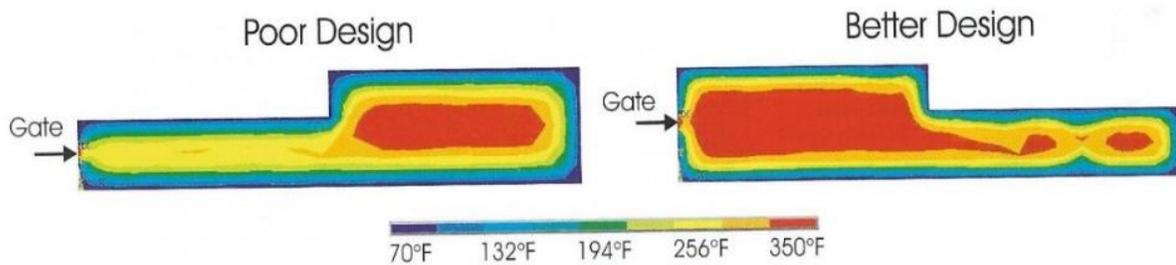


Figura 7. Análisis reológico de un producto plástico; muestra la distribución de temperatura, con respecto a la ubicación del punto de inyección. (Beaumont, 2004).

Finalmente, se ofrecerán consejos prácticos de diseño y alternativas para solucionar diseños de artículos con problemas.

Con la información obtenida en las etapas anteriores, se inicia el proceso de diseño del molde, pero antes se relacionan los diferentes tipos de moldes de inyección y sus características. Posteriormente se hace énfasis en los sistemas y funciones básicas, sistemas éstos que comprenden: boquilla de acoplamiento a inyectora, cavidades, llenado del molde (llevar el plástico de la boquilla a las cavidades), la refrigeración, la evacuación de aire o venteo del molde, el guiado, el desmoldeo, la expulsión del artículo y demás sistemas adicionales que se requieran, dependiendo de las exigencias de la pieza a inyectar. En la Figura 8 se muestra un esquema típico de distribución de los elementos y sistemas de un molde de inyección, tomado del catálogo de la compañía Progressive Components International Corporation (2018).

Finalmente, debe tenerse presente la importancia de la selección de materiales para el molde y de los tratamientos térmicos y superficiales de los que se puede disponer, para llevar el molde a condiciones óptimas de desempeño, calidad, y fiabilidad en el tiempo; sin dejar de hacer consideraciones de costos, beneficios y evaluación de los resultados del diseño. En la Figura 9 se puede observar la imagen de cavidades de molde en aceros especiales para moldes de transformación de plástico distribuidos por Böhler.

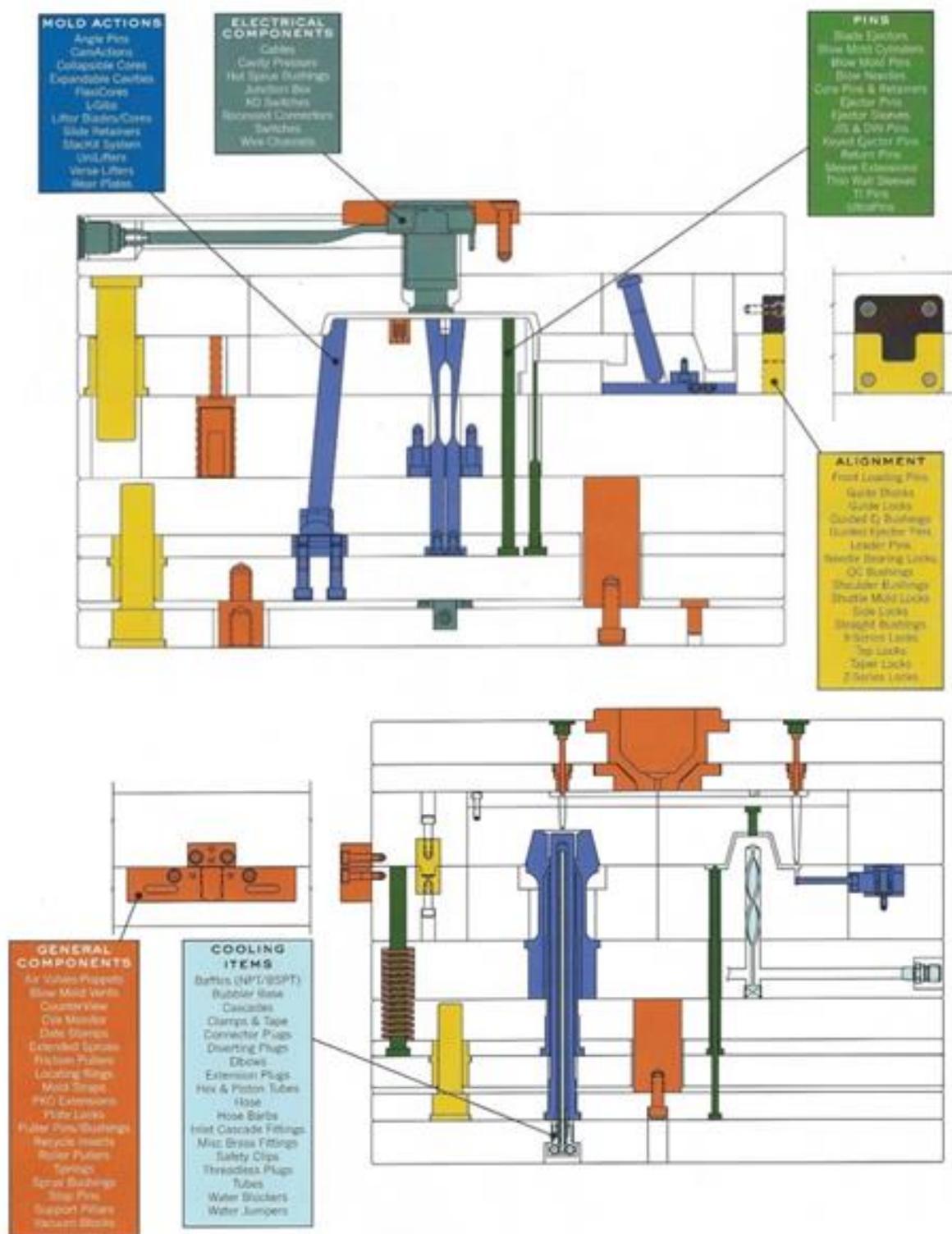


Figura 8. Esquema típico de distribución de los elementos y sistemas de un molde de inyección. (Progressive Components International Corporation., 2018).



Figura 9. Cavidades de molde en aceros especiales para moldes de transformación de plástico
Distribuidos por Böhler. ([Böhler](#), 2000, p.7).

Después de realizar un recorrido por los temas relevantes de la transformación de plásticos mediante moldes de inyección, en el siguiente capítulo se expondrá con un mayor énfasis los temas concernientes con los sistemas de expulsión, tales como:

- Comentarios generales, descripciones y definiciones acerca del tema de expulsión y desmoldeo.
- Sistemas de expulsión y desmoldeo de artículos.
- Requerimientos básicos para cualquier método de expulsión
- Tipos comunes, de sistemas de expulsión y del desmoldeo de artículos.
- Sistemas de expulsión especiales, expulsiones multietapa, desmoldeo con machos o núcleos colapsibles.
- Sistemas de desenrosque.
- Sistemas de asistencia externa como cilindros hidráulicos o neumáticos, incluso asistencia por aire directo a la cavidad.

La combinación de todos estos conceptos se constituye en una guía para el diseño de cualquier tipo de sistema de expulsión que pueda requerirse.

También se presentarán sistemas comerciales o estandarizados para adaptarlos a los moldes trabajados. Estos sistemas, aunque costosos, facilitan la fabricación y diseño del molde, lo cual a largo plazo y dependiendo del alcance comercial de nuestro producto, será reintegrado rápidamente. A manera de ejemplo, en la Figura 10 se muestra un ejemplo de sistema de expulsión y desmoldeo comercial ([ver catálogo](#)).

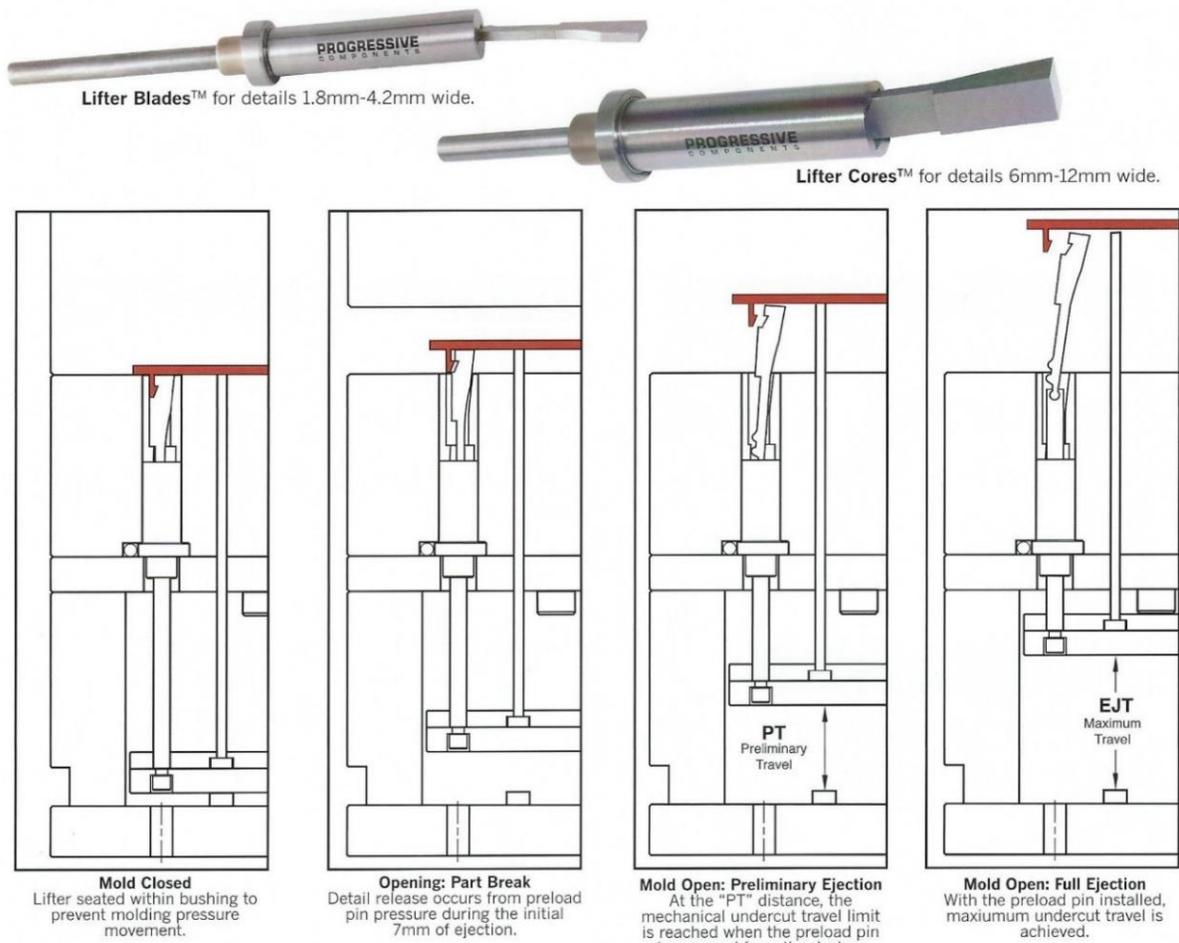


Figura 10. Ejemplo de sistema de expulsión y desmoldeo comercial. ([Progressive Components International Corporation, 2018, p. C-12](#)).

En esta última etapa del proceso, después de haber realizado el recorrido por todos los temas, se realizará una compilación de toda la información relevante y que se considere debe estar en los anexos, como información de referencia y como complemento de los temas que sean necesarios. Dicha información incluirá documentos de referencia, catálogos de elementos comerciales, tablas, figuras y esquemas.

1 Tipos de Plásticos y Aspectos de Interés Sobre su Reología

En nuestro entorno observamos múltiples artículos plásticos moldeados cuyos usos son innumerables y en muchos casos, su desempeño sobrepasa nuestras expectativas. Sin embargo, la obtención de un buen artículo moldeado no está exenta de dificultades y consideraciones sobre algunos problemas, los cuales requieren ser identificados y prever o analizar sus posibles causas.

En el moldeo por inyección intervienen tres elementos que presentan una estrecha relación y dependencia entre ellos. Un buen artículo moldeado depende de la buena interacción de la máquina con el material plástico y este a su vez con el molde que nos entrega dicho artículo. De la buena interacción de estos tres elementos depende el éxito del proceso de inyección.

Por lo anterior, se hace de vital importancia estudiar las propiedades de los diferentes materiales plásticos y la relación con las condiciones de su procesado, para entender su comportamiento durante el proceso de moldeo por inyección (Sánchez, Yañez & Rodríguez, 2003).

1.1 Tipos de Plásticos de Uso Común

Los plásticos son sustancias químicas sintéticas denominados polímeros, de estructura macromolecular que puede ser moldeada mediante calor o presión y cuyo componente principal es el carbono. Estos polímeros (Figura 11 A) son grandes agrupaciones de monómeros, unidos mediante un proceso químico llamado polimerización (Figura 11 B). La Figura 12 muestra una representación simbólica de una molécula de polietileno.

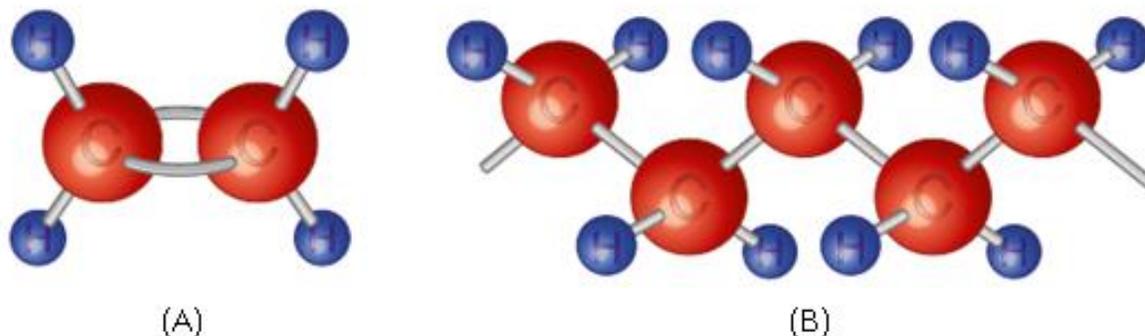


Figura 11. Representación esquemática de: A) monómero de etileno, B) polímero de polietileno. (Osswald & Rudolph, 2015, pp.25-26).

Los polímeros se dividen en dos grandes grupos: *termoplásticos*, *termoestables*.

Las resinas termoplásticas se forman a partir de cadenas moleculares individuales, que tienen una estructura lineal y se exhiben sin unión química entre las moléculas individuales.

Las resinas termoestables tienen moléculas que están químicamente unidas entre sí por enlaces cruzados y forman una especie de estructura de red.

1.1.1 Peso molecular.

Un material polimérico puede consistir en cadenas de polímero de diferentes longitudes o unidades de repetición. Por lo tanto, el peso molecular se determina por el peso molecular medio o media, que se define por

$$\bar{M} = \frac{W}{N} \quad (1-1)$$

Donde W es el peso de la muestra y N el número de moles de la muestra. Las propiedades de los materiales poliméricos están fuertemente ligadas al peso molecular del polímero, como se muestra esquemáticamente en la Figura 13. Un polímero tal como el poliestireno es rígido y quebradizo a temperatura ambiente para un grado de polimerización de 1.000. Sin embargo, en un grado de polimerización de 10, el poliestireno pasa a ser pegajoso y blando a temperatura ambiente (Menges & Osswald, 2012, p.51).

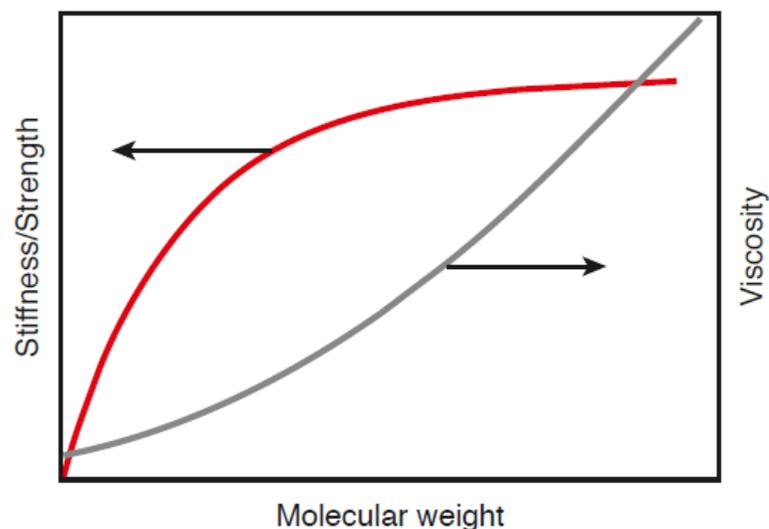


Figura 13. Influencia del peso molecular en las propiedades mecánicas. (Menges & Osswald, 2012, p. 51).

Con la excepción de tal vez algunos polímeros de origen natural, mayoría de los polímeros tienen una distribución de peso molecular tal como se muestra en la Figura 15. Para una función de distribución de peso molecular tal, podemos definir un número medio, peso medio, y viscosidad media (Menges & Osswald, 2012, p.52).

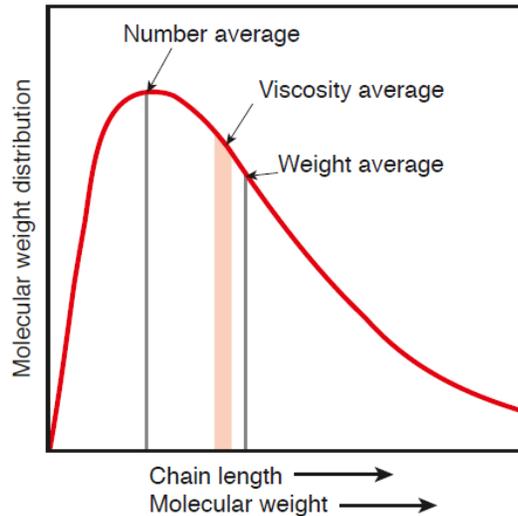


Figura 15. Distribución del peso molecular de un termoplástico típico. (Menges & Osswald, 2012, p.53).

La ramificación de las cadenas poliméricas también influye en la estructura final, cristalinidad y propiedades del material polimérico. La Figura 16 muestra la arquitectura molecular de alta densidad, baja densidad, y lineal de baja densidad del polietileno (Menges & Osswald, 2012, p.58).

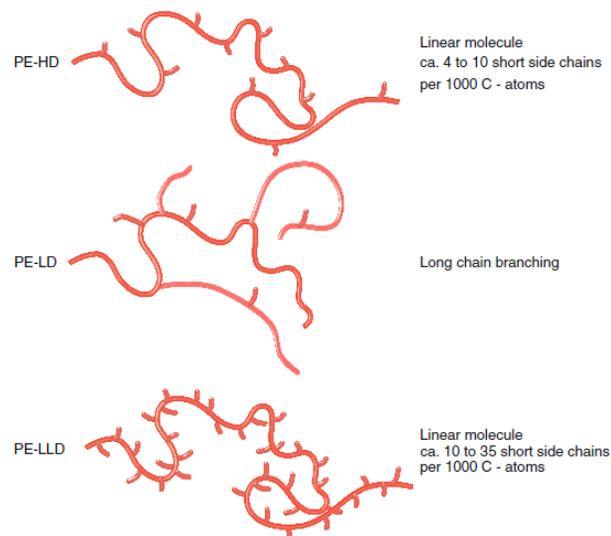


Figura 16. Esquema de la estructura molecular del polietileno con diferentes densidades. (Menges & Osswald, 2012, p.59).

1.1.2 Termoplásticos (no reticulados).

Un termoplástico es un polímero que, a temperatura ambiente, es plástico o deformable, se derrite cuando se calienta y se endurece cuando se enfría lo suficiente. Las moléculas se mantienen unidas por fuerzas intermoleculares.

Durante el proceso de moldeo, cuando el calor y la presión se aplican a la resina termoplástica, las fuerzas intermoleculares se rompen y las moléculas se mueven, cambian de posición en relación una de otra. En la fase de sostenimiento del ciclo de moldeo, las moléculas se dejan enfriar en sus nuevas ubicaciones. Las fuerzas intermoleculares se restauran en la nueva forma o posición de las moléculas.

Los polímeros termoplásticos son ideales para fines de reciclaje debido a su capacidad de re-enlazarse muchas veces.

La mayor parte de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular, los cuales poseen cadenas asociadas por medio de débiles fuerzas Van der Waals (polietileno); fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace de hidrógeno, o incluso anillos aromáticos apilados (poliestireno).

Los polímeros termoplásticos difieren de los polímeros termoestables en que después de calentarse y moldearse pueden recalentarse y formar otros objetos, mientras que, en el caso de los termoestables o termofijos, después de enfriarse la forma no cambia y arden al aplicar calor.

Las propiedades físicas de los termoplásticos cambian gradualmente si se funden y se moldean varias veces (historial térmico), generalmente estos procesos disminuyen dichas propiedades.

Los termoplásticos más usados son: el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el polimetilmetacrilato (PMMA), el policloruro de vinilo (PVC), el politereftalato de etileno (PET), el teflón (o politetrafluoretileno, PTFE) y el Nylon (un tipo de poliamida).

Muchos de los termoplásticos conocidos pueden ser resultado de la suma de varios polímeros, como es el caso del vinilo, que es una mezcla de polietileno y polipropileno (Tres, 2014; Fernandez, 2013-2014).

Los termoplásticos presentan dos tipos de estructuras amorfa y cristalina.

1.1.2.1 Estructura amorfa.

Los termoplásticos amorfos, con su estructura molecular dispuesta aleatoriamente, son análogos a un plato de espaguetis (Figura 17). Debido a su estructura al azar, el tamaño característico de la región más grande ordenada, es del orden de un enlace carbono-carbono. Esta dimensión es mucho más pequeña que la longitud de onda de la luz visible y esto hace que los termoplásticos amorfos sean por lo general transparentes.

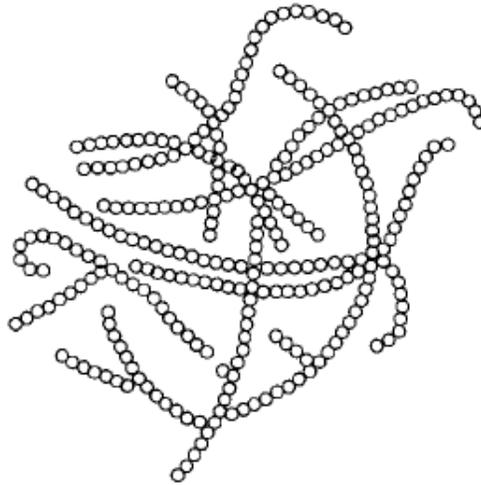


Figura 17. Cadenas moleculares para polímeros amorfos: cadenas moleculares. (Menges & Osswald, 2012).

Aunque no hay una clara transición entre "sólido" y "líquido", la temperatura que divide los dos estados en un termoplástico amorfo se conoce como la temperatura de transición vítrea, **T_g**. A temperaturas por debajo de la temperatura de transición vítrea el material se comporta como un sólido viscoelástico. Una vez que la temperatura del material es superior a la temperatura de transición vítrea, este entra en la región elástica llamada entrópica. En este punto, el material puede ser más fácilmente deformado, tal como se hace durante el proceso de termo formado. Sin embargo, para que el material fluya, su temperatura debe estar por encima una temperatura de reblandecimiento, **T_s**, en cuyo punto se comporta como un fluido viscoelástico.

La temperatura de reblandecimiento define el punto en que las fuerzas viscosas durante la deformación (pérdida) exceden las fuerzas elásticas durante la deformación (almacenamiento), y para termoplásticos amorfos **T_s** está aproximadamente 50°K por encima de **T_g**.

La temperatura T_s y el tiempo para alcanzar esta pueden aumentar cuando se aumenta el peso molecular del material. Las moléculas más largas tienen más dificultad de deslizamiento, por lo que requiere temperaturas más altas para lograr "flujo" (Menges & Osswald, 2012).

1.1.2.2 Estructura Cristalina o Semicristalina.

Los polímeros *crystalinos* son arreglos ordenados en densas cadenas moleculares (Figura 18). Estas cadenas moleculares tienen la apariencia de una cinta de zapatos, cuando es magnificada muchas veces bajo un microscopio. Las regiones altamente organizadas muestran las características de comportamiento de los cristales. Debido a su estructura más ordenada, el tamaño característico de la región más grande ordenada es lo suficientemente grande. Esta dimensión es mayor que la longitud de onda de la luz visible y los termoplásticos semicristalinos son por lo general opacos.

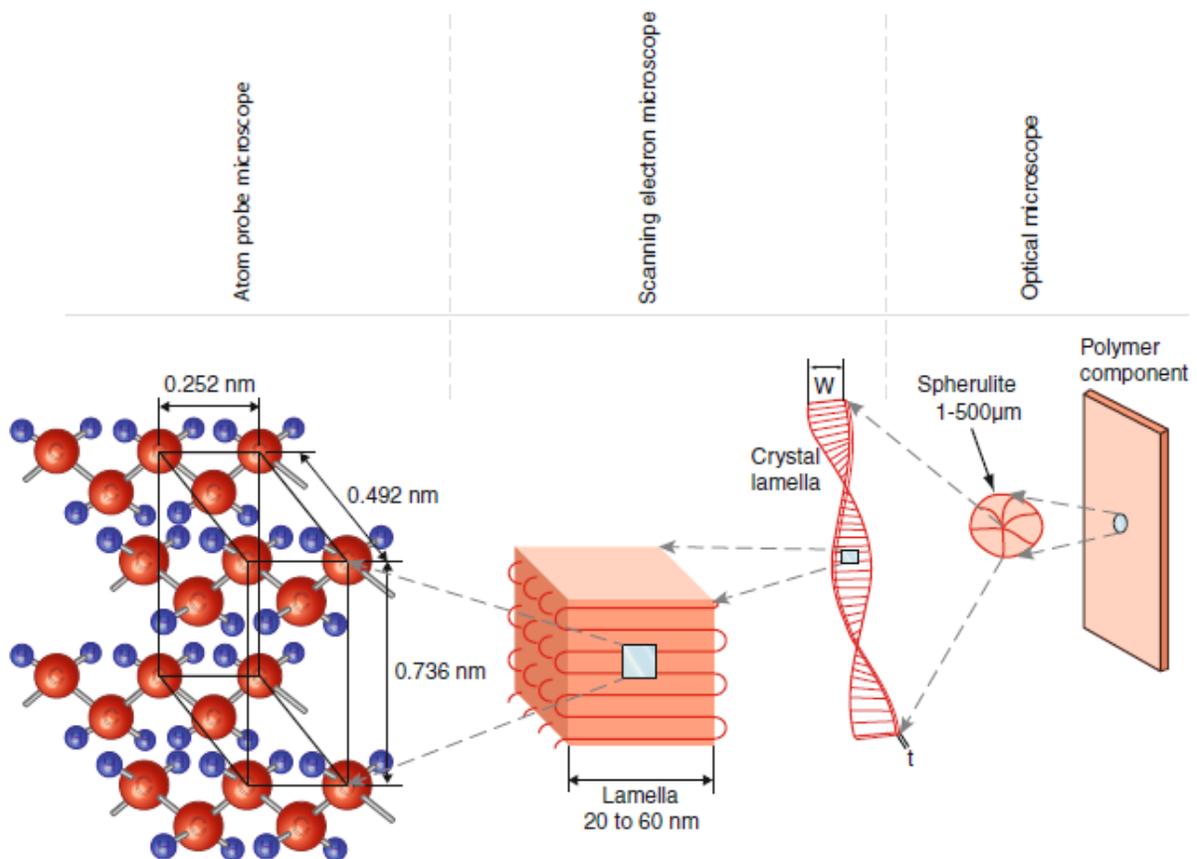


Figura 18. Representación esquemática de la estructura molecular general y la disposición ordenada en los materiales semicristalinos. (Menges & Osswald, 2012, p.63).

Cabe señalar que la cristalinidad completa se logra pocas veces durante el procesamiento del polímero. Casi siempre habrá algunas zonas amorfas en la pieza y esto los hará más o menos opacos.

Durante procesamiento, las piezas se enfrían desde el exterior, por lo que la piel de la parte es el área con más probabilidades de carecer de la cristalinidad necesaria. Muchos polímeros cristalinos lograr un grado de cristalinidad de sólo el 35 al 40%, incluso bajo condiciones de procesamiento ideales.

Eso significa que poco más de un tercio de la estructura del componente se convierte en cristalina, esto los hace semicristalinos (ver Figura 19).

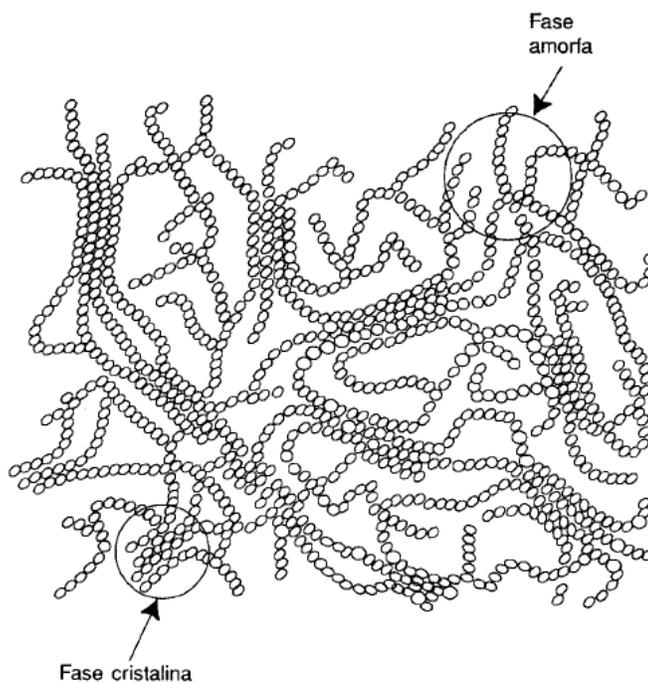


Figura 19. Cadenas moleculares por fases para polímeros semicristalinos. (Sánchez et al, 2003, p.29).

Algunos ejemplos típicos de polímeros cristalinos incluyen Acetal, Poliamida (Nylon), Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliéster (PET, PBT), y sulfuro de Polifenileno (PPS) (Tres, 2014).

1.1.3 Termoestables (reticulados).

Los plásticos termoestables son aquellos que una vez moldeados no pueden reblandecerse con el calor, ya que experimentan una transformación química llamada fraguado; por este proceso, las moléculas se enlazan permanentemente y el polímero queda definido en forma.

Antes del fraguado, los productos termoestables son líquidos pastosos o sólidos, pero capaces de adquirir la forma adecuada mediante la aplicación de calor y de presión.

Estos plásticos una vez fraguados no es posible darles otra forma ni someterlos a temperaturas elevadas, puesto que sus moléculas se degradan por el calor, siendo imposible volver a moldearlos. No se puede reciclar.

Durante el proceso de moldeo, cuando las resinas termoestables son calentadas y curadas, forman entrecruzamientos entre las cadenas moleculares (ver Figura 20). Esto también se llama reacción de polimerización. Cuando se recalienta, estas cadenas cruzadas impiden que las cadenas individuales se deslicen (Tres, 2014; Fernandez, 2013-2014).

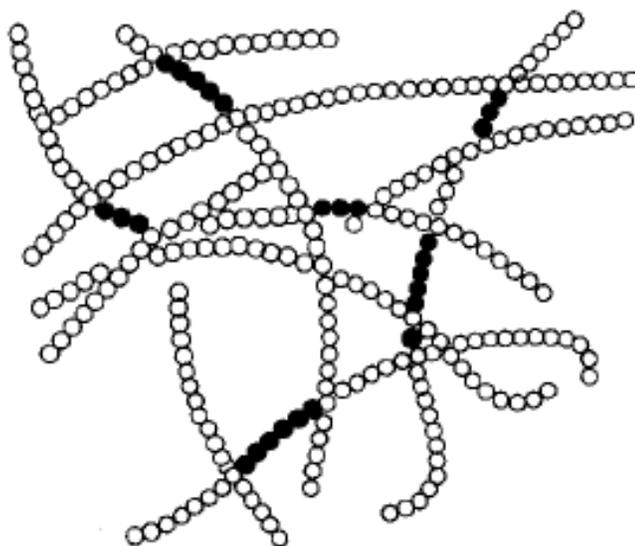


Figura 20. Termoestables: entrecruzamientos. (Sánchez et al., 2003, p.23).

Aunque los termoestables presentan estructura amorfa, pueden clasificarse en dos tipos, *elastómeros* y *termofijos*.

1.1.3.1 *Elastómeros.*

Los elastómeros son aquellos polímeros que muestran un comportamiento elástico. El término, que proviene de polímero elástico, es a veces intercambiable con el término goma, que es más adecuado para referirse a vulcanizados. Cada uno de los monómeros que se unen entre sí para formar el polímero está normalmente compuesto de carbono, hidrógeno, oxígeno y/o silicio.

Los elastómeros son polímeros amorfos que se encuentran sobre su temperatura de transición vítrea o T_g , de ahí esa considerable capacidad de deformación. A temperatura ambiente las gomas son relativamente blandas ($E \sim 3\text{MPa}$) y deformables. Se usan principalmente para cierres herméticos, adhesivos y partes flexibles. Comenzaron a utilizarse a finales del siglo XIX, dando lugar a aplicaciones hasta entonces imposibles (como los neumáticos de automóvil) (Wikipedia, 2019, párr.1).

Lo particular de los elastómeros es que pueden ser estirados hasta muchas veces sus longitudes, para luego recuperar su forma original sin una deformación permanente. Esto tiene que ver con la entropía, que significa desorden y esto equivale a amorfo. Las moléculas poliméricas que conforman una porción de caucho, cualquier clase de caucho, no tienen ningún orden. Se enrollan y se enredan entre ellas, formando un gran revoltijo Figura 21.

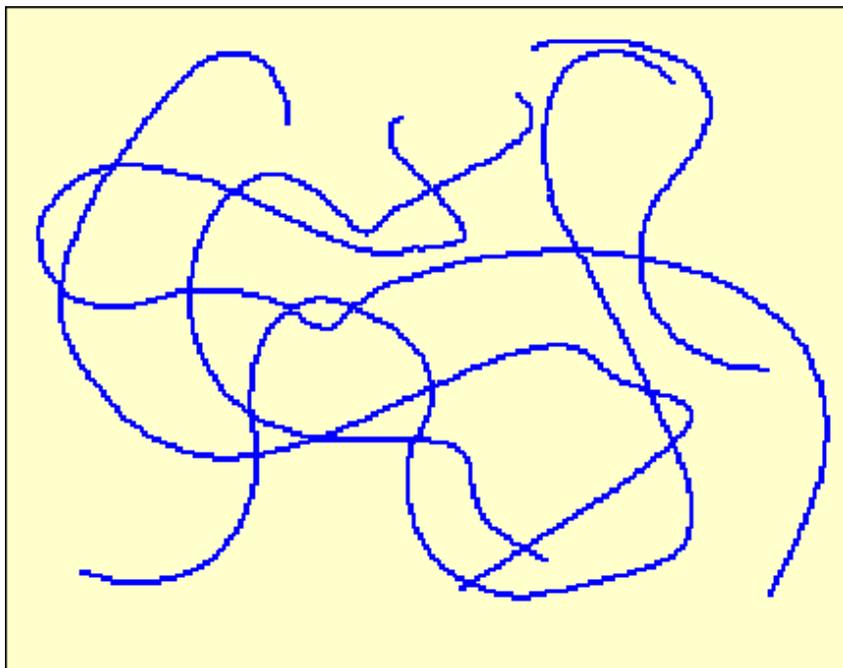


Figura 21. Cadenas poliméricas de un trozo de caucho no estirado. (Rave, 2003).

Pero si se estira esa porción de caucho todo cambia Figura 22. Las moléculas son forzadas a alinearse en la dirección en que se está produciendo el estiramiento. Cuando lo hacen, se vuelven más ordenadas. Si se estira lo suficiente, las cadenas se estirarán tanto como para cristalizar. Claro cuando se afloja la presión y se deja de estirar, las moléculas volverán rápidamente a su estado enredado y desordenado, tendiendo a su forma original, si su límite de elasticidad no fue superado (Rave, 2003).

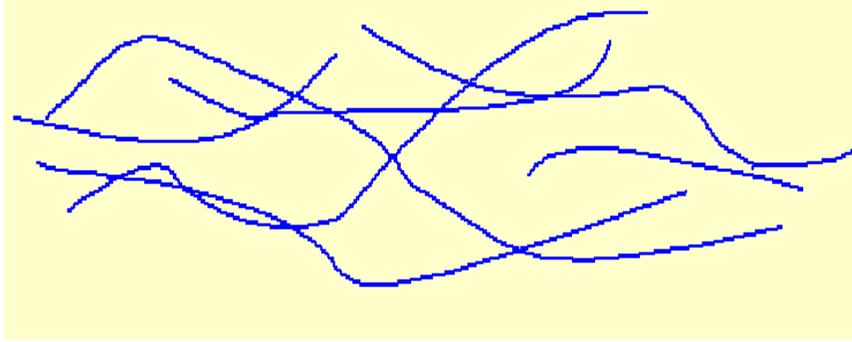


Figura 22. Cadenas poliméricas de un trozo de caucho estirado. (Rave, 2003).

1.1.3.2 Termofijos.

Los polímeros termofijos se distinguen por su estructura tridimensional de alto encadenamiento transversal. En efecto, la parte formada (por ejemplo, el mango de una olla o la cubierta de un interruptor) se convierte en una gran macromolécula. Los termofijos son siempre amorfos y no exhiben temperatura de transición vítrea.

Los termofijos son materiales que se caracterizan por tener cadenas poliméricas entrecruzadas, formando una resina con una estructura tridimensional que no se funde. Polimerizan irreversiblemente bajo calor o presión formando una masa rígida y dura.

Existen distintos tipos de sistemas de Resinas que están orientadas a las industrias del adhesivo, pinturas y recubrimientos.

Debido a la diferencia en la composición química y estructura molecular, las propiedades de los plásticos termofijos son diferentes de los termoplásticos. En general, los termofijos son:

- Más rígidos, con módulos de elasticidad dos o tres veces más grandes.
- Frágiles, prácticamente no poseen ductilidad.
- Menos solubles en los solventes comunes.
- Capaces de funcionar a temperaturas más altas.
- No pueden ser refundidos, en lugar de esto se degradan o se queman.

Las diferencias en las propiedades de los plásticos termofijos se atribuyen a las cadenas transversales que forman enlaces en valencias tridimensionales térmicamente estables.

El encadenamiento transversal se logra en tres formas:

- **Sistemas activados por temperatura.** En los sistemas más comunes, los cambios son causados por fuentes de calor durante las operaciones de conformado de la pieza (por ejemplo, moldeado). La materia prima es un polímero lineal en forma granular suministrado por la planta química.
El material se somete al calentamiento para ablandarlo y moldearlo, una mayor exposición al calor causa el encadenamiento transversal del polímero. El término termo fraguado se aplica apropiadamente a estos polímeros.
- **Sistemas activados catalíticamente.** El encadenamiento transversal en estos sistemas ocurre cuando se añaden en forma líquida pequeñas cantidades de un catalizador al polímero. Sin el catalizador el polímero permanece estable, pero una vez combinado con el catalizador, cambia a la forma sólida.
- **Sistemas activados por mezcla.** La mayoría de las resinas epóxicas son ejemplos de estos sistemas. El mezclado de dos sustancias químicas genera una reacción que forma un polímero sólido con cadenas transversales. Las temperaturas elevadas se usan algunas veces para acelerar las reacciones.

Las reacciones químicas asociadas con el encadenamiento transversal se llaman curado o fraguado. El curado se ejecuta en la planta de fabricación donde se hacen las partes, y no en la planta química que surte la materia prima al fabricante.

Los plásticos termofijos no se usan tan ampliamente como los termoplásticos, quizá por las complicaciones adicionales relacionadas con su proceso de curación.

En la Figura 23, se muestra un resumen de la clasificación de los polímeros presentada anteriormente.

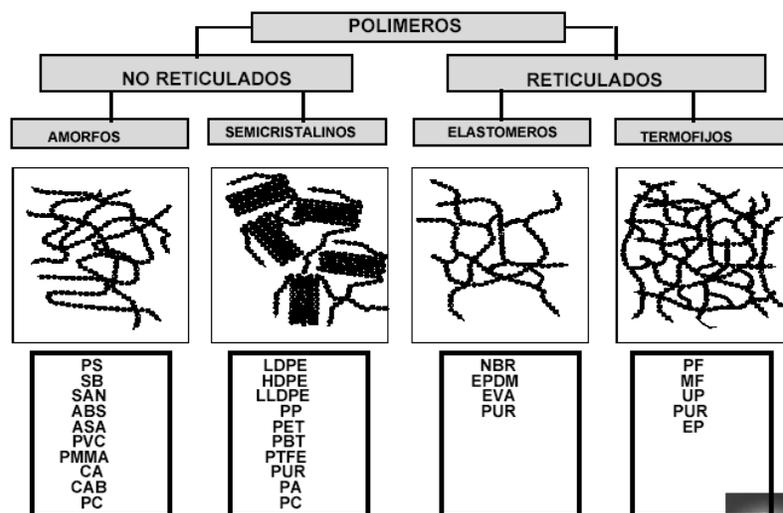


Figura 23. Resumen de la clasificación de los polímeros. (Rave, 2003).

1.1.4 Copolímeros y mezclas de polímeros.

Como lo mencionan Osswald & Giménez (2008) en su libro *Procesado de Polimeros - Fundamentos*, los polímeros de estructura química más sencilla son aquellos formados por un solo tipo de monómero o grupo funcional, estos se denominan homopolímeros. Sin embargo, algunos polímeros están formados por cadenas poliméricas con dos o más monómeros distintos. Cuando en el polímero coexisten dos tipos de monómeros diferentes se le denomina copolímeros, mientras que aquellos formados por tres grupos de monómeros se les llaman terpolímeros. “Dependiendo del grado de ordenamiento de los monómeros en la cadena polimérica se pueden distinguir varios tipos de copolímeros: al azar, alternados, en bloque, o injerto” (p.18), como se muestra en la Figura 24.

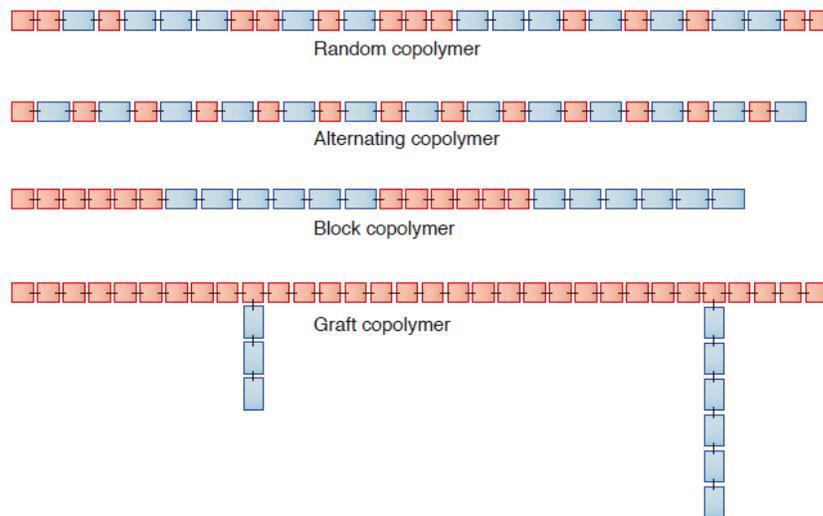


Figura 24. Representación esquemática de diferentes copolímeros. (Menges & Osswald, 2012, p.74).

Uno de los copolímeros habituales es el poliestireno de alto impacto (**HIPS**), que está formado por cadenas de poliestireno unidas a una cadena principal de polibutadieno. En el caso de que los monómeros de estireno y butadieno sean copolimerizados de forma aleatoria o al azar, el material resultante será un elastómero denominado estireno-butadieno (**SBR**). Otro ejemplo clásico de polimerización es el terpolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno (**ABS**).

Las mezclas de polímeros pertenecen a otra familia de materiales poliméricos obtenidos mediante el mezclado en estado fundido de dos o más polímeros, con la finalidad de ampliar el rango de las propiedades físicas obtenidas con cada uno de los polímeros individuales. Entre las mezclas de polímeros comercializadas se incluyen: **PP+PC**, **PVC+ABS**, **PE+PTFE**, **ABS+PC** (Osswald & Giménez, 2008, pp.18-19).

1.1.5 Aditivos aplicables a los polímeros.

Según Osswald & Giménez (2008), un polímero rara vez es considerado un material puro. En la mayoría de los casos los polímeros contienen diferentes tipos de aditivos que se adicionan durante el procesado, que son empleados para modificar las propiedades mecánicas, físicas y químicas.

“Habitualmente se emplea el término plástico para referirse a aquellos polímeros de alto peso molecular que incorporan una serie de aditivos para modificar su cuadro de propiedades, y que son necesarios para que el material pueda tener utilidad industrial” (p.19).

1.1.5.1 *Plastificantes.*

Los plastificantes son sustancias químicas añadidas al polímero buscando alterar sus propiedades reológicas o mecánicas. Los plastificantes son empleados como ayudantes del procesado, ya que producen el mismo efecto que un aumento en la temperatura del material. La disminución de la viscosidad, como consecuencia de la adición de estas sustancias, reduce el riesgo de degradación térmica durante el procesado. Por ejemplo, el nitrato de celulosa [NC] degrada térmicamente cuando es procesado sin la utilización de plastificante (Osswald & Giménez, 2008, pp.19-20).

Las propiedades mecánicas del polímero que suelen modificarse mediante plastificantes son tales como la rigidez, la resistencia y la tenacidad. Por ejemplo, en el **PVC**, puede reducir su rigidez en 3 veces si se le adiciona un plastificante como el dioctilftalato (**DOP**). Esto a su vez disminuye su temperatura de transición vítrea en 35°C. de hecho, el **PVC** plastificado es viscoelástico a temperatura ambiente (Osswald & Giménez, 2008, p.20).

1.1.5.2 *Ignifugantes o retardadores de llama.*

Osswald & Giménez (2008), opinan que, dada la naturaleza orgánica de los polímeros, la mayoría de estos son inflamables y esta ha sido una característica de máximo interés; por lo que, para reducir la combustión dentro de un componente plástico, pueden ser usados algunos aditivos halógenos a base de bromo, fosforo o cloro. Si se inicia el proceso de combustión, estos liberan un gas inerte que extingue el fuego al calentarse. Los compuestos bromados, como sistemas retardadores de llama, son más efectivos que los clorados (p.20).

1.1.5.3 *Estabilizantes.*

Estos son aditivos que retardan la degradación del polímero por la exposición a los factores ambientales, tales como la luz (radiación UV) y la oxidación. La combinación de calor y oxígeno (oxidación) puede producir deterioro del polímero por degradación térmica, la cual produce decoloración o coloración amarillenta en el producto. “La degradación térmica puede reducirse mediante la incorporación de estabilizantes, tales como antioxidantes o eliminadores de peróxidos” (Osswald & Giménez, 2008, p.20). Estos no eliminan la degradación, pero la reducen considerablemente, hasta el momento en que el estabilizante se consume por la reacción con el oxígeno.

El policloruro de vinilo es posiblemente el polímero más sensible a sufrir degradación térmica. Durante el procesado del polímero, esta degradación genera cloruros que reaccionan y forman subproductos ácidos. El estabilizante debe usarse para neutralizar dichos ácidos, así como para prevenir los posibles problemas de corrosión que puedan darse en los equipos y moldes, durante el procesado del polímero.

1.1.5.4 *Agentes antiestáticos.*

Puesto que generalmente los polímeros son aislantes eléctricos dada su baja conductividad, estos producen electricidad estática. La carga estática acumulada es función de la velocidad a la que ocurren los procesos de generación y descarga de la electricidad estática almacenada.

La velocidad de generación de carga estática en la superficie del polímero puede reducirse disminuyendo la zona de contacto, mientras que la velocidad de descarga eléctrica puede incrementarse haciendo la superficie más conductora. Así pues, un buen agente antiestático debería ser un aditivo ionizable que permitiera la migración de la carga hacia la superficie del polímero, haciendo que la superficie sea más conductora. De esta manera, se disipan las cargas estáticas almacenadas. Entre los agentes antiestáticos más comunes se incluyen los compuestos basados en nitrógeno, tales como las aminas de cadena larga, las amidas y los alcoholes polihídricos (Osswald & Giménez, 2008, p.21).

1.1.5.5 *Rellenos.*

Tal como Osswald & Giménez (2008) lo indican, los materiales de relleno pueden clasificarse de tres maneras según la función principal que desempeñen:

- Aquellos adicionados al polímero buscando reforzarlo y mejorar sus propiedades mecánicas. Estos se conocen como refuerzos.
- Aquellos usados para abaratar el coste del producto mediante la reducción de la cantidad de polímero empleado en la fabricación de la pieza. Estos se conocen como cargas.
- Y los menos comunes, que son los dispersados en el polímero para mejorar su conductividad eléctrica (p.22).

El principal material de relleno utilizado en el refuerzo de materiales poliméricos es la fibra de vidrio, empleado habitualmente como carga de relleno, y que también permite incrementar la rigidez y las propiedades mecánicas de algunos termoplásticos. Para mejorar la unión interfacial entre la matriz del polímero y el refuerzo se suelen añadir agentes de acoplamiento, siendo los de silano y titanato los más extendidos.

En general se utiliza la designación de plásticos reforzados o compuestos para referirse a aquellos polímeros que contienen aditivos de refuerzo para producir una mejora en las propiedades mecánicas (Osswald & Giménez, 2008, p.22).

Asimismo, los compuestos pueden clasificarse como de alta y de baja resistencia; siendo los de alta aquellos en los cuales el refuerzo busca conseguir un comportamiento mecánico óptimo, como es el caso de la utilización de fibras de vidrio unidireccionales en una matriz epóxica. Generalmente, los compuestos de alta resistencia contienen entre un 50% y un 80% en volumen de refuerzo y suelen presentar una estructura laminar por capas de tejido. Y los de baja resistencia aquellos donde el refuerzo es lo suficientemente pequeño como para poder ser dispersado homogéneamente dentro de la matriz del polímero. Estos materiales pueden ser procesados de la misma forma que los materiales que no tienen refuerzo (Osswald & Giménez, 2008, p.22).

Las cargas de relleno usadas para reducir el coste del componente son por lo general partículas de pequeño tamaño con diferente origen, composición y morfología. Las cargas más empleadas son el carbonato cálcico, arena de sílice, caolín, serrín o negro de humo.

La adición de cargas de relleno permite incrementar la rigidez del polímero, aunque esto lleva asociada también una pérdida considerable de la tenacidad en el material.

1.1.5.6 *Espumantes.*

La función principal de los agentes de soplado o espumantes es producir una estructura celular en los polímeros, denominados plásticos espumados. Las celdillas pueden estar totalmente encapsuladas (celdilla cerrada) o pueden estar interconectadas (celdilla abierta). Las espumas se obtienen con densidades que oscilan entre 1.6 kg/m^3 y 960 kg/m^3 . Las razones por las que se suelen emplear espumas son fundamentalmente por su elevada resistencia específica, sus excelentes propiedades aislantes y acústicas, y su gran capacidad para absorber vibraciones.

La obtención de un polímero espumado se realiza mediante la introducción de gases que quedan atrapados en el interior del polímero. Existen dos tipos de agentes de espumado: los físicos y los químicos.

- Los agentes de espumado físico se descomponen a una determinada temperatura, liberando en el interior del polímero gases que dan lugar a la formación de una estructura celular.
- Los agentes de espumado químico liberan gases como consecuencia de una reacción química. (Osswald & Giménez, 2008, p.22).

1.2 Propiedades y Comportamiento de los Polímeros

1.2.1 Propiedades físicas.

Densidad, gravedad específica, la elasticidad, la plasticidad, ductilidad, tenacidad, fragilidad, sensibilidad a la entalla, isotropía, la anisotropía, absorción de agua, y la contracción, son importantes propiedades físicas que se deben conocer (Tres, 2014, p.14).

1.2.1.1 *Densidad y gravedad específica.*

La *densidad* es una medida de la masa por unidad de volumen, expresada en libras por pulgada cúbica o gramos por centímetro cúbico. La Tabla 1 muestra las densidades de varios polímeros.

Tabla 1.*Valores de densidad típicos de Polímeros.*

Material	Density (g/cm ³)	Density (lb/in ³)
ABS	1.05	0.0382
ABS GR	1.2	0.0433
Acetal	1.4	0.051
Acetal GR	1.6	0.0582
Acrylic	1.2	0.0433
Cast epoxy	1.8	0.0655
Phenolic	1.85	0.0673
Polyamide (PA)	1.15	0.0415
Polyamide (PA) GR	1.35	0.0487
Polyamide imide	1.55	0.0564
Polycarbonate (PC)	1.2	0.0433
Polycarbonate GR	1.45	0.0523
Polyester (PET, PBT)	1.14	0.0415
Polyester GR	1.63	0.0588
Polyethylene	0.9	0.0325
Polyphenylene oxide (PPO)	1.08	0.0393
Polyphenylene sulfide (PPS)	1.55	0.0564
Polypropylene (PP)	0.9	0.0325
Polypropylene (PP) GR	1.1	0.0397
Polysulfone (PSU)	1.25	0.0451
Polystyrene (PS)	1.05	0.0382
Polyvinyl chloride (PVC), rigid	1.35	0.491
Polyvinyl Chloride (PVC), flexible	1.25	0.0451
Styrene acrylonitrile (SAN)	1.07	0.0389
Styrene acrylonitrile (SAN) GR	1.28	0.4657

Tres, 2014, pp.14-15.

La *gravedad específica* es la densidad de un material dividido por la densidad del agua. Esta es una medida adimensional.

Tanto la densidad y peso específico se utilizan en la determinación del peso de la pieza y el costo (Tres, 2014, p.15).

1.2.1.2 Elasticidad.

La elasticidad es la capacidad de un material para volver, parcial o completamente, a su tamaño y forma original después de ser deformada (Figura 25). Los materiales que se recuperan totalmente a su tamaño inicial son perfectamente elásticos. Los que se recuperan parcialmente son parcialmente elásticos.

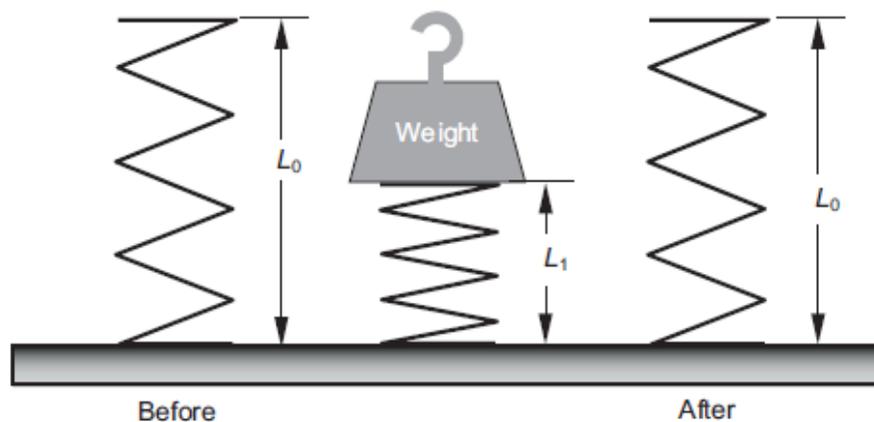


Figura 25. Concepto de elasticidad. (Tres, 2014, p.15)

La región elástica para material termoplástico o termoestable es un dominio muy importante para el análisis lineal. Los materiales frágiles muestran generalmente rangos elásticos reducidos. Los cauchos y los elastómeros termoplásticos tienen una excelente elasticidad (Tres, 2014, pp.15-16).

1.2.1.3 Plasticidad.

La plasticidad es la propiedad de un material a conservar la forma o el tamaño al que se deforma (Figura 26). La plasticidad se produce cuando la tensión va más allá del punto de fluencia en la curva tensión-deformación para cualquier material dado. Esta propiedad del material se puede utilizar en los procesos de conformación en frío para algunos plásticos. Los aumentos en la temperatura afectan en gran medida la plasticidad, especialmente en resinas termoplásticas (Tres, 2014, p.16).

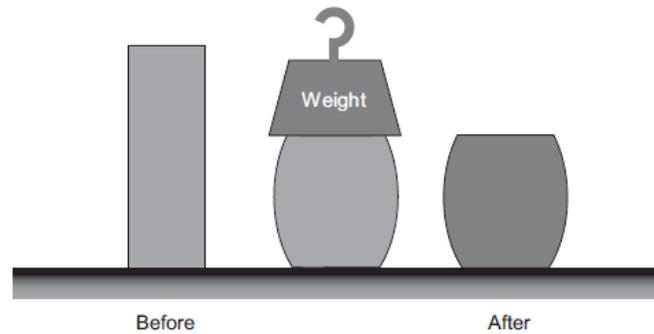


Figura 26. Concepto de plasticidad. (Tres, 2014, p.16)

1.2.1.4 Ductilidad.

La capacidad del material de cambiar de forma, como ser enrollado, o desenrollado sobre una forma sin destruir su integridad se denomina ductilidad (Figura 27). Los polímeros se clasifican como dúctil o frágil a una temperatura dada. La falla típica de los polímeros dúctiles se produce cuando las moléculas se deslizan una a lo largo de la otra. Esto causa gran alargamiento, por lo general con estrangulamiento del área de sección transversal, y la rotura (Tres, 2014, p.16).

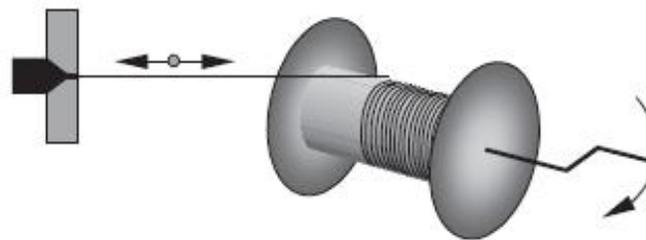


Figura 27. Concepto de ductilidad. (Tres, 2014, p.16).

1.2.1.5 Tenacidad (Dureza).

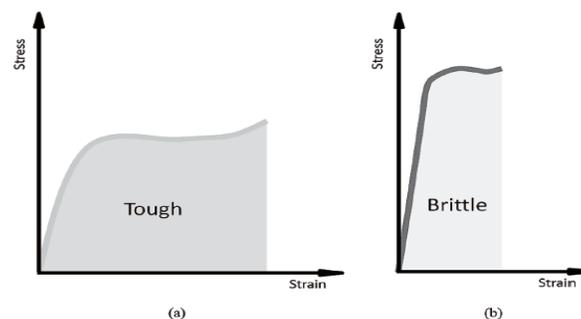


Figura 28. Concepto de tenacidad o dureza: (a) material tenaz; (b) material frágil o quebradizo. (Tres, 2014, p.17)

La tenacidad o dureza es la capacidad de los materiales poliméricos para absorber energía mecánica sin fracturarse. Esto se hace ya sea con la deformación elástica o plástica. La dureza a menudo se mide como el área bajo la curva de tensión-deformación, como en la Figura 28 (Tres, 2014, p.17).

1.2.1.6 Fragilidad.

La fragilidad es la propiedad de los materiales poliméricos a fracturarse fácilmente cuando absorbe energía mecánica (Figura 29). Muchos plásticos reforzados son frágiles y, por tanto, muestran menor capacidad de absorber impactos y propiedades de rigidez más elevados. (Tres, 2014, p.17).

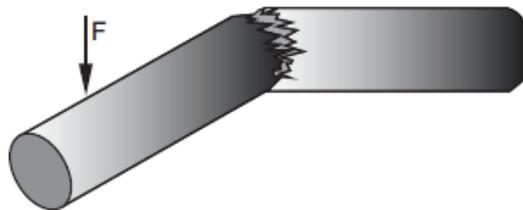


Figura 29. Concepto de fragilidad. (Tres, 2014, p.17).

1.2.1.7 Sensibilidad a la entalla.

La sensibilidad a la entalla es la facilidad de propagación de fisuras a través de un material, de fisuras preexistentes o por generación en esquinas agudas (Figura 30). Las concentraciones de tensiones excesivas (concentradores de esfuerzo) pueden ocurrir como resultado de tres tipos de condiciones: ranuras y agujeros, los cambios en el área de sección transversal provocada por hombros o cambios bruscos de espesor, y diversos métodos de montaje. Para tener en cuenta las zonas de concentración de tensión, se establece un factor de concentración de tensión k .

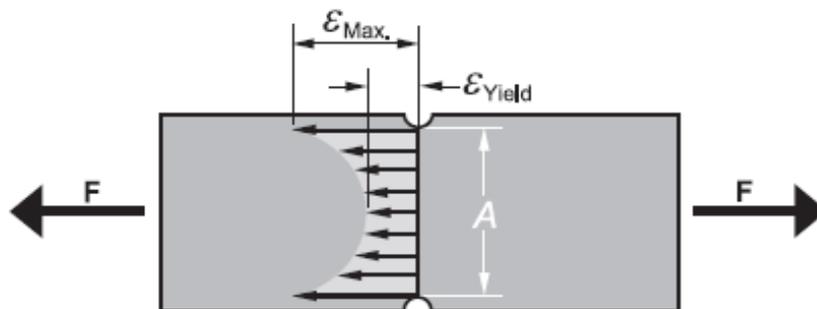


Figura 30. Sensibilidad de muesca creada por ranuras y agujeros (Tres, 2014, p.18).

Por ejemplo, consideremos una placa como se muestra en la Figura 31. En el curso del diseño de una pieza, es necesario determinar el filete ideal entre dos superficies en ángulo recto que nos permitan evitar una esquina aguda. Con el fin de determinar el radio de transición r se deben seguir los siguientes pasos.

Supongamos que D es el espesor de la pieza y d es el espesor de la parte más delgada. Entonces d/D es la relación de los dos espesores. La adecuada curva d/D debe ser seleccionada a partir del gráfico siguiente (Figura 31). Si ninguna está disponible, se establece una nueva d_{ad} por interpolación gráfica, entonces tendremos una d_{ad}/D nueva. A continuación, se selecciona, un radio de empalme r .

A continuación, se calcula la relación r/d .

La relación calculada r/d se encuentra entonces en el eje horizontal (Figura 31). Una línea vertical desde ese punto se intercepta con la curva d/D correspondiente.

A partir de ahí, nos movemos horizontalmente hacia la izquierda para interceptar el eje vertical. Esto nos da el factor de concentración de tensión (k).

El radio de transición da a la parte un nivel de tensión más alto porque el filete facilitará la concentración de tensión que la creada por una esquina aguda. Para calcular el nuevo nivel de estrés, multiplicar k por el nivel de estrés con el que la parte fue diseñada con la esquina aguda.

Con el fin de disminuir los riesgos de falla de una pieza de plástico, no debería haber esquinas afiladas. Un pequeño radio en la unión de la pared nominal y la nervadura es necesario para lograr buenas tolerancias. No tener un radio debilita la unión entre nervios y el resto de la pieza. Además, la falta del radio hace que sea más difícil para el polímero fundido cambiar de dirección de flujo; las costillas o venas de refuerzo en las partes plásticas deben ser más delgadas (un 60%) que la pared normal a la cual está ligada.

El ancho mínimo de un refuerzo está limitado por las preocupaciones de llenado del molde, mientras que el ancho máximo posible está limitado por las características de contracción de la resina seleccionada para la aplicación específica. Mientras que el uso de radios más grandes teóricamente debería reducir la concentración de esfuerzos, la sección de pared más gruesa asociado con las tangencias de los radios puede generar contracción excesiva y aumentar las

tensiones y huecos de contracción, que en realidad afecta negativamente a las tolerancias dimensionales y generar mala calidad superficial de la parte plástica.

Los Factores de concentración de esfuerzos se han determinado para una variedad de diseños, y muchos libros técnicos se ocupan de la resistencia del material y proporcionar estos gráficos.

En Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34 y Figura 35, se muestran algunos de los factores de concentración de esfuerzos más comunes, como las dimensiones funcionales de la pieza cuando esta se carga en tensión, compresión y flexión. Para una parte cuya relación de dimensión no está representada por una curva en el gráfico, esta puede ser generada por interpolación gráfica. Esto determinará el factor k y que esfuerzo máximo se puede aplicar a la pieza.

Cabe señalar que k es siempre mayor que 1. Después de emplear un redondeo de transición, la máxima tensión que la misma parte será capaz de sostener es:

$$\sigma_{max} = k\sigma_{nominal} \quad (1-2)$$

Donde k = es el factor de concentración de tensiones y

$$\sigma_{nominal} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}} = \frac{F}{A} \quad (1-3) \text{ (Tres, 2014, pp.17-19).}$$

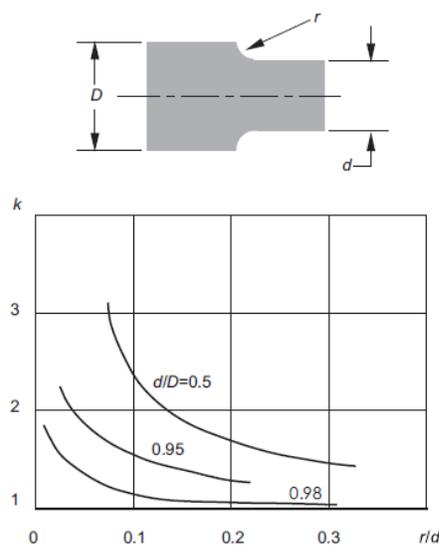


Figura 31. Factor de concentración de esfuerzos, k , para barras planas cargadas en tensión o compresión. (Tres, 2014, p.19)

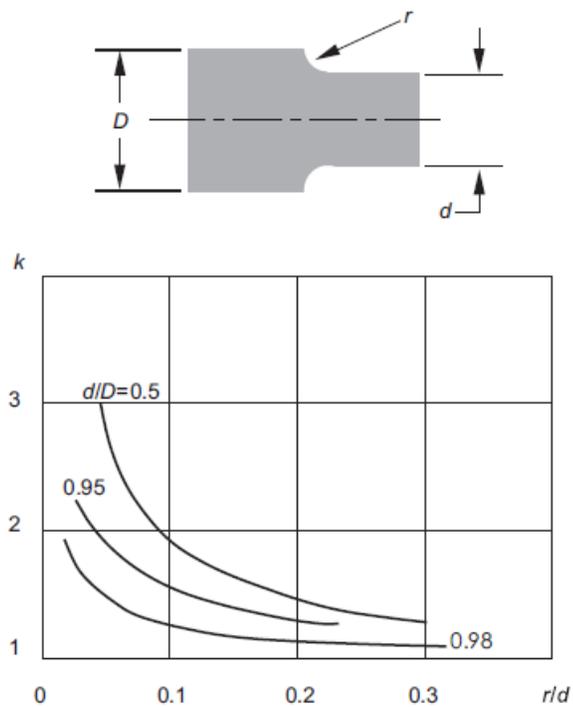


Figura 32. Factor de concentración de esfuerzos, k , para barras planas cargadas en flexión. (Tres, 2014, p.20).

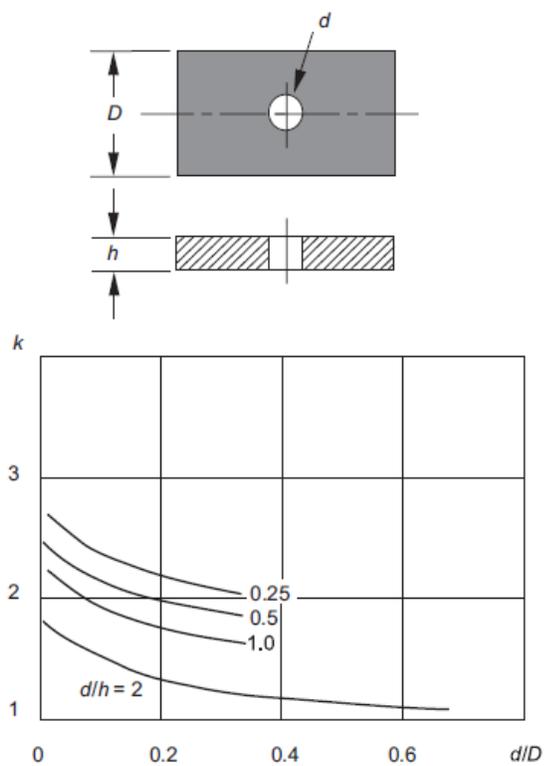


Figura 33. Factor de concentración de esfuerzos, k , para barras planas cargadas en flexión. Tres, 2014, p.20).

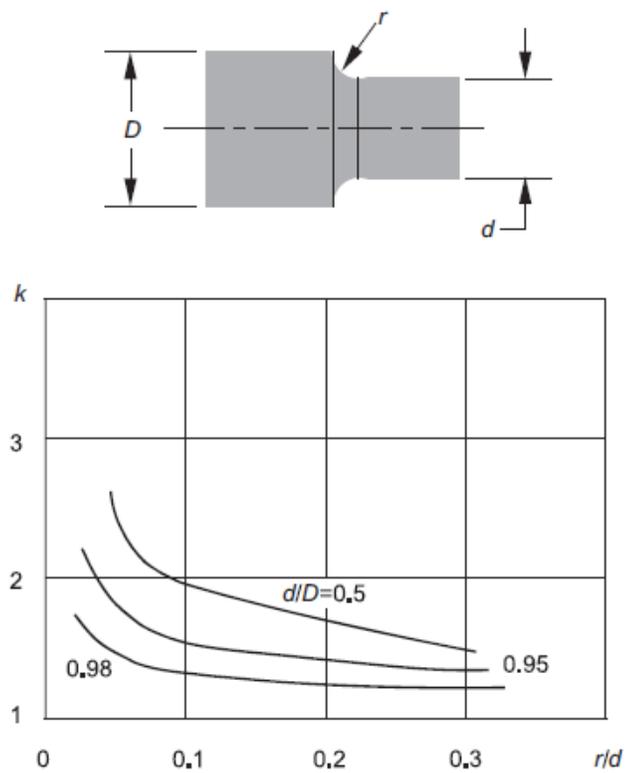


Figura 34. Factor de concentración de esfuerzos, k , para varillas cargadas en tensión o compresión. Tres, 2014, p.21).

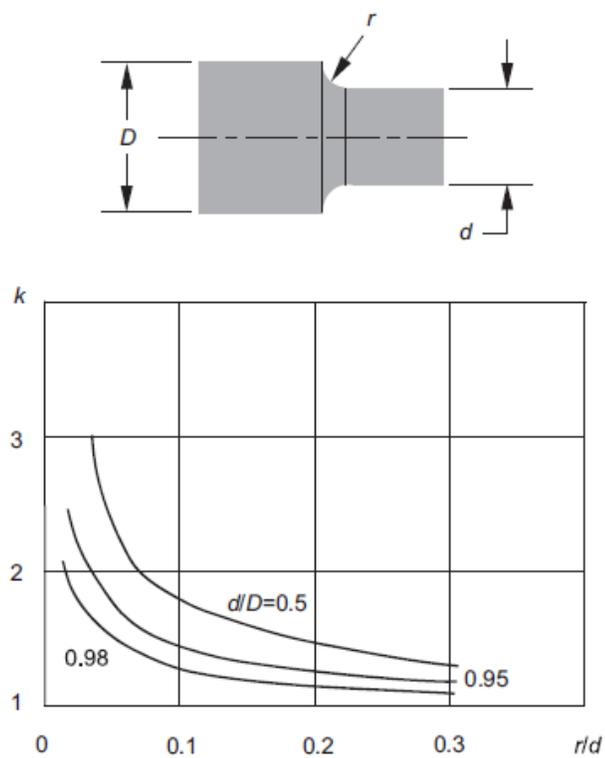


Figura 35. Factor de concentración de esfuerzos, k , para varillas cargadas en flexión. Tres, 2014, p.21).

1.2.1.8 Isotropía.

Un material isotrópico es un material termoplástico o termoestable que tiene las mismas propiedades físicas cuando se miden en cualquier dirección (Figura 36).

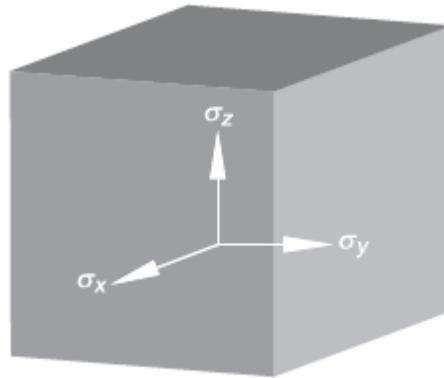


Figura 36. Isotropía. $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$. (Tres, 2014, p.22).

1.2.1.9 Anisotropía.

Las propiedades de un material anisótropo dependen de la dirección en la que se miden (Figura 37). Los plásticos reforzados con un alto grado de orientación de las propiedades en la dirección de los refuerzos de fibra.

Los plásticos extruidos y laminados también tienen diferentes propiedades en las direcciones longitudinal y transversal de la máquina. La madera, que tiene un "grano", es un buen ejemplo de un material anisótropo, que tiene propiedades distintas las tres direcciones (Tres, 2014, p.22).

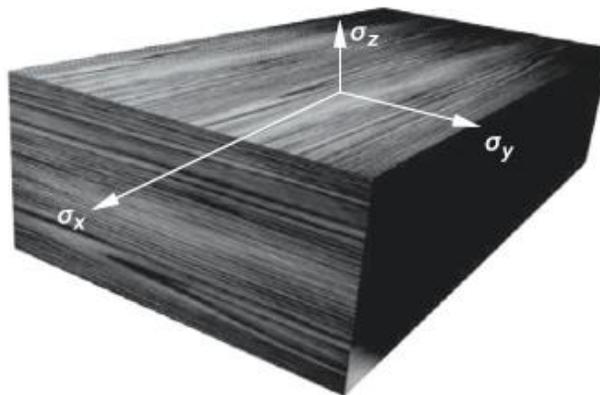


Figura 37. Anisotropía. $\sigma_x \neq \sigma_y \neq \sigma_z$. (Tres, 2014, p.22).

1.2.1.10 Absorción de agua.

El incremento en peso de un material puede representar un porcentaje de absorción de agua, (Figura 38). Los materiales plásticos pueden ser absorbentes (higroscópico) o no absorbentes. La mayoría de los plásticos muestran tendencias higroscópicas en su estado "seco". Ellos absorben el agua por la exposición directa o de vapores de agua en el aire y a una velocidad de absorción específica para cada material. La absorción termina cuando se alcanza el nivel de saturación.

Generalmente, la tasa de absorción de agua se mide cuando el material está expuesto al 50% de humedad relativa del aire (50% RH), y la saturación viene dada por el porcentaje de peso seco de la parte.

La presencia de agua en la estructura del material influye en sus propiedades físicas y eléctricas, así como en su estabilidad dimensional. La humedad absorbida por una resina antes de su procesamiento puede causar una grave degradación de las propiedades, a menos que esta sea eliminada antes, puede generar defectos visuales, tales como manchas superficiales e hidrólisis severa durante el proceso de moldeo (Tres, 2014, pp.22-23).



Figura 38. Absorción de agua. (Tres, 2014, p.23).

1.2.1.11 Contracción de molde.

La contracción del molde es el porcentaje de variación en las dimensiones, con respecto al molde, que presenta una parte plástica, después ser retirada del molde y esta se enfría a temperatura ambiente (Figura 39). La contracción del material comienza en el momento en que el plástico se inyecta en la herramienta, por lo que en un buen diseño de molde de

ingeniería se elegirá la mejor posición de la puerta (gate), el diámetro, el tiempo de ciclo, y las trayectorias de flujo más suaves para evitar deslaminaciones y vacíos.

Con el fin de mejorar el rendimiento térmico y estructural, así como otras propiedades mecánicas y químicas de los polímeros, se usan fibras u otros materiales de relleno para reforzar el material. Las fibras de vidrio tienen una temperatura de fusión superior a 1.500-2.000 °F. Por lo tanto, nunca se derretirán o ablandarán en las condiciones normales o incluso extremas de procesamiento del polímero. La forma de las fibras de vidrio es cilíndrica, tienen dimensiones típicas de 3 mm de longitud y unas pocas micras de diámetro. La fibra de vidrio migrada en una resina puede ser visualizada como una pequeña canoa flotando en un río.

Las fibras de vidrio se alinean a la dirección del flujo de la resina, tal como las canoas, se alinean con la corriente del río. La dirección del flujo define la propiedad de contracción anisotrópica de los polímeros reforzados con vidrio.

Cuanto mayor sea el espesor de la parte es, lo más probable, que las fibras de vidrio tengan una distribución aleatoria en la zona de ese espesor. Típicamente, para un espesor de pared de 6 mm (0,25 in.), las fibras de vidrio alineadas con la dirección del flujo son aproximadamente el 5% o menos, del total. La distribución aleatoria de las fibras de vidrio en las costillas o refuerzos gruesos crea contracción impredecible (a veces también en la deformación), lo que hace casi imposible tener dimensiones predecibles en la pieza.

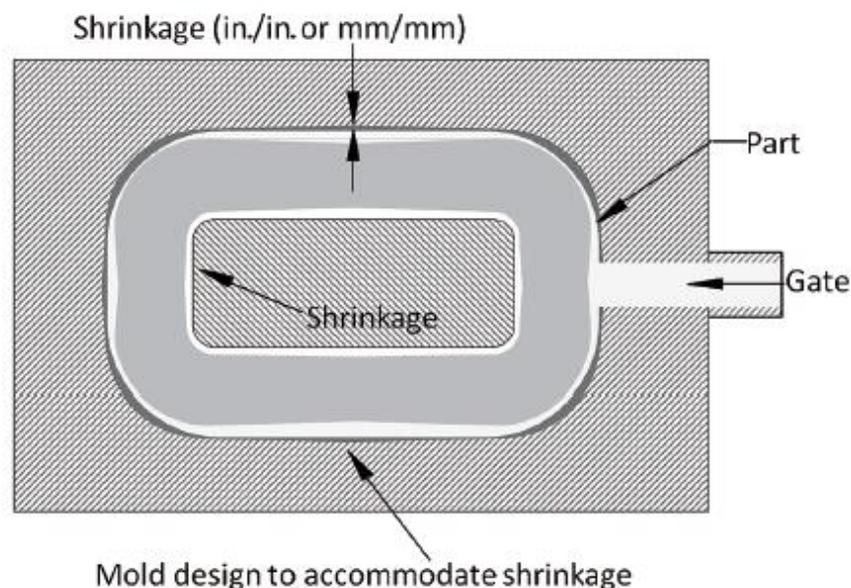


Figura 39. Contracción. (Tres, 2014, p.24).

La contracción Post-moldeo por lo general se completa el momento la pieza terminada se saca del molde y se deja enfriar hasta la temperatura ambiente. Factores como formas complejas de la pieza acabada y diferentes tasas de contracción con respecto a dimensiones de la pieza pueden causar tensión interna que se acumule durante el proceso de enfriamiento. Esto puede causar deformaciones que se produzca. Un proceso de recocido se utiliza a menudo después del moldeo es completa a aliviar el estrés y evitar deformaciones.

Uno de los aspectos más importantes en la consecución de previsibilidad dimensional de las piezas de plástico es el punto de inyección (gate). El gate en el moldeo por inyección, representa un área a través de la cual el polímero fundido alcanza la cavidad del molde. El diseño o configuración de la forma de este tiene un impacto dramático en la calidad, estabilidad dimensional y la repetitividad de una pieza moldeada por inyección.

Como regla general, los gates o puntos de inyección deben ser colocados en la pared o zona más gruesa de la parte plástica a fin de no ser visible para el usuario final, por razones estéticas y debido a un vestigio de entrada que queda en la parte después de retirar el sistema de canal (Tres, 2014, pp.23-24).

1.2.2 Propiedades mecánicas.

1.2.2.1 *Esfuerzo normal.*

En un ensayo estándar de tracción, una barra del material a testear es sujeta axialmente y cargada a tensión (Figura 40). Durante este test, son determinadas las relaciones entre carga, deformación y esfuerzo.

El esfuerzo es la relación entre la carga aplicada al área de la sección transversal inicial expresada en libras por pulgada cuadrada (psi) o mega pascales (1 MPa = 1 N/mm²).

1.2.2.2 *Deformación normal.*

Cuando una probeta de ensayo se somete a una carga aplicada cambia su longitud. Si la longitud inicial de la probeta es L y el cambio en la longitud es ΔL , la deformación producida se define como

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1-4)$$

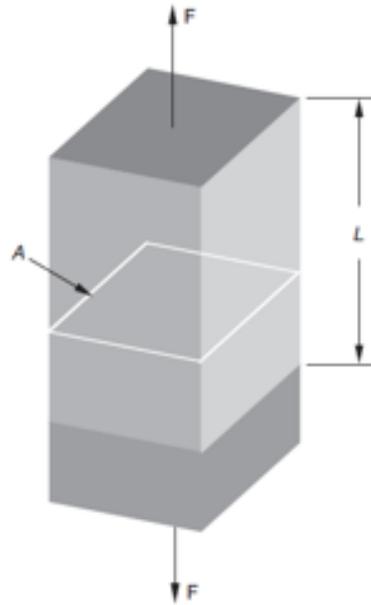


Figura 40. Esfuerzo normal. (Tres, 2014, p.25).

Por lo tanto, la tensión o esfuerzo es una medida de la deformación del material, una relación que es adimensional (Figura 41) (Tres, 2014, p.25-26).

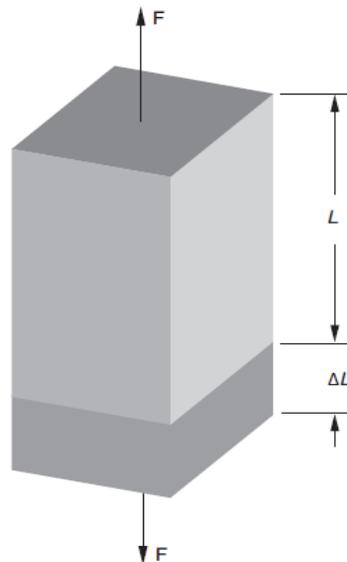


Figura 41. Deformación. (Tres, 2014, p.26).

1.2.2.3 Curva esfuerzo - deformación.

Hemos visto que un material sometido a una carga de esfuerzo o tensión inicial experimenta un cambio en sus dimensiones. La variación de estos dos parámetros es proporcional a la Ley de Hooke que es la declaración de su proporcionalidad.

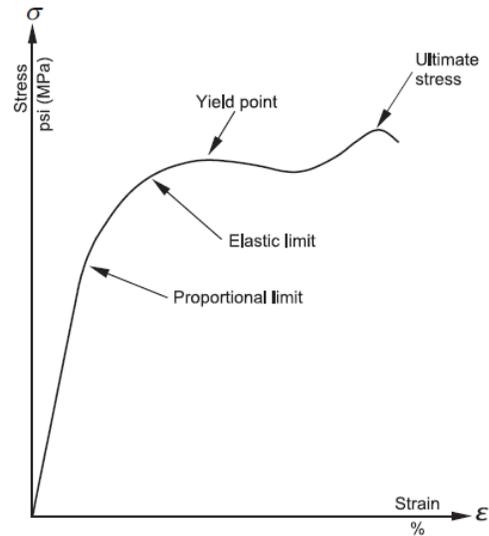


Figura 42. Curva típica esfuerzo – deformación. (Tres, 2014, p.27).

Este valor es constante y se mide en libras por pulgada cuadrada o mega-Pascales y se conoce como módulo de Young. La gráfica de la relación tensión-deformación da una curva $f(\sigma, \epsilon)$ que se denomina la curva de esfuerzo-deformación (Figura 42).

Las curvas de esfuerzo-deformación son útiles para dar una imagen general de la resistencia y rigidez de la resina y permite comparaciones precisas para la selección de materiales. También proporcionan información general sobre la ductilidad y la tenacidad del polímero. En comparación con las curvas de metal, las curvas esfuerzo-deformación de plásticos muestran propiedades viscoelásticas más pronunciados (Figura 43) (Tres, 2014, pp.26-27).

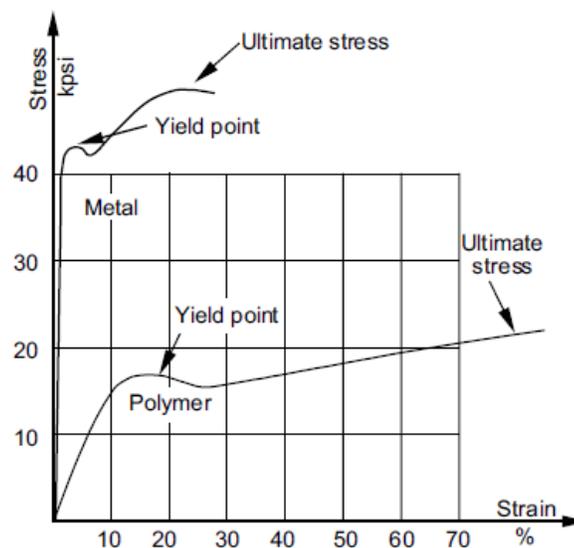


Figura 43. Curva de esfuerzo-deformación, metal vs plástico. (Tres, 2014, p.27).

1.2.3 Fluencia (Creep).

Las piezas de plástico presentan dos propiedades importantes que pueden ocurrir durante la carga a largo plazo: la fluencia y la tensión de relajación.

1.2.3.1 Introducción.

Cuando se aplica una carga constante a una pieza de plástico, se induce una tensión interna. Con el tiempo, el plástico se deforma lentamente para redistribuir la energía interna dentro de la parte. Una prueba que mide este cambio se lleva a cabo mediante la aplicación de una tensión constante en el tiempo. Este flujo relacionado con el tiempo se denomina fluencia.

1.2.3.2 Experimentos de fluencia.

La Figura 44 muestra un experimento de fluencia en el que una probeta de ensayo se carga verticalmente desde un extremo. La longitud original de la barra es L . Cuando un peso se engancha en el extremo libre de la barra, la carga aumentará inmediatamente la longitud en una cantidad expresada como ΔL en el tiempo = 0.

Si la carga se deja aplicada por un tiempo, por ejemplo 1 año o 5 años, este tiempo se denomina tiempo=final, durante este tiempo la probeta de prueba se alargará más. Este nuevo aumento de longitud, que es provocada por el factor tiempo y el peso o carga aplicada y se denomina fluencia (Tres, 2014, p.28).

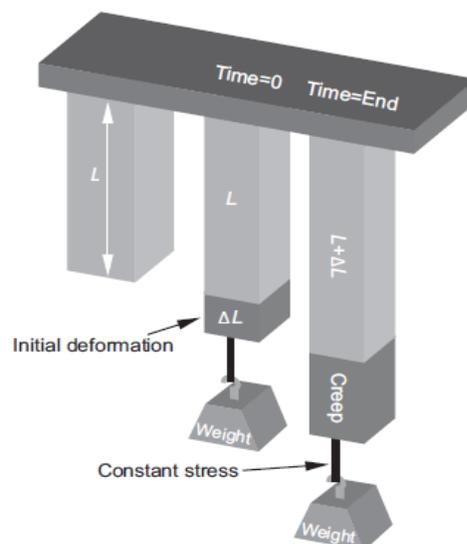


Figura 44. Experimentos de fluencia. (Tres, 2014, p.28).

1.2.3.3 Curvas de fluencia.

Una de las mejores maneras de demostrar propiedades de fluencia es mediante el uso de curvas tensión-deformación isócrona (Figura 45). La mayoría de estas se generan a partir de varias muestras de ensayo, cada una bajo un diferente grado de tensión constante. Después se aplica la carga apropiada, el alargamiento de cada muestra se mide en varios intervalos de tiempo. Los puntos de datos para cada intervalo de tiempo están conectados para crear curvas tensión-deformación isócronas. Debido a que las propiedades del material también son dependientes de la temperatura, esta debe mantenerse constante durante todo el experimento.

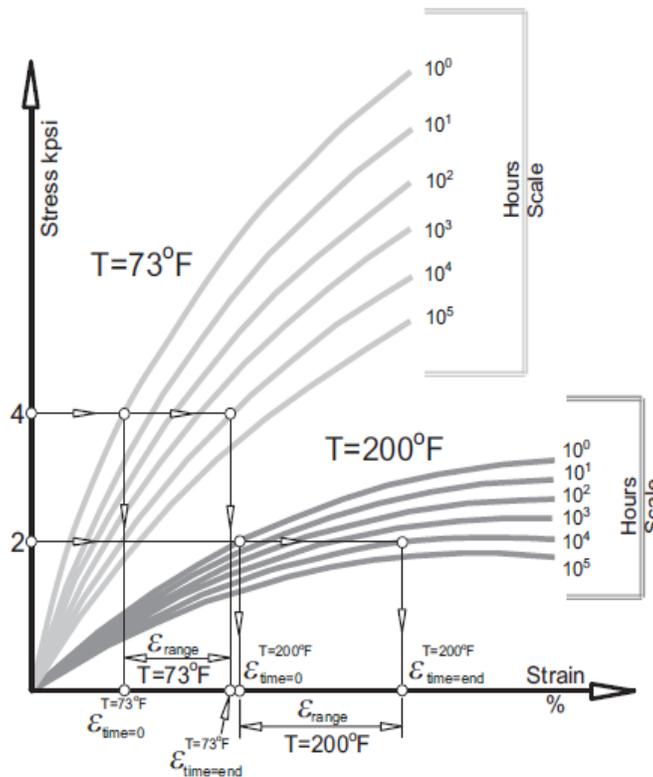


Figura 45. Curvas isócronas de esfuerzo-deformación. (Tres, 2014, p.29).

El Módulo de fluencia, es el módulo de un material a un nivel de esfuerzo y temperatura dados, durante un período de tiempo especificado. El Módulo de fluencia se expresa como:

$$E_C = \frac{\text{Stress}}{\text{Total Strain at time=end}} \quad (1-5)$$

El módulo de fluencia también se denomina módulo aparente. Estas curvas se derivan generalmente de esfuerzos constantes isócronos de las curvas esfuerzo-deformación. Las

curvas son gráficos del módulo de fluencia (aparente) de la resina como una función del tiempo (Figura 46 y Figura 47) (Tres, 2014, p.29).

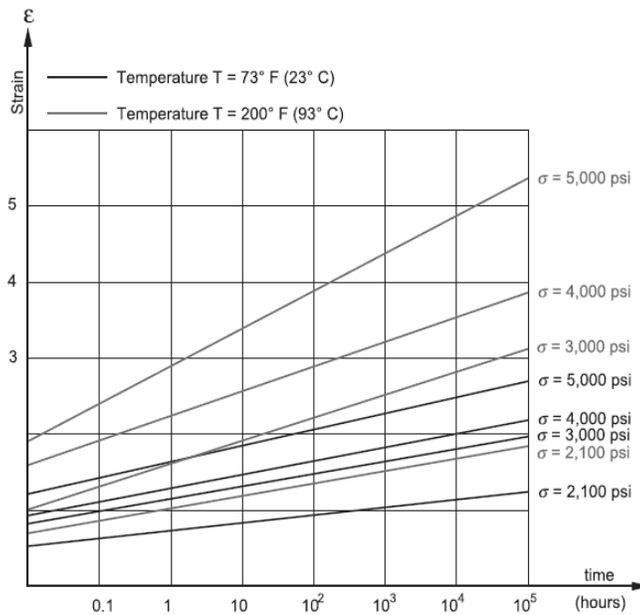


Figura 46. Esfuerzo constante, deformación vs logarítmica del tiempo. (Tres, 2014, p.30).

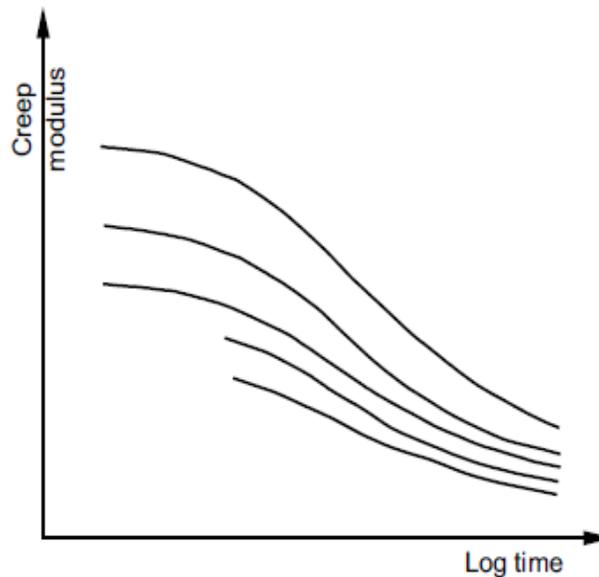


Figura 47. Módulo aparente (fluencia) (Tres, 2014, p.30).

1.2.3.4 Relajación de esfuerzos.

Si la pieza de plástico se somete a una tensión constante (o alargamiento) con el tiempo, la cantidad de tensión necesaria para mantener constante el alargamiento disminuirá. Este fenómeno se conoce como tensión-relajación.

La Figura 48 muestra un experimento de esfuerzo-relajación. Es muy similar al experimento de fluencia, excepto que el peso de la carga varía, disminuyendo con el tiempo como sea necesario para mantener $L + \Delta L$ a una longitud constante. La varianza del peso en un caso idealizado debe ser continua con mediciones instantáneas. Debido a que esto no siempre es posible, las curvas fluencia se pueden utilizar si las curvas tensión-relajación no están disponibles. En la mayoría de los casos, un margen de error de 5-10% es aceptable.

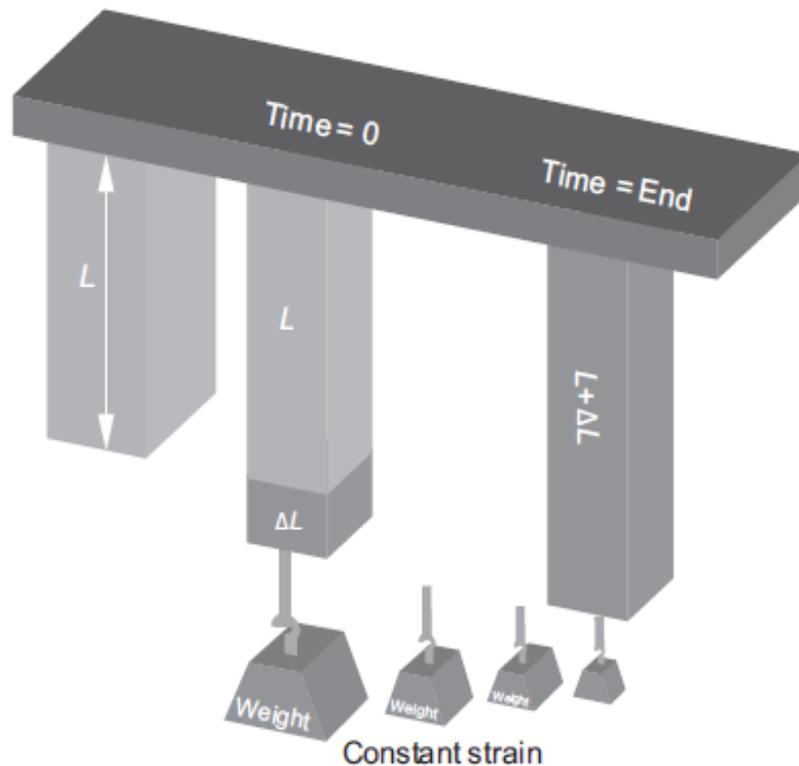


Figura 48. Experimento de esfuerzo-relajación. (Tres, 2014, p.31).

La relajación de la tensión puede ser descrita como una disminución gradual en los niveles de estrés con el tiempo, en virtud de una deformación o tensión constante (Tres, 2014, p.31).

1.2.4 Propiedades impacto.

En el ensayo de impacto Izod (Figura 49), que se utiliza sobre todo en América del Norte, se toma una barra de muestra y se sujeta en una posición vertical casi como una viga en voladizo. El espécimen es golpeado por un péndulo situado a una distancia fija desde la base de sujeción. El péndulo se incrementa para ataques posteriores hasta la ruptura de la barra de prueba. Esta prueba se puede hacer con una barra de muestra con muescas o sin muesca. Cabe señalar que la carga de apriete induce una varianza para esta prueba.

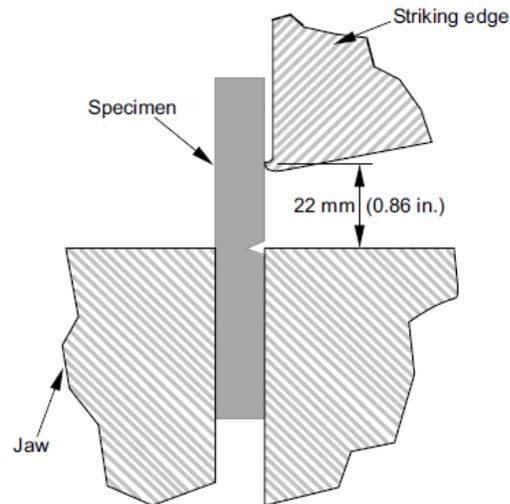


Figura 49. Prueba de impacto Izod. (Tres, 2014, p.32).

El ensayo de impacto Charpy (Figura 50), que se utiliza principalmente en Europa, es similar a la prueba Izod, excepto que la barra se coloca horizontalmente y no está sujeta. Esto significa que no hay variación inducida por la carga de sujeción (Tres, 2014, p.31-32).

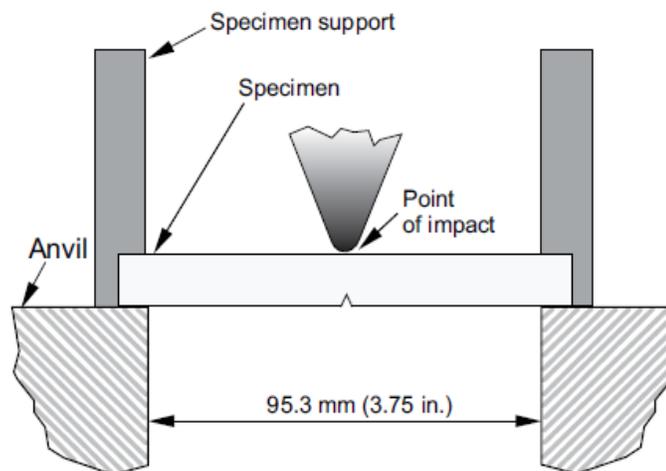


Figura 50. Prueba de impacto Charpy. (Tres, 2014, p.32).

1.2.5 Propiedades térmicas.

Los polímeros son sensibles a los cambios de temperatura. Las propiedades mecánicas, eléctricas, y químicas de un polímero serán todas influenciadas por las variaciones de temperatura. Los efectos de los cambios de temperatura en las propiedades no son siempre coherentes; la alta temperatura puede afectar las propiedades mecánicas de algunos polímeros, bajar mucho los niveles de estrés, pero aumentar de los niveles de deformación.

Las temperaturas más altas también pueden mejorar las propiedades eléctricas de algunos plásticos.

1.2.5.1 Punto de fusión (Melting point).

Los polímeros termoplásticos se vuelven más flexibles con aumentos de temperatura. Las resinas cristalinas presentan un punto de fusión bien definido. La propiedad punto de fusión es importante con respecto a las técnicas de proceso de moldeo o de montaje.

Las resinas amorfas y los polímeros de cristal líquido (LCP) no tienen un punto de fusión definido. Ellos exhiben esta propiedad a través de un rango más amplio de temperaturas.

1.2.5.2 Temperatura de transición vítrea.

La temperatura de transición vítrea es la temperatura a la cual los polímeros exhiben un cambio significativo en las propiedades. Por lo general, los polímeros tienen una respuesta más frágil por debajo de **T_g** (temperatura de transición vítrea). Por encima de ella se comportan con propiedades más elásticas.

1.2.5.3 Temperatura de deflexión bajo carga.

La temperatura de deflexión bajo carga o HDT es la temperatura a la que una barra de ensayo de material se desvía 0,2% mm Cuando se somete a una carga de flexión de 0,45 MPa (66 psi) o 1,8 MPa (264 psi) en una prueba ISO HDT-A. La temperatura de deformación bajo carga indica la máxima temperatura de servicio para componentes con solicitaciones mecánicas y se ocupa esencialmente de los polímeros por su capacidad para soportar cargas bajo calor durante un tiempo corto.

1.2.5.4 Coeficiente de expansión térmica.

Todos los polímeros se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. La mayoría de las resinas muestran un cambio en las dimensiones para una determinada variación de temperatura. El cambio dimensional exhibido por los polímeros es generalmente mayor que la exhibida por los metales para la misma variación de la temperatura.

Los polímeros se expanden y contraen de 5 a 10 veces más que los metales. Este cambio repetido en las dimensiones causa tensiones o esfuerzos internos en la pieza. Se pueden desarrollar concentración de tensiones en la unión de un conjunto que comprende una parte

polimérica y una parte de metal que tienen una superficie de contacto. Esto se puede superar mediante el uso de juntas de elastómero en la interfaz entre los dos componentes. Además, el uso de refuerzos, tales como fibras de vidrio, mica o carbono, en el polímero base puede reducir el coeficiente de dilatación térmica lineal y la contracción del polímero. Esto reducirá en gran medida la diferencia entre la dilatación del plástico y el componente de metal.

Otra forma de compensar las diferencias térmicas del metal y el plástico es atacar estas diferencias en el propio diseño de la pieza, si los requisitos de tolerancia lo permiten.

El coeficiente de expansión lineal o contracción térmica (CLTE) es una propiedad del material. La Tabla 2. muestra la dilatación térmica lineal y la contracción de varios materiales (Tres, 2014, pp.32-34).

1.2.5.5 Conductividad térmica.

La conductividad térmica representa la velocidad a la que el calor se transfiere por conducción a través de una unidad de superficie dada de un material dado, cuando la diferencia de temperatura o gradiente es normal a la superficie de la sección transversal. La cantidad de calor que se desplaza a través de una unidad de volumen de un polímero en un momento dado, cuando el gradiente de temperatura es un grado (1°), se conoce como un coeficiente de conductividad térmica.

Los plásticos tienen un coeficiente de conductividad térmica baja, en comparación con otros materiales, tales como los metales.

Recientemente, a través de nuevos descubrimientos, los polímeros se pueden hacer conductor es térmicos.

1.2.5.6 Influencia térmica en las propiedades mecánicas.

Como hemos visto hasta ahora, la temperatura, o más específicamente una variación de la temperatura, afecta a muchas de las propiedades de un polímero. Desde el punto de vista de ingeniería de diseño mecánico, estamos más interesados en las propiedades mecánicas.

Todos los polímeros exhibirán cambios similares en la curva tensión-deformación cuando se someten a las mismas condiciones de ensayo (Tres, 2014, p.36).

Tabla 2.

Coeficiente de expansión térmica de los metales y Polímeros comunes.

Material	cm/cm ³ C x 10 ⁻⁵	in./in./°F x 10 ⁻⁵
ABS	6.5-9.5	3.6-5.3
Acetal copolymer	6.1-8.5	3.3-4.7
Acetal copolymer 25% GR	2-4.4	1.1-2.4
Acetal homopolymer	10-11.3	5.5-6.2
Acetal homopolymer 20% GR	3.3-8.1	1.8-4.5
Aluminum	2.2	1.2
Epoxy	2-6	1.1-3.3
Brass	1.8	1.0
Bronze	1.8	1.0
Copper	0.9	1.6
Polyamide 6	8-8.3	4.4-4.6
Polyamide 6 GR	1.6-8	0.84-4.4
Polyamide 6/6	8	4.4
Polyamide 6/6 GR	1.5-5.4	0.8-3
Polyamide 6/12 GR	2.1-2.5	1.1-1.3
Polyamide 11	10	5.5
Polyamide 12	-4	3.3-5.5
Polyamide imide	3	1.65
Polyamide imide GR	1.6	0.84
Polycarbonate	6.8	3.8
Polycarbonate GR	2.2	1.2
PBT	6-9.5	3.3-5.3
PBT GR	2.5	1.3
PET	6.5	3.6
PET GR	1.8-3	1-1.65
Low-density polyethylene (LDPE)	10-22	5.5-12.2
High-density polyethylene (HDPE)	5.9-11	3.2-6.1
Polyimide	4.5-5.6	2.5-3.1
Polyphenylene oxide	3.8-7	2.1-3.8
Polyphenylene sulfide	2.7-4.9	1.5-2.7
Polypropylene	8.1-10	-1
Polypropylene GR	2.1-6.2	1.1-3.4
Polystyrene	5-8.3	2.7-4.6
Polysulfone	5.6	3.1
Polyurethane thermoset	-10	5.5-11.1
Polyurethane thermoplastic	3.4	1.8
PVC rigid	5-10	2.7-5.5
PVC flexible	7-25	3.8-13.4
Steel	1.1	0.6
Zinc	3.1	1.7

Tres, 2014, pp.34-35.

En -20°C (Figura 51) la curva de tensión-deformación de un polímero exhibe los valores más altos de resistencia. La alta resistencia se produce porque los enlaces o las fuerzas entre las moléculas del polímero se hacen más fuertes y las moléculas se empaquetan más juntas. El movimiento de las moléculas se hace limitado por el poco espacio entre ellas, lo que reduce los valores de deformación y hacen que el polímero sea más frágil.

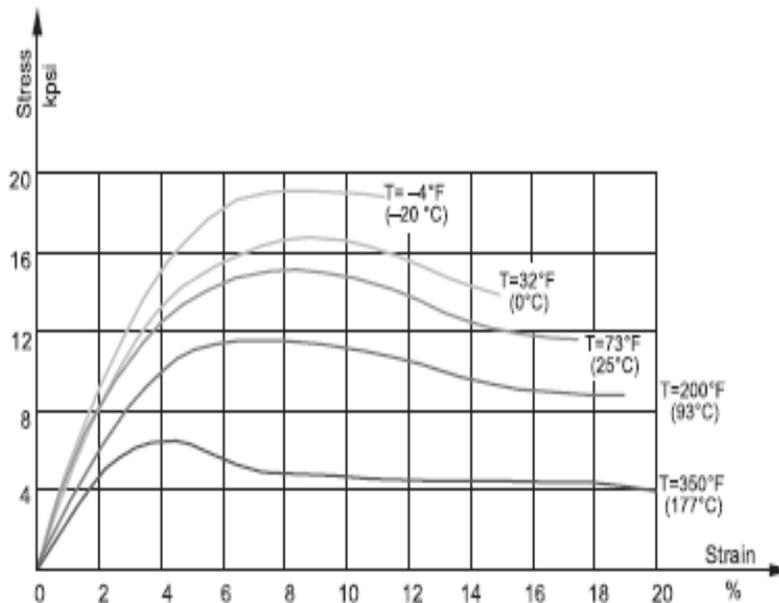


Figura 51. Influencia de la temperatura sobre las curvas esfuerzo-deformación. (Tres, 2014, p.36).

A medida que aumenta la temperatura, el polímero se expande disminuyendo las fuerzas intermoleculares y permitiendo más espacio para el movimiento molecular, como se muestra en las curvas de temperaturas más altas en la Figura 51. El material se vuelve más elástico e incapaz de mantener el mismo valor de la alta tensión que poseía a -20°C (Tres, 2014, pp.36-37).

En la Figura 52 se presentan los valores de algunas de las propiedades de interés, para los materiales plásticos más representativos.

1.2.6 Comparación de las propiedades de los materiales.

Hay una gran diferencia entre las propiedades, métodos de procesamiento y aplicaciones de materiales fabricados por diversas industrias. No hay un solo material que se pueda utilizar en todas las aplicaciones. Cada nueva propiedad desarrollada en un material abre la puerta a nuevas y excepcionales aplicaciones, tecnologías e innovaciones que mejoran la eficiencia y la calidad de vida de los usuarios finales.

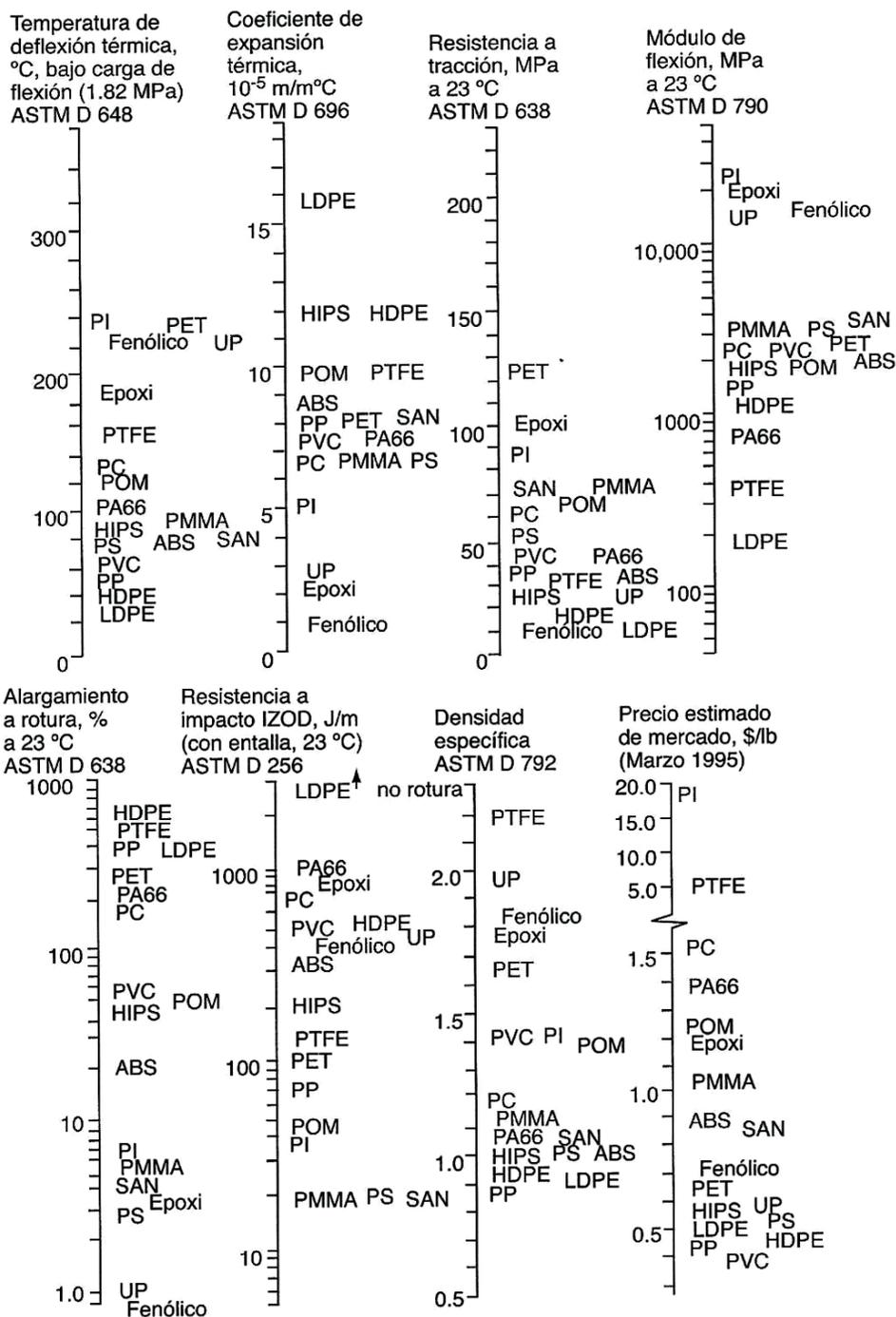


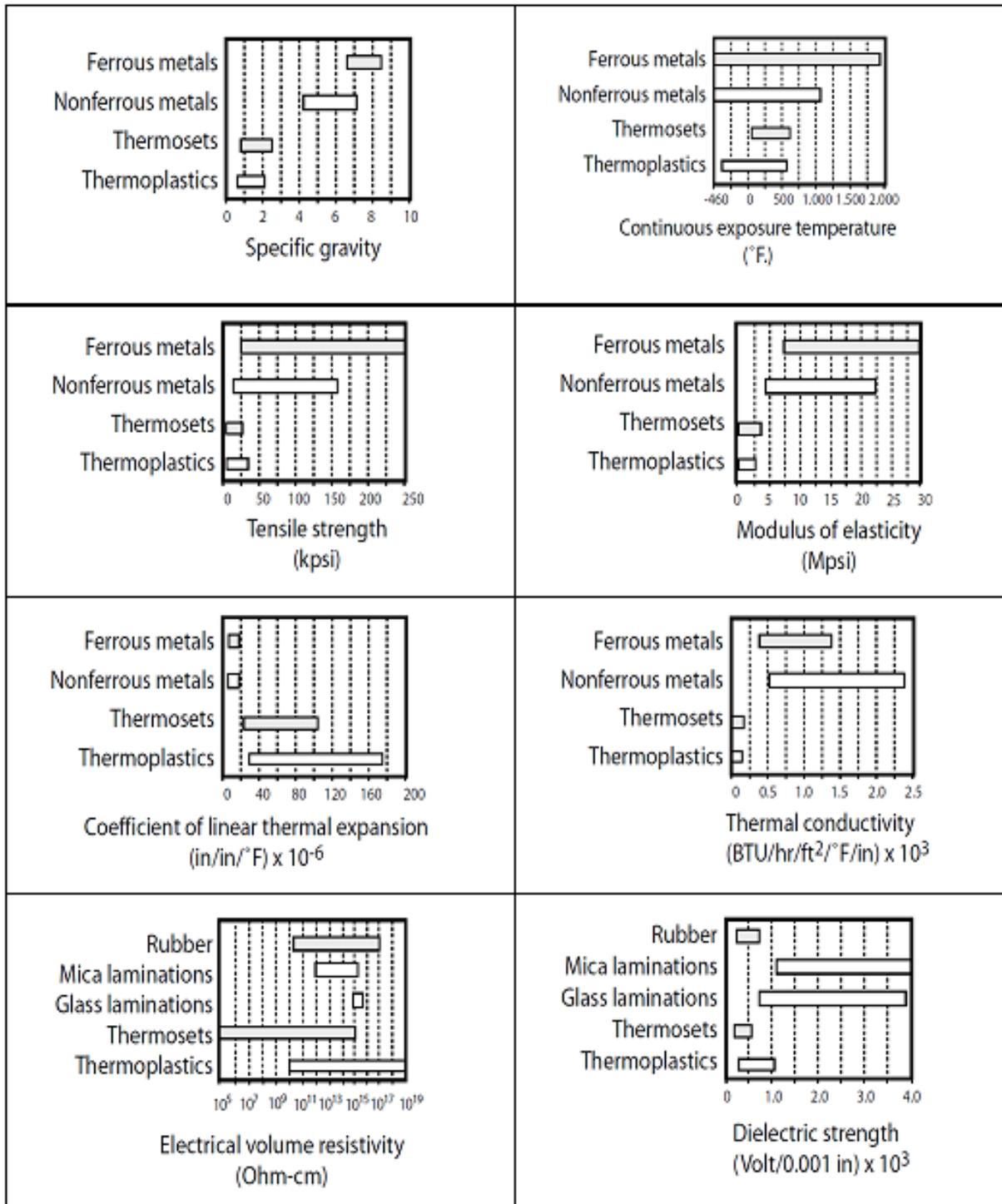
Figura 52. Propiedades de algunos polímeros de uso común. (Osswald & Giménez, 2008).

La comparación de las propiedades es una herramienta eficaz cuando se aplica a los materiales de la misma familia. Para ilustrar el punto de que las propiedades entre las diferentes familias de materiales no se pueden comparar, la

Tabla 3 muestra varios gráficos utilizando diferentes valores de las propiedades genéricas de las diferentes familias de materiales (Campo, 2006).

Tabla 3.

Comparación de las propiedades genéricas de los materiales.



1.3 Reología Básica de los Polímeros Fundidos

La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de materia. Es el estudio de la forma como los materiales responden a un esfuerzo o deformación. De entre la amplia variedad de materiales que son estudiados por los reólogos, los polímeros han sido los más interesantes y complejos. Los polímeros en estado fundido presentan comportamientos pseudoplásticos (shear thinning) y viscoelásticos, y sus propiedades de flujo dependen directamente de la temperatura.

En este apartado se hablará acerca de los fenómenos que son típicos de los polímeros en estado fundido y se mostrarán las propiedades básicas utilizadas para representar el comportamiento del flujo de polímeros. También serán introducidos los conceptos de reometría. Para obtener una mayor información sobre reología de polímeros fundidos, se recomienda consultar las referencias [Menges & Osswald \(2012\)](#) y [Osswald & Rudolph \(2015\)](#). Para más detalles sobre el flujo de polímeros y la simulación de su procesamiento también deben ser revisados las referencias [Tucker III \(1989\)](#) y [Osswald T. \(2010\)](#).

1.3.1 Introducción a la reología.

La viscosidad es el parámetro del material más utilizado en la determinación del comportamiento de los polímeros durante el procesamiento. Debido a que la mayoría de los procesos en los polímeros son gobernados por la velocidad de cizallamiento, la viscosidad de la masa fundida se mide comúnmente utilizando dispositivos de medición de deformación por cizallamiento. Por ejemplo, el flujo de cizalla simple generado en el reómetro de placa deslizante, mostrado en la Figura 53 exhibe un esfuerzo elástico (compresión) definido por

$$\tau_{xy} = \eta(T, \dot{\gamma}) \dot{\gamma}_{xy} \quad (1-6)$$

Donde $\eta(T, \dot{\gamma})$ es la viscosidad y $\dot{\gamma}_{xy}$ la velocidad de cizalla definida por v/h . para el flujo mostrado en la Figura 53, la magnitud de la velocidad del tensor de deformación $\dot{\gamma}$, es $\dot{\gamma}_{xy}$ (Osswald & Giménez, 2008, p.63).

Para algunos procesos de polímeros, tales como moldeo por soplado, termoconformado, y la extrusión de fibras, que están gobernados por la elongación o por una combinación de deformación por elongación y cizallamiento. Además, algunos polímeros fundidos pueden exhibir efectos elásticos significativos durante la deformación (Osswald & Giménez, 2008, p.64).

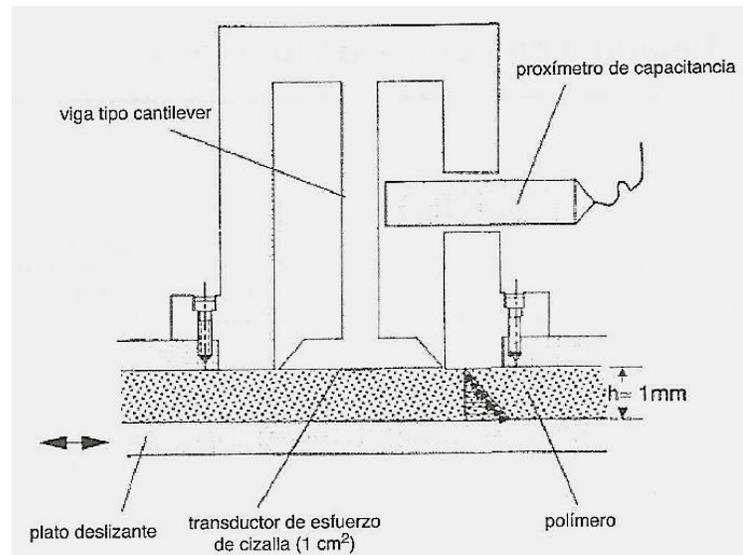


Figura 53. Representación esquemática de un reómetro de plato deslizante. (Osswald & Giménez, 2008, p. 64).

1.3.1.1 Comportamiento pseudoplástico de polímeros (shear thinning).

La mayoría de los polímeros fundidos son fluidos pseudoplásticos. El efecto de fluidificación por cizalla (shear thinning) es la reducción de la viscosidad a altas velocidades de deformación en flujo estacionario, tal y como se muestra en la Figura 54 para un **LDPE**. Este fenómeno ocurre debido a que, a bajas velocidades de deformación, las moléculas tienden a estar estiradas y desenredadas. En estas condiciones las moléculas pueden deslizarse más fácilmente unas sobre otras, disminuyendo así la viscosidad en el polímero fundido (Osswald & Giménez, 2008, p.64).

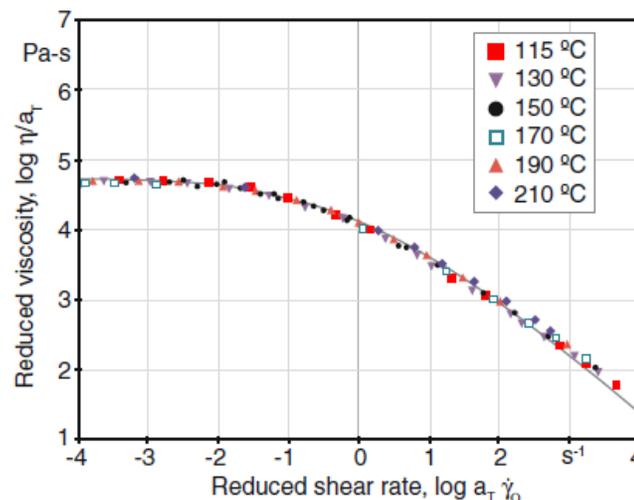


Figura 54. Curva de viscosidad reducida para un LDPE a una temperatura de referencia de 150°C. (Osswald & Giménez, 2008, p.65).

El modelo de la ley de potencia propuesto por Ostwald (1925) y Waale (1923) [citados en Osswald & Giménez, 2008, p.65] es el modelo más simple que representa de forma precisa la región pseudoplástica en la curva de viscosidad frente a la velocidad de deformación, aunque se solapa con la “meseta” de comportamiento newtoniano donde la viscosidad es constante a velocidades de deformación pequeñas. El modelo de la ley de potencias se puede expresar como:

$$\eta = m(T)\dot{\gamma}^{n-1} \quad [1-7]$$

Donde m representa el *índice de consistencia* y n del *índice de fluidez* o *pseudoplasticidad*. El índice de consistencia puede expresarse en función de la variación de la viscosidad con la temperatura, según la ecuación

$$m(T) = m_0 e^{-a(T-T_0)} \quad [1-8]$$

En la Tabla 4 se recogen las constantes de la ley de potencia para algunos termoplásticos comunes, empleadas en las ecuaciones [1.7] y [1.8] (Osswald & Giménez, 2008, p.65).

Tabla 4.

Índices de fluidez, índices de consistencia y constantes dependientes de la temperatura para termoplásticos comunes.

Polímero	m (Pa-s ⁿ)	n	a (1/°C)	T_0 (°C)
Poliestireno	2.80×10^4	0.28	-0.025	170
Polietileno de alta densidad	2.00×10^4	0.41	-0.002	180
Polietileno de baja densidad	6.00×10^3	0.39	-0.013	160
Polipropileno	7.50×10^3	0.38	-0.004	200
Policloruro de vinilo	1.00×10^4	0.26	-0.019	180

Osswald & Giménez, 2008, p.66.

1.3.1.2 Esfuerzos normales en flujo de cizalla.

La tendencia de las moléculas poliméricas a enrollarse formando un ovillo mientras están siendo estiradas en un flujo de cizalla, esta inducida por la aparición de esfuerzos normales en el fluido. Por ejemplo, el flujo de cizalla representado en la

ecuación [1.6] muestra diferencias de esfuerzo normal cuantificables, \mathbf{N}_1 y \mathbf{N}_2 , que se denominan diferencia de primer y segundo esfuerzo normal, respectivamente. Las diferencias del primer y segundo esfuerzo normal dependen del material y se definen como:

$$N_1 = \tau_{xx} - \tau_{yy} = -\Psi_1(\dot{\gamma}, T)\dot{\gamma}_{xy}^2 \quad [1-9]$$

$$N_2 = \tau_{yy} - \tau_{zz} = -\Psi_2(\dot{\gamma}, T)\dot{\gamma}_{xy}^2 \quad [1-10]$$

Las funciones del material, Ψ_1 y Ψ_2 , se denominan coeficientes de esfuerzo normal primario y secundario, y son también funciones de la magnitud del tensor de velocidad de deformación y de la velocidad. Las diferencias del primer y segundo esfuerzo normal de deformación no cambian de signo cuando varía la dirección de la velocidad de deformación. Esto se observa en las ecuaciones [1.9] y [1.10]. La Figura 55 muestra el coeficiente del primer esfuerzo normal para el **LDPE** fundido de la [Figura 55] a una temperatura de referencia de 150°C. la diferencia del segundo esfuerzo normal resulta más difícil de medir y a menudo se suele aproximar mediante la expresión

$$\Psi_2(\dot{\gamma}) \approx -0.1\Psi_1(\dot{\gamma}) \quad [1-11]$$

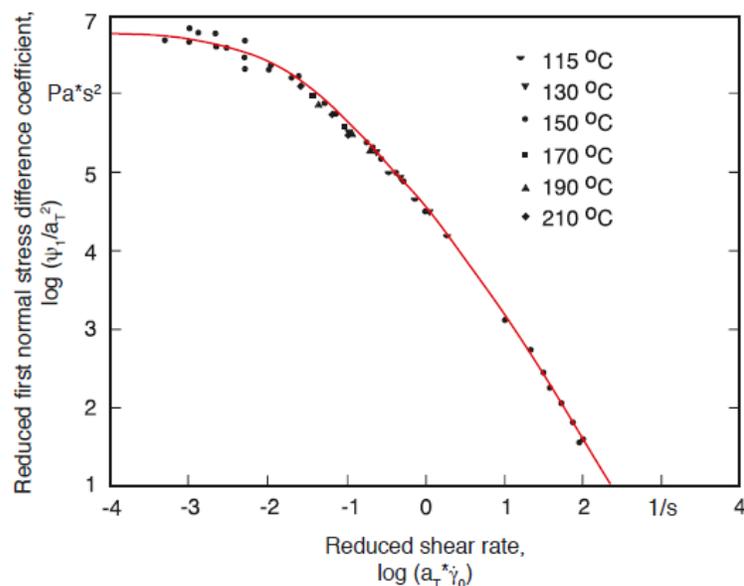


Figura 55. Coeficiente del primer esfuerzo normal para un LDPE fundido a una temperatura de referencia de 150°C. (Osswald & Giménez, 2008, p.71)

Las diferencias de esfuerzo normal juegan un papel importante durante el procesado. Por ejemplo, la diferencia del primer esfuerzo normal es responsable en parte del hinchamiento del material extruido (extrudate swell) a la salida del cabezal de extrusión [Figura 56]. Las diferencias del segundo esfuerzo normal ayudan a disminuir la excentricidad que se produce en un cable a la salida del cabezal, durante el proceso de recubrimiento de cables (Osswald & Giménez, 2008, pp.70-71).

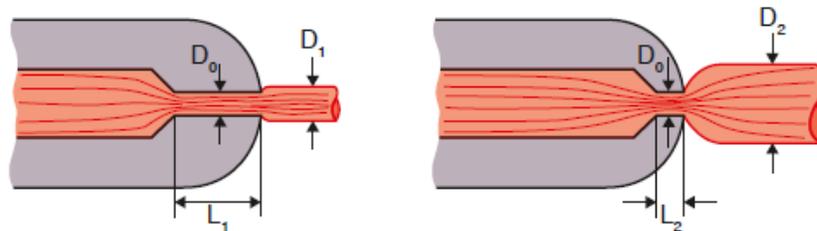


Figura 56. Representación esquemática del hinchamiento del material durante la extrusión. (Osswald & Giménez, 2008, p.71)

1.3.1.3 Numero de Deborah.

Un parámetro útil para estimar los efectos elásticos que tienen lugar durante el flujo es el número de Deborah:

$$D_e = \frac{\lambda}{t_p} \quad [1-12]$$

Donde λ es el tiempo de relajación del polímero y t_p es el tiempo característico del proceso. El tiempo característico del proceso puede definirse por la relación entre las dimensiones características del cabezal y la velocidad media a través del cabezal. Un número de Deborah igual a cero representa un fluido viscoso y un número de Deborah ∞ indica un sólido elástico. A medida que el número de Deborah excede de uno, el polímero no tiene suficiente tiempo para relajarse durante el proceso y se producen inestabilidades de flujo como *hinchamiento del material extruido*, *piel de tiburón (shark skin)*, o incluso *fractura del fundido (melt fracture)*.

Aunque muchos factores influyen en el hinchamiento o reducción de la sección transversal del material extruido, los efectos de los esfuerzos normales y de “memoria” del fluido son los más significativos. Sin embargo, también juegan un papel importante los cambios bruscos en las condiciones de contorno, tales como el punto de separación del extruido del cabezal. En la práctica, la contribución del factor de memoria del fluido al hinchamiento que se produce a la salida del cabezal puede

reducirse mediante el aumento de la longitud de la boquilla. Este efecto se muestra de forma esquemática en la [Figura 57]. Una boquilla de mayor longitud separa el polímero del distribuidor lo suficiente como para permitir “olvidar” su forma anterior.

En el material extruido pueden también aparecer “ondas” como resultado de la aplicación de altas velocidades durante la extrusión, que impiden que el polímero pueda relajar tensiones. Este fenómeno se denomina generalmente “piel de tiburón” y se muestra en la [Figura 57 A] (...) para HDPE. Los polímeros pueden extruirse a velocidades tan elevadas que llega a producirse una separación intermitente entre el fundido y las paredes internas del cabezal, tal y como se puede observar en la [Figura 57 B]. A este fenómeno se le denomina *deslizamiento-adhesión* o “*spurt flow*” y se atribuye a esfuerzos elevados de cizalla entre el polímero y la pared del cabezal. Este fenómeno ocurre cuando el esfuerzo de cizalla está cerca al valor crítico de 0.1 MPa (...). Cuando la velocidad supera este valor se obtiene un material extruido con geometría helicoidal, tal y como se muestra en la [Figura 57 C] para un polipropileno extruido. En casos excepcionales, las velocidades son tan elevadas que se desarrolla una geometría caótica, como la que se muestra en la Figura 57 D]. Este fenómeno se denomina *fractura del fundido*. La piel de tiburón o *Shark skin* no se da habitualmente, y el *spurt flow* se ha visto que ocurre solamente en polímeros lineales (Osswald & Giménez, 2008, pp.72-73).

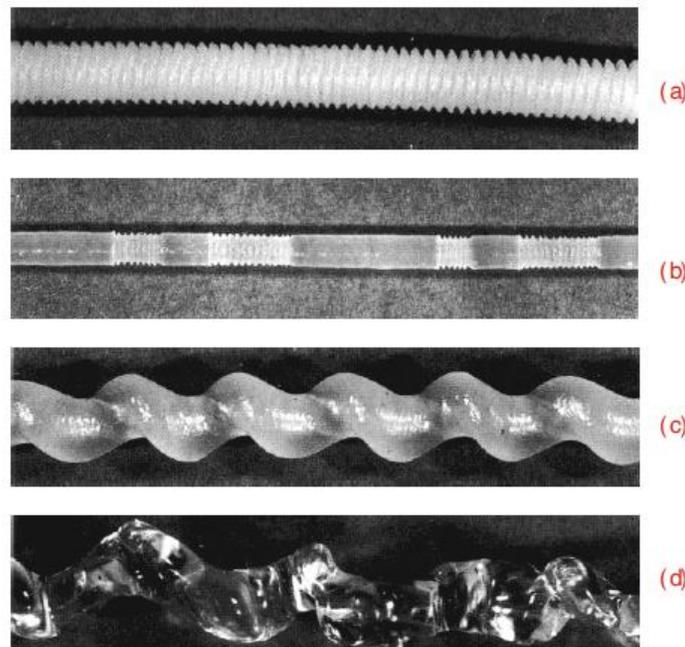


Figura 57. Varias formas obtenidas en polímeros extruidos bajo fractura del fundido. (Osswald & Giménez, 2008, p.73)

1.3.1.4 Reología del curado de termoestables.

El curado de un polímero termo estable tiene una cinética o grado de conversión que incrementa conforme aumenta el peso molecular del polímero reactivo. Para una resina de viniléster cuya cinética de curado se muestra en la [Figura 58]. La viscosidad varía según se observa en la [Figura 59]. Por ello, un modelo completo para la viscosidad de un polímero reactivo debería incorporar los efectos de la velocidad de deformación $\dot{\gamma}$, de la temperatura T , y del grado de curado, c , de la forma.

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, T, c) \quad [1-13]$$

No hay modelos generalizados que incluyan todas estas variables para polímeros termoestables. Sin embargo, se ha realizado un profundo estudio sobre la viscosidad en poliuretanos, empleados en los procesos de moldeo por inyección reactiva. De esta forma, se ha podido expresar la viscosidad de estos polímeros reactivos mediante un modelo empírico basado en la temperatura y el grado de curado, según la ecuación

$$\eta = \eta_0 e^{E/RT} \left(\frac{c_g}{c_g - c} \right)^{c_1 - c c_2} \quad (1-14)$$

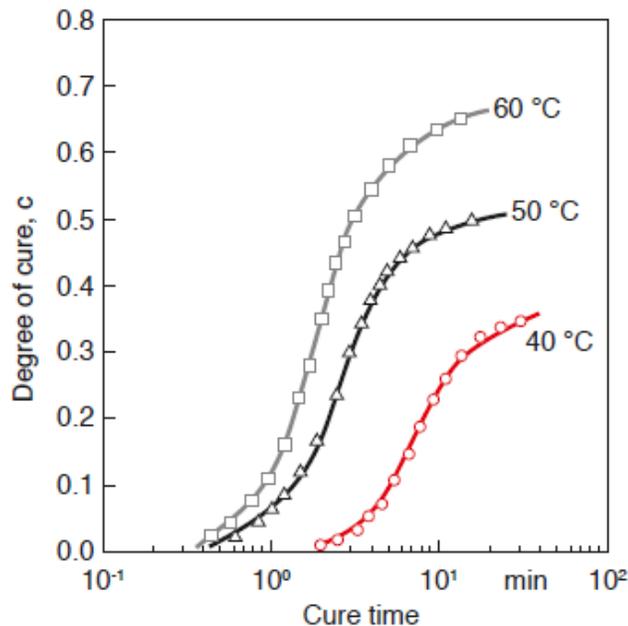


Figura 58. Grado de curado en función del tiempo para una resina de viniléster sometida a diferentes temperaturas isotermas de curado. (Osswald & Giménez, 2008, p.75).

Donde E es la energía de activación del polímero, R la constante de los gases ideales, T la temperatura, c_g el punto de gel, c el grado de curado, y c_1 y c_2 son constantes que se ajustan a los datos experimentales. El punto de gel es el grado de curado cuando el peso molecular tiende a infinito o cuando las moléculas se encuentran interconectadas (Osswald & Giménez, 2008, p.74).

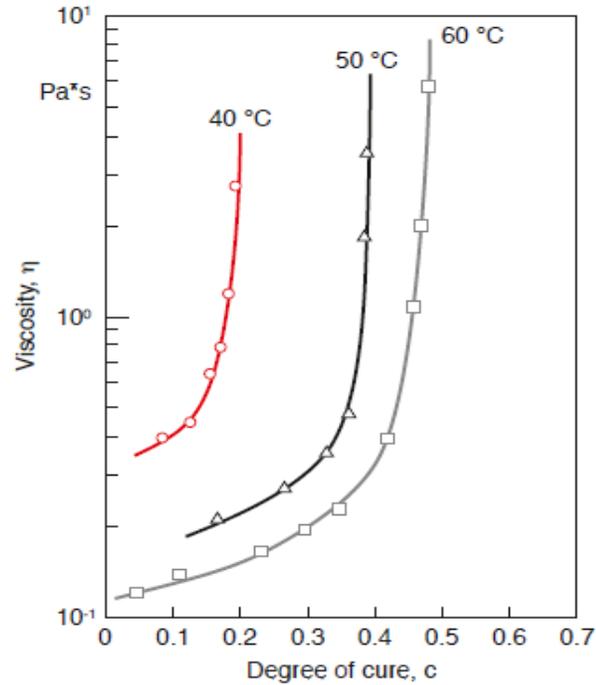


Figura 59. Viscosidad en función del grado de curado para una resina de viniléster sometida a diferentes temperaturas isotermales de curado. (Osswald & Giménez, 200, p.75)

1.3.1.5 Reología en suspensiones.

La dispersión de partículas en un material, como es el caso de los polímeros reforzados o cargados, tiene un marcado efecto sobre las propiedades de la pieza, así como sobre la viscosidad del material durante su procesado. El modelo que mejor se ajusta a los valores experimentales es el propuesto por Guth (Guth, 1936, citado en Osswald & Giménez, 2008, p.76):

$$\frac{\eta_f}{\eta_0} = 1 + 2.5\phi + 14.1\phi^2 \quad [1-15]$$

En la [Figura 60] se comparan los valores obtenidos experimentalmente con el ajuste teórico realizado a partir de la ecuación de Guth. Los ensayos se realizaron sobre el polietileno y poliestireno cargados con esferas de vidrio de diámetros entre 36 μm y

99.8 μm . El modelo se ajusta correctamente a los valores experimentales hasta fracciones volumétricas del 30% (Osswald & Giménez, 2008, p.76).

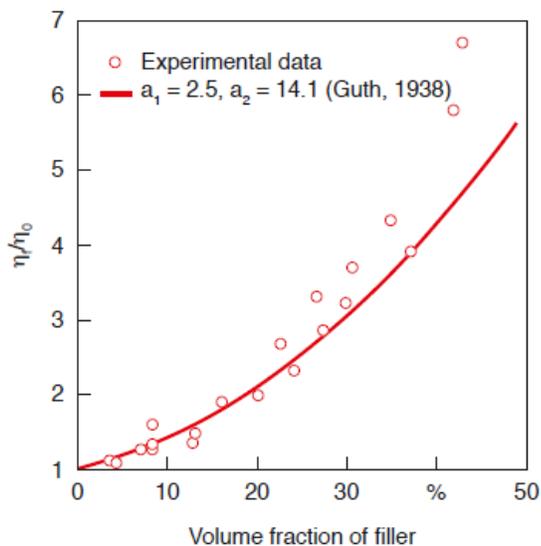


Figura 60. Incremento de la viscosidad en función de la fracción volumétrica de carga para un poliestireno y un LDPE. (Osswald & Giménez, 2008, p.76).

1.3.1.6 Modelos de flujo viscoelástico.

El concepto de flujo viscoelástico se ha tratado para el caso particular de viscoelasticidad lineal. Sin embargo, el procesado de polímeros lleva asociada la aplicación de deformaciones elevadas sobre el material, siendo necesario la utilización de modelos de flujo viscoelástico no lineales. En general, se dispone de dos modelos tipo, el modelo diferencial y el modelo integral. (Osswald & Rudolph, 2008, p.76).

Para profundizar en estos modelos puede consultarse en el libro de referencia ([Osswald & Rudolph, 2008](#)).

1.3.2 Reometría.

En la industria hay varias maneras de analizar cualitativa y cuantitativamente las propiedades de una masa fundida de polímero. Las técnicas varían desde un simple análisis para comprobar la consistencia del material en ciertas condiciones, a las mediciones más complejas para evaluar la viscosidad y diferencias de esfuerzo normal. Esta sección incluye tres de tales técnicas para dar al lector una idea general de las técnicas de medición que pueden emplearse (Menges & Osswald, 2012, p.138).

1.3.2.1 Índice de fluidez en fundido.

El medidor del índice de fluidez es de uso frecuente en la industria para caracterizar un polímero fundido y como un medio sencillo y rápido de control de calidad. Se necesita un solo punto de medición usando condiciones de ensayo normalizadas para cada clase de polímero sobre una extrusora tipo pistón o reómetro de extrusión, como se muestra en la Figura 61. El procedimiento estándar para el ensayo de la velocidad de flujo de termoplásticos usando un reómetro de extrusión se describe en el ensayo ASTM D1238, (ASTM, 1994, citado en Menges & Osswald, 2012). Durante la prueba, una muestra se calienta en el barril y se extruye mediante un pequeño cabezal cilíndrico utilizando un pistón accionado por un peso. El peso del polímero en gramos extruidos durante la prueba de 10 minutos es el índice de fluidez en fundido (MFI) del polímero (Menges & Osswald, 2012, p.139).

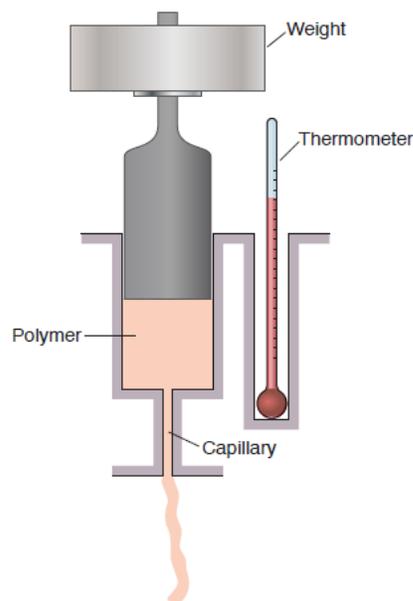


Figura 61. Diagrama esquemático de un reómetro de extrusión utilizado para medir índice de fluidez de un fundido. (Menges & Osswald, 2012, p.139).

1.3.2.2 Viscosímetro capilar.

El dispositivo más común y simple para la medición de la viscosidad es el viscosímetro o reómetro capilar. Su principal componente es un tubo recto o capilar, y se usó primero para medir la viscosidad del agua por Hagen (1839) y Poiseuille (1840) (citados en Menges & Osswald, 2012, p. 139). Un reómetro capilar tiene un flujo impulsado por la presión para la cual el gradiente de velocidad o velocidad de deformación y también la velocidad de cizallamiento será máxima a la pared y cero en el centro del flujo, por lo que es un flujo no homogéneo.

Dado que los reómetros accionados por presión emplean flujos no homogéneos, sólo pueden medir las funciones de corte constantes tales como la viscosidad $\eta(\dot{\gamma})$. Sin embargo, son ampliamente utilizados debido a que son relativamente baratos y fáciles de manejar. A pesar de su simplicidad, los viscosímetros capilares con capilar largo proporcionan los datos de viscosidad más precisos disponibles. Otra ventaja importante es que el viscosímetro capilar no tiene superficies libres en la región de la prueba, a diferencia de otros tipos de reómetros, como el reómetro de cono y plato, que será analizado más adelante. Cuando se mide la viscosidad en función de la velocidad de deformación de la masa fundida de polímero, los reómetros capilares pueden ser el único método satisfactorio de obtener dichos datos a velocidades de cizallamiento mayores a 10 s^{-1} . Esto es importante para los procesos con mayores tasas de deformación, tales como mezclado, extrusión y moldeo por inyección. Debido a la simplicidad de su diseño y a que sólo necesita una carga de presión en su entrada, los reómetros capilares pueden ser fácilmente incorporados al final de una extrusora de husillo o de tipo pistón para mediciones en línea. Esto hace del viscosímetro capilar una herramienta eficiente para la industria.

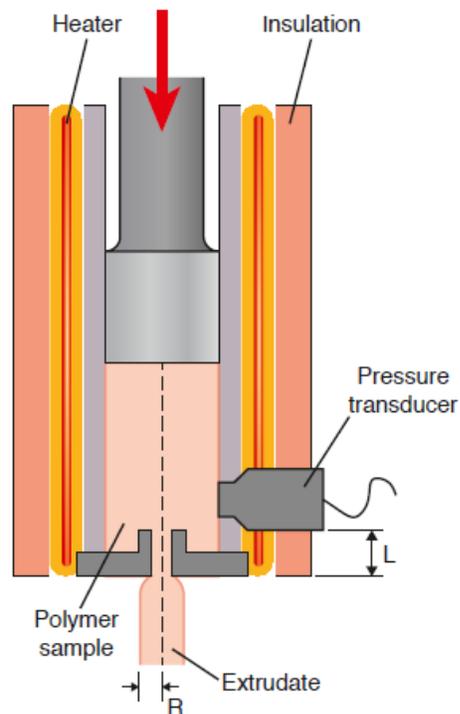


Figura 62. Diagrama esquemático de un viscosímetro capilar. (Menges & Osswald, 2012, p.141).

Las características básicas del reómetro capilar se muestran en la Figura 62. Un capilar de radio R y longitud L Figura 63 está conectado a la parte inferior de un depósito. La caída de presión y velocidad de flujo a través de este tubo se utilizan para determinar la viscosidad.

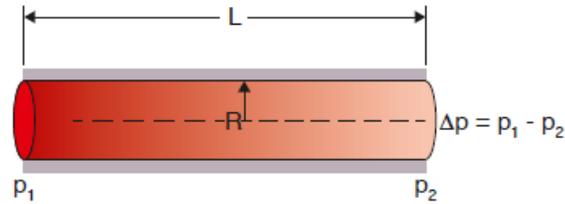


Figura 63. Diagrama esquemático de flujo de presión a través de un tubo.

Para derivar la relación de viscosidad, se hacen las siguientes suposiciones:

- sin velocidad en las direcciones r y θ (Figura 63),
- El polímero es incompresible, y
- plenamente desarrollado, constante, isotérmico, flujo laminar.

El viscosímetro capilar puede ser modelado usando el componente z de la ecuación de movimiento en terminos del esfuerzo τ , así

$$0 = \frac{dp}{dz} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r\tau_{rz}) \quad (1-16)$$

Donde

$$\frac{dp}{dz} = \frac{p_0 - p_L}{L} \quad (1-17)$$

Integrando en términos del esfuerzo de cizallamiento se obtiene:

$$\tau_{rz} = \frac{(p_0 - p_L)r}{2L} + \frac{C_1}{r} \quad (1-18)$$

La constante C_1 se lleva a cero, puesto que el esfuerzo no puede ser infinito en el eje del cilindro.

1.3.2.2.1 Cálculo de la viscosidad usando las ecuaciones Bagley y Weissenberg-Rabinowitsch

En la pared el esfuerzo de cizalla será:

$$\tau_{r=w} = \tau_w = \frac{R}{2} \frac{(p_0 - p_L)}{L} = \frac{R}{2} \frac{\Delta p}{L} \quad (1-19)$$

Cuando se calcula la viscosidad con los datos medidos usando un reómetro capilar, el esfuerzo de cizalladura en la pared del capilar tiene que corregirse como lo propuso Bagley debido a los efectos de la entrada. Además, debido a que la forma del perfil de velocidad se afecta por el comportamiento cizallante adelgazante del polímero, la velocidad de cizalladura en la pared se calcula usando la corrección de Weissenberg-Rabinowitsch (Bagley, 1957)

Ecuación 1.19 requiere que el capilar sea lo suficientemente largo para asegurar un flujo totalmente desarrollado donde los efectos finales sean insignificantes. Sin embargo, debido a los efectos a la entrada, el perfil de presiones obtenido a lo largo del capilar muestra una ligera curvatura. El efecto se muestra esquemáticamente en la Figura 64 (Dealy, 1982).

El emplea la corrección final e así:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \frac{(p_0 - p_L)}{(L/R) + e} \quad (1-20)$$

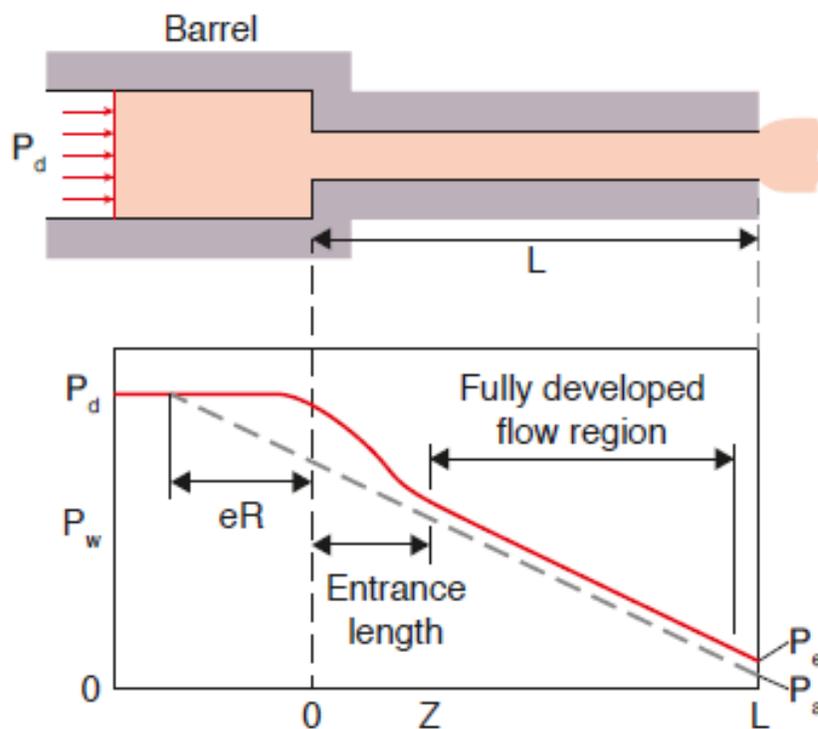


Figura 64. Diagrama esquemático de flujo de presión a través de un tubo. (Menges & Osswald, 2012, p.141).

El factor de corrección a una velocidad de cizallamiento específica se puede encontrar mediante el trazado de la caída de presión para varias relaciones de L/D del capilar, tal y como se muestra en la Figura 65 (Dealy, 1982, citado en Menges & Osswald, 2012, p.141).

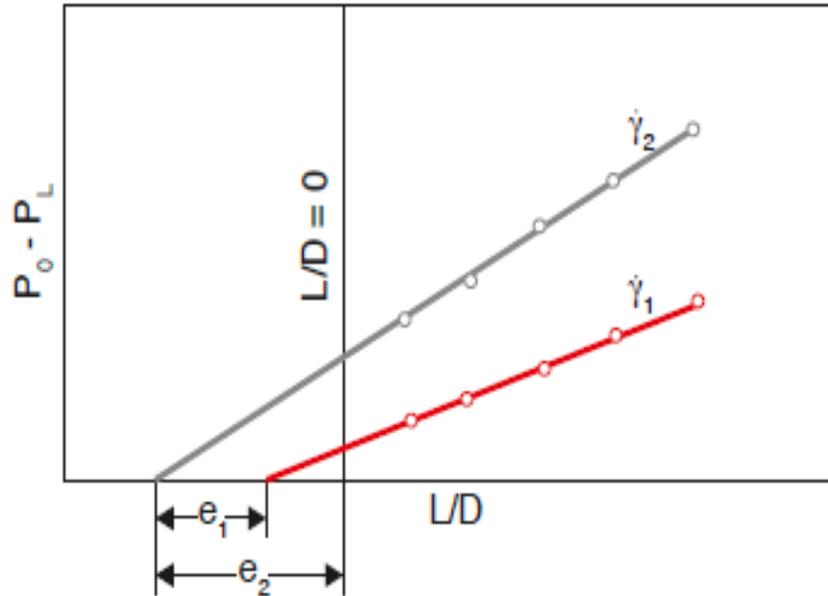


Figura 65. Representación de Bagley para dos velocidades de cizalla. (Menges & Osswald, 2012, p.142).

La ecuación para el esfuerzo de cizalla se puede expresar como

$$\tau_{rz} = \frac{r}{R} \tau_w \quad (1-21)$$

Para obtener la velocidad de cizalla en la pared puede emplearse la ecuación de Weissenberg-Rabinowitsch (Rabinowitsch, 1929, citado en Menges & Osswald, 2012, p.141).

$$\dot{\gamma}_w = \frac{1}{4} \dot{\gamma}_{aw} \left(3 + \frac{d(\ln Q)}{d(\ln \tau)} \right) \quad (1-22)$$

Donde, $\dot{\gamma}_{aw}$ es la velocidad de cizalla aparente o newtoniana en la pared y viene dada por

$$\tau_{aw} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (1-23)$$

Así, la velocidad de cizalla y el esfuerzo de cizalla en la pared son ahora conocidas. Por tanto, haciendo uso de los valores medidos de la velocidad de flujo, Q , y La caída de presión, $p_0 - p_L$, la viscosidad se puede calcular mediante la expresión

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} \quad (1-24)$$

1.3.2.2.2 Aproximación a la viscosidad usando el método de viscosidad representativa

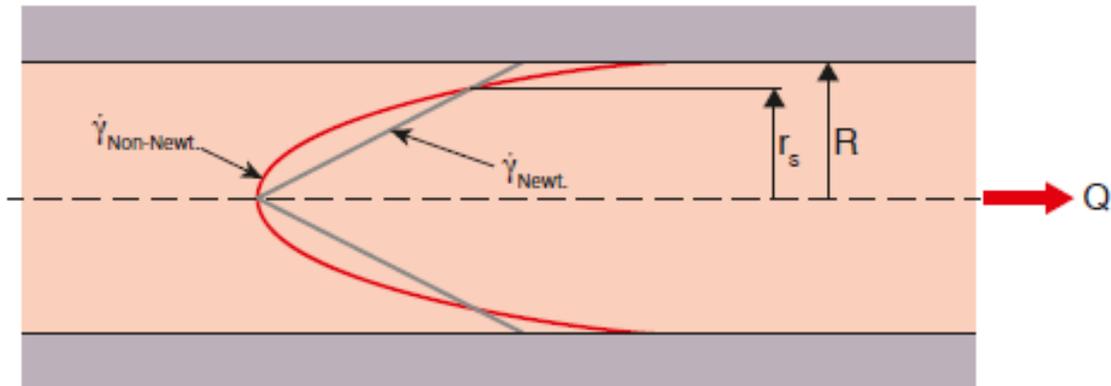


Figura 66. Distribución de la velocidad de deformación en los fluidos newtonianos y no-newtonianos que fluyen a través de un capilar.

Un método simplificado para calcular la viscosidad, desarrollado por Schümmer y Worthoff (1978, citado en Menges & Osswald, 2012, p.142), toma ventaja del hecho de que la cizalladura en los materiales newtonianos y no newtonianos, tienen una línea de corriente común a la que la velocidad de deformación es la misma. Esto es representado esquemáticamente en la Figura 66 donde se encuentra la línea de corriente común en r_s . La posición de la línea de corriente que está relacionado con el índice de la ley de potencia y varía entre 0,7715 y 0,8298 R para los índices de la ley de potencias entre 1,4 y 0,25. Una aproximación se da por

$$r_s \approx \frac{\pi}{4} R = 0.7854R \quad (1-25)$$

El valor de $\pi/4$ no se deriva matemáticamente, pero ofrece una simplificación significativa a las ecuaciones con un error final en la viscosidad de menos de 5%.

Y la velocidad de deformación en ese punto está dada por

$$\bar{\dot{\gamma}} = \frac{4}{\pi} \frac{Q}{R^4} r_s \approx \frac{Q}{R^3} \quad (1-26)$$

El esfuerzo cortante en la ubicación r_s se puede calcular utilizando

$$\bar{\tau} = \left(\frac{p_0 - p_L}{L} \right) \frac{r_s}{2} \approx \frac{\pi}{8} \left(\frac{P_0 - P_L}{L} \right) \quad (1-27)$$

1.3.2.3 Reómetro de cono y plato.

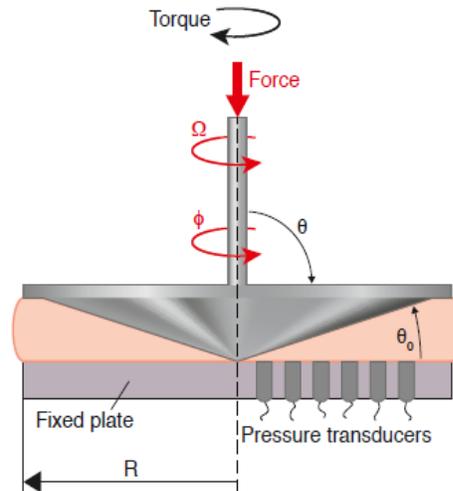


Figura 67. Distribución de la velocidad de deformación en los fluidos newtonianos y no-newtonianos que fluyen a través de un capilar. (Menges & Osswald, 2012, p.144).

El reómetro de cono y plato se utiliza a menudo para medir la viscosidad y las funciones de coeficiente de esfuerzos normales primarios y secundarios como funciones de la velocidad de cizalla y la temperatura. La geometría de un reómetro de cono y plato se muestra en la Figura 67. Debido a que el ángulo θ_0 es muy pequeña, típicamente $<5^\circ$, la velocidad de cizallamiento se puede considerar que es constante y está dada por

$$\gamma_{\theta\phi} = \frac{\Omega}{\theta_0} \quad (1-28)$$

Donde Ω es la velocidad angular del cono. El esfuerzo cortante también puede considerarse constante y puede estar relacionado con el par medido, T ,

$$\tau_{\theta\phi} = \frac{3T}{2\pi R^3} \quad (1-29)$$

La función de la viscosidad ahora puede obtenerse a partir de

$$\eta(\dot{\gamma}_{\theta\phi}) = \frac{\tau_{\theta\phi}}{\dot{\gamma}_{\theta\phi}} \quad (1-30)$$

La función de coeficiente de tensión normal primaria ψ_1 , se puede calcular midiendo la fuerza, F , necesaria para mantener el cono en su lugar y se puede calcular usando

$$\psi_1 = \frac{2F}{\pi R^2 \dot{\gamma}^2} \quad (1-31)$$

Aunque también es posible determinar la función de coeficiente de estrés secundaria a partir de la distribución normal del esfuerzo a través de la placa, es muy difícil obtener datos precisos (Menges & Osswald, 2012, p.144).

Es importante para el diseñador de productos plásticos y el equipo de transformación de plásticos, conocer y comprender la reología de los materiales a transformar, esto es vital para entender las posibles causas del comportamiento de estos dentro de los moldes y así anticipar el resultado de la inyección, tanto de los aciertos como de los desaciertos tanto en el proceso de inyección, como en el proceso de diseño de las partes plásticas, además de aquellos problemas que no fueron previstos encontrar, plantear las posibles causas de estos y sus posibles soluciones.

2 Proceso de Transformación

Las propiedades mecánicas y el rendimiento de un producto terminado siempre son el resultado de una secuencia de eventos. La fabricación de una pieza de plástico comienza con la selección del material en las primeras etapas de la fase de diseño. Luego sigue el procesamiento, lo que determina las propiedades de la pieza final y de su permanencia en el tiempo. Durante el diseño y la fabricación de cualquier producto de plástico siempre hay que tener en cuenta que las propiedades de los materiales, el procesamiento y el diseño van de la mano y no pueden ser disociados. Este enfoque es denominado de las seis P's: polímero, procesamiento, producto, el performance (rendimiento), post-consumer life (vida después del consumo), y profit (beneficio).

En la actualidad, las técnicas más importantes de procesamiento de polímeros disponibles son la extrusión, seguido por los procesos de mezcla y el moldeo por inyección. Existen más operaciones de conformación secundarias, tales como el calandrado, recubrimiento, moldeo por compresión y moldeo rotacional entre otras.

El presente trabajo se ocupa del proceso de mezclado y moldeo por inyección. Si el lector desea profundizar más en estos y los demás procesos, puede remitirse al texto de [Menges & Osswald \(2012\)](#).

2.1 Mezclado

Hoy en día, la mayoría de los procesos implican algún tipo de mezcla. Debido a esto, una parte integral de un extrusor de tornillo es una zona de mezcla. De hecho, la mayoría de extrusoras de doble tornillo se usan principalmente como dispositivos de mezcla. Del mismo modo, la unidad de plastificación de una máquina de moldeo por inyección a menudo tiene una zona de mezcla. Esto es importante porque la calidad del producto acabado en casi todos los procesos de polímeros depende en parte de lo bien que se mezcló el material. Tanto las propiedades del material como la capacidad de conformado del compuesto en piezas perfiladas e inyectadas están altamente influenciadas por la calidad de la mezcla. Por lo tanto, una mejor comprensión del proceso de mezcla ayuda a optimizar las condiciones de procesamiento y aumentar la calidad de la pieza.

El proceso de mezclado de polímeros implica siempre la distribución o dispersión de un componente minoritario o secundario dentro de un componente mayoritario que actúa como matriz. El componente mayoritario puede considerarse como la fase continua y el

componente minoritario como la fase dispersa o distribuida en forma de gotas, fibras o aglomerados.

Cuando se genera una mezcla de polímeros, se debe tener en cuenta que dicha mezcla podrá ser refundida en procesos secundarios de conformado. Por ejemplo, en una mezcla homogénea obtenida tras un enfriado rápido en el que la estructura queda retenida o “congelada”, puede producirse separación de fases debido a la coalescencia cuando es de nuevo recalentado. Desde el punto de vista práctico este tipo de mezclas no son adecuadas para su procesado. No obstante, este efecto se suele reducir, usando macromoléculas especiales que permiten compatibilizar las capas límite entre fases.

El proceso de mezclado puede ser *dispersivo* o *distributivo*. La morfología final obtenida en la mezcla polimérica viene determinada por la presencia en el proceso de tres mecanismos: El mezclado distributivo, el mezclado dispersivo y la coalescencia. La Figura 68 muestra un modelo propuesto por Macosko y colaboradores (1991, citado en Menges & Osswald, 2012, p.179), que permite visualizar de forma más clara los mecanismos que intervienen en la obtención de la morfología final de las mezclas de polímeros.

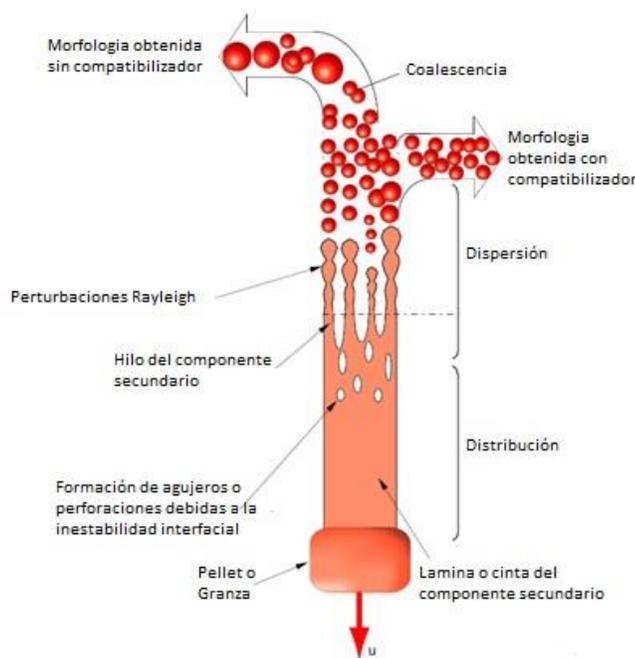


Figura 68. Mecanismos que intervienen en la morfología obtenida en mezclas de polímeros. (Menges & Osswald, 2012, p.180).

El proceso comienza cuando una delgada lámina de polímero se funde lejos del pellet. A medida que se estira la lámina, la tensión superficial hace que se rasgue y forme hilos. Estos

hilos se estiran y se reducen de radio, hasta que la tensión superficial se hace lo suficientemente importante como para causar perturbaciones de Rayleigh, que rompen los hilos en pequeñas gotitas (Menges & Osswald, 2012, p.179).

Hay tres categorías generales de las mezclas que se pueden crear:

- Mezclas homogéneas de polímeros compatibles
- Mezclas monofásicas de polímeros parcialmente incompatibles, y
- Mezclas multi-fase de polímeros incompatibles.

La **Tabla 5** enumera ejemplos de mezclas de polímeros compatibles, parcialmente incompatibles, e incompatibles (Menges & Osswald, 2012, p.179).

Tabla 5.

Mezclas de polímeros comunes.

Mezclas de polímeros compatibles

Caucho natural y polibutadieno

Poliámidas (ej. PA 6 y PA 66)

Eterpolifenileno (PPE) y poliestireno

Mezclas de polímeros parcialmente incompatibles

Polietileno y Poliisobutileno

Polietileno y polipropileno (5% PE en PP)

Policarbonato y tereftalato de polibutileno

Mezclas de polímeros incompatibles

mezclas de poliestireno / polietileno

mezclas de poliamida / polietileno

mezclas de polipropileno / poliestireno

Menges & Osswald, 2012, p.180.

2.1.1 Mezclado distributivo.

El mezclado distributivo o mezclado laminar de líquidos miscibles o compatibles se caracteriza habitualmente por la distribución de la gota o fase secundaria dentro de la matriz. Esta distribución se consigue mediante la aplicación sobre el sistema de grandes deformaciones, de manera que se logra incrementar el área interfacial entre las fases y disminuir las dimensiones locales, o espesores de estrización, de las fases secundarias.

Este concepto se muestra en la Figura 69. En este caso, se dispone de un equipo de flujo de Couette con un espesor de estriación inicial para el componente secundario de δ_0 . A medida que gira el cilindro interior, el componente secundario se distribuye a través de los sistemas con una disminución constante en el espesor de estriación; el espesor de estriación depende de la velocidad de deformación de la deformación, lo que hace que sea una función de la posición. La deformación total que sufre una gota o fase secundaria se define por

$$\gamma(\tau) = \int_0^\tau \dot{\gamma}(t) dt \quad (2-1)$$

Donde $\dot{\gamma}$ es la magnitud de la velocidad de deformación de la deformación se define por las ecuaciones. 1.24 y 1.25, y τ es un punto arbitrario en el tiempo. Para una esfera, que se deforma en un elipsoide, la deformación total puede estar relacionada con el espesor estriación usando (Menges & Osswald, 2012, p.181).

$$\delta = 2R(1 + \gamma^2)^{-0.25} \quad (2-2)$$

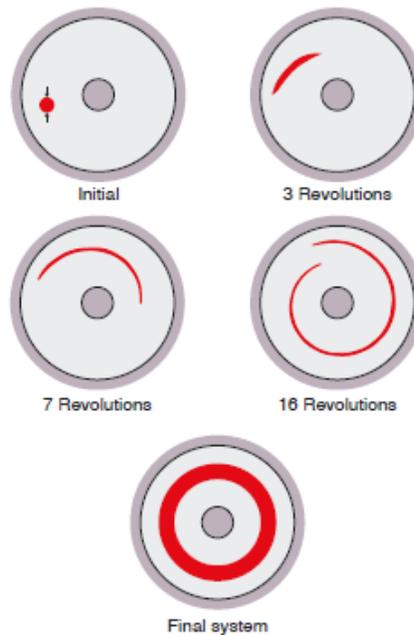


Figura 69. Resultados experimentales del mezclado distributivo en un equipo de flujo de Couette y esquema del sistema final de mezclado. (Menges & Osswald, 2012, p.181).

2.1.1.1 Efecto de la orientación.

La aplicación de grandes deformaciones sobre el sistema no permite homogeneizar suficientemente bien la mezcla. Se ha de tener en cuenta, que en la calidad del mezclado

intervienen factores importantes como son el tipo de equipo utilizado para el mezclado, la orientación inicial, y la posición de los componentes líquidos. Por ejemplo, el mecanismo de mezclado mostrado en la Figura 70 distribuye homogéneamente el material fundido dentro de la región contenida por las líneas de flujo que son interceptadas tangencialmente por el componente secundario inicial. La Figura 71, muestra otra variación en la orientación inicial y distribución del componente secundario. En este caso, la fase secundaria intercepta todas las líneas de flujo, dando lugar a una mezcla homogénea.

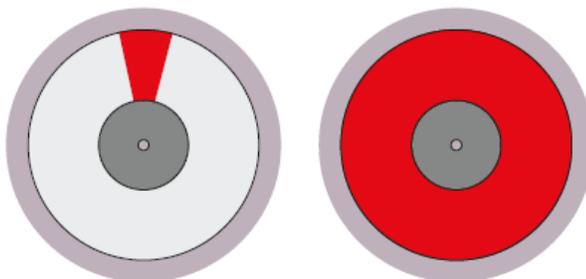


Figura 70. Mezclado distributivo en equipo de flujo de Couette. (Menges & Osswald, 2012, p.182).

Una forma común de cuantificar la mezcla es seguir el crecimiento de la interfaz entre los fluidos primario y secundario. En un flujo de cizallamiento simple, una simple expresión que relaciona el crecimiento de la interfaz, el esfuerzo, y la orientación de la zona del fluido secundario con respecto a la dirección de flujo es:

$$\frac{A}{A_0} = \gamma \cos \alpha \quad (2-3)$$

Donde A_0 es el área de la interface inicial, A es el área de la interface final, γ es la deformación total y α el ángulo que define la orientación de la superficie, o vector normal, con respecto a la dirección del flujo. La Figura 71 demuestra este concepto.



Figura 71. Efecto de la orientación inicial de la superficie sobre el mezclado distributivo. (Menges & Osswald, 2012, p.183).

Así, ambos casos (a) y (b) de la Figura 72, comienzan con áreas iniciales iguales A_0 , y están sometidos a la misma deformación, $\gamma = 10$. El componente secundario circular en (a) tiene una superficie que está orientada al azar, entre 0 y 2π , mientras que la mayor parte de la superficie del componente secundario alargado en (b) está orientado en $\pi/2$, lo cual conduce a un crecimiento insignificante de la zona interfacial. Un caso ideal sería aquel donde un componente secundario largo y delgado con una superficie orientada en la dirección del flujo o vertical entre las placas paralelas. Por lo tanto, el crecimiento máximo de interfaz dentro de un mezclador de cizallamiento simple puede lograrse, si la dirección de la interfaz se mantiene en una orientación óptima ($\cos\alpha = 1$).

En un flujo de cizalladura simple esto requeriría un mecanismo de agitación especial para mantener la interfaz entre los componentes del fluido primario y secundario en una posición vertical. Erwin y Ng (Erwin, 1978; Ng, 1979, citados en Menges & Osswald, 2012, p. 182), demostraron esto en un estudio experimental que consistía en colocar bloques de polietileno blanco y negro en un dispositivo de Couette (Figura 72 A). La Figura 72 B muestra que después de aplicar una pequeña cantidad de cizalladura, las superficies que originalmente estaban orientadas en la dirección radial se han estirado una cierta cantidad y han cambiado su orientación. Es claro a partir de la fotografía que la misma superficie tiende a alinearse con los planos de cizalla, lo que reduce la eficiencia de mezcla del proceso. Por lo tanto, con el fin de aumentar la eficacia de la mezcladora Ng se llevó el contenido Couette y lo corto en nuevos bloques, que se colocaron en el interior del dispositivo de Couette girados 90° (Figura 72 C). Esto cambió la orientación de las superficies a una nueva posición en la que pueden sentir más eficazmente los efectos de la deformación. Al repetir este procedimiento varias veces, Erwin y sus compañeros de trabajo fueron capaces de demostrar que el crecimiento de la zona es también una función del número de reorientaciones que se producen durante el proceso de mezcla. Si N es el número total de etapas de cizallamiento, separados por una reorientación, el crecimiento de la zona se puede calcular usando

Donde γ_{Total} es la deformación total aplicada durante el proceso. Para el uso de este concepto, Erwin demostró que el límite superior para el mezclador ideal se obtiene en un mezclador que ejerce sobre el fluido un flujo elongacional bajo deformación plana o flujo de cizalladura puro y donde las superficies se mantienen idealmente orientados durante todo el proceso; esto ocurre cuando se aplica una cantidad infinitesimal de cizallamiento $N = \infty$ y cada vez. En un sistema tal, el crecimiento de las zonas interfaciales sigue a la relación dada por

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{\gamma_{Total}}{N} \right)^N \quad (2-4)$$

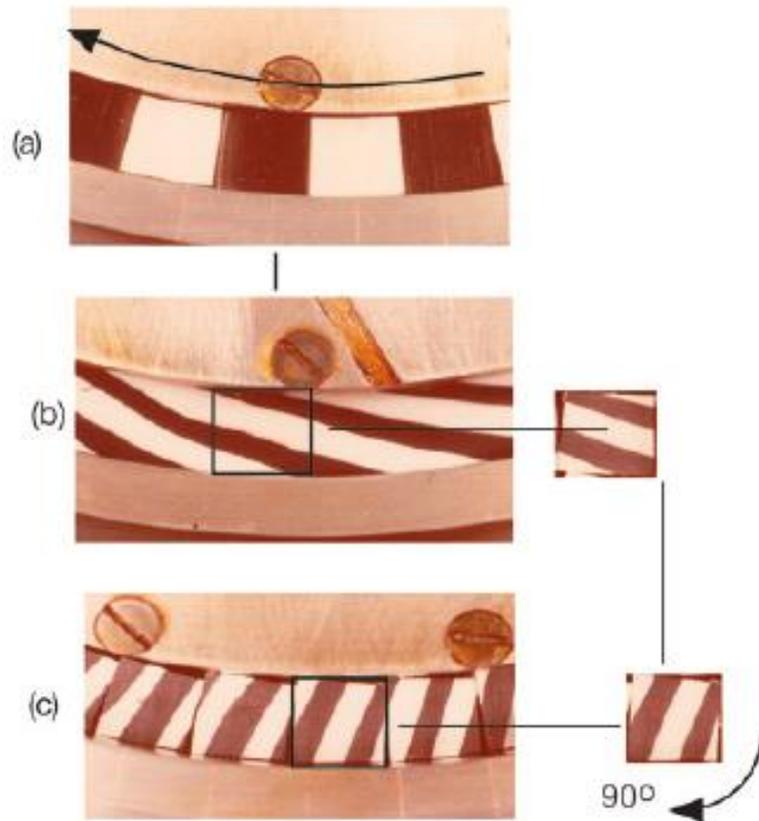


Figura 72. Esquema de la deformación y la reorientación de Couette. (Menges & Osswald, 2012, p.183).

$$\frac{A}{A_0} = e^{\gamma/2} \quad (2-5)$$

En el mezclador ideado por Erwin, la cantidad de la mezcla aumenta de manera exponencial, en comparación con el aumento lineal que se produce si la orientación de las interfaces de los fluidos permanece sin alteraciones o perturbaciones (Menges & Osswald, 2012, pp.182-184).

2.1.2 Mezclado dispersivo.

El mezclado dispersivo en el procesamiento de polímeros implica romper un fluido secundario inmiscible o de un aglomerado de partículas sólidas y su dispersión a través de la matriz. Aquí, la deformación impuesta no es tan importante como el esfuerzo aplicado, ya que este último es el responsable de la rotura del sistema. Por lo tanto, el tipo de flujo que predomina en el interior de un mezclador desempeña un papel importante en la rotura de los grupos de partículas sólidas o de las gotas de fluido en dispersión (Menges & Osswald, 2012, p.184).

2.1.2.1 Rotura de los aglomerados de partículas.

El ejemplo más común de mezclado dispersivo de aglomerados de partículas sólidas es la dispersión y la mezcla de negro de carbono (negro de humo) en un compuesto de caucho. La dispersión de un sistema de este tipo está representada esquemáticamente en la Figura 73. Sin embargo, la rotura de aglomerados de partículas se explica mejor mediante un sistema ideal de dos partículas esféricas pequeñas que deben ser separadas y dispersadas durante un proceso de mezcla.

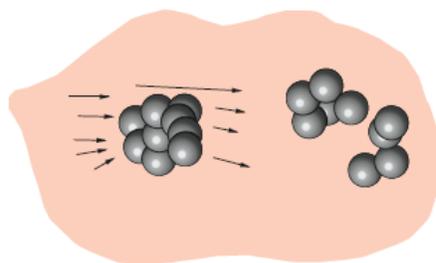


Figura 73. Desintegración de aglomerados de partículas durante el flujo. (Menges & Osswald, 2012, p.184).

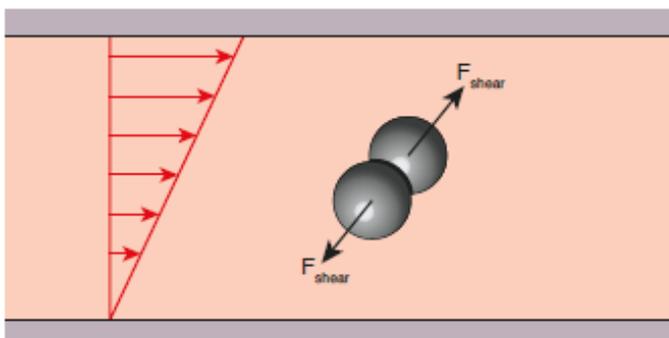


Figura 74. Fuerza aplicada a un aglomerado de dos partículas en el flujo de cizallamiento simple. (Menges & Osswald, 2012, p.185).

Si el dispositivo de mezcla genera un flujo de cizalladura simple, como se muestra en la Figura 74, la fuerza máxima de separación que actúan sobre las partículas a medida que viajan en su línea de corriente se produce cuando se orientan en una posición de 45 °, ya que continuamente giran durante el flujo. La magnitud de la fuerza que intenta separar el "aglomerado" está dada por

$$F_{cizalla} = 3\pi\eta\dot{\gamma}r^2 \quad (2-6)$$

Donde η es la viscosidad del fluido de arrastre, $\dot{\gamma}$ el valor del tensor de la velocidad de deformación y r el radio de las partículas.

Sin embargo, si el campo de flujo generado por el dispositivo de mezcla es puramente elongacional, tal como se muestra en la Figura 75, las partículas siempre estarán orientadas a 0° , por ser la posición donde tiene lugar la fuerza máxima. La magnitud de la fuerza para este sistema está dada por

$$F_{elong} = 6\pi\eta\dot{\gamma}r^2 \quad (2-7)$$

Que es el doble de la fuerza máxima tangencial generada por el sistema que produce un flujo de cizallamiento simple. Además, en un flujo de elongación, el aglomerado está siempre orientado en la dirección de generación de la fuerza máxima, mientras que, en el flujo de cizalladura simple, el aglomerado disminuye rápidamente de tamaño con la posición de la máxima fuerza.

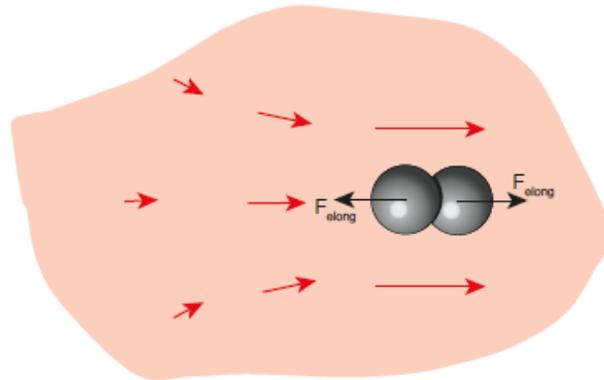


Figura 75. Fuerza aplicada a un aglomerado de dos partículas sometido a flujo elongacional. (Menges & Osswald, 2012, p.185).

Lo anterior indica que en los procesos de mezclado que requieren disgregación y dispersión de los aglomerados de mezcla, la elongación es el modo preferido de deformación. Esto sólo es válido si la magnitud de la velocidad de tensor de deformación se puede mantener igual tanto en elongación como en cizalladura. Por lo tanto, en la optimización de los dispositivos de mezcla, es importante saber qué modo de deformación es dominante. Esto se puede lograr mediante el cálculo de un número de flujo, o de Manas-Zloczower (M_Z) (1990, citado en Menges & Osswald, 2012, p.186), definido por

$$M_Z = \frac{\dot{\gamma}}{\gamma + \omega} \quad (2-8)$$

Donde $\dot{\gamma}$ es la magnitud de la tasa de tensor deformación y ω la magnitud del tensor de vorticidad. Un número Manas-Zloczower de 0 implica flujo rotacional puro, un valor de 0,5

representa el flujo de cizalladura simple, y cuando $Mz = 1$ es implícito el flujo de alargamiento puro.

2.1.2.2 Rotura de las gotas de fluido.

En general, las gotas dentro de una matriz incompatible tienden a ser esféricas debido a las tendencias naturales a mantener la superficie más baja posible en relación al volumen. Sin embargo, las líneas de flujo dentro del mezclador aplican esfuerzos sobre las gotas, haciendo que se deformen. Si esta tensión es lo suficientemente alta, con el tiempo provoca que las gotas se dispersen. Las gotas se dispersarán cuando la tensión superficial ya no puede mantener su forma en el campo de flujo y las estas se rompen en gotas más pequeñas. Este fenómeno de la dispersión y distribución sigue repitiéndose hasta que los esfuerzos producidos por el campo de flujo ya no pueden superar la tensión superficial de las nuevas gotas formadas.

Como puede verse, el mecanismo de ruptura de un aglomerado líquido es de naturaleza similar al de un aglomerado sólido, en el sentido de que ambos dependen de la aplicación de fuerzas para dispersar las partículas. Por lo tanto, el modo elongacional es también el modo preferido de deformación cuando se desea disgregar un fluido en finas gotas o hilos, por lo que el número Manas-Zloczower, M_z , es una cantidad indispensable cuando se desea cuantificar los procesos de mezcla que tienen que ver con tales sistemas.

Un parámetro comúnmente utilizado para determinar si una gota se dispersará es el *número de capilaridad*, definido por

$$C_a = \frac{\tau R}{\sigma_s} \quad (2-9)$$

Donde τ es el flujo inducido o esfuerzo desviador, R la dimensión característica de la gota, y σ_s la tensión superficial que actúa sobre la gota. El número capilaridad se define como la relación entre los esfuerzos en el flujo y los esfuerzos sobre la superficie de las gotas. La ruptura de la gota se produce cuando se alcanza un número de capilaridad crítico $C_{a_{crit}}$. Esta ruptura puede verse en la Figura 76, que muestra la desintegración de un hilo newtoniano en una matriz newtoniana.

Debido la continua disminución del radio de la gota, el número capilar crítico se alcanzará en algún momento específico en el tiempo. Debido a la oposición entre los esfuerzos elásticos y las tensiones superficiales, la forma cilíndrica se vuelve inestable y las pequeñas alteraciones

en la superficie provocan la aparición de ondas de capilaridad. Estas ondas se denominan comúnmente como *perturbaciones de Rayleigh*. Estas perturbaciones pueden presentar diferentes longitudes de onda sobre la superficie cilíndrica, pero sólo aquellas con una longitud de onda mayor que la circunferencia de la gota ($2\pi R_0$) darán lugar a una disminución progresiva del área de la interfaz.

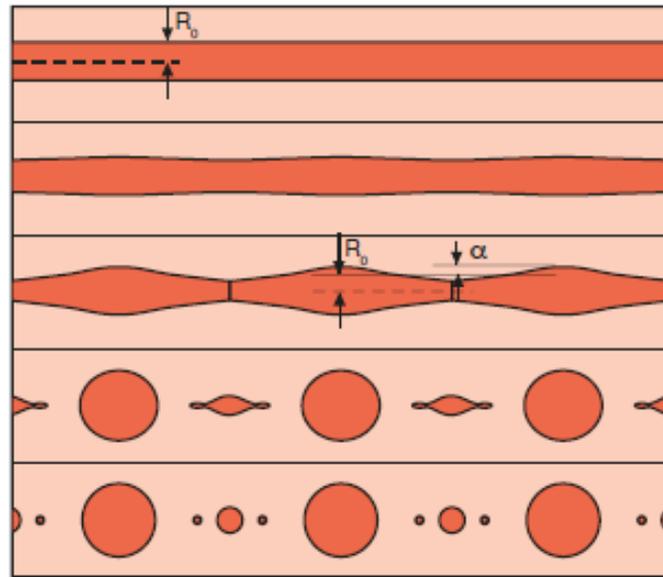


Figura 76. Desintegración de una gota de aceite de ricino de 0,35 mm de diámetro en una matriz newtoniana de aceite de silicona. Representación gráfica a partir de fotografías tomadas cada segundo. (Menges & Osswald, 2012, p.187).

En el Diagrama de Grace (1982, citado en Menges & Osswald, 2012, p.187) Figura 77, se muestra el número de capilaridad crítico como una función de la relación de viscosidad η_2/η_1 , y el tipo de flujo, descrito por el parámetro de mezclado de flujo λ . Para una relación de viscosidad de 1 el número capilar crítico es de orden 1 (Tadmor & Gogos, 2006, citados en Menges & Osswald, 2012, p.187). Así pues, el mezclado distributivo tiene lugar cuando C_a es mucho mayor que $C_{a_{crit}}$, ya que el esfuerzo en la interfaz es mucho menor que los esfuerzos de cizalladura. Aquí, las ondas capilares que podrían causar la ruptura de las gotas no se desarrollarán. Por otra parte, el mezclado dispersivo se produce cuando C_a se aproxima a su valor crítico o cuando los esfuerzos en la interfaz son prácticamente iguales a los esfuerzos elásticos, produciendo la ruptura de la gota. Además, la ruptura solo puede ocurrir si se da el tiempo suficiente para que esto suceda. La amplitud de la perturbación α , se supone que crecen exponencialmente así.

$$\alpha = \alpha_0 e^{qt} \quad (2-10)$$

Donde α_0 es la amplitud inicial de perturbación, a veces se supone que es el 0,3% del radio del hilo, y que la tasa de crecimiento q se define por

$$q = \frac{\sigma_s \Omega}{2\eta_1 R_0} \quad (2-11)$$

En la ecuación anterior R_0 representa el radio inicial de la gota y Ω una tasa de crecimiento adimensional presentada en la Figura 78 como una función de la relación de la viscosidad para la amplitud de longitud de onda de perturbación, que conduce a la ruptura. El tiempo requerido para la ruptura, t_b , ahora se puede calcular utilizando las ecuaciones anteriores como

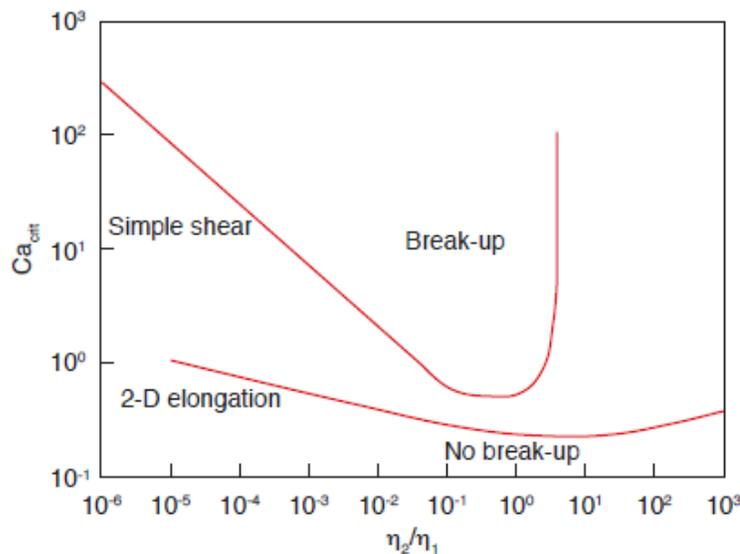


Figura 77. Número de capilaridad crítico para la ruptura de la gota en función de la relación de viscosidad para un flujo de cizalladura simple y un flujo elongacional 2-D. (Menges & Osswald, 2012, p.188).

$$t_b = \frac{1}{q} \ln \left(\frac{\alpha_b}{\alpha_0} \right) \quad (2-12)$$

Donde α_b es la amplitud en desintegración, que para una perturbación sinusoidal es $\alpha_b = \sqrt{2/3} R_0$. El tiempo de ruptura disminuye a medida que el número capilar crítico es reducido excederse la desintegración tiempo t_b^* se puede aproximar utilizando

$$t_b^* = t_b \left(\frac{C_a}{C_{a_{crit}}} \right)^{-0.63} \quad (2-13)$$

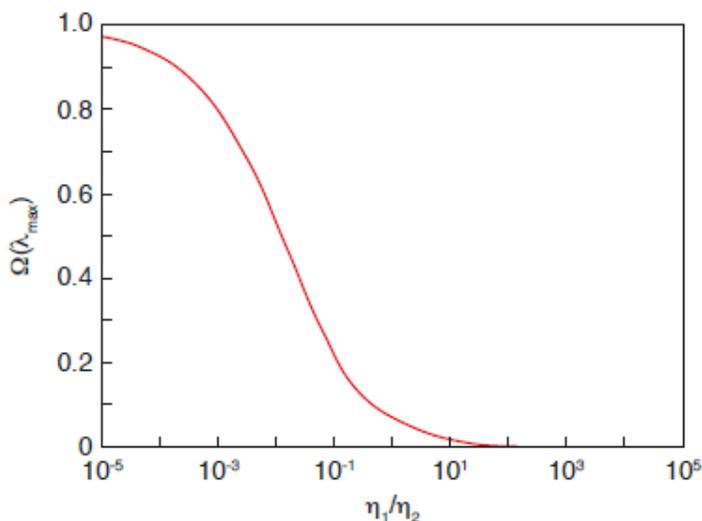


Figura 78. Tasa de crecimiento de las perturbaciones en las interfaces como una función de relación de viscosidad. (Menges & Osswald, 2012, p.188).

Como se mencionó anteriormente, la tensión superficial juega un papel importante en el proceso de mezcla, sobre todo cuando se trata de mezclado dispersivo, cuando el número de capilaridad se aproxima a su valor crítico. Como consecuencia del estiramiento de la zona interfacial debido a mezclado distributivo, los radios de cada uno de los componentes suspendidos disminuyen a medida que la tensión superficial se hace más intensa. También hay que señalar que una vez que el número de capilaridad C_a asume un valor por debajo de su valor crítico $C_{a_{crit}}$, se producen sólo pequeñas deformaciones y la agitación interna mantiene en equilibrio la gota elíptica dentro del flujo, representado esquemáticamente en la Figura 79. En ese momento, el proceso de mezcla se reduce a la distribución de las gotitas dispersadas. Investigaciones analíticas y numéricas de la forma de las gotas estables con $C_a < C_{a_{crit}}$ en un flujo de corte simple, se han realizado por varios investigadores (Cox, 1969; Stone and Leal, 1989, citados en Menges & Osswald, 2012, p.189). Figura 79 también muestra que, en relaciones de viscosidad por encima de 4, los flujos de cizallamiento simples no son capaces de romper gotas de fluido.

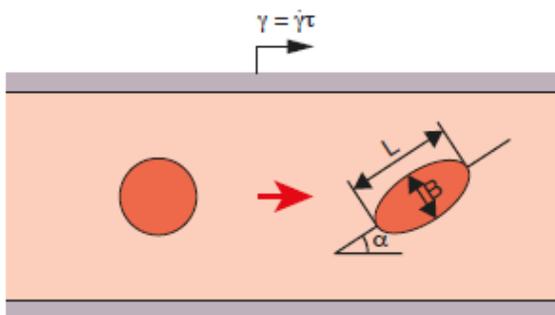


Figura 79. Esquema de deformación de gotas en el flujo de corte simple. (Menges & Osswald, 2012, p.189).

2.1.3 Dispositivos de mezclado.

Las propiedades finales de un componente polimérico están muy influenciadas por el índice de mezclado alcanzado en la masa plástica durante el procesado o en una etapa independiente en el proceso de fabricación. Como se mencionó anteriormente, cuando se mide la calidad de la mezcla, también es necesario evaluar la eficiencia del proceso de mezclado. Por ejemplo, la cantidad de energía necesaria para lograr la más alta calidad de una mezcla puede ser poco realista o inalcanzable. Esta sección presenta algunos de los dispositivos de mezcla utilizados más comúnmente encontrados en el procesamiento de polímeros.

En general, los mezcladores se pueden clasificar en dos categorías: mezcladores internos y mezcladores en continuo. Los mezcladores internos, tales como el mezclador de Banbury, son los dispositivos de mezclado más antiguos utilizados en el procesado de polímeros y todavía se usan ampliamente en la industria de compuestos de caucho. La Industria también utiliza a menudo mezcladores continuos, ya que combinan la mezcla, además de sus tareas normales de procesamiento. Ejemplos típicos son extrusoras de tornillo simple (mono husillo) y de tornillo doble que a menudo incorporan cabezales de mezclado o platos rompedores en su sistema (Menges & Osswald, 2012, pp.189-190).

2.1.3.1 Mezcladores estáticos.

Los mezcladores estáticos o inmóviles trabajan por efecto de la presión y son dispositivos de mezclado continuo a través de los cuales la mezcla es impulsada, girada y dividida; conduce a un mezclado efectivo sin la necesidad de partes móviles ni cabezales de mezcla. Uno de los mezcladores estáticos más utilizados es el de cinta retorcida que se muestra esquemáticamente en la Figura 80.

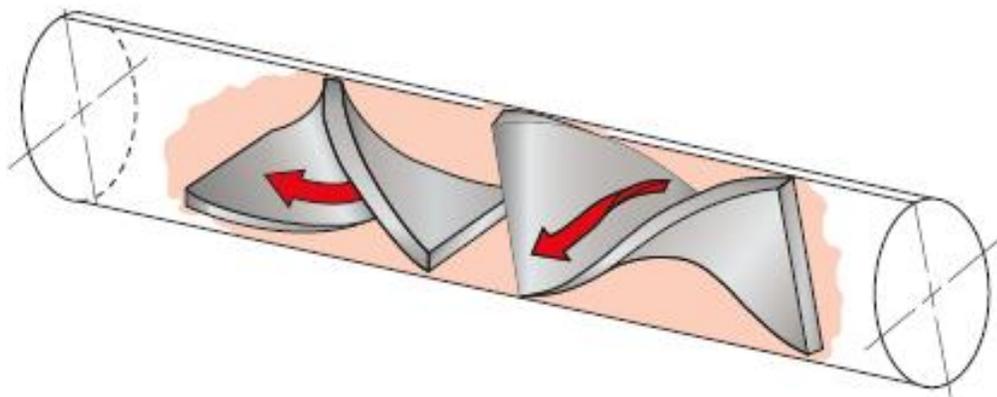


Figura 80. Diagrama esquemático de un mezclador estático de Kenics. (Menges & Osswald, 2012, p.190).

La Figura 81 (Gramann, 1991, citado en Menges & Osswald, 2012, pp.190) muestra una simulación computarizada de la progresión de las líneas de flujo con relación al giro de la pared. A medida que el fluido se hace girar a través de la pared divisoria, las interfaces entre los fluidos aumentan. Las interfaces son entonces obligadas a reorientarse 90° una vez que el material entra en una nueva sección.

La Figura 81 también muestra una trayectoria típica de una partícula a medida que viaja en una línea de corriente en el apartado N del mezclador estático y termina en una línea de corriente diferente después de entrar en la siguiente sección, N + 1. La secuencia de estiramiento-reorientación se repite hasta que el número de estrías es tan alto que se consigue una mezcla aparentemente homogénea.

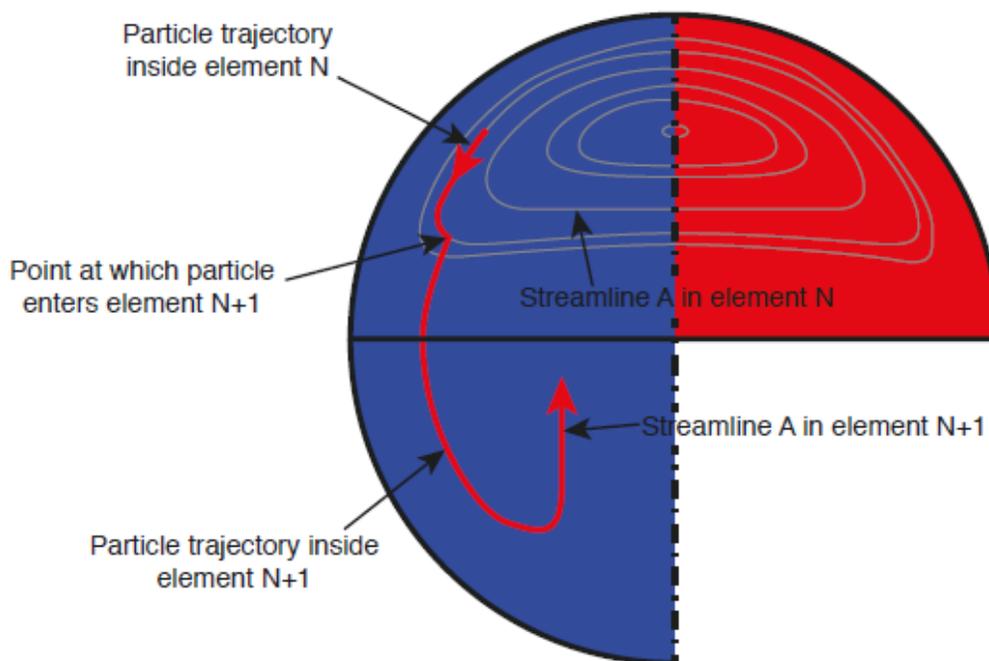


Figura 81. Líneas de corriente simuladas dentro de una sección del mezclador estático de Kenics. (Menges & Osswald, 2012, p.191).

La Figura 82 muestra una secuencia de corta de un mezclador estático Kenics. De la figura se puede observar que el número de estrías aumenta de una sección a otra por 2, 4, 8, 16, 32, etc., que se puede calcular usando

$$N = 2^n \quad (2-14)$$

Donde N es el número de estriaciones y n es el número de secciones en el mezclador (Menges & Osswald, 2012, p.190).

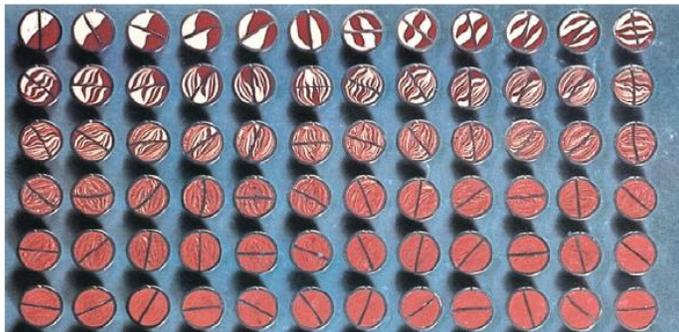


Figura 82. Evolución experimental del proceso de mezclado de dos polímeros coloreados en un mezclador estático tipo Kenics. (Menges & Osswald, 2012, p.191).

De manera análoga a los mezcladores dispersivos que se utilizan en extrusoras mono husillo, el principal inconveniente de los mezcladores estáticos actuales es que su modo principal de deformación es de tipo cizalladura en lugar de elongacional. Recientemente se ha desarrollado un mayor mezclado dispersivo (Gramann, Davis, Oswald and Rauwendaal, 1998, citados en Menges & Osswald, 2012, p.190). La Figura 83 muestra un esquema del nuevo mezclador estático dispersivo.

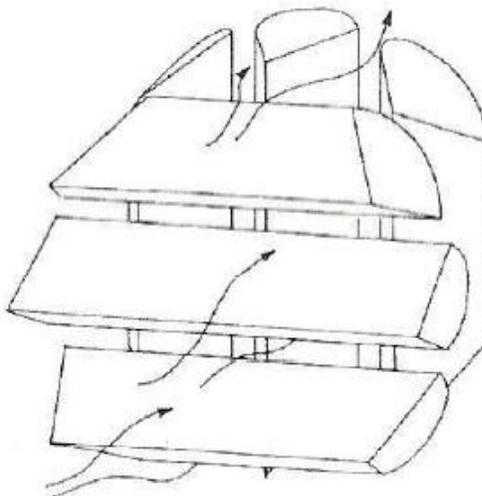


Figura 83. Esquema de un mezclador estático dispersivo.

2.1.3.2 Mezcladores Banbury.

El mezclador tipo de Banbury, que se muestra esquemáticamente en la Figura 84, es tal vez el mezclador interno por lotes que se utiliza con mayor frecuencia. Los mezcladores internos son equipos de mezclado de alta intensidad que generan flujos de cizallamiento y de elongación complejos y que son especialmente adecuados para la dispersión de aglomerados de partículas sólidas dentro de aglomerados matrices poliméricas.

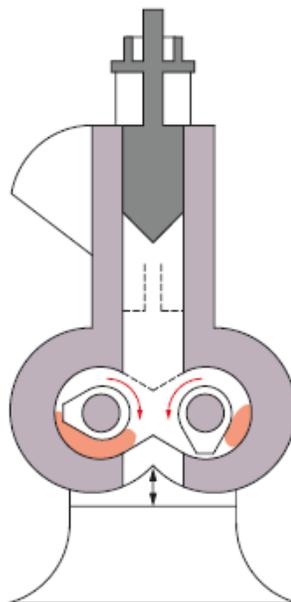


Figura 84. Diagrama esquemático de un mezclador de tipo Banbury. (Menges & Osswald, 2012, p.191).

En este sentido, una de las aplicaciones más comunes para el mezclador interno de alta intensidad, es la rotura de aglomerados de negro de humo dentro de compuestos de caucho. La dispersión de los aglomerados depende directamente del tiempo de mezclado, de la velocidad del rotor, de la temperatura, y la geometría de las palas del rotor (Biswas and Osswald, 1994, citados en Menges & Osswald, 2012, p.192). Figura 85 (Cox, 1069; Boonstra, 1963, citados en Menges & Osswald, 2012, p.192) muestra la fracción de negro de humo no dispersada, como una función del tiempo en un mezclador Banbury a 77 rpm y 100°C. La línea de trazos en la figura representa la fracción de partículas menores de 500 nm.

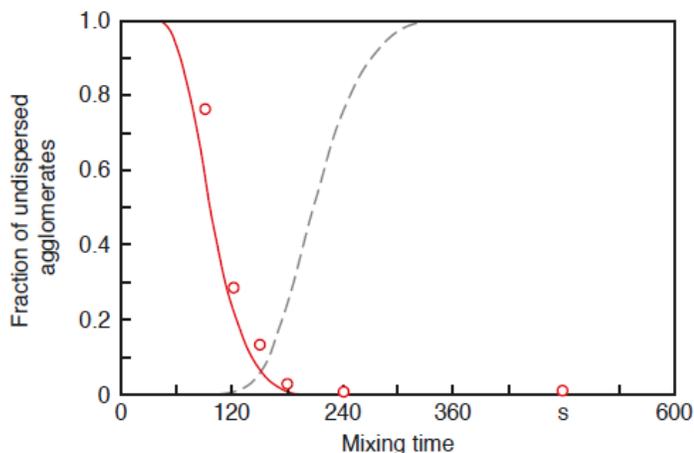


Figura 85. Fracción de negro de humo sin dispersar negro, de tamaño aproximado de 9 μm , en función del tiempo de mezclado dentro de un mezclador Banbury. (O) indica los resultados experimentales y las predicciones teóricas (línea continua); la línea discontinua representa la fracción de agregados más pequeños que 500 nm. (Menges & Osswald, 2012, p.192).

2.1.3.3 Mezclador tipo Co-kneader.

El mezclador Co-kneader es una extrusora mono husillo con pines sobre el cilindro y un husillo que oscila en la dirección axial. La Figura 86 muestra un diagrama esquemático de un Co-kneader. Los pines sobre el cilindro limpian la superficie entera del husillo, por lo que es la única extrusora mono husillo con autolimpieza. Esto se traduce en reducción del tiempo de residencia, que lo hace adecuado para el procesamiento de materiales con baja estabilidad térmica.

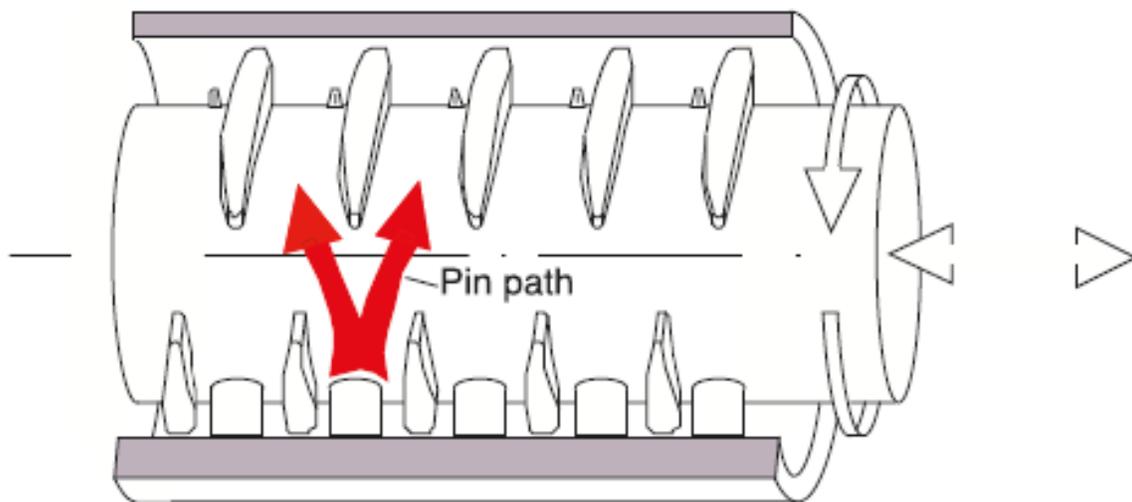


Figura 86. Diagrama esquemático de un mezclador tipo Co-kneader. (Menges & Osswald, 2012, p.194).

Los pines sobre el cilindro también ayudan a disgregar el lecho sólido, creando un fundido disperso lo que mejora la velocidad media del fundido y reduce la temperatura global en el material. A partir de un análisis simplificado de un mezclador Co-kneader se puede obtener el siguiente número de estriaciones por L/D de (Rauwendaal, 2009, citado en Menges & Osswald, 2012, p. 195)

$$N_s = 2^{12} \quad (2-15)$$

Lo que significa que más de una sección de $4D$ el número de estrías es $2^{12(4)} = 2.8E14$. Una información más detallada sobre la Co-kneader se da por Rauwendaal y Elemans (Rauwendaal, 1993; Elemans, 2009, citados en Menges & Osswald, 2012, p. 195).

En general para profundizar en el tema de mezclado y los cálculos de consumo de energía, calidad y eficiencia de la mezcla, ver la referencia [Menges & Osswald, 2012, pp. 179-205](#).

2.2 Influencia de las Condiciones de Proceso en las Propiedades de la Pieza Moldeada

Las propiedades mecánicas y la apariencia de los artículos inyectados pueden variar considerablemente cuando se efectúan cambios en las condiciones de moldeo; aun teniendo la misma máquina inyectora, un mismo molde y un mismo lote de material podemos observar un amplio espectro de propiedades en productos que parecen similares (Tabla 6).

Tabla 6.

Intervalo de valores de propiedades físicas.

PROPIEDAD	POLIESTIRENO (HIPS)	POLIPROPILENO (PP)
Fuerza tensil a la ruptura, kg	346-555	286-445
Resistencia a la flexión, kg/cm ²	358-578	164-288
Resistencia al impacto Izod, kg-cm/cm	7.6-21.8	4.9-45.2

Sánchez, Yañez & Rodríguez, 2003, p.60.

Los cambios en las propiedades se dan por las diferencias en la morfología del polímero surgidas debido a las variaciones en las condiciones del proceso de inyección. Es decir que, dependiendo de las condiciones de procesado, la masa del polímero puede ser amorfa con el arreglo de las cadenas poliméricas sin un orden real o puede ser cristalina, caso en el cual los segmentos de las cadenas poliméricas están acomodados en estructuras ordenadas, dando lugar a las diferencias en las propiedades mencionadas.

Además de los cambios en morfología, la variación en las condiciones de procesado puede dar lugar a diferente orientación de las moléculas del polímero, lo cual también puede afectar drásticamente las propiedades de la pieza moldeada (Sánchez, Yañez & Rodríguez, 2003, pp.59-60).

2.2.1 Orientación durante el moldeo por inyección.

Como se presentó anteriormente las moléculas en su forma normal, en su estado de relajación se presentan como cadenas enmarañadas; cuando se aplica presión al polímero fundido las cadenas tienden a “desenredarse” y a orientarse paralelamente a la dirección del flujo, lo cual permite a las moléculas deslizarse más fácilmente, unas sobre otras. Esta acción de corte de una capa de polímero fundido sobre otra capa es lo que causa la orientación [Figura 87] (Sánchez et al., 2003, p.60).

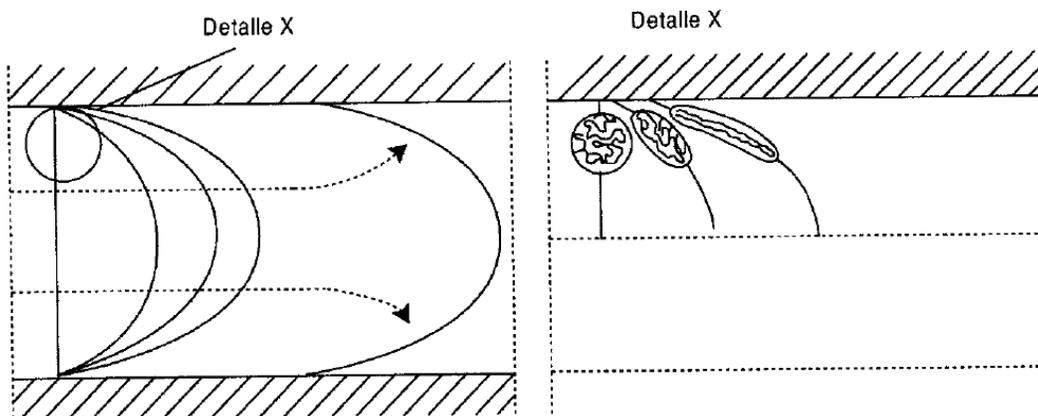


Figura 87. Orientación de cadenas durante el flujo de polímeros. (Sánchez et al., 2003, p.61).

Al estar las moléculas del polímero más alineadas en una dirección que en la otra, las propiedades en la pieza son diferentes en las dos direcciones (Figura 88), es decir el producto presentara **propiedades anisotrópicas**. El material será más fuerte (presentara mayor resistencia) en la dirección del flujo, debido a que las fuerzas enlace carbono-carbono son mucho más fuertes que las fuerzas de atracción entre cadenas vecinas (Sánchez et al., 2003, p.61).

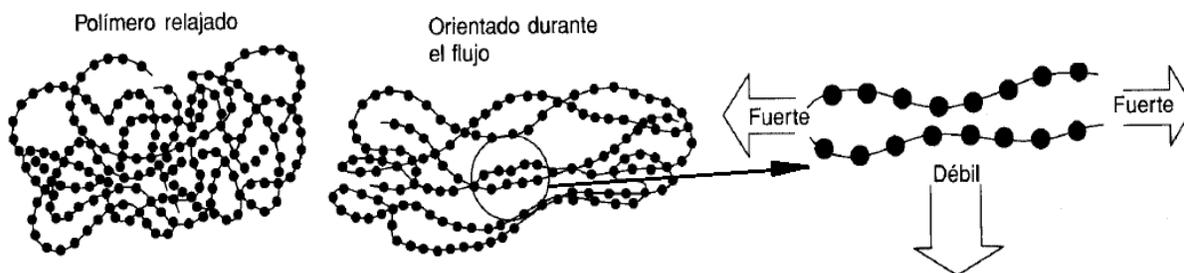


Figura 88. Anisotropía provocada por la orientación de cadenas durante el flujo de polímeros. (Adaptado de Sánchez et al., 2003, p.61).

2.2.2 Efecto del molde.

Cuando el polímero fundido es forzado a entrar en el molde y hace contacto con las paredes de este, se solidifica. A pesar de la orientación causada por el flujo a través de la entrada, la turbulencia es suficiente para que la primera capa solidifique sin orientar. Por lo tanto, la superficie del polímero inmediatamente adyacente a la superficie del molde tendrá un bajo grado de orientación, pero aquellas capas cercanas a la superficie estarán bastante orientadas, debido al rápido enfriamiento que sufren. Por otro lado, las regiones del centro que tendrán más tiempo para que ocurra la relajación (permanecen más tiempo calientes) se encontraran menos orientadas. Esto conducirá a que se forme un gradiente de

orientación a través del espesor del artículo moldeado, con bajos niveles de orientación en el centro y mayores a ambos lados del centro [Figura 89]. Este gradiente variara con las condiciones de procesado y el tipo de material (Sánchez et al., 2003, p.62).

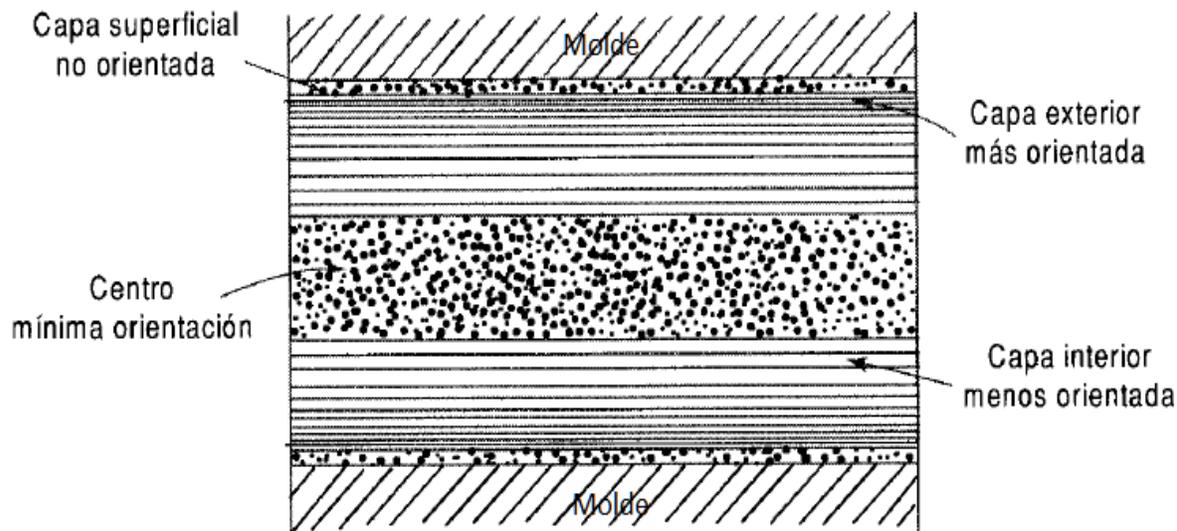


Figura 89 Gradiente de orientación en una pieza moldeada. (Sánchez et al., 2003, p.62).

2.2.3 Medida de la orientación.

El estudio de la orientación se realiza con un método denominado birrefringencia, el cual se basa en la refracción de la luz y se aplica a piezas moldeadas en plástico transparente. Este método consiste en colocar la pieza entre dos filtros polarizados, en medio de una fuente de luz blanca; cuando uno de los filtros se rota, y aparece una serie de franjas o bandas de colores.

Al examinar el artículo moldeado con luz polarizada, se encuentra que la orilla se ve negra, indicando que no existe orientación en esa posición y si nos movemos a lo largo de una línea, hacia la entrada, se verá una franja amarilla, a continuación, estará una línea roja y después una verde. Este grupo de tres franjas se conoce como “primer orden” el grupo siguiente como “segundo orden” y así de modo sucesivo. Usualmente se cuenta el número total de órdenes y este se utiliza para indicar el grado de orientación total.

La posición de máxima orientación se muestra en general como una franja casi circular, la cual normalmente está localizada entre el centro del artículo moldeado y la entrada. Después de alcanzar la posición de máxima orientación, la secuencia de

colores aparece en sentido inverso a medida que disminuye la orientación (Sánchez et al., 2003, p.63).

2.2.4 Factores que influyen en la orientación.

Como se ha expuesto, se sabe que la orientación es el resultado neto de la alineación de las moléculas en la dirección en una dirección (por efecto de las fuerzas de corte) y la relajación de ese alineamiento. Por lo tanto, cualquier cosa que se haga para propiciar una mayor relajación resultara en una reducción en la orientación. Es importante considerar las siguientes condiciones de operación:

- **Altas temperaturas del molde y del material disminuyen la orientación.** Esto se entiende si se recuerda que a mayores temperaturas habrá más oportunidad de que ocurra la relajación de las cadenas orientadas. Además, después de remover la pieza del molde puede ocurrir una cantidad apreciable de relajación. Por ejemplo, si se colocan los artículos moldeados en secciones gruesas en agua caliente, se permitirá la relajación y disminuirá la orientación.
- **La presión aumenta la orientación.** Altas presiones dan lugar a altos esfuerzos y velocidades de corte, lo cual provoca una mayor orientación.
- **El tiempo de compactación tiene un efecto importante en la orientación.** Debido a que mientras la entrada o el punto de inyección no se cierre, la presión del pistón provoca que el flujo continúe; es decir, se generan más esfuerzos de corte y mayor orientación, principalmente en el área de entrada. De manera usual esta es el área más orientada de la pieza, donde existe mayor cantidad de orientación residual (esfuerzos congelados).
- **El espesor de la pieza también influye en la orientación.** Debido a la baja conductividad térmica de los plásticos, las paredes gruesas actuaran como aislantes de la parte central, la cual se mantendrá más tiempo caliente. Esto promoverá la relajación de esta zona, disminuyendo la orientación.
- **Las velocidades de flujo (velocidad de inyección) son críticas.** A mayor velocidad, más rápido se llenará la cavidad y se cerrará la entrada. Una vez el flujo se detiene, empieza la relajación; es decir, disminuye la orientación (Sánchez et al., 2003, pp.63-64).

La Tabla 7 y la Figura 90 resumen gráficamente la influencia de las variables del molde y del proceso de inyección sobre la orientación.

Tabla 7.

Efecto del molde y de las variables de procesado sobre la orientación y la anisotropía.

	ORIENTACIÓN	ANISOTROPÍA
Temperatura		
Alta temperatura del material	Disminuye	Disminuye
Alta temperatura del molde	Disminuye	Disminuye
Enfriamiento rápido de la pieza	Aumenta	Aumenta
Presión		
Alta presión de inyección	Aumenta	Aumenta
Tiempo de sostenimiento largo	Aumenta	Aumenta
Geometría		
Mayor espesor de la pieza	Disminuye	Disminuye
Entradas grandes	Aumenta	Aumenta
Otros		
Baja velocidad de llenado del molde	Aumenta	Aumenta

Sánchez et al., 2003, p.64.

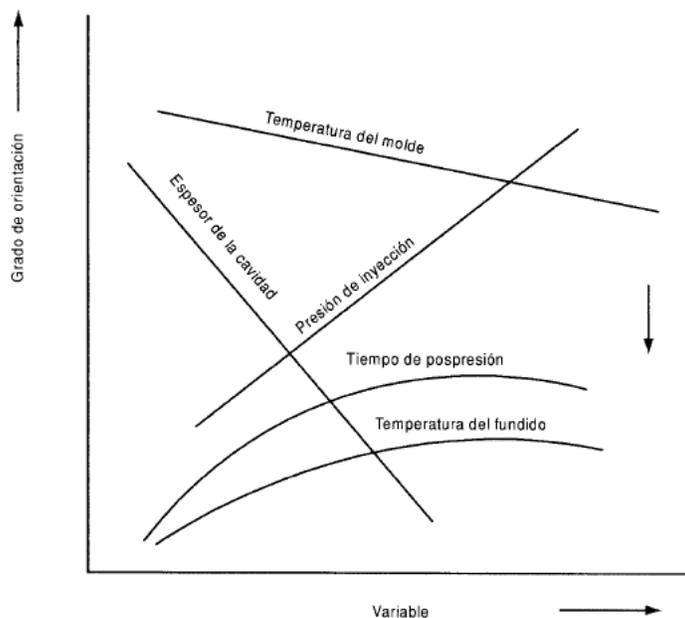


Figura 90. Efecto de las variables de inyección sobre la orientación. (Sánchez et al., 2003, p.65).

2.2.5 Efecto de la orientación en la contracción y las propiedades.

Teniendo en cuenta las diferencias que se presentan en cuanto a la contracción entre materiales amorfos y cristalinos, no se puede olvidar “que uno de los efectos inmediatos de

la orientación es que también contribuye, de manera importante, a la contracción en ambos casos” (Sánchez et al., 2003, p.66).

2.2.5.1 Contracción diferencial.

Generalmente, durante la inyección de una pieza ocurre orientación, es decir, las cadenas del polímero se alinean en la dirección de flujo; cuando el flujo cesa estas cadenas tenderán a regresar a su forma “ovillada” normal. Al hacerlo, el artículo moldeado se reducirá en longitud en esa misma dirección, mientras que la contracción en dirección perpendicular a la línea de flujo será mucho menor. Esta contracción diferencial es una de las causas del **alabeamiento** o **distorsión** [Figura 91] (Sánchez et al., 2003, p.66).

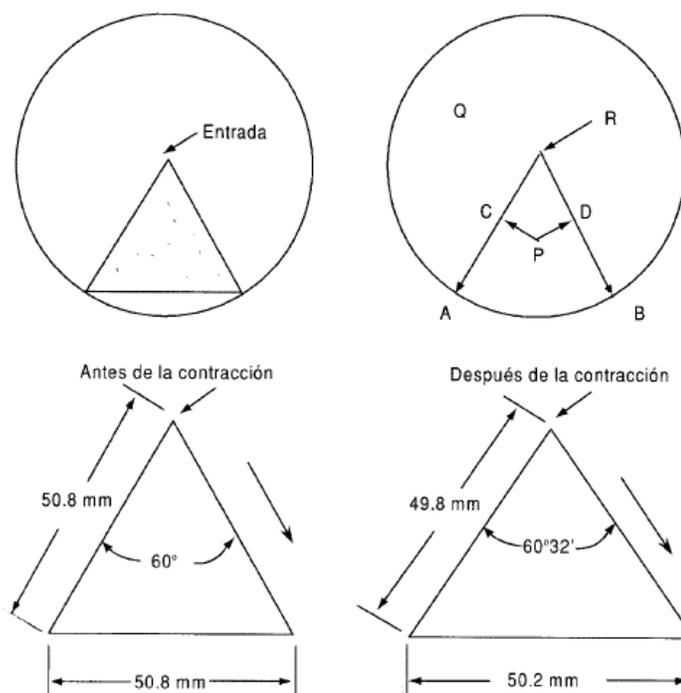


Figura 91. Contracción diferencial como causa de alabeamiento de una pieza moldeada circular. (Sánchez et al., 2003, p.67).

2.2.5.2 Efecto de las condiciones de procesado en la contracción.

El moldeador debe tener presente que una cierta contracción en la pieza es inevitable, pero puede prevenir, al menos en parte, la contracción excesiva, controlando las condiciones de operación (Sánchez et al., 2003, p.71). Si las condiciones de procesado permiten grandes tiempos de relajación, esto dará lugar a mayor contracción principalmente en la dirección de flujo.

2.2.5.3 Factores que ocasionan el alabeamiento.

El alabeamiento o distorsión de una pieza ocurre sobre todo por una contracción no uniforme, esto altera no solo las dimensiones, sino también el contorno y ángulos de la pieza moldeada.

Existen diversos factores que pueden ocasionar en alabeamiento: contracción diferencial, mal diseño del molde o de la pieza y/o malas condiciones de moldeo y/o mala elección del material.

- **Contracción diferencial.** Como ya se mencionó, las diferencias en contracción que ocurren, por efecto de la orientación, en un artículo moldeado, pueden provocar el alabeamiento o distorsión de este, sobre todo si la geometría de la pieza no provee suficiente rigidez. Al reducir la orientación de la pieza se reducirá la contracción diferencial y por lo tanto el alabeamiento.
- **Diseño de la pieza.** En lo relativo al diseño de la pieza se puede señalar que, si se tienen espesores no uniformes, estos tendrán distinta rapidez de enfriamiento y, por lo tanto, diferentes densidades y orientación. Por esto pueden crearse grandes tensiones internas cuando la pieza se enfría, lo cual dará lugar al alabeamiento de la pieza.
- **Diseño del molde.** Por otro lado, uno de los mayores problemas en cuanto al diseño del molde es la localización adecuada de la entrada del material a la pieza moldeada, ya que una mala ubicación de esta puede provocar orientaciones indeseables. Además, el enfriamiento no uniforme da lugar a diferencias en la orientación y en la densidad de la pieza, lo cual también es causa de alabeamiento en la pieza. En el ejemplo de la Figura 91 se observa que una sola entrada (O) provoca una contracción diferencial (ya que la pieza se contrae más en la dirección del flujo, OA-OB, que la dirección perpendicular a este, PC-PD), causando alabeamiento. Por lo tanto, la solución a este caso fue colocar otras entradas (P, Q, R), esto permitió tener una contracción más uniforme en la pieza y evitar así alabeamiento.

Difícilmente estos problemas se pueden solucionar, sin un rediseño de los sistemas del molde o de la pieza.

- **Condiciones de moldeo.** En general cualquier condición que tienda a reducir la orientación hará reducir el alabeamiento. Por ejemplo, un tiempo más largo de enfriamiento disminuirá el alabeamiento, ya que cuanto más rígida este la pieza cuando se extrae del molde, menor posibilidad tendrá de que los esfuerzos se traduzcan en deformaciones.

Mientras que temperaturas no uniformes en el molde darán lugar a diferencias en densidad en las distintas partes de la pieza, lo cual provocara una contracción no homogénea y por lo tanto, provocara el alabeamiento de la pieza moldeada.

- **Materiales.** Los materiales cristalinos presentan mayor contracción que los materiales amorfos. Sin embargo, una mayor cristalinidad da lugar a piezas con una mayor rigidez, lo cual permite menor alabeamiento. Por otra parte, una distribución estrecha de pesos moleculares producirá un menor alabeamiento (Sánchez et al., 2003, pp.66-69).

2.2.5.4 Como evitar el alabeamiento.

“Aunque no existe una solución única al problema del alabeamiento sabemos que cualquier condición que tiende a reducir la orientación permitirá reducir también este problema. La [Tabla 8] muestra algunos factores que influyen en el alabeamiento” (Sánchez et al., 2003, p.69).

Tabla 8.

Factores que influyen en el alabeamiento.

ALABEAMIENTO	
Temperatura	
Alta temperatura del material	Disminuye
Alta temperatura del molde	Disminuye
Enfriamiento uniforme de la pieza	Disminuye
Enfriamiento lento de la pieza	Disminuye
Presión	
Alta presión de inyección	Aumenta
Tiempo largo de sostenimiento	Aumenta
Geometría	
Mayor espesor de la pieza	Disminuye
Espesores no uniformes	Aumenta
Entradas grandes	Aumenta
Otros	
Alta velocidad de llenado del molde	Disminuye

Sánchez et al., 2003, p.69.

Se ha mencionado antes el efecto de las condiciones de procesado sobre la morfología del polímero y como afecta esto a sus propiedades. Además, se ha

señalado que la orientación también afecta, aunque en menor grado, las propiedades de los polímeros cristalinos y amorfos, ya que provoca diferencias de estas en dirección longitudinal y transversal (anisotropía). Generalmente, la orientación puede mejorar algunas propiedades en la dirección de flujo, pero a costa de reducir estas mismas en la dirección transversal, lo cual no es lo más conveniente. Lo que se requiere es una pieza que tenga buenas propiedades en todas direcciones.

En general, puede observarse que, al aumentar la orientación, aumenta la resistencia de tensión, la elongación y la resistencia al impacto Izod con muesca, en la dirección de flujo.

En la [Tabla 9] se puede observar el efecto que tiene la orientación sobre algunas propiedades (Sánchez et al., 2003, pp. 69-70).

Tabla 9.

Efecto de la orientación sobre algunas propiedades.

PROPIEDADES	DIRECCIÓN	
	PERPENDICULAR	LONGITUDINAL
Resistencia a la tensión	Disminuye	Aumenta
Resistencia al impacto con muesca	Disminuye	Aumenta
Resistencia al impacto por caída de peso	Disminuye	Disminuye
Resistencia a la flexión	Aumenta	Aumenta
Fluencia	Disminuye	Disminuye

Sánchez et al., 2003, p. 70.

2.2.6 Contracción térmica.

Ya se ha indicado con anterioridad, el efecto que causa el aumento de temperatura sobre los polímeros cristalinos y amorfos. En general, al aumentar la temperatura se incrementa la movilidad de las cadenas y el volumen libre que existe entre ellas. Un polímero cristalino experimenta un aumento considerable en volumen específico cuando funde su estructura cristalina (T_m), ya que los cristales ocupan menor volumen. Este cambio en volumen no es experimentado por los polímeros amorfos, por lo tanto, se contraen menos cuando pasan del estado fundido al sólido.

En este caso, cuanto más alta es la temperatura del fundido y del molde, más grande será la contracción térmica que sufrirá el material al enfriarse, ya que el enfriamiento

es más lento y permite más movimiento molecular y de los segmentos de las cadenas, lo cual aumenta la probabilidad de que las moléculas se ordenen y solidifiquen en un estado cristalino con lo que se tendrá un mayor grado de cristalinidad.

Es decir, en materiales cristalinos la contracción aumenta cuando se incrementa la cristalinidad, ya que la cristalización del fundido propicia una reducción de volumen de la pieza debido a un incremento de densidad (Sánchez et al., 2003, pp.70-71).

2.2.6.1 *Efecto de las condiciones térmicas de procesado en la contracción.*

En el proceso de inyección se debe tener en cuenta que una cierta contracción en la pieza es inevitable, pero puede prevenirse, al menos en parte, la contracción excesiva, controlando las condiciones de operación. El efecto que tienen algunas de las variables térmicas de proceso sobre la contracción de las piezas son las siguientes.

- ***Efecto de la presión.*** Durante el proceso de inyección, la presión que se transmite a la cavidad influye directamente en la contracción de la pieza moldeada. Cuando el molde se llena, la presión dentro del molde aumenta rápidamente, comprimiendo el material. Durante el enfriamiento de la pieza, su volumen disminuye y la presión de inyección empuja más el material, compensando dicha reducción en volumen. Mientras más gruesa sea la capa de material solidificado, menor será la contracción. A mayor presión menor contracción. Se puede decir que la variable más importante que afecta las condiciones de una pieza moldeada es la presión del molde. Cuanto más largo sea el tiempo en que actúa la pospresión, mientras no se cierre la entrada, más material puede ser empaquetado en la cavidad y, por lo tanto, la pieza se contraerá menos.
- ***Efecto de la temperatura.*** Como ya se ha indicado, a mayor temperatura del fundido, mayor será la contracción que se obtendrá en la pieza moldeada al enfriarse. Sin embargo, también el aumento de temperatura da lugar a una disminución de la viscosidad, lo cual permite que la transmisión de la presión a la cavidad sea mayor, permitiendo un mayor empaquetamiento de material; entonces la presión más alta sobrepasa el efecto de aumento de temperatura. Disminuyendo la contracción.
- ***Espesor de la pieza.*** Un mayor espesor de la pieza moldeada da lugar a que el material en el interior de esta se enfríe más lentamente y origina más movimiento molecular y de los segmentos de las cadenas; aumenta la probabilidad de que las moléculas se ordenen y solidifiquen en un estado cristalino; esto propiciara entonces un mayor grado de cristalinidad y por lo tanto, mayor contracción.

- **Tamaño de la entrada.** Es necesario determinar cuidadosamente el tamaño de la entrada para asegurarse que esta no va a solidificar de manera prematura. Es decir, el material en la zona de entrada debe permanecer fluido el tiempo suficiente para que transmita la presión de inyección adecuadamente, en caso contrario se dará lugar a altas contracciones. El efecto de algunas variables de inyección sobre la contracción puede apreciarse, de forma resumida, en la Tabla 10 y en la Figura 92 (Sánchez et al., 2003, pp.71-73).

Tabla 10.

Condiciones que afectan la contracción.

PARA DISMINUIR LA CONTRACCIÓN	
Temperatura	
Temperatura del fundido	Aumentar
Temperatura del molde	Disminuir
Presión	
Presión de inyección	Aumentar
Tiempo de <u>pospresión</u>	Alargar
Geometría	
Espesor de paredes de la pieza	Disminuye
Tamaño de la entrada	Aumenta
Otros	
Velocidad inyección	Disminuye
Ciclo total	Alargar

Sánchez et al., 2003, p.72.

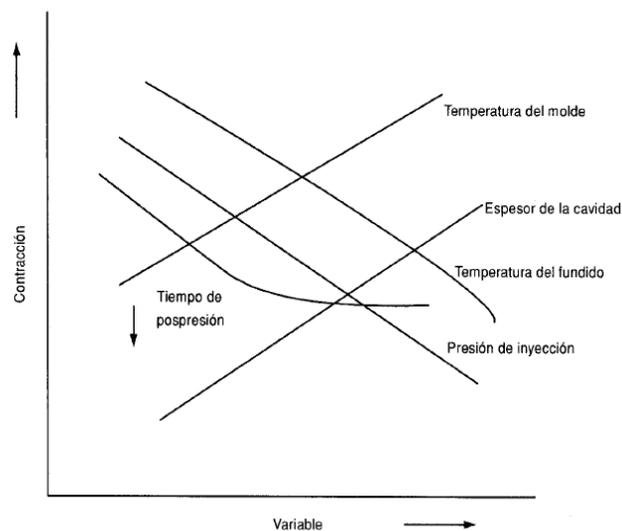


Figura 92. Condiciones que afectan la contracción. (Sánchez et al., 2003, p.73).

2.3 La Máquina de Inyección.

En una máquina inyectora para termoplásticos [Figura 93] pueden identificarse diferentes partes fundamentales, las cuales normalmente se agrupan dentro de las siguientes unidades:

- **Unidad de cierre:** consta de los dispositivos necesarios para la colocación, accionamiento y funcionamiento de las dos mitades del molde.
- **Unidad de inyección:** Comprende las partes necesarias de la máquina para la carga, plastificación (fusión) e inyección del plástico.
- **Unidad de potencia:** Comprende el conjunto de dispositivos necesarios de la máquina para transformar y suministrar la fuerza motriz a las unidades de inyección y de cierre.
- **Unidad de control:** Es la parte necesaria de la máquina para que se realice el proceso de una forma predeterminada y pueda variarse a voluntad, si fuera preciso. El sistema de control está ligado íntimamente al de potencia, a través del cual las distintas señales se convierten en movimientos de las unidades de inyección y cierre.

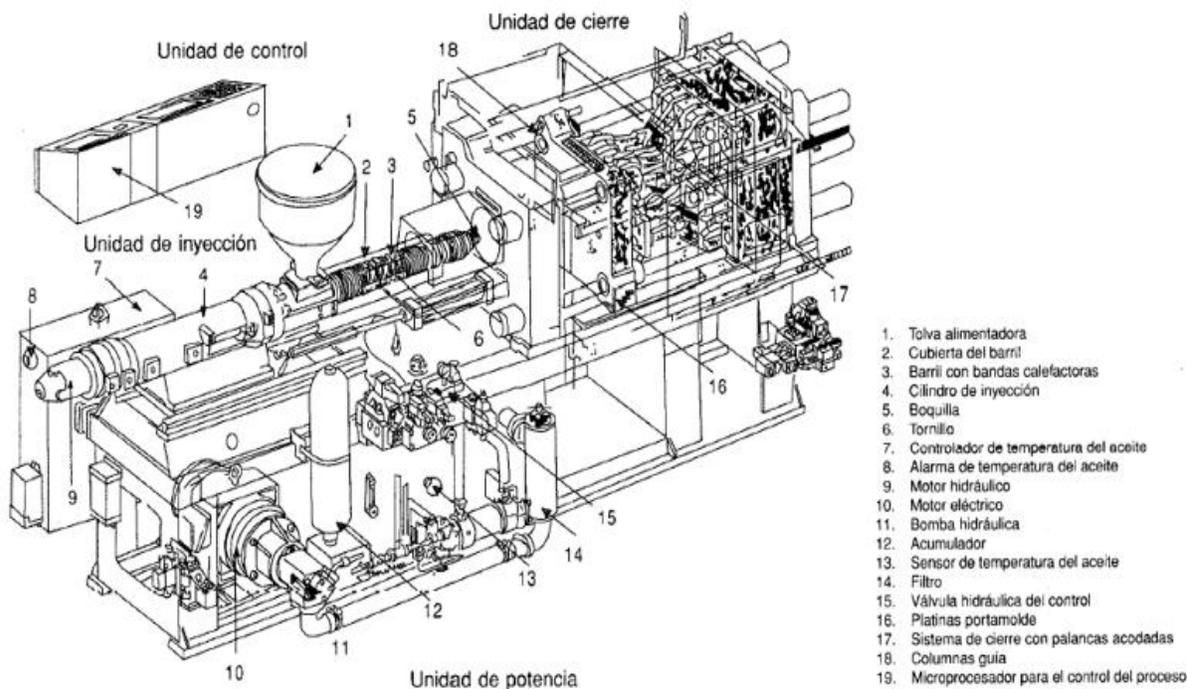


Figura 93. Partes fundamentales de una máquina inyectora. (Rosato, 1986, citado en Sánchez et al., 2003, p.77).

Cada una de estas partes realiza un cierto número de funciones, que pueden mezclarse tanto como lo requiera el proceso de inyección, si bien la relación de una con otras no está determinada por el proceso.

Las unidades de inyección y de cierre son las partes más importantes para definir una máquina inyectora, por lo que a continuación se describirán los aspectos más relevantes de cada una de ellas (Sánchez et al., 2003, pp.75-78).

2.3.1 Unidad de inyección y plastificación.

En la Figura 94 se muestra la unidad de inyección y plastificación. Las funciones principales de la unidad de inyección son las de fundir el polímero, homogeneizar y acumular el material fundido en la cámara del husillo, inyectar el fundido dentro de la cavidad, y mantener la presión constante durante el proceso final de enfriado (Menges & Osswald, 2012, p.210).

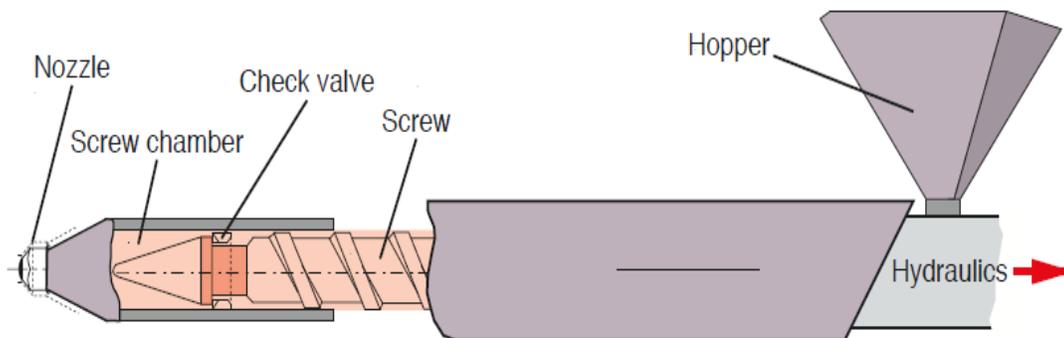


Figura 94. Esquema de la unidad de plastificación. (Menges & Osswald, 2012, p.211).

Los elementos principales que componen la unidad de plastificación son los siguientes:

- Tolva (Hopper)
- Husillo (Screw)
- Sistema Calefactor (Heater bands)
- Válvula de retención (Check valve)
- Boquilla (Nozzle)

La tolva, el sistema calefactor y el husillo son similares a los de una extrusora mono husillo de plastificación, a excepción de que el husillo en la máquina inyectora puede retroceder para permitir la acumulación de la masa fundida en el extremo final y poder inyectar posteriormente dentro del molde. Esta característica le confiere el nombre de husillo tipo

embolo. En este caso, el recorrido máximo que puede realizar el husillo dentro del cilindro de la inyectora es 3 veces el Diámetro (3D).

Aunque el husillo más utilizado en máquinas de inyección es el husillo de plastificación de tres zonas, frecuentemente se emplean husillos con desgasificación de dos etapas para extraer la humedad y los gases desprendidos por el polímero justo después de la etapa de fusión.

La válvula de retención, o válvula antirretorno, está situada al final del husillo y puede trabajar como un embolo durante la inyección, compactando el polímero fundido sin permitir que escape y retroceda dentro del canal del husillo. En la Figura 94 se muestran la función de una válvula de retención durante el proceso de inyección. En la actualidad existen válvulas de retención de alta calidad en las que el porcentaje de masa fundida que puede retroceder dentro del canal del husillo durante el proceso de inyección y compactación es inferior al 5%.

Finalmente, la boquilla es la pieza situada en el extremo de la unidad de plastificación que da salida al material inyectado. Durante la inyección, la unidad de plastificación avanza hasta conseguir que la boquilla ajuste fuertemente contra el bebedero de entrada al molde. Asimismo, el tipo de boquilla puede ser abierta o cerrada. La boquilla abierta es la más simple, permitiendo un menor consumo de presión (Menges & Osswald, 2012, p.211).

2.3.2 Unidad de potencia.

Al analizar la demanda de potencia de los principales movimientos involucrados en el ciclo de moldeo [Figura 95], se observa que el movimiento de cierre del molde requiere solo la potencia necesaria para vencer la resistencia generada por fricción para alcanzar la rapidez necesaria para el cierre del molde. Sin embargo, al final de este movimiento debe aplicarse una gran fuerza de cierre, tan rápido como sea posible para mantener cerradas las dos mitades del molde (Sánchez et al., 2003, p.79-80).

La etapa de inyección necesita la potencia máxima, aunque casi siempre por un periodo muy breve y esta depende de las condiciones de moldeo, que establecen la carrera del pistón de inyección. Por ejemplo, el empleo de materiales de baja fluidez o de entradas pequeñas a las cavidades exige el uso de grandes presiones, el caso contrario permitirá reducir las

necesidades de potencia. El movimiento de la unidad de inyección y la apertura del molde necesitan generalmente muy poca potencia.

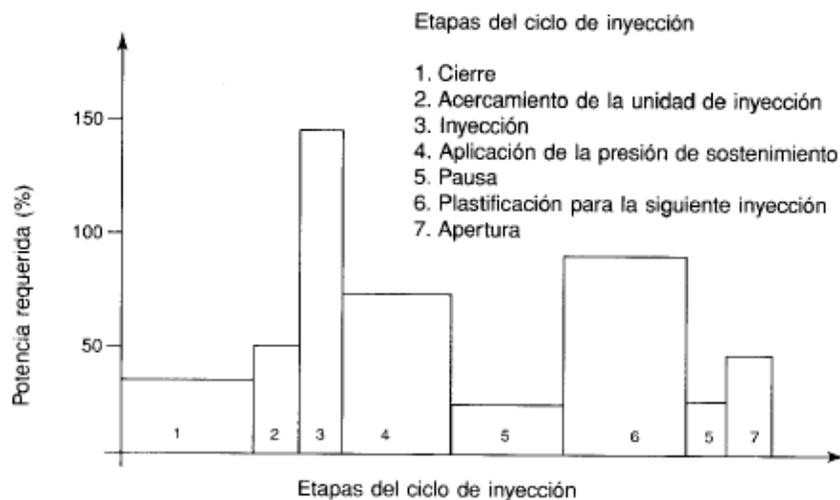


Figura 95. Consumo de potencia de los principales movimientos involucrados en un ciclo de inyección típico. (Johannaber, 1982, citado en Sánchez et al., 2003, p.79).

Para lograr las condiciones de trabajo apropiadas, según el tipo de pieza, se debe regular tanto la fuerza como la velocidad de los diferentes fluidos que suministran la potencia durante las diferentes fases del ciclo de inyección.

Igualmente, es de gran importancia la regulación de la fuerza de inyección aplicada al plástico fundido durante el llenado del molde y la compactación (presión de sostenimiento o pospresión).

La velocidad a la que fluye el plástico a la cavidad del molde y la presión que se aplica durante el tiempo de enfriamiento, ejercen gran influencia en la calidad de la pieza obtenida. En general, es bueno utilizar una velocidad tan alta como lo permita la máquina, si bien hay tipos de moldes en los que es necesario controlar la velocidad para eliminar defectos y marcas de flujo en la superficie de la pieza.

Los principales tipos de sistemas de potencia para la unidad de inyección se pueden clasificar en:

- Motor eléctrico con unidad reductora de engranes.
- Motor hidráulico con unidad reductora de engranes.
- Sistema hidráulico directo (Sánchez et al., 2003, p.80).

2.3.2.1 Sistema de potencia eléctrica.

Este sistema de potencia se utiliza generalmente en máquinas relativamente pequeñas, puede emplearse tanto para hacer girar el tornillo como para abrir y cerrar el molde mediante la unidad de cierre. Esto debido a que la máquina posee dos sistemas de engranes y palancas, uno para el cierre y otro para la inyección, cada uno con su respectivo motor eléctrico independiente de gran par y cuyos ejes pueden girar en ambos sentidos. Cada motor transmite la potencia a la palanca acodada mediante un cuadrante y una rueda dentada.

Así con un sentido de giro en el motor, se accionan las rodilleras para el cierre del molde y se aplica una gran fuerza de cierre, al invertir el sentido de giro del motor se abre el molde. De forma similar el otro motor acciona los engranes que activan la rotación del tornillo. En la Figura 96 se presenta un diseño típico de un sistema de potencia eléctrico para la unidad de inyección (Sánchez et al., 2003, p.80-81).

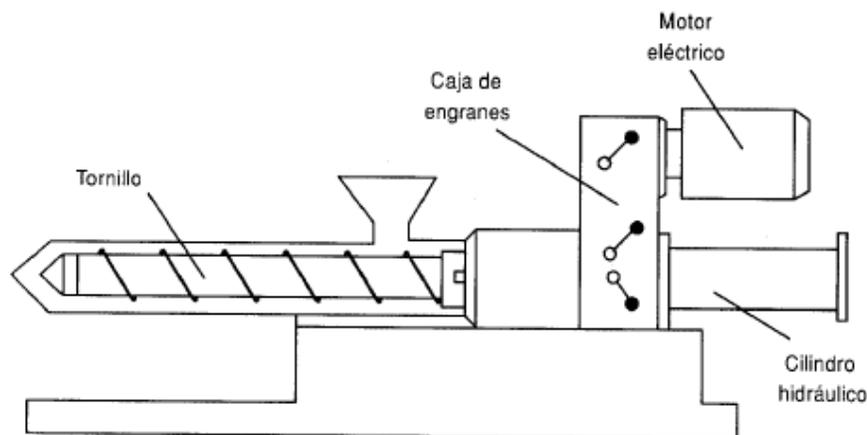


Figura 96. Diseño típico de un sistema de potencia eléctrica para la rotación del tornillo. (Sánchez et al., 2003, p.81).

En los sistemas con motor eléctrico la velocidad del tronillo puede ajustarse solo en un determinado número de valores económicamente rentables, lo cual puede ocasionar problemas en la reproducción de los parámetros de operación, lo que dificulta la obtención de piezas plásticas con calidad constante (repetitividad del proceso).

Normalmente los motores eléctricos generan un torque inicial muy alto, por lo que debe tenerse precaución al usar tornillos con diámetros de pequeño a medio para evitar que sean dañados. Generalmente los motores eléctricos cuentan con un freno mecánico, que es activado eléctricamente al finalizar la etapa de alimentación, evitando que el tornillo gire durante la inyección. Lo cual es muy práctico cuando no se utiliza válvula antirretorno en el tornillo (Sánchez et al., 2003, p.81-82).

2.3.2.2 Sistema de potencia hidráulico.

Estos son los más usados y transforman potencia la hidráulica de un fluido en potencia mecánica, similar al sistema utilizado en las bombas hidráulicas.

En estos sistemas de potencia a base de fluidos se utiliza un fluido (aire, agua, aceite) para transmitir la potencia desde una fuente de energía a las partes de accionamiento de la máquina. Mientras que, en el caso de las máquinas electromecánicas, la transmisión de la potencia desde la fuente (motor eléctrico) a las partes de accionamiento de la máquina se efectúa por medios mecánicos, a través de engranes y palancas, con un sistema de fluidos estos mecanismos se sustituyen, total o parcialmente, por tuberías de conducción que llevan el fluido a presión a los pistones de inyección y cierre del molde.

El uso del aceite ha predominado en la mayoría de las máquinas hidráulicas y es usado actualmente por casi todos los fabricantes de máquinas de inyección, lo cual se debe a sus propiedades lubricantes en aplicaciones que implican grandes cargas en el equipo de bombeo. Aunque no es barato, su uso es rentable si se presta atención a su aplicación, uso en servicio y mantenimiento. Su compresibilidad es baja y el porcentaje de reducción de volumen con el aumento de la presión depende del tipo de aceite, de la temperatura y de algunos factores más.

En los sistemas hidráulicos es común usar presiones que varían entre 70 y 140 kg/cm² y aún más en máquinas grandes.

Las ventajas del motor hidráulico con respecto al eléctrico pueden resumirse principalmente en:

- Permite la variación de velocidades, lo cual se logra de manera sencilla con el control de volumen de fluido.
- Se alcanza una relación casi lineal entre el torque y la velocidad. El límite del torque se logra por la presión limitante (evitando el daño a los tornillos) y el torque de inicio es aproximadamente igual al de operación.
- Permite inicios y paros rápidos debido al pequeño momento de inercia en lo que respecta al tornillo. La inercia de cierre depende del peso del molde.
- Permite relaciones bajas de peso potencia, lo que favorece el alcance de altas velocidades del material durante la inyección.

Un diseño típico de este motor se presenta en la Figura 97 (Sánchez et al., 2003, pp.82-83).

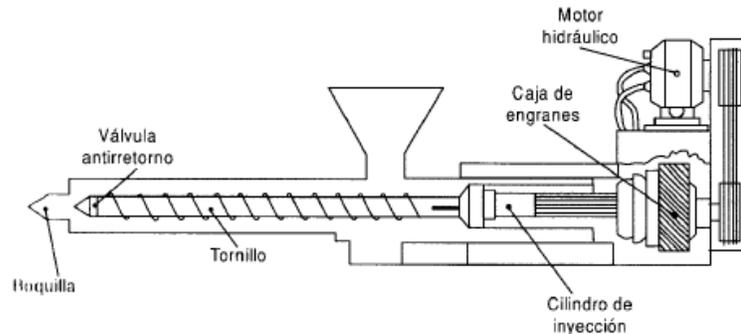


Figura 97. Diseño típico de un sistema de potencia hidráulico para la rotación del tornillo. (Sánchez et al., 2003, p.83).

2.3.3 Unidad de cierre.

El trabajo de la unidad de cierre de una máquina inyectora, es abrir y cerrar el molde durante el proceso de expulsión e inyección, respectivamente. El sistema de cierre debe ser lo suficientemente fuerte como para evitar la aparición de rebabas en el artículo o pieza durante el llenado y la compactación. Las máquinas de inyección más modernas presentan dos tipos de accionamientos: mecánicos e hidráulicos.

La Figura 98 presenta un mecanismo de rodillera en las posiciones de molde abierto y cerrado. Aunque el sistema de rodillera se mueve accionado por un cilindro hidráulico se le considera esencialmente un accionamiento mecánico. El mecanismo de palanca o rodillera tiene la ventaja que cuando el molde se acerca al cierre, la fuerza de cierre disponible aumenta y el tiempo de cerrado se reduce de forma significativa. Sin embargo, el mecanismo de palanca sólo transmite su fuerza máxima de cierre cuando el sistema está completamente extendido.

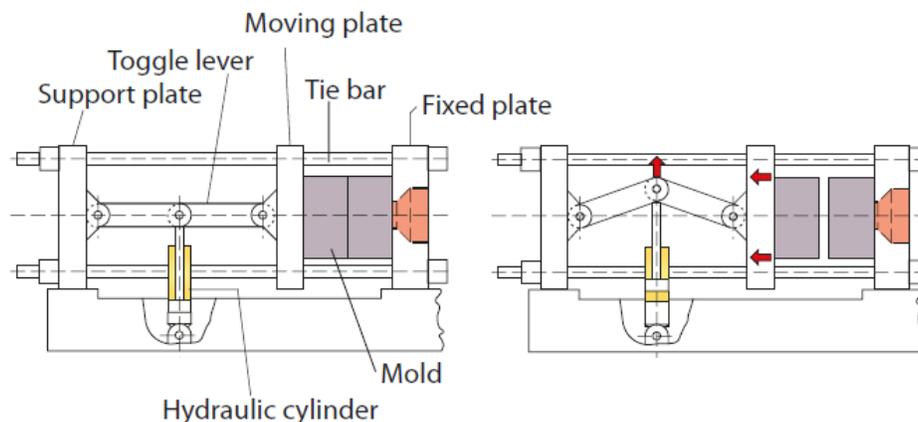


Figura 98. Unidad de cierre con un mecanismo de rodillera. (Menges & Osswald, 2012,p.212).

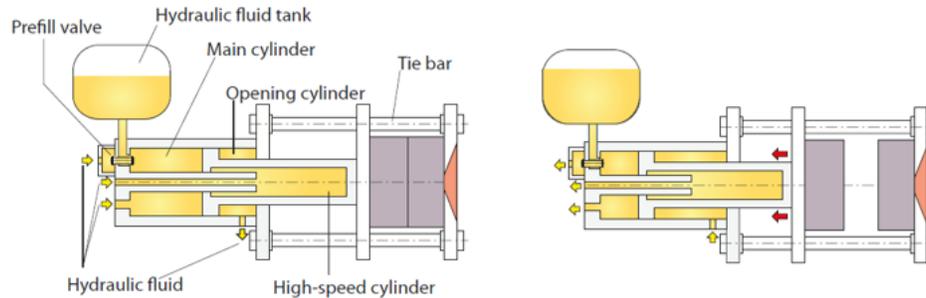


Figura 99. Unidad de cierre hidráulica. (Menges & Osswald, 2012,p.212).

La Figura 99 muestra el esquema de una unidad de cierre hidráulica en las posiciones de molde abierto y cerrado. Las ventajas del sistema hidráulico son que la fuerza máxima de cierre se puede alcanzar en cualquier posición de cierre del molde, y que el sistema puede tomar diferentes tamaños molde sin ajustes importantes del sistema. (Menges & Osswald, 2012, p.211-212).

2.4 Características Principales de la Máquina

Las máquinas de inyección poseen unas características fundamentales que permiten definir las limitaciones de tamaño y peso de la pieza a inyectar, tamaño del molde y capacidad de producción entre otras. Dichas características las incluye el fabricante en las especificaciones de la máquina, estas deben conocerse y ser analizadas para determinar las posibilidades de la máquina para producir la pieza objetivo. El fabricante puede definir características particulares de la máquina, tales como sistema de control de temperaturas, de circuitos hidráulicos y eléctricos, diseño de barril, formas de expulsión del artículo, y algunas otras. Sin embargo, estas características particulares no son comparables directamente entre máquinas.

En la Tabla 11 se presentan las características fundamentales de una máquina de inyección, que son especificadas por el fabricante (Sánchez et al., 2003, p.105).

Las principales características que permiten definir y comparar las capacidades de las unidades de cierre y de inyección de las máquinas al momento de la selección para la producción de una pieza plástica, son las siguientes:

- Capacidad de cierre.
- Dimensiones de molde.
- Recorrido de apertura del molde.
- Capacidad de inyección.

- Presión de inyección.
- Capacidad de plastificación.
- Velocidad de inyección (Sánchez et al., 2003, p.106).

Tabla 11.

Valores típicos de las características fundamentales de una máquina inyectora.

UNIDAD DE INYECCIÓN		UNIDAD DE CIERRE	
Diámetro del tornillo, mm	40	Numero de zonas de calefacción	1+3
Presión de inyección, kg/cm ²	1606	Capacidad de cierre, ton	90
Capacidad de inyección teórica, cm ³	201	Distancia entre columnas guía, mm	H404xV304
Peso máximo de inyección (PS), g	183	Dimensiones de los platos, mm	H640xV540
Peso máximo de inyección (HDPE), g	143	Altura mín. para montar el molde, mm	250
Relación L/D del tornillo,	20	Recorrido de apertura, mm	375
Recorrido del tornillo, mm	160	Distancia máxima entre platos, mm	625
Capacidad de plastificación, g/s	21	Números de ciclos en vacío, min ⁻¹	32
Velocidad de iny. en vacío, cm ³ /s	133	Recorrido del expulsor, mm	160

Sánchez et al., 2003, p.105.

2.4.1 Capacidad de cierre.

Esta es una de las características más importantes a tener en cuenta en una máquina de inyección, indica la fuerza máxima en toneladas, que se opone a la presión de inyección y que evita que el molde se abra.

Cuando los materiales termoplásticos están fundidos, se comportan como fluidos “nonewtonianos”, su comportamiento bajo presión y en las condiciones de flujo que existen en el proceso de inyección hacen que la transmisión de presión sea difícil. La estructura molecular de los polímeros impide que la presión se trasmita igualmente en todas las direcciones, de tal forma que la presión transmitida al molde es menor que la aplicada por el tornillo de inyección. El porcentaje de presión que se transfiere depende de varios factores, especialmente:

- La viscosidad del material plastificado.
- Y la temperatura de plastificación.

Si la viscosidad del polímero es baja (semejante al agua), se incrementa la eficacia de la transmisión de presión.

Por otro lado, el material que entra en la cavidad del molde se enfría continuamente, por lo que el material en los extremos de la pieza inyectada estará más frío que en la zona próxima a la entrada, generándose un gradiente de presión a lo largo de la línea de partición del molde, el cual será diferente para cada molde y en cada molde para las diferentes condiciones de moldeo. Por lo tanto, la fuerza de apertura real (F), debida a la presión en el molde será producto de la presión media en el molde (P_m) por el área proyectada de la pieza (A_p).

$$F = P_m * A_p \quad (2-16)$$

El valor de la presión media (P_m) es la presión que ejerce el material sobre las paredes de la cavidad y la cual trata de abrir el molde. Esta presión siempre será menor que la presión de entrada, que a su vez será menor que la presión aplicada por el pistón de inyección, debido a las pérdidas producidas entre la cara del pistón y la cavidad del molde. Comúnmente la presión en la cavidad es medida mediante transductores para así ajustar la presión de inyección ejercida.

El área proyectada (A_p) Figura 100, se define como el área que presenta perpendicularmente a la unidad de cierre, tanto la pieza o conjunto de piezas moldeadas y la colada (vena y canales de alimentación). Dicha área es la que presenta resistencia a la presión de inyección, por lo que sí es muy grande la unidad de cierre tendera a abrirse.

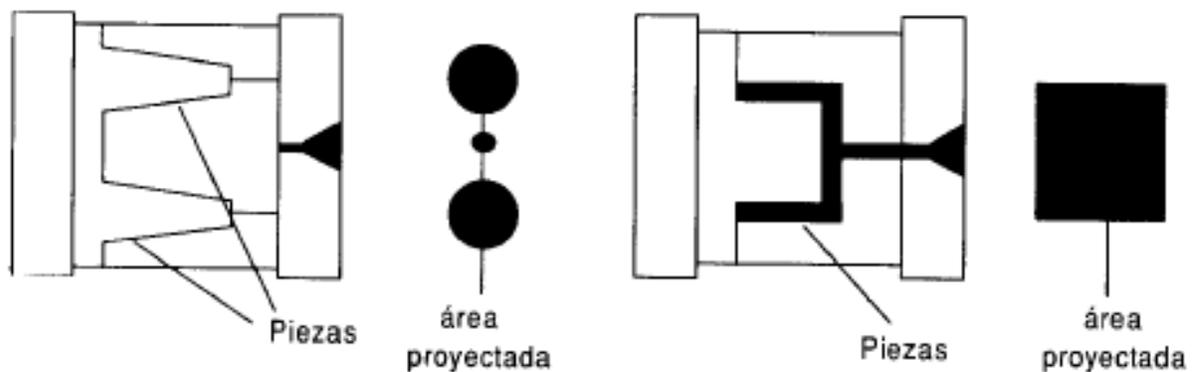


Figura 100. Área proyectada de una pieza moldeada. (Sánchez et al., 2003, p.107).

La fuerza de cierre está relacionada de manera directa con el área proyectada del artículo a moldear, por lo que debe tenerse cuidado que dicha área no sea mayor que el valor del área proyectada máxima de la máquina.

Los valores de área proyectada que pueden utilizarse con seguridad para una fuerza de cierre determinada dependen además de otras características de las piezas, tales como espesor de pared, profundidad de la pieza, tipo de entrada a la cavidad, etcétera.

Por ejemplo, se va a inyectar una pieza con un área proyectada de 650 cm^2 y relativamente de poca profundidad (25 mm) y de un espesor de 3 mm, la cual requeriría de una fuerza de cierre de 250 toneladas para mantener el molde cerrado. Tal pieza puede inyectarse a una determinada presión de inyección. Si esta misma pieza se inyecta en un material más viscoso o si el espesor se redujera a 2 mm, se necesitaría de una presión de inyección más alta. Lo cual significa que en la cavidad se generaría una fuerza de apertura mayor y, por lo tanto, se necesitaría una mayor fuerza de cierre.

Un incremento similar en la fuerza de cierre también podría ser necesario si se aumenta la profundidad de la pieza. En el caso de una pieza más profunda, el recorrido de flujo de material plástico es mayor, por lo que es preciso mantener una presión mayor en la cavidad mientras el material fluye a lo largo de las paredes laterales. Esto hace que cuando el molde este lleno, la presión que actúa sobre la superficie proyectada sea mayor. La Figura 101 muestra esquemáticamente la diferencia de recorrido en dos piezas diferentes (Sánchez et al., 2003, pp. 106-107).

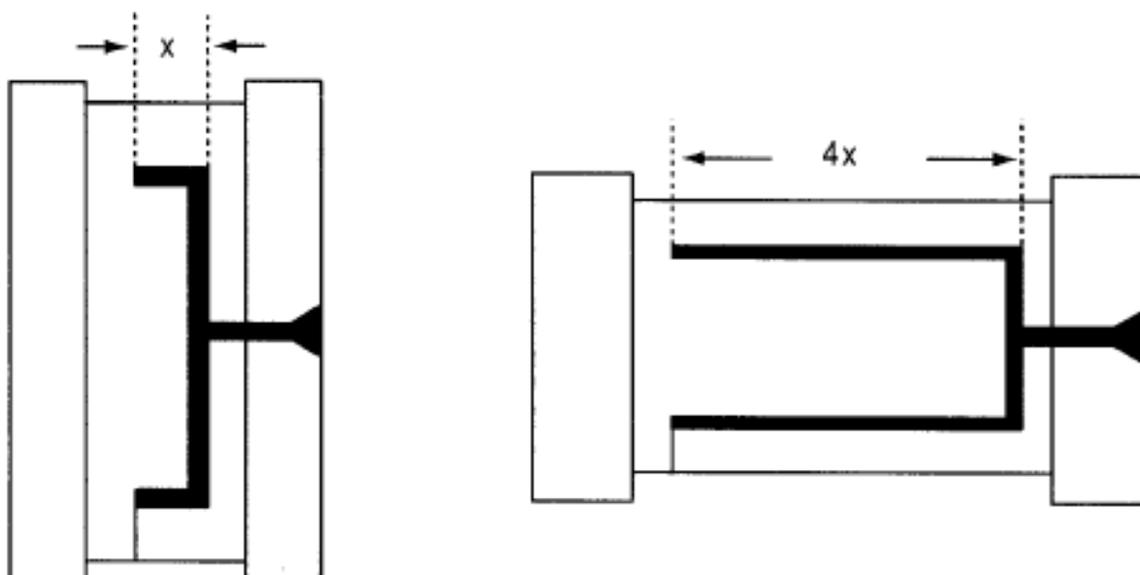


Figura 101. Piezas con diferentes recorridos de flujo. (Sánchez et al., 2003, pp. 108).

La relación entre la capacidad de cierre requerida con el espesor de la pieza y el recorrido de flujo (profundidad de la pieza) se presentan en la Figura 102.

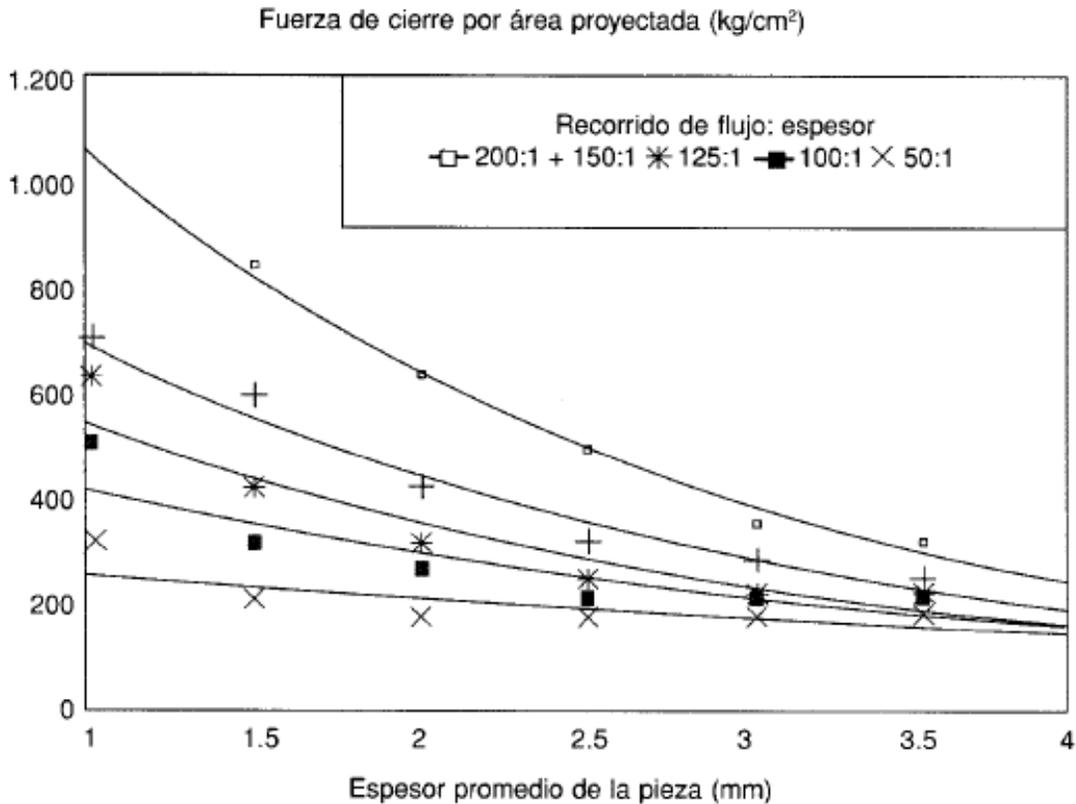


Figura 102. Fuerza de cierre requerida en función del espesor de la pieza y del recorrido de flujo de material. (Sánchez et al., 2003, pp. 109).

Para plásticos con buena fluidez, tales como PS, PE, PP, etcétera, se ha estimado con bastante aceptación que la presión promedio (P_m) de la resina dentro del molde es aproximadamente 250 kg/cm² y para aquellos materiales de baja fluidez tales como CA, PC, PVC rígido, etcétera, de aproximadamente 300 kg/cm². Por ejemplo, para moldear una pieza de PS en forma de plato con entrada directa y de 15 cm de diámetro puede determinarse con la ecuación (16) que requerirá una fuerza de cierre de:

$$F = P_m * A_p = \left(\frac{250 \text{ kg}}{\text{cm}^2} \right) \left[\frac{\pi}{4} (15 \text{ cm})^2 \right] = 44000 \text{ kg} \quad (2-17)$$

Donde:

F = Fuerza de cierre

P_m = Presión media para el PS

A_p = Área proyectada del plato = $\pi * \frac{d^2}{4}$

(Sánchez et al., 2003, pp. 108-109).

Tabla 12.*Fuerza de cierre requerida para algunos termoplásticos.*

MATERIAL	FUERZA DE CIERRE	
	(MN/m ²)	(ton-f/in ²)
ABS	38.6 a 61.8	2.5 a 4
CA	15.4 a 30.9	1 a 2
HIPS	15.4 a 30.9	1 a 2
PA 6	61.8 a 77.2	4 a 5
PA 66	61.8 a 77.2	4 a 5
PA 11	23.2 a 30.9	1.5 a 2
PA 12	23.2 a 30.9	1.5 a 2
PC	46.3 a 77.2	3 a 5
HDPE	23.2 a 38.6	1.5 a 2.5
LDPE	15.4 a 30.9	1 a 2
PET-Amorfo	30.9 a 38.6	2 a 2.5
PET-Cristalino	61.8 a 92.6	4 a 6
PMMA	30.9 a 61.8	2 a 4
PS	15.4 a 30.9	1 a 2
PVC Plastificado	23.2 a 38.6	1.5 a 2.5
SURLYN	15.4 a 20	5 a 8
PCTG	46.3 a 77.2	3 a 5

Sánchez et al., 2003, p.110.

Una estimación empírica comúnmente empleada consiste en aplicar 31 meganewton (MN) de fuerza de cierre por cada m² de área proyectada (2 ton/in²). Sin embargo, esta estimación no puede generalizarse por lo que en la Tabla 12 se presenta la fuerza de cierre recomendada para algunos materiales plásticos (Sánchez et al., 2003, pp.109-110).

2.4.2 Dimensiones de molde.

La distancia que queda libre entre los platos móvil (respaldo expulsión) y fijo (respaldo inyección) de la inyectora, cuando el molde está cerrado, define el espesor del molde que puede utilizarse, mientras que el tamaño de las placas de respaldo e inyección de la máquina limita la altura y el ancho del mismo. Además, se debe tener en cuenta el ancho o la distancia entre las barras de la máquina que es de importancia a la hora de facilitar el montaje del molde a la máquina.

El espesor máximo del molde es la distancia máxima que puede obtenerse entre el plato fijo y el móvil cuando el mecanismo de cierre está totalmente retraído. Mientras que el espesor mínimo del molde es aquella distancia que queda entre las placas cuando el mecanismo está totalmente extendido para el cierre.

En las máquinas que utilizan sistema de cierre mecánico de palanca acodada, suele darse un rango entre máximo y mínimo para que cualquier espesor de molde entre dichos límites pueda ser montado en la inyectora. Esto implica poder regular la posición final del plato para compensar según sea el espesor del molde, ya que la máquina posee un mecanismo que proporciona una carrera fija.

Comúnmente en las máquinas que emplean sistemas de cierre completamente hidráulico, la fuerza de cierre que se desarrolla es independiente de la posición del plato móvil. Con esta característica se hace innecesario cualquier tipo de ajuste en el recorrido, ya que la máquina proporciona la fuerza total de cierre cuando se juntan las dos partes del molde, sin importar el espesor final de este.

En la Figura 103, se muestran los dos sistemas mencionados.

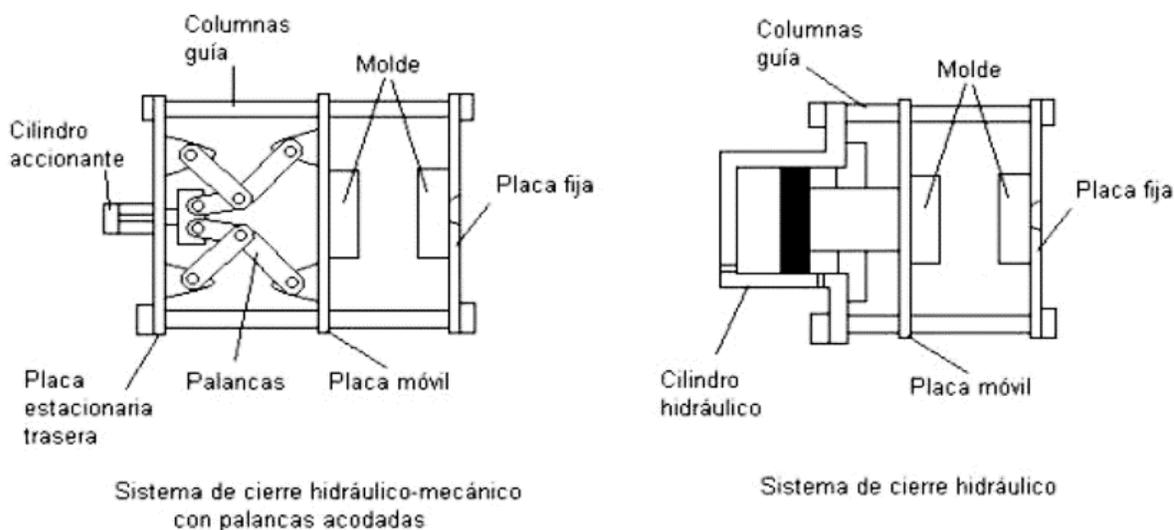


Figura 103. Dimensiones máximas y mínimas de un molde según el sistema de cierre utilizado. (Sánchez et al., 2003, p.111).

El espesor del molde puede variar según el sistema de extracción a utilizar para expulsar el artículo. Los sistemas más comunes que pueden afectar dicho espesor serían; usar una placa de expulsión, que aprovecha el movimiento de del cilindro expulsor de la máquina y solo aumenta el espesor del molde en el espesor de la placa expulsora. Si se usan pines expulsores de artículo estos van fijados a una placa flotante al interior del molde y puede requerir varias etapas para el desmoldeo del artículo, el espesor del molde se aumenta en el espesor de la placa y la suma de los movimientos requeridos (Sánchez et al., 2003, pp.110-111).

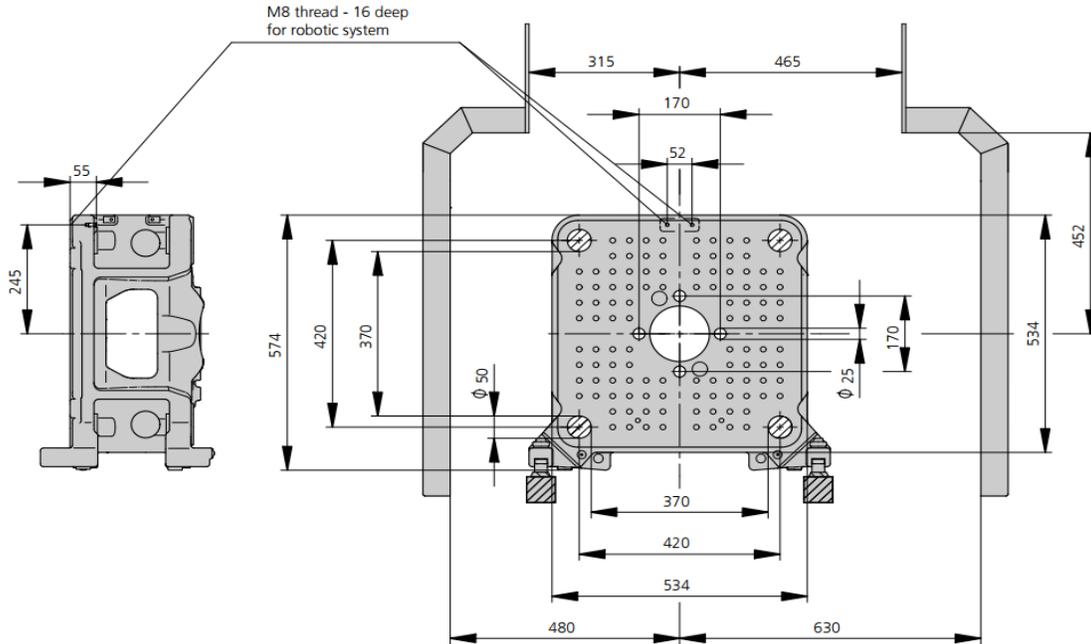


Figura 104. Dimensiones de montaje de molde placa móvil. (Arburg, s.f.).

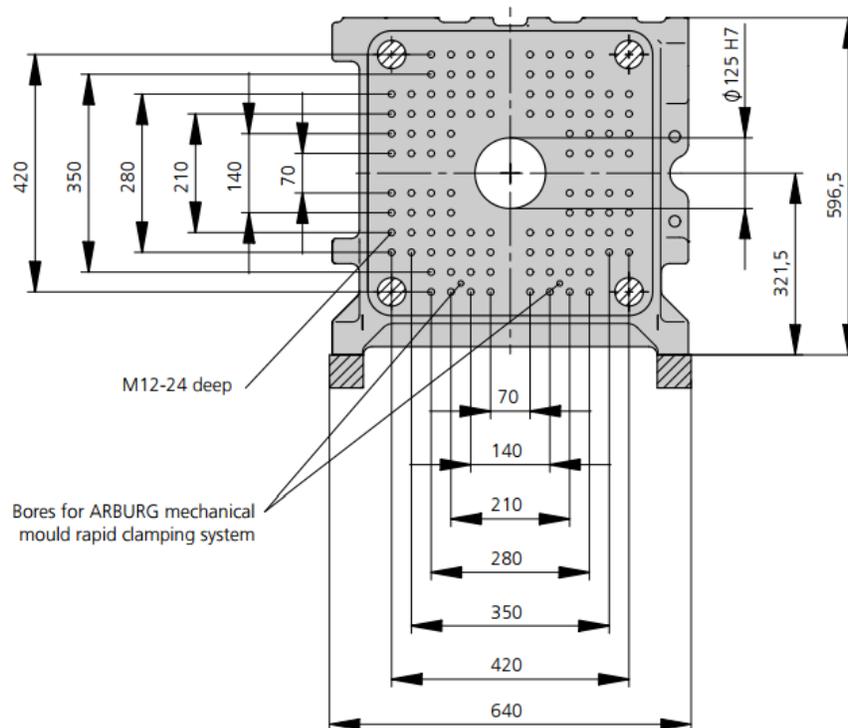


Figura 105. Dimensiones de montaje de molde placa fija. (Arburg, s.f.).

Es común que los proveedores proporcionen las dimensiones de las placas de la máquina (Figura 104 y Figura 105), mostrando las características dimensionales de la máquina, esto ayuda a definir las demás dimensiones del molde tales como la altura, el ancho y la posición

de los amarres del molde a la máquina. Esto último dado que las placas de la máquina presentan una gran cantidad de perforaciones roscadas en las que se colocan tronillo que sujetaran el molde a la máquina. Las perforaciones están distribuidas de manera estandarizada para facilitar el intercambio del molde entre diferentes máquinas. Aunque esto debe ser verificado de proveedor a proveedor en los catálogos suministrados por estos.

2.4.3 Recorrido de apertura del molde.

El recorrido de apertura del molde es la distancia recorrida por la placa móvil de la máquina durante los movimientos de apertura y cierre de la misma. Normalmente se especifica como el movimiento máximo que puede obtenerse de la máquina (Sánchez et al., 2003, pp.112-113).

2.4.4 Capacidad de inyección.

La capacidad de inyección de una máquina inyectora generalmente suele diferenciarse en como capacidad teórica y capacidad real.

- **Capacidad teórica:** también conocida como calculada, se define como el máximo de volumen de material calculado, que puede ser desplazado hacia adelante por el tornillo o pistón de inyección, a lo largo de la longitud de su carrera máxima sin que ocurran fugas de material. Esto puede calcularse con la siguiente formula:

$$C_i = \frac{\pi}{4} * d^2 * L \quad (2-18)$$

Donde:

C_i = Capacidad de inyección en cm^3

d = Diámetro del tornillo en cm

L = Recorrido máximo del tornillo en cm

- **Capacidad de inyección real:** esta es la especificación del peso máximo de la pieza (con los canales y vena de alimentación) que puede ser inyectado por el tornillo bajo carga máxima. Estos pesos máximos de inyección de penden de:

- Carrera del pistón o tornillo.

- Diámetro del pistón o tornillo.
- Densidad aparente de los gránulos (para máquinas con pistón).

Esta capacidad de inyección puede ser variada en algunas máquinas, que permiten montar pistones o tornillos de diferentes diámetros, cada uno de ellos con su correspondiente barril o cilindro. Teniendo en cuenta que las máquinas vienen proyectadas para determinada fuerza de inyección total, para cada diámetro de pistón o tornillo, se tiene una presión de inyección diferente. En conclusión, a mayor diámetro, mayor capacidad de inyección, pero menor presión máxima de inyección disponible (Figura 106). Esto puede verse en la siguiente expresión:

$$\text{presión de inyección } (P_i) = \frac{\text{Fuerza de inyección } (F_i)}{\text{Área del piston o tornillo } (A)} \quad (2-19)$$

Normalmente la capacidad de inyección se indica en gramos de poliestireno, debido que este material presenta cambios muy pequeños de densidad con las variaciones de presión y temperatura, además, dentro de los termoplásticos, es el que tiene un valor de densidad más cercano a 1.0 g/cm³ (1.04-1.07 g/cm³) (Sánchez et al., 2003, pp.113-114).

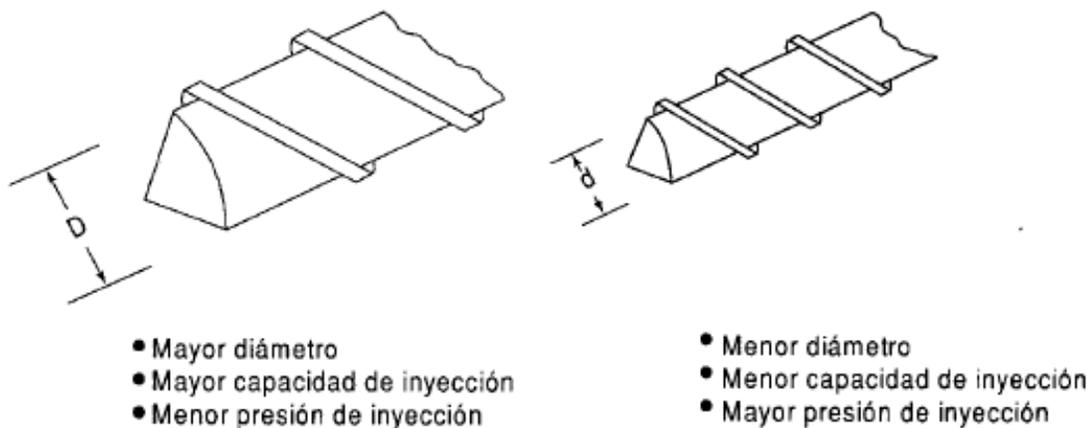


Figura 106. Relación entre diámetro de tornillo, presión de inyección y capacidad de inyección. (Sánchez et al., 2003, p.114).

2.4.5 Presión de inyección.

La presión de inyección es una de las variables que influyen de manera más directa en la calidad de la pieza a moldear. Esta se define como la fuerza máxima que puede ejercer el tornillo sobre el material plástico, por unidad de área. La presión de inyección es la responsable de que el material entre en la cavidad del molde. La presión real que se aplica al

material depende de la eficacia con que se transmita esta presión a través del volumen de material situado entre el tornillo o pistón y la boquilla. Esta transmisión depende de la forma del barril de inyección y de las características del material plástico.

Generalmente, esta presión es desarrollada por un pistón que empuja hacia adelante el tornillo, venciendo la oposición que ofrece el material plástico. Las máquinas actuales vienen equipadas con dispositivos que permiten controlar la presión de forma continua, hasta el máximo valor disponible, el cual varía de máquina a máquina.

Debido a que, en el material, de manera regular, se presenta pérdidas significativas de presión, en el trayecto que va desde la punta de la boquilla de la máquina hasta la cavidad del molde, es preferible colocar sensores de presión dentro de la cavidad en lugar del barril lo cual facilita un control más preciso.

Generalmente se usan presiones de inyección grandes para mantener la velocidad de inyección deseada; sin embargo, una vez lleno el molde, estas altas presiones ya no son necesarias, por lo que se prefiere usar una combinación de una primera presión seguida de una segunda menor presión de inyección.

Es usual que durante el proceso de inyección se ajuste el giro del tornillo para que siempre quede una pequeña cantidad constante de material durante un mismo proceso, pero que varía entre el 10% y 20% del total de la inyección específica dependiendo del artículo a inyectar, entre la punta del tornillo y el barril, al finalizar la inyección. Esto permite que se pueda aplicar más efectivamente la presión de inyección y de sostenimiento. Este material remanente se conoce comúnmente como “colchón” o “amortiguamiento” del tornillo (Sánchez et al., 2003, p.115).

2.4.6 Capacidad de plastificación.

Esta es la cantidad de material fundido que el tornillo de la máquina puede suministrar, rotando a la máxima velocidad en un tiempo determinado. Más técnicamente, representa la cantidad de material que puede ser llevado a la forma de fluido viscoso, a una temperatura uniforme para ser moldeado por unidad de tiempo. Este valor suele darse en **g** o **kg** de PS por hora.

Esta capacidad de plastificación es difícil de calcular, ya que está es influida no solo por la eficacia térmica del barril y la del tornillo para plastificar el material, también deben

considerarse las diferentes características de los materiales (calor específico, conductividad térmica, calor latente de fusión y temperatura de inyección) pues estas influyen en su valor absoluto (Sánchez et al., 2003, pp.115-116).

2.4.7 Velocidad de inyección.

Esta se refiere a la cantidad de material que entra en el molde durante el tiempo de llenado. Generalmente se expresa como el volumen de material plástico que la máquina puede inyectar por unidad de tiempo, cuando el tornillo se mueve a máxima velocidad.

Esta característica es una de las más importantes para obtener piezas de calidad, ya que nos indica la rapidez con la cual se llenan las cavidades molde con el material plástico. Su valor depende de la potencia necesaria y utilizada en la carrera de inyección. Puede estimarse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Vel. de inyección(V_i) = \frac{Capacidad\ de\ inyección\ calculada, C_i (cm^3)}{Tiempo\ de\ inyección, T_i (s)} \quad (2-20)$$

En algunos casos la velocidad de inyección se expresa como la velocidad lineal con que se desplaza el tornillo o pistón. Este valor dista mucho del real, ya que el desplazamiento del material a través de la boquilla siempre es menor, sobre todo en el caso del moldeo con pistón, debido a que parte del movimiento de este es absorbido en compactar los gránulos del material en la zona de alimentación.

Muchas máquinas modernas realizan los movimientos de las distintas unidades a través de un motor eléctrico, el cual acciona una bomba suministradora de aceite a cilindros hidráulicos que efectúan los movimientos requeridos. La velocidad del pistón de inyección dependerá del flujo del fluido hidráulico. Así para una presión de terminada, a mayores velocidades de inyección se necesitarán motores eléctricos más potentes.

Las presiones máximas de inyección tienden a ser constantes en los diferentes tamaños de máquinas. Sin embargo, las velocidades de inyección deben aumentar necesariamente con el tamaño de las máquinas. Esto se comprende de manera fácil si se considera el llenado del molde.

Durante el llenado, la temperatura relativamente baja de la superficie del molde ira enfriando el material que entra. Naturalmente las condiciones de llenado mejorarán si se reduce este efecto de enfriamiento, ya que se evitarán problemas, tales como: líneas de

soldadura, marcas de flujo, así como tensiones congeladas (esfuerzos latentes o residuales). Con máquinas de pre-plastificación y de tornillo alternativo al emplearse más eficazmente la potencia, pueden lograrse mayores velocidades de inyección (Sánchez et al., 2003, pp.116-117).

2.5 Proceso de Inyección

El moldeo por inyección es el proceso más importante que se utiliza para la fabricación de productos de plástico. Hoy en día, más de un tercio de todos los polímeros termoplásticos que se producen son moldeados por inyección, y más de la mitad de los equipos de procesamiento de polímeros existentes en el mercado son máquinas inyectoras. El proceso de moldeo por inyección es ideal para la fabricación de piezas producidas en serie de formas complejas que requieren dimensiones precisas.

El proceso se remonta a 1872, cuando los hermanos Hyatt patentaron su máquina de relleno de celulosa para inyectar en moldes. Sin embargo, las máquinas de moldeo por inyección de hoy en día están relacionados principalmente con la máquina de moldeo por inyección de tornillo de movimiento alternativo patentado en 1956. Una máquina de moldeo por inyección moderna con sus elementos más importantes se muestra en la Figura 107. Los componentes principales de la máquina de moldeo por inyección son la unidad de plastificación, la unidad de cierre, y el molde (Menges & Osswald, 2012, p.206).

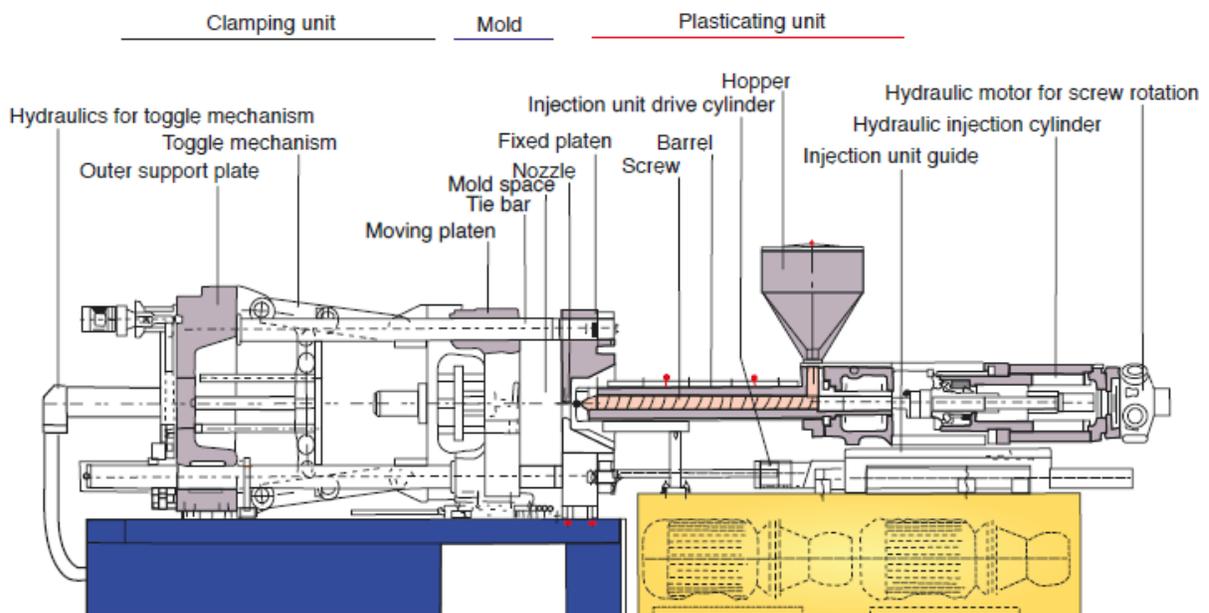


Figura 107. Esquema de una máquina de moldeo por inyección. (Menges & Osswald, 2012, p.206).

Las máquinas de inyección se clasifican de acuerdo con el siguiente convenio internacional¹, el cual rige en la actualidad.

Tipo de fabricante T/P

Donde T es la fuerza de cierre en toneladas y P es el tamaño de la carga de inyección que viene definido como

$$P = \frac{v_{max}P_{max}}{1000} \quad (2-21)$$

Donde v_{max} es el tamaño máximo de un disparo en cm^3 y P_{max} es la presión de inyección máxima medida en bares. La fuerza de cierre T puede ser tan bajo como 1 tonelada para máquinas pequeñas, hasta valores por encima de 11.000 toneladas (Menges & Osswald, 2012, pp.206-207).

El principio básico del moldeo por inyección comprende las tres operaciones básicas siguientes:

- ***Elevar la temperatura del plástico a un punto donde pueda fluir bajo la aplicación de presión.*** Normalmente esto se hace calentando y moliendo los gránulos solidos de material plástico, hasta formar una masa fundida con viscosidad y temperatura uniforme. Actualmente esto se realiza dentro del barril de la máquina mediante un tornillo, el cual aporta el trabajo mecánico (fricción) que en conjunto con el calor del barril funden (plastifican) el plástico. Es decir, el tornillo transporta, mezcla y plastifica el material plástico. Figura 108.

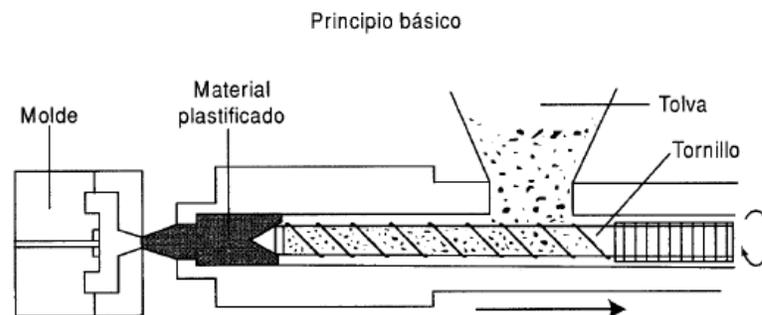


Figura 108. Plastificación del material plástico. (Sánchez et al., 2003, p.120).

¹ La designación americana antigua era *FABRICANTE T-v* donde T representaba la fuerza de cierre en toneladas inglesas y v la capacidad de inyección en onzas.

- **Permitir la solidificación del material en el molde cerrado.** En esta etapa el material fundido ya plastificado en el barril de la máquina se transfiere (se inyecta) a través de una boquilla, que conecta el barril hacia los varios canales del molde hasta llegar a las cavidades donde toma la forma del producto final. (Figura 109).

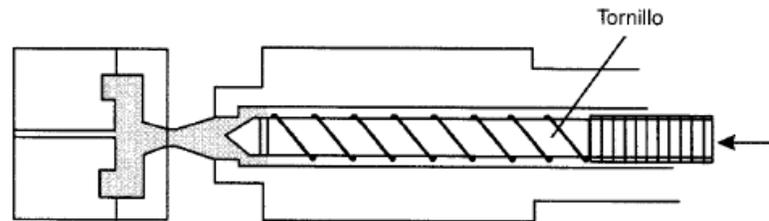


Figura 109. Inyección del material hacia el molde. (Sánchez et al., 2003, p.121).

- **Apertura del molde para la extracción de la pieza.** Esto se hace después de mantener el material bajo presión dentro del molde y una vez que el calor (el cual se aplicó para la plastificación) es removido para permitir solidificar el material en la forma deseada (Figura 110) (Sánchez et al., 2003, pp.120-121).

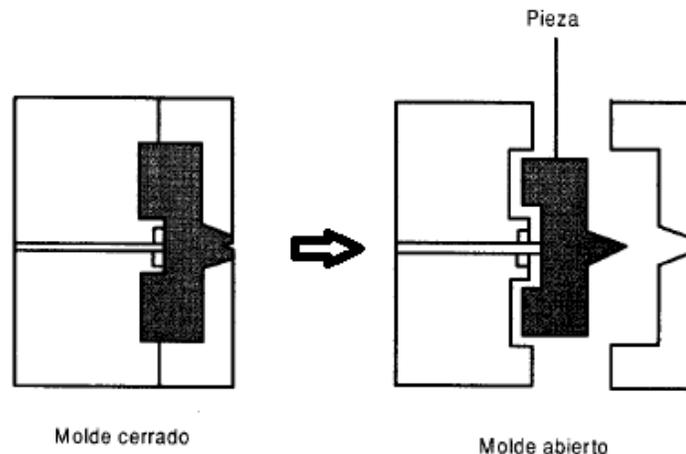


Figura 110. Apertura del molde y extracción de la pieza. (Sánchez et al., 2003, p.121).

La secuencia de eventos durante el moldeo por inyección de una pieza de plástico, como se muestra en la Figura 111 se denomina ciclo de moldeo por inyección. El ciclo se inicia cuando se cierra el molde, seguido de la inyección del polímero en la cavidad del molde. Una vez que se llena la cavidad, una presión de sostenimiento se mantiene para compensar la contracción del material. En el siguiente paso, el tornillo gira, alimentando el extremo final de este para la siguiente inyección. Esto hace que el tornillo para retraer como la siguiente toma está preparado. Una vez que la parte es lo suficientemente frío, el molde se abre y la pieza es expulsada (Menges & Osswald, 2012, p.207).

2.5.1 Ciclo de inyección.

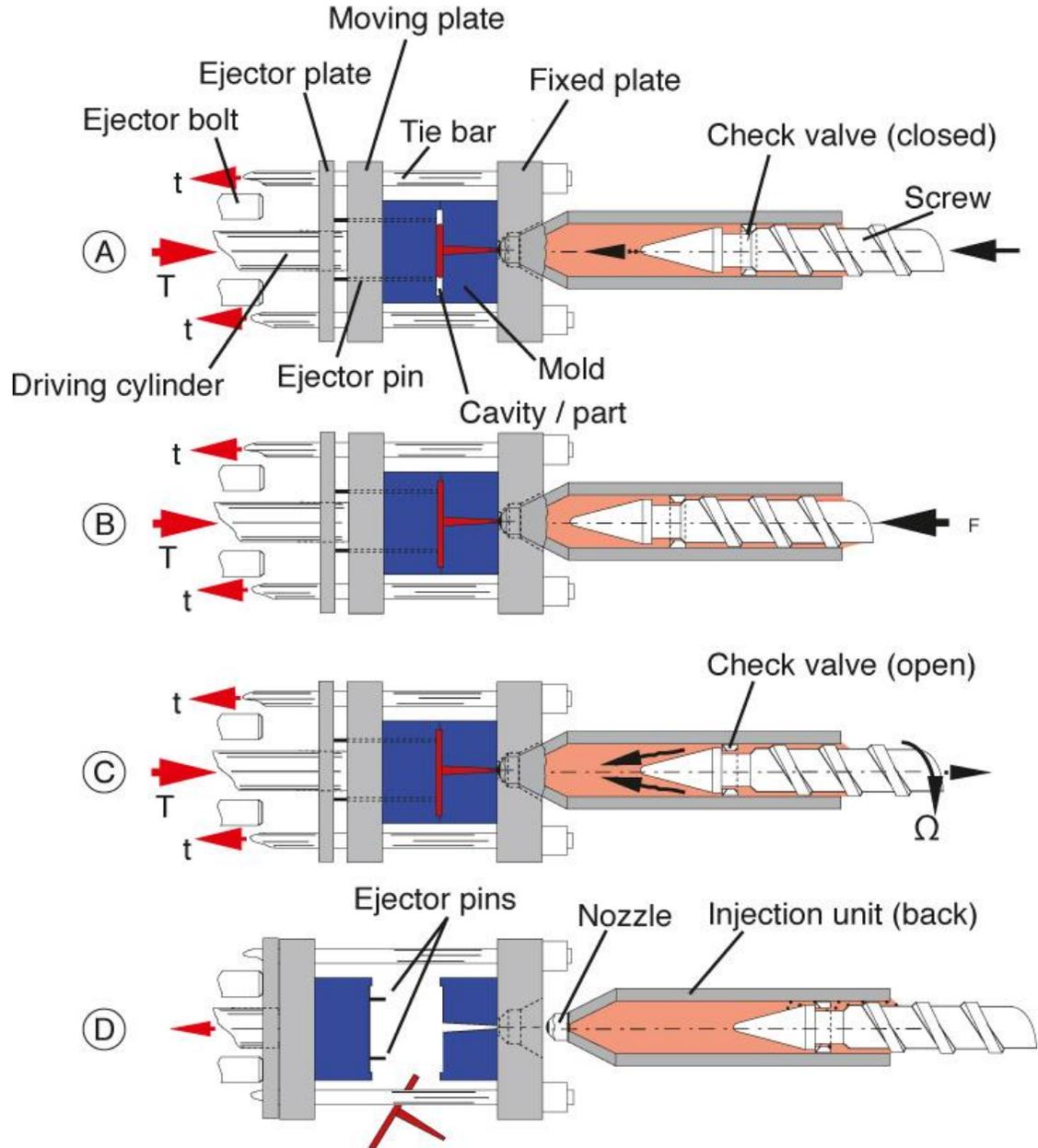


Figura 111. Secuencia de etapas que tienen lugar durante un ciclo completo de inyección. (Menges & Osswald, 2012, p.207).

A partir de la evolución de la temperatura media en la pieza y la presión en la cavidad, se puede analizar y estimar el proceso de inyección mediante el uso de los diagramas P-v-T, como se muestra en la Figura 112.

Para seguir el proceso en el diagrama P-v-T, hay que introducir las variables temperatura y presión a diferentes tiempos. El diagrama revela cuatro procesos básicos:

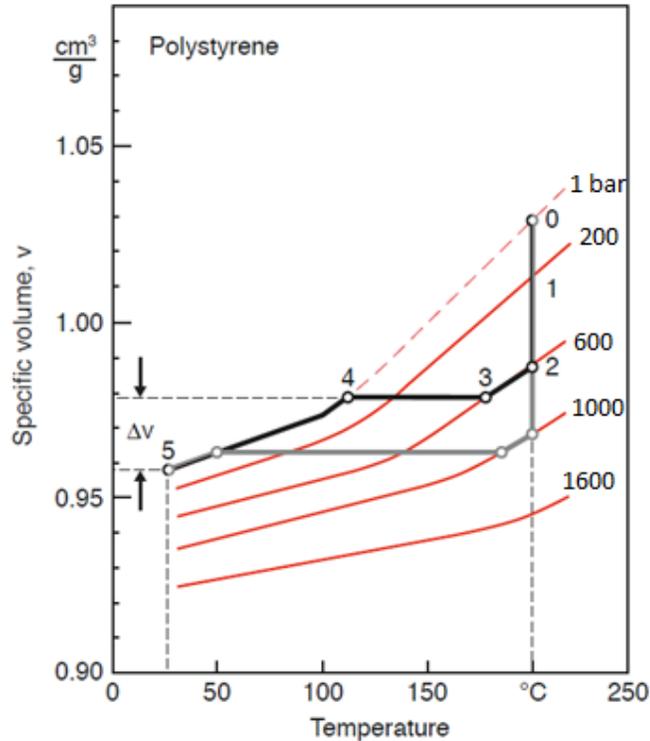


Figura 112. Representación de dos ciclos de inyección diferentes en un diagrama P-v-T. (Menges & Osswald, 2012, p.209).

- Una inyección isotérmica (0-1) con incremento de presión hasta la presión de compactación (1-2).
- Un proceso de enfriado a isobárico durante el ciclo de compactación (2-3).
- Un enfriamiento a volumen constante después de que solidifica el punto de inyección. con una caída de presión hasta la presión atmosférica (3-4).
- A continuación, un enfriamiento isobárico hasta la temperatura ambiente (4-5).

El punto del diagrama P-v-T en el que comienza el enfriamiento isobárico final (4), se puede conocer la contracción total que se producirá en la pieza ΔV . Este punto está influenciado por las dos condiciones principales de procesamiento - la temperatura de fusión T_m , y la presión de compactación P_H . En la Figura 112 se puede ver en gris un ciclo con aumento de la presión de compactación. Por supuesto, hay una combinación infinita de condiciones que hacen válidas las piezas, trabajando dentro de los límites de temperatura y presión máxima y mínima. La Figura 113 muestra el *diagrama de moldeo* con todas las condiciones límite. La temperatura de la masa fundida está limitada en el extremo inferior por una escasa *capacidad de inyección* o un llenado insuficiente de la cavidad y en el extremo superior, por una excesiva temperatura que conduce a la degradación térmica del material. Igualmente, la presión de compactación está limitada por una baja presión que da lugar a una elevada contracción en la

pieza o a piezas de bajo peso, y por el otro lado, una excesiva presión que causa la aparición de rebabas en la pieza (Menges & Osswald, 2012, p.209).

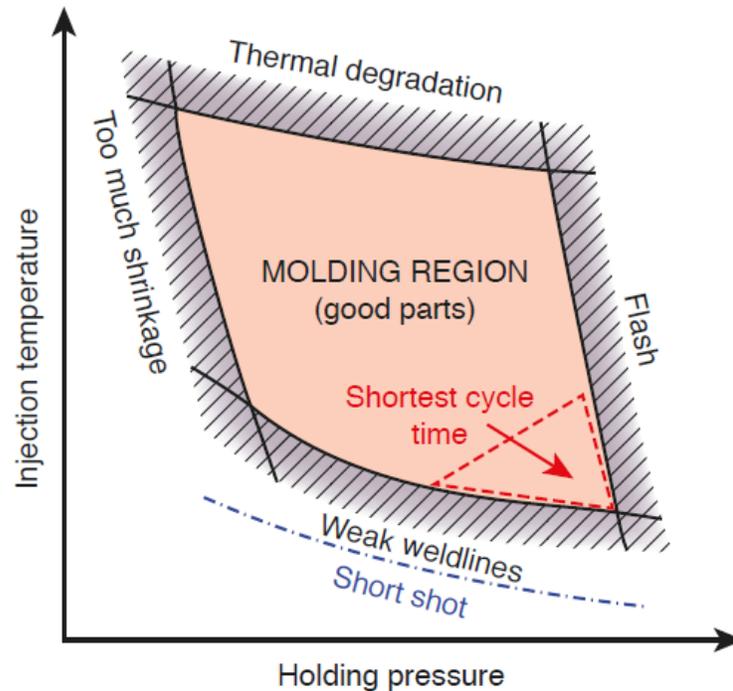


Figura 113. Diagrama de moldeo. (Menges & Osswald, 2012, p.210).

La aparición de estas rebabas se presenta cuando la fuerza de presión en la cavidad supera la fuerza de cierre de la máquina inyectora, permitiendo que el plástico fundido fluya a través de la línea de partición del molde. La presión de compactación determina la correspondiente fuerza de cierre necesaria según el tamaño de la máquina inyectora.

En la Figura 114 se presenta la secuencia completa del proceso de moldeo por inyección. La figura muestra que el tiempo de ciclo está dominado por el enfriamiento de la pieza en la cavidad interior del molde. El tiempo total del ciclo se puede calcular utilizando

$$t_{ciclo} = t_{cierre} + t_{etapas\ restantes} + t_{expulsión} \quad (2-22)$$

Donde el cierre y el tiempo de eyección, de t_{cierre} y $t_{expulsión}$, pueden durar desde una fracción de segundo a unos pocos segundos, dependiendo del tamaño del molde, las acciones requeridas (secuencia de apertura, periféricos como robots, pinzas de extracción, mecanismos de expulsión, etc.) y del número de ciclos por minuto en vacío indicado por el constructor de la máquina, pero estas son constantes de tiempo para el proceso específico de la pieza.

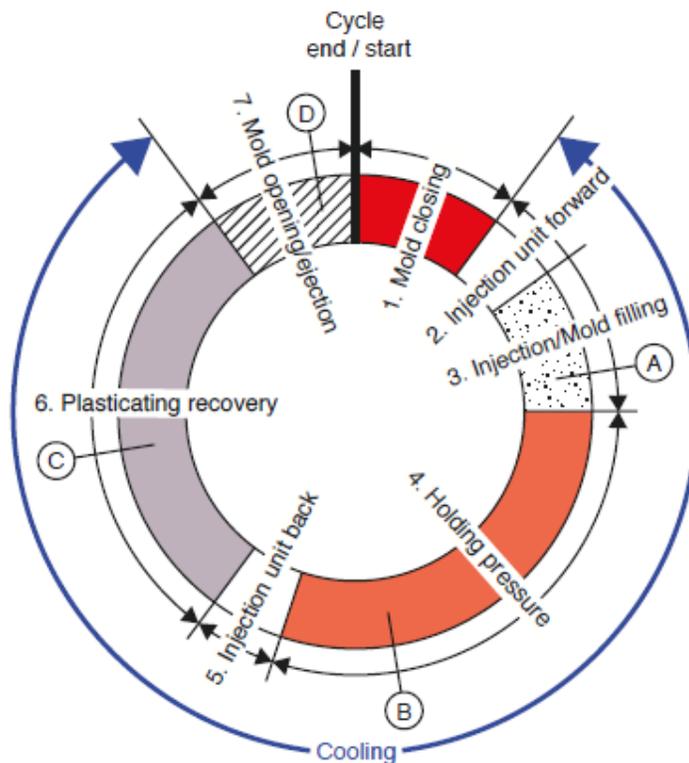


Figura 114. Ciclo de moldeo por inyección. (Menges & Osswald, 2012, p.208).

Para conocer el tiempo total del ciclo, es preciso conocer el tiempo de las etapas restantes $t_{etapas\ restantes}$, que varían en función de la pieza moldeada según su forma, sus características y el material plástico empleado. Dichas etapas son:

2.5.1.1 Tiempo de inyección (t_i).

También conocido como tiempo de llenado del molde, es el tiempo necesario para que el material fundido pase desde el barril a las cavidades del molde al estar ejerciéndose la presión de inyección. Este tiempo suele abarcar desde 5 hasta 25% del ciclo total (Sánchez et al., 2003, p.137).

Para calcular el tiempo de inyección, es preciso conocer el volumen de material que la máquina puede desplazar por segundo o sea la capacidad de inyección C_i , la cual es indicada por el constructor de la máquina. Normalmente la capacidad de inyección máxima se señala en gramos de poliestireno. La capacidad para otro material cualquiera (mat X) se determina por la ecuación (2.18):

$$C_{i\ mat\ X} = C_{i\ PS} \frac{\text{densidad de X}}{\text{densidad del PS}} \quad (2-23)$$

Conociendo así la capacidad de inyección, puede estimarse el tiempo necesario para la inyección por:

$$\text{Tiempo de iny, } t_i[s] = \frac{\text{peso de las piezas [g]}}{C_{i \text{ mat } X}} \quad (2-24)$$

En general, mientras mayor sea la velocidad de inyección posible, esto beneficiara la calidad del producto. Existen algunos trabajos experimentales (Bown, 1979, citado en (Sánchez et al., 2003, p.138) que han buscado calcular con mayor precisión el tiempo óptimo de inyección, para lo cual se ha considerado que el material entra en la cavidad y comienza a enfriar al hacer contacto con las paredes del molde, reduciendo así el espacio a través del cual fluye este. En estos estudios, se ha observado que la capa de material solidificado es uniforme en todos los puntos en el instante en el que el frente de material solidificado (S) es proporcional al tiempo de llenado del molde (t). Esta última observación puede expresarse como:

$$C = C * t^{1/3} \quad (2-25)$$

Donde:

S = Espesor de la capa de material [mm].

t = Tiempo [s].

C = Constante de solidificación o enfriamiento.

También se ha encontrado que C se relaciona con un factor adimensional definido como:

$$C = \frac{(T_X - T_m)}{(T_C - T_m)} \quad (2-26)$$

Donde:

T_C = Temperatura del fundido [°C].

T_m = Temperatura del molde [°C].

T_X = Temperatura de distorsión bajo carga (HDT) del material [°C].

Al hacer ciertas modificaciones para hacer un estimado del tiempo máximo para llenar el molde, se llega a la siguiente expresión empírica referenciada por J. Bown.

$$\text{Tiempo de iny, } t_i[s] = \frac{(S_{min} * F_m / F_L)^3}{8 * (T_X - T_m / T_C - T_m)^3} \quad (2-27)$$

Donde:

S_{min} = Espesor de pared mínimo [cm].

F_m = Recorrido máximo del fundido desde la entrada [cm].

F_L = Relación entre recorrido de flujo/espesor de pared para el material a inyectar.
(Sánchez et al., 2003, p.138-139).

2.5.1.2 *Tiempo de aplicación de la presión de sostenimiento o pospresión (t_p).*

Este tiempo es el que debe estar parado el tornillo, una vez se ha terminado la inyección. Su objetivo es evitar la formación de rechupes. Durante este tiempo el tornillo actúa como un pistón y empuja material adicional en las cavidades del molde, compensando así su contracción. En general se aplica una presión más baja que la de inyección.

El tiempo y magnitud de la presión de sostenimiento dependen de varios factores, como diámetro y longitud de los canales de alimentación, tipo de material usado y forma de la pieza, entre otros. La estimación de este tiempo se obtiene por la experiencia moldeando piezas similares y la regulación definitiva se realiza por tanto, si bien puede calcularse el tiempo en que se cierra (solidifica) el punto de inyección de la pieza, a base de mediciones de peso de las piezas que se inyectan hasta que se obtiene un peso constante, o bien medir sus dimensiones hasta que ya no se presente encogimiento apreciable, aunque es más eficiente y estable lo primero. Este cálculo es útil para evitar la pérdida de tiempo innecesaria por mantener la presión cuando ya están solidificados los puntos de inyección de la pieza.

Por lo tanto, el tiempo de sostenimiento se aplica hasta antes que el material solidifique totalmente y así, poder compensar la disminución en volumen de la pieza debido a su contracción. Si se aplica un tiempo de sostenimiento excesivo, una vez que ya solidificó la pieza, provocará un desperdicio de tiempo y energía (Sánchez et al., 2003, pp.139-140).

2.5.1.3 *Tiempo de plastificación (t_f).*

Este es el tiempo requerido para lograr la fusión (plastificación) del material. Se calcula a partir del peso de las piezas, incluidos los canales de alimentación o rama y de la capacidad de plastificación de la máquina en Kg/hora.

La capacidad de plastificación varía con el tipo de material y con la presión de retroceso aplicada. Esta capacidad suele darse por el constructor de la máquina para diversos materiales.

Entonces, conocido el peso de la pieza a inyectar (artículos y rama) y el tipo de material a inyectar, así como la capacidad de inyección de la máquina (obtenida de la información técnica de la máquina suministrada por el fabricante o bien calculándola), el tiempo de plastificación se obtiene mediante la siguiente ecuación (Sánchez et al., 2003, p.140).

$$t_f [S] = \frac{\text{peso de las piezas y rama [g]}}{\text{capacidad de plastificación [g/s]}} \quad (2-28)$$

2.5.1.4 Tiempo de solidificación o de enfriamiento (t_s).

Es el tiempo comprendido entre el final de la aplicación de la presión de sostenimiento y el comienzo de la apertura del molde. Es el lapso requerido para asegurar que el material fundido ha solidificado y podrá ser extraído sin ser distorsionado. Tiempos de enfriamiento, que dominan el proceso, dependen del espesor máximo de la pieza. Este tiempo es el más largo del ciclo, llegando a alcanzar desde el 50 a 85% del ciclo.

Este tiempo depende de varios factores:

- Del dispositivo de refrigeración del molde.
- Del líquido de refrigeración.
- De la forma y espesor de la pieza.
- Del tipo de material a inyectar.

Generalmente, este tiempo, aunque puede calcularse con exactitud, se establece mediante la experiencia del moldeo de una pieza similar o por ensayos. Una forma es inyectar piezas, reduciendo de forma progresiva el tiempo de enfriamiento hasta que se obtenga sin deformación apreciable. (Sánchez et al., 2003, p.140).

De todas formas, el tiempo mínimo de enfriamiento una pieza inyectada puede calcularse a partir de la fórmula propuesta por Ballman y Shusman (1959, citados en Sánchez et al., 2003, p.140).

$$t_s = \frac{-s^2}{2\pi\alpha} \ln \left[\frac{\pi}{4} \frac{T_x - T_m}{(T_c - T_m)} \right] \quad (2-29)$$

Donde:

S = Espesor máximo de la pieza [cm].

T_m = Temperatura de la pared del molde [°C].

T_c = Temperatura del material fundido [°C].

T_x = Temperatura media de la pieza al momento de la expulsión (con frecuencia se usa la temperatura de distorsión bajo carga del material HDT) [°C].

α = Difusividad térmica del material [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Por ejemplo, para una geometría cilíndrica de diámetro D puede usarse:

$$t_s = \frac{D^2}{23.14\alpha} \ln \left[0.692 \frac{T_c - T_m}{T_x - T_m} \right] \quad (2-30)$$

En la Tabla 13 se representan datos de estas variables para determinar el tiempo de enfriamiento mínimo de algunos materiales.

Tabla 13.

Datos requeridos para determinar el tiempo de enfriamiento de algunos polímeros.

Material	T_c [°C]	T_m [°C]	T_x (HDT) [°C]	Difusividad [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
ABS	240	60	95	1.7×10^{-3}
CA	210	50	98	1.04×10^{-3}
PA 6	260	90	180	0.98×10^{-3}
PA 66	285	90	180	1.01×10^{-3}
PC	300	90	130	1.47×10^{-3}
HDPE	240	20	92	0.74×10^{-3}
LDPE	220	20	45	1.15×10^{-3}
PMMA	240	50	102	1.09×10^{-3}
PP	240	40	107	0.85×10^{-3}
PS	220	20	85	1.6×10^{-3}
HIPS	220	20	85	1.6×10^{-3}
PVC	180	20	60	1.16×10^{-3}

Sánchez et al., 2003, p.141.

La difusividad térmica mide la rapidez con la que el calor se transmite de un punto a otro en un cuerpo. Es decir que materiales con mayor α tendrán un enfriamiento más rápido y un tiempo menor de solidificación. La difusividad térmica viene dada por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (2-31)$$

Donde

k = Coeficiente de conductividad térmica.

ρ = Densidad.

C_p = Calor específico.

El tiempo de enfriamiento para una determinada condición de temperatura, se incrementa con el cuadrado del espesor de la pieza. Es decir, que, para un espesor determinado, una temperatura de molde baja y una temperatura de extracción alta, reducen considerablemente el tiempo de enfriamiento. En la [Figura 115] se presenta la tendencia del tiempo de enfriamiento, en función del espesor de la pieza, para una temperatura determinada del fundido, molde y pieza (Sánchez et al., 2003, p.142).

Como ya se dijo, cuando se moldean materiales termoplásticos es común encontrar que la parte del ciclo más larga corresponde al tiempo de enfriamiento de la pieza en el molde. A pesar de la influencia que esta situación tiene en la productividad, la refrigeración del molde se suele considerar como algo secundario en el diseño del molde. En la actualidad existen programas computacionales que ayudan al diseñador a optimizar el tiempo y el sistema de refrigeración del molde.

La secuencia de las diferentes etapas del ciclo (Figura 116) comprende: primero, el tiempo en que cierran las dos mitades del molde, posteriormente se comienza a inyectar el material en el molde, una vez terminado el tiempo de inyección, el material comienza a solidificar, por lo que comienza a aplicarse la presión de sostenimiento para compactar el material. Una vez terminado este tiempo se inicia la plastificación del material para la siguiente inyección y, por último, se abre el molde para liberar la pieza, una vez terminado el tiempo de enfriamiento seleccionado. En algunas máquinas es posible realizar movimientos superpuestos y/o asistidos por válvulas o boquillas de cierre (Ver [Titulo 2.7.3.1](#)), es decir, es factible realizar la función de apertura y cierre del molde, a la vez que se realiza la función de plastificación mediante el giro del tornillo. El tiempo de ciclo se reduce. La fase de solidificación se termina antes concluir la plastificación y, por lo tanto, la apertura del molde comienza antes que el tornillo deje de girar (Sánchez et al., 2003, p.142).

En las máquinas que no pueden realizar movimientos superpuestos o en paralelo, pueden presentarse dos tipos de ciclos totales. Uno, en el que la fase de solidificación termina después o al mismo tiempo que la fase plastificación, por lo que el tiempo total del ciclo (t_t) será:

$$t_t = t_v + t_i + t_s \quad [2-32]$$

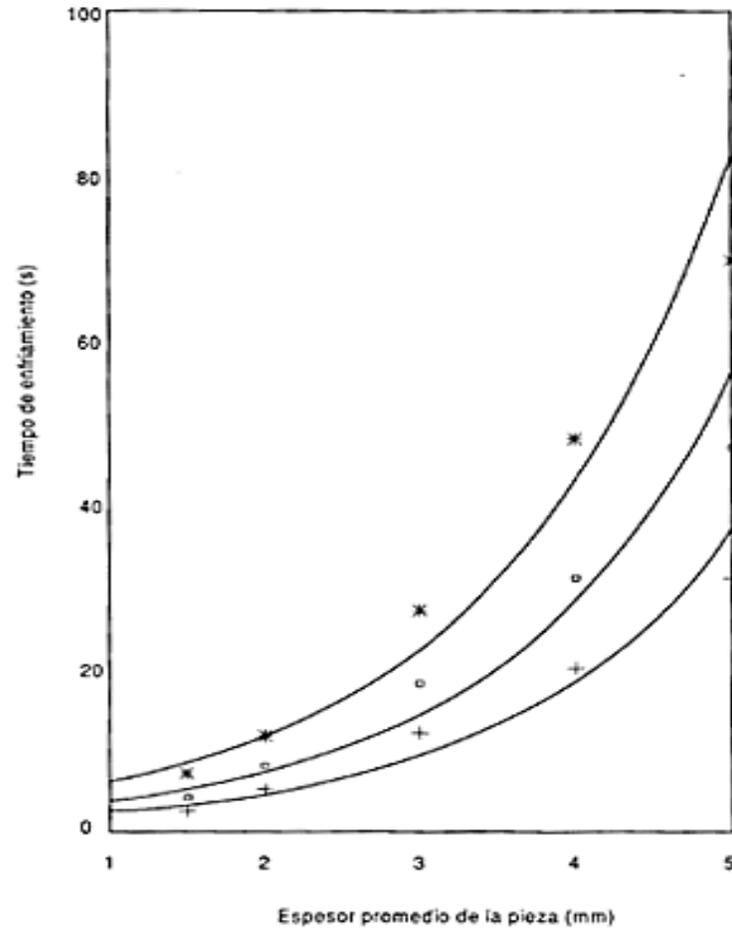


Figura 115. Relación del tiempo de enfriamiento con el espesor de la pieza para una temperatura determinada del fundido, molde y pieza. (Sánchez et al., 2003, p.143).

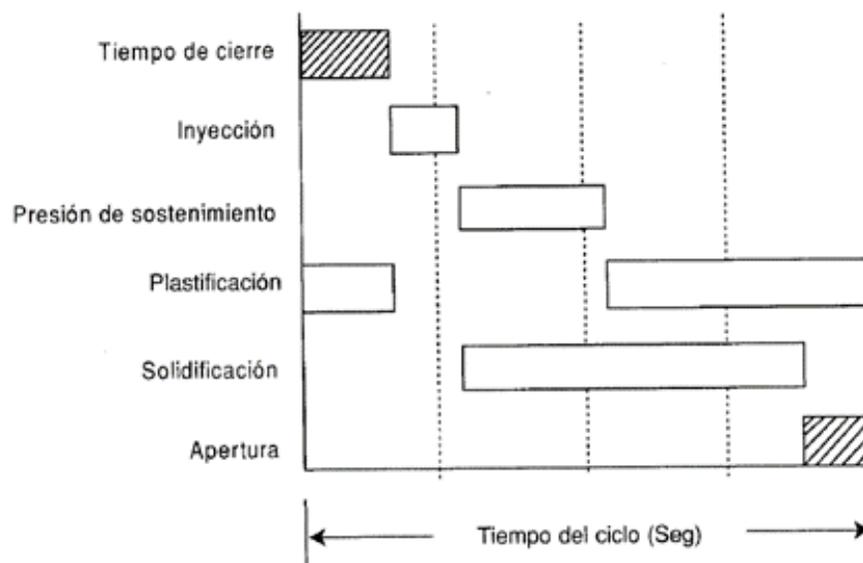


Figura 116. Secuencia de duración de las diferentes etapas del ciclo de inyección. (Sánchez et al., 2003, p.144).

Donde t_v es el tiempo en vacío. Otro tipo de ciclo es en el que la fase de solidificación termina antes que la fase de plastificación, donde el tiempo total (t_t) será:

$$t_t = t_v + t_i + t_p + t_f \quad [2-33]$$

(Sánchez et al., 2003, p.144).

2.5.2 Estimación de la presión de inyección y la fuerza de cierre.

Una de las funciones del ingeniero responsable del procesamiento de polímeros es encontrar las presiones de inyección adecuadas y la correspondiente fuerza de cierre de la máquina. Un ingeniero con experiencia, por lo general, puede determinar qué máquina de moldeo por inyección es apropiada para una aplicación específica.

Para el ingeniero de procesamiento de polímeros sin entrenamiento, la búsqueda de esta presión de inyección y la fuerza de cierre correspondiente para molde puede ser difícil. “Para facilitar esta tarea, Stevenson [1978, citado en Osswald & Giménez, 2008, p.155] desarrollo una serie de parámetros adimensionales, así como las correspondientes gráficas que describen el proceso de llenado del molde para polímeros no newtonianos en estado fundido” (Osswald & Giménez, 2008, p.155).

Empleando la notación que aparece en la Figura 117 y la viscosidad expresada como:

$$\eta = m_0 e^{-a(T-T_{ref})} |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (2-34)$$

Se pueden definir las cuatro variables adimensionales propuestas por Stevenson:

- La temperatura adimensional β de termina la intensidad del acoplamiento entre la ecuación de la energía y el balance de momentos, y se define como

$$\beta = a(T_i - T_m) \quad (2-35)$$

Donde T_i y T_m son las temperaturas de inyección y del molde, respectivamente.

- El tiempo adimensional τ es la relación entre el tiempo de llenado, $t_{llenado}$, y el tiempo que tarda en alcanzarse el equilibrio térmico por conducción, expresado como

$$\tau = \frac{t_{llenado} k}{h^2 \rho C_p} \quad (2-36)$$

- El número de Brinkman es la relación entre el calor generado por disipación viscosa y el calor transmitido por conducción. En el caso de un proceso no isotermo, el modelo no newtoniano para polímeros puede expresarse como

$$B_r = \frac{m_0 e^{-aT_i} h^2}{k(T_i - T_m)} \left(\frac{R}{t_{llenado} h} \right)^{n+1} \quad (2-37)$$

- El índice exponencial, n , de la ecuación de la ley de la potencia, también conocida como modelo de Ostwald y de Waale, representa el comportamiento estructural del polímero fundido.

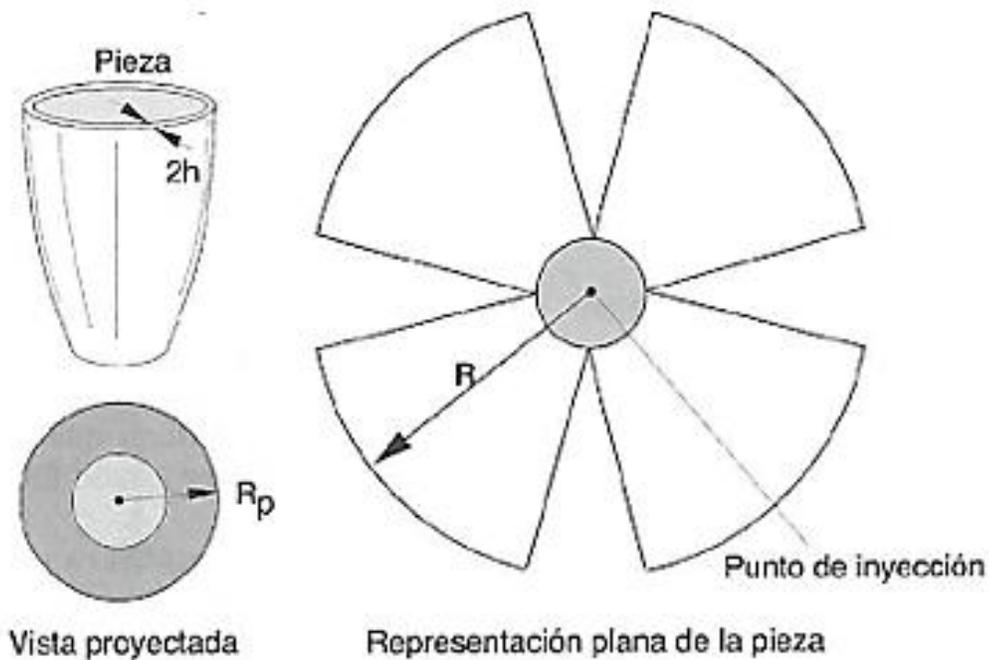


Figura 117. Representación planar de una pieza moldeada por inyección. (Osswald & Giménez, 2008, p.156).

- Una vez se han determinado los parámetros adimensionales, las presiones de inyección ($\Delta p - \Delta p_I$) y las fuerzas de cierre (F/F_I) pueden extraerse de las Figura 118, Figura 119, Figura 120 y Figura 121. La fuerza y presión isoterma se calcula usando

$$\Delta p_I = \frac{m_0 e^{-aT_i}}{1-n} \left[\frac{1+2n}{2n} \frac{R}{t_{llenado} h} \right]^n \left(\frac{R}{h} \right) \quad (2-38)$$

Y

$$F_I = \pi R^2 \left(\frac{1-n}{3-n} \right) \Delta p_I \quad (2-39)$$

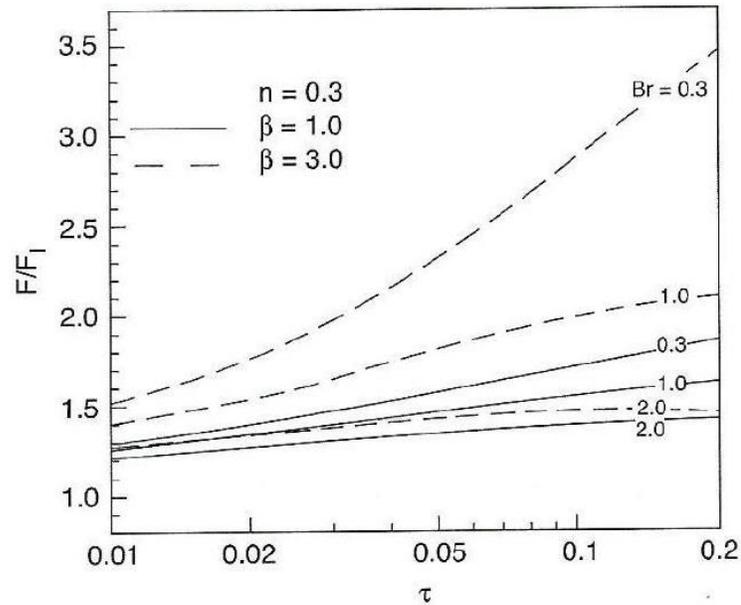


Figura 118. Fuerza de cierre adimensional en función de las variables adimensionales. (Osswald & Giménez, 2008, p.157).

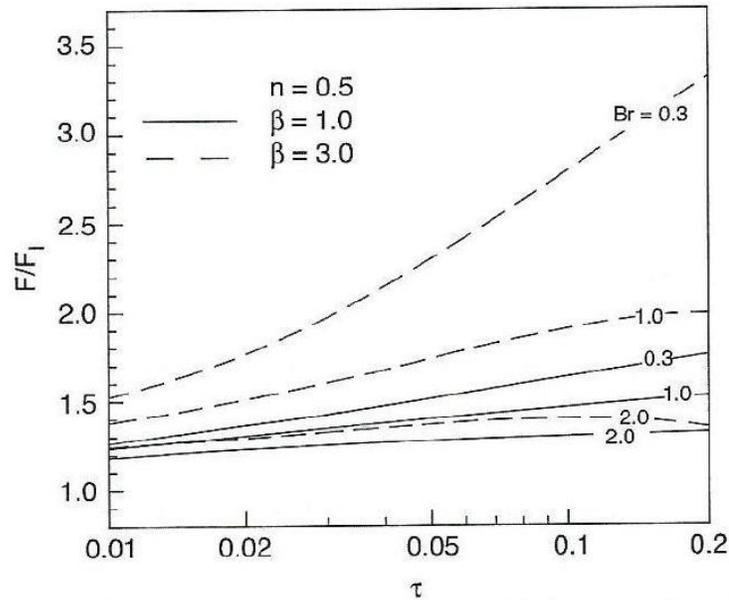


Figura 119. Fuerza de cierre adimensional en función de las variables adimensionales. (Osswald & Giménez, 2008, p.157)

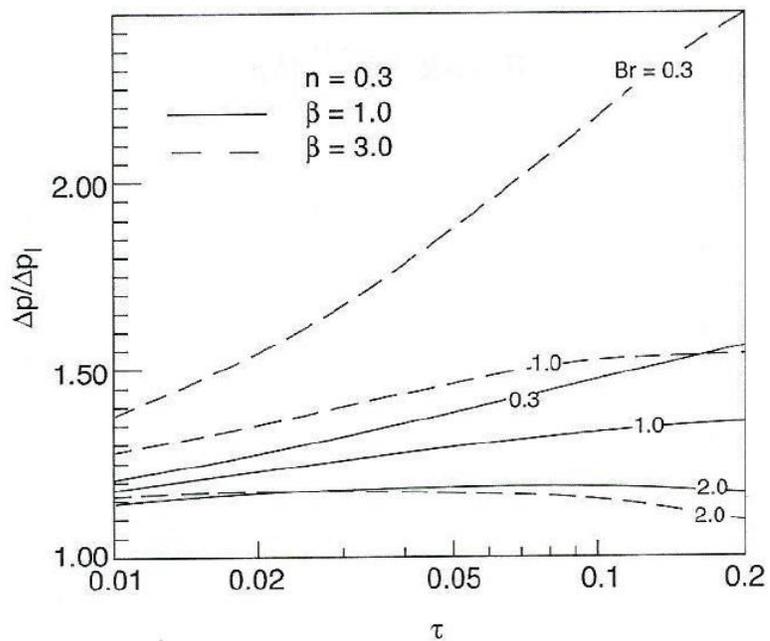


Figura 120. Presión de inyección adimensional en función de las variables adimensionales. (Osswald & Giménez, 2008, p.158).

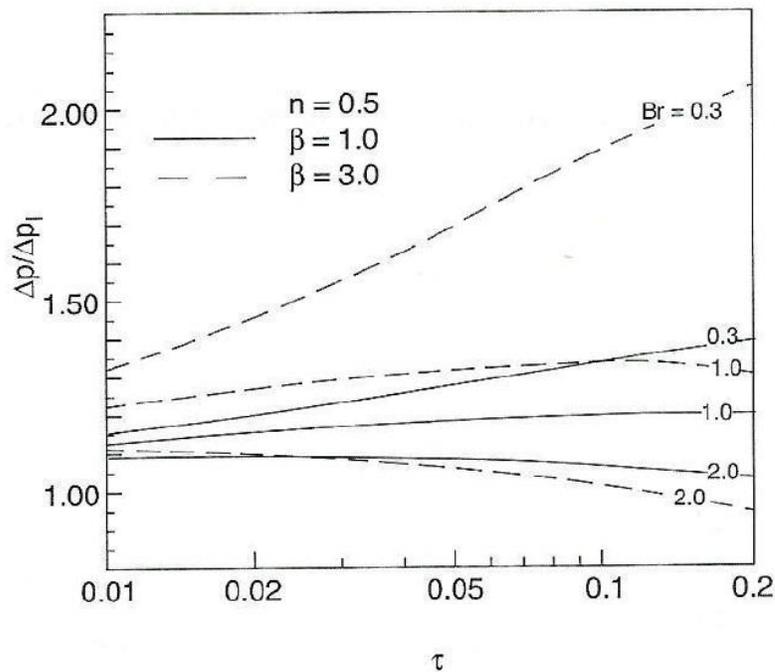


Figura 121. Presión de inyección adimensional en función de las variables adimensionales. (Osswald & Giménez, 2008, p.158).

La Figura 122 puede emplearse para corregir la fuerza de cierre calculada, en aquellos casos en los que el área de la pieza exceda el área proyectada (Osswald & Giménez, 2008, pp.155-159).

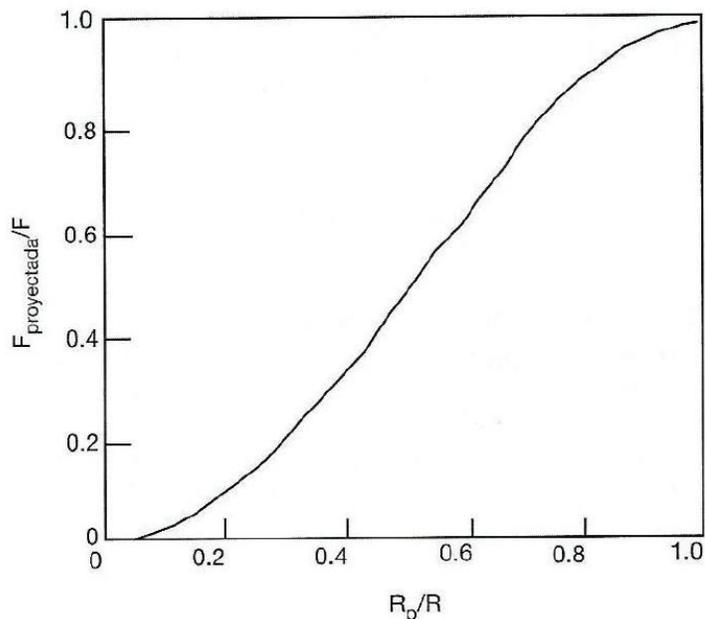


Figura 122. Corrección de la fuerza de cierre para el área proyectada. (Osswald & Giménez, 2008, p.159).

Aunque con dificultad, es posible controlar y predecir la forma final del componente y los esfuerzos residuales presentes en la pieza a temperatura ambiente. Por ejemplo, los rechupes o hundidos en la superficie del producto final son causadas por la contracción del material durante el enfriamiento. Por otro lado, los esfuerzos residuales pueden conducir a roturas o grietas bajo determinadas condiciones (Erwin, 1978, citado en Osswald & Giménez, 2008, p.159).

La deformación o alabeos en el producto final son a menudo causados por las condiciones en el procesamiento que conducen a una distribución de tensiones o esfuerzos residuales asimétricos a través del espesor de la pieza. La formación de tensiones residuales en piezas inyectadas se atribuye a la combinación de dos factores principales: el enfriamiento y los esfuerzos de flujo. El primero y más importante es la tensión residual producida como resultado de un enfriamiento rápido (Osswald & Giménez, 2008, p.159).

2.5.3 Tensiones residuales en una pieza inyectada.

La distribución parabólica de temperaturas que se produce a lo largo del espesor de una pieza inyectada durante el proceso de solidificación da lugar también a una distribución parabólica de tensiones residuales sobre la pieza, en la que las superficies más externas del componente quedan sometidas a esfuerzos de compresión y el núcleo a esfuerzos de tracción. De este modo, asumiendo que no hay acumulación de tensiones residuales durante el cambio de fase, puede usarse una

sencilla ecuación que tiene en cuenta la distribución de temperaturas parabólica para poder predecir la distribución de tensiones residuales en las piezas de sección delgada [Rauwendaal, 1991, citado en Osswald & Giménez, 2008, p.160]:

$$\sigma = \frac{2}{3} \alpha E (T_s - T_f) \left(\frac{6z^2}{4L^2} - \frac{1}{2} \right) \quad (2-40)$$

En este caso, T_f es la temperatura final de la pieza, E es el módulo elástico, α el coeficiente de expansión térmica, L el espesor medio y T_s indica la temperatura de solidificación: temperatura de transición vítrea para termoplásticos amorfos o de temperatura de fusión para polímeros semicristalinos. En la [Figura 123 (Erwin, 1978, citado en Osswald & Giménez, 2008, p.160)] se comparan los esfuerzos de compresión medidos experimentalmente sobre la superficie de placas inyectadas de PMMA y los obtenidos utilizando la ecuación [2.30] (Osswald & Giménez, 2008, pp.159-160).

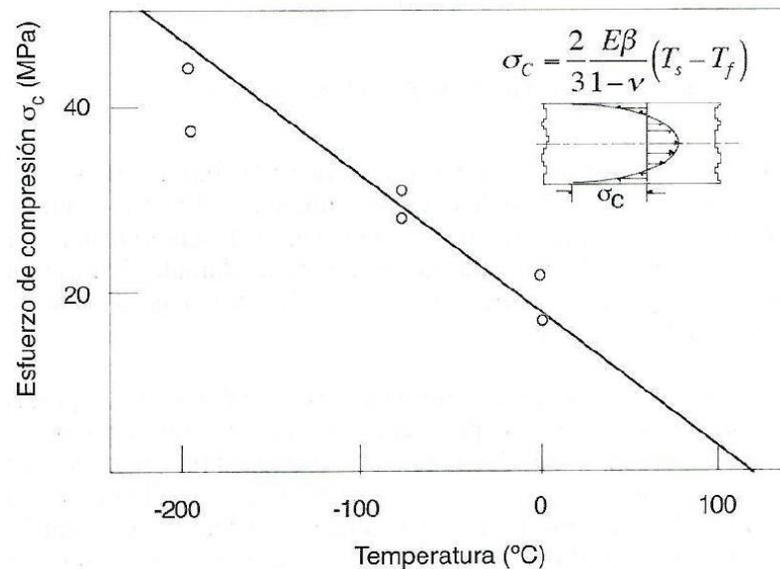


Figura 123. Comparación entre los esfuerzos de compresión aplicados sobre la superficie de una placa inyectada de PMMA, calculados a partir de la ecuación (2.22) y determinados experimentalmente. (Osswald & Giménez, 2008, p.160).

2.6 Procesos Especiales de Moldeo por Inyección

Aunque la mayoría de los procesos de moldeo por inyección se encuentran englobados dentro de la descripción que se ha hecho de los procesos convencionales de inyección, existen algunas variaciones que conviene conocer por la importancia y el auge que cada día van experimentando. Entre ellas se incluyen:

2.6.1 Inyección multicolor.

Este proceso se produce cuando dos o más materiales son inyectados dentro del molde a través de diversos sistemas de canales y puntos de inyección en diferentes etapas del proceso de moldeo. Cada color o componente es inyectado usando su propia unidad de plastificación. Los moldes están por lo general colocados sobre una bancada (Ver Figura 124). Este proceso se utiliza ampliamente en la industria automotriz, como es el caso particular de la obtención de los pilotos traseros de los vehículos (Menges & Osswald, 2012, p.216).

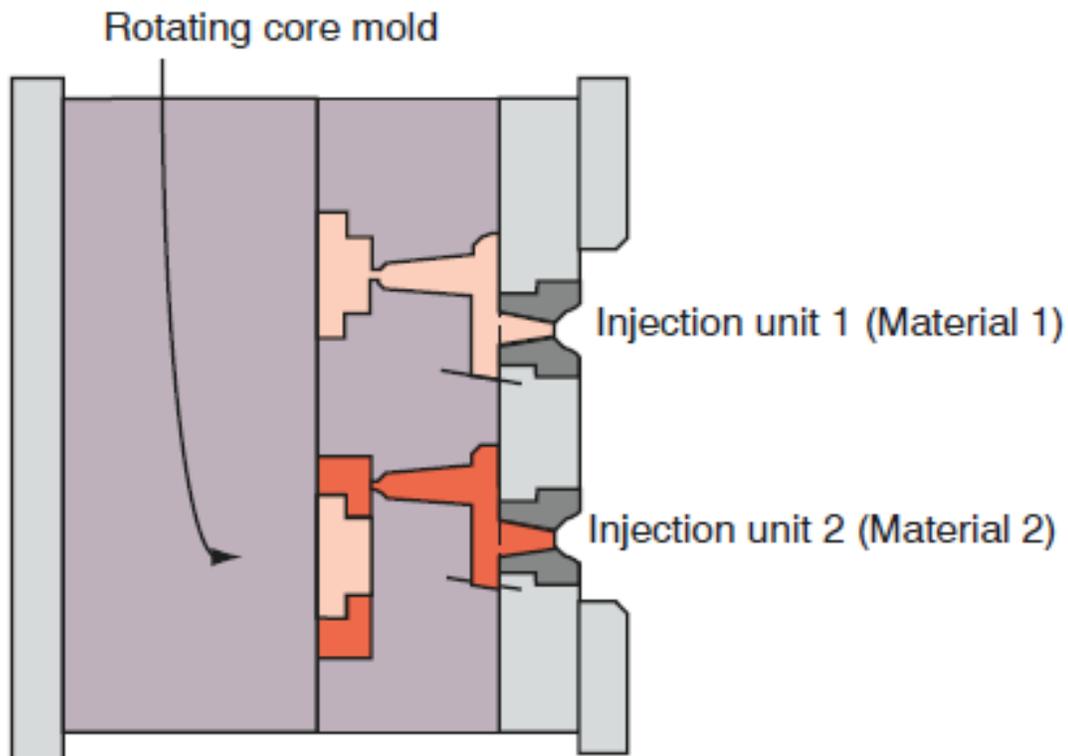


Figura 124. Diagrama esquemático de un molde giratorio utilizado para producir piezas moldeadas por inyección de multicolor o de múltiples componentes. (Menges & Osswald, 2012, p.217).

2.6.2 Inyección multicomponente.

En principio este proceso es igual que el proceso multicolor y fue inicialmente empleado para moldear teclas de máquinas de escribir. En este caso, se moldean dos materiales incompatibles, o un componente es enfriado lo suficiente como para que los dos componentes no se adhieran entre sí.

Mediante este proceso pueden producirse piezas con dos o más colores, compuestos rígidos-blandos, conexiones móviles, pero no separables, como las utilizadas en juguetería

para articulaciones de muñecos sin riesgo de que se desmonten y sean tragados por los niños, y finalmente, moldeo de tipo *sándwich* con dos o tres componentes. En el caso de un sistema de unión tipo rótula-bola, la rótula es moldeada primero, dejándola enfriar antes de inyectar la bola en su interior. Esto da lugar a un sistema con total movilidad. Este tipo de proceso de inyección se suele emplear para eliminar etapas tediosas de ensamblado de piezas, y está siendo cada vez más usual en países donde el coste de la mano de obra es elevado.

Dentro de la inyección multicomponente cabe mencionar como procedimiento simple la inyección multicapa, en la que se inyectan determinados materiales para formar una pieza multicapa. La ventaja de la conformación en varias capas esta, por ejemplo, en que se pueda emplear material reciclado como núcleo, o añadir agentes espumantes en el núcleo para reducir la fuerza de cierre y lograr una presión uniforme en las piezas más grandes.

Además, el procedimiento multicapa es óptimo para la producción de envases para la industria alimentaria, ya que permite la inyección en el núcleo de estos artículos de un polímero con altas propiedades barrera a gases que evite la pérdida de aromas y sabores, como es el caso de los polímeros EVOH. (Figura 125) (Menges & Osswald, 2012, pp.216-217).

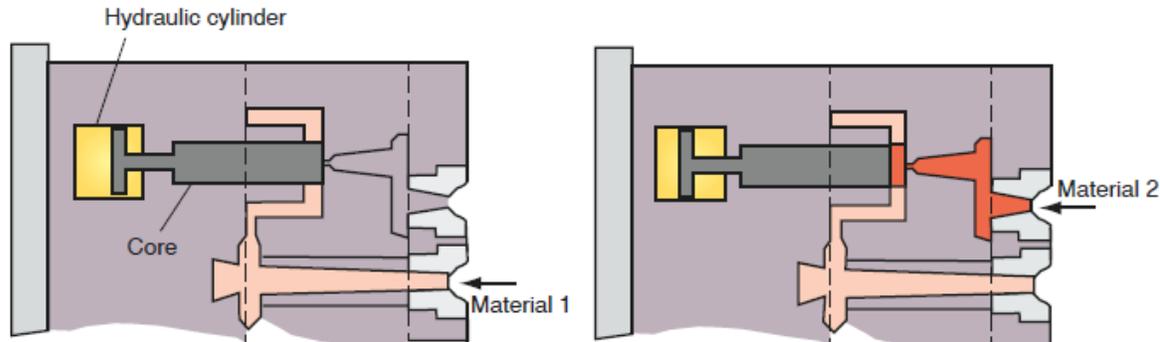


Figura 125. Diagrama esquemático de moldeo por inyección multicomponente usando la técnica de tiro 1 con macho adelante y tiro 2 con macho atrás. (Menges & Osswald, 2012, p.217).

2.6.3 Coinyección.

A diferencia de la inyección multicolor y multicomponente, la coinyección utiliza el mismo punto de inyección y sistema de canales para producir piezas compactas cuya superficie exterior es de un material distinto al del interior, generalmente de menor calidad o recuperado. En una primera fase se inyecta una cantidad del material que va a cubrir la superficie exterior, pero sin llenar todo el molde.

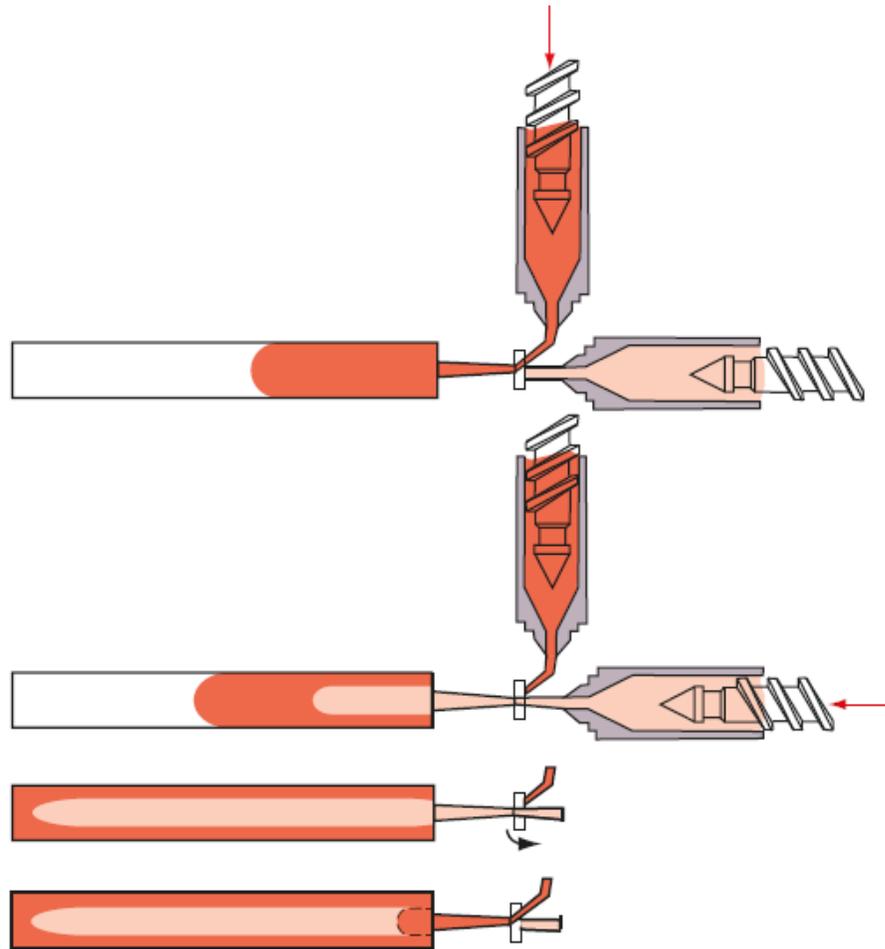


Figura 126. Esquema del proceso de coinyección. (Menges & Osswald, 2012, p.218).

El frente de fundido del primer material se enfría rápidamente, a medida que es empujado por el material de la segunda unidad de inyección, formando un “piel” relativamente delgada y dando lugar a una estructura tipo *sándwich*, tal como se muestra en la Figura 126. Un exceso del material exterior es antieconómico y puede llegar a producirse la aparición en la superficie del segundo material si existe algún defecto; de manera que las secuencias, presiones y temperaturas exigen un control riguroso (Menges & Osswald, 2012, pp.218-219).

2.6.4 Inyección asistida por gas (GAIM).

Este tipo de inyección es similar a la multicomponente y permite obtener piezas huecas con una combinación de espesores de pared de distinto grosor. En lugar de un segundo componente, como en los casos anteriores, se inyecta primero una cantidad pequeña y definida de fundido, y a continuación, un gas inerte que hace avanzar y expandir la masa de fundido formando una piel en contacto con las paredes frías del molde hasta recubrirlo

totalmente. El gas inyectado puede formar parte de la inyección y/o de la fase de presurización y compactación. Se utiliza nitrógeno a una presión de hasta 30 MPa, tanto por precio como por razones de seguridad, dado que el aire podría producir mezclas explosivas. Ver Figura 127 (Menges & Osswald, 2012, pp.219-221).

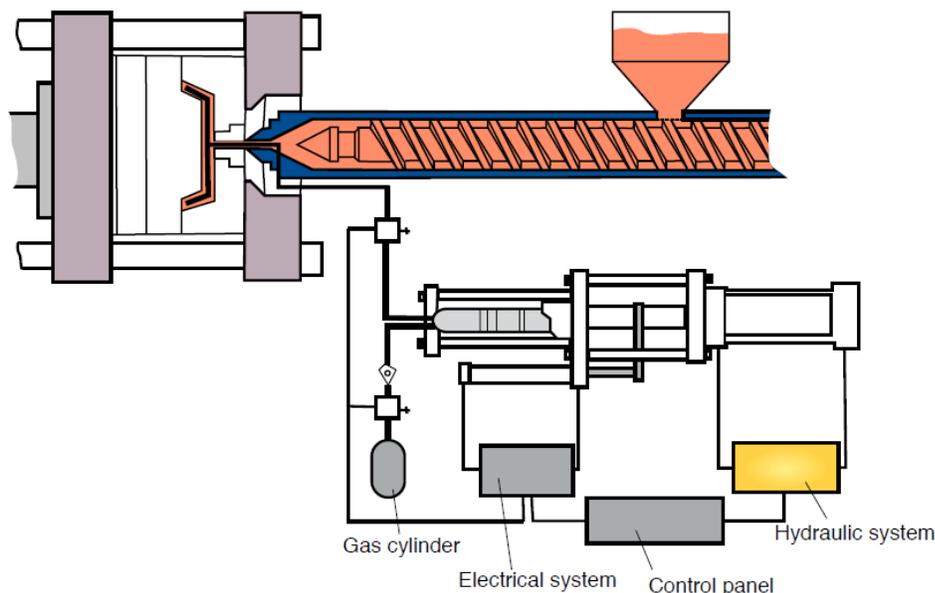


Figura 127. Diagrama esquemático de una máquina de moldeo por inyección típica, adaptada para el moldeo por inyección asistida por gas con un complemento en el cilindro de compresión de gas y equipos accesorios. (Osswald., Turng & Gramann. 2007, citados en Menges & Osswald, 2012, p.221).

2.6.5 Inyección – compresión (ICM).

En este tipo de moldeo, la cavidad del molde se llena en dos fases, una primera en la que se inyecta el material con el molde semiabierto, seguida de una segunda etapa en la que se cierra el molde para hacer fluir la masa de polímero fundido Figura 128. Este sistema permite reducir la fuerza de cierre entre un 25% y un 70%, siendo crítica la relación entre longitud del recorrido del flujo y el espesor de pared.

El moldeo por inyección-compresión se utiliza para productos plásticos que requieren un acabado superficial de alta calidad, tales como discos compactos y otros componentes con requerimientos ópticos importantes. Asimismo, el moldeo por inyección-compresión es la base para el decorado de piezas plásticas. Para ello se sitúa en el molde la etiqueta, tejido o elemento que se pretende respaldar por inyección y se procede como se ha indicado anteriormente. La alimentación de tales elementos puede ser manual, mediante marco de fijación, o en continuo a partir de película o tela en bobina (Menges & Osswald, 2012, pp.221-222).

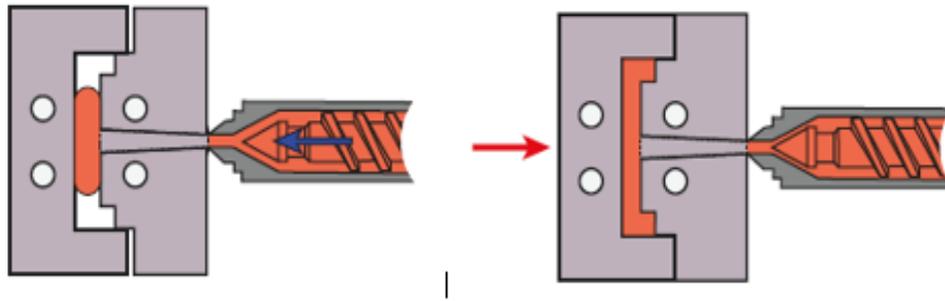


Figura 128. Esquema del proceso de moldeo por inyección-compresión. (Osswald., Turng and Gramann. 2007, citados en Menges & Osswald, 2012, p.222).

2.6.6 Moldeo por inyección reactiva (RIM).

Este tipo de moldeo y su derivado con reforzantes (*RRIM*), difieren del moldeo convencional en que se utilizan resinas líquidas reactivas en lugar de polímeros fundidos. Este proceso involucra el mezclado a alta presión de dos o más líquidos que reaccionan espontáneamente para su posterior inyección a menor presión dentro de un molde cerrado [Figura 129]. Este sistema no utiliza extrusores para material fundido, ni un sistema de almacenaje y dispersión de las resinas reactivas. Con esta tecnología se han alcanzado ciclos de inyección de dos minutos o menos en la inyección de partes grandes y gruesas (Sánchez et al, 2001, p.100).

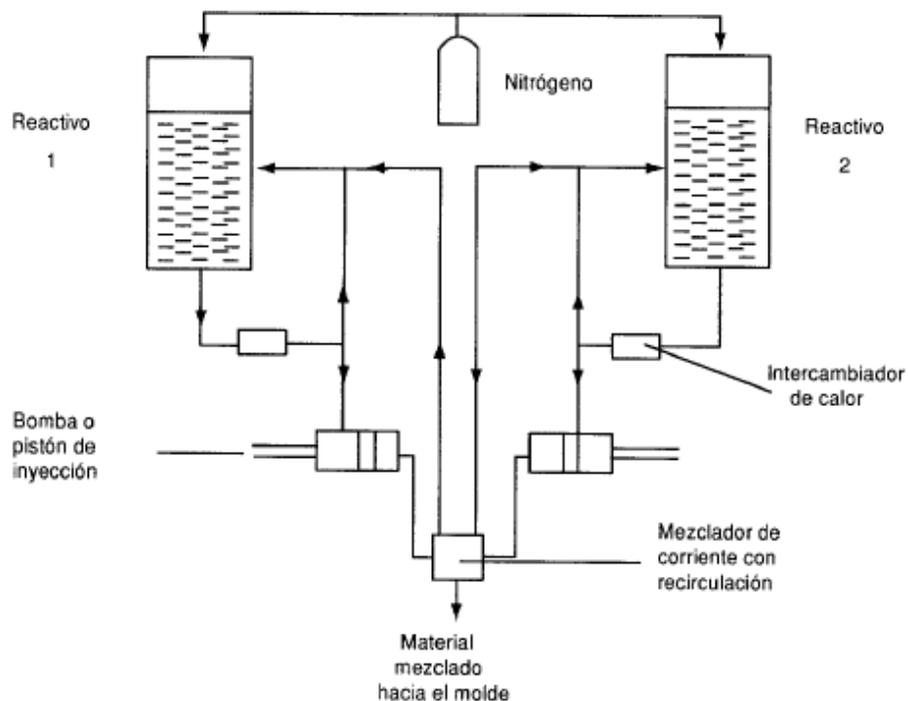


Figura 129. Proceso de moldeo por inyección reactiva (RIM). (Sánchez et al., 2003, p.101).

El principal plástico que se usa en este proceso es el hule de poliuretano (PUR), aunque también se utilizan otros materiales como el nylon, resinas poliéster, acrílicas y epóxicas, entre otras.

La principal ventaja de este proceso sobre el proceso convencional es la facilidad de moldear piezas grandes, normalmente mayores de 10 libras. Sin embargo, requiere de dispositivos más sofisticados para la extracción de la pieza, ya que el poliuretano reproduce de manera fiel la superficie del molde y tiende a pegarse en él. Durante la fase inicial del proceso, los componentes líquidos, en este caso monómeros o prepolímeros (no polímeros) como los polioles, son bombeados desde sus depósitos (regularmente a temperaturas entre 60 y 90°C) para ser mezclados en la proporción adecuada, ya sea a baja presión (por ejemplo, para suelas de zapato) o a alta presión (para piezas gruesas) y después son inyectadas en un molde donde se formará el producto final. En realidad, este proceso es la combinación de un proceso químico y de moldeo, donde las materias primas no son polímeros, sino reactivos químicos que formaran un polímero al ser moldeado en un producto terminado.

El proceso RIM consume menos energía que el proceso convencional, ya que los líquidos son inyectados a temperatura ambiente (temperatura típica del molde 40°C). Por otro lado, ya que el material se formula con agentes espumantes este expande dentro del molde, requiriendo fuerzas de cierre bastante bajas (7 kg/cm²). Por ejemplo, para la inyección de partes automotrices planas de gran tamaño, de 5 kg de peso, en RIM solo se requieren 50 ton de fuerza de cierre, lo cual es un valor bastante bajo comparado con los valores de 2000 a 3500 ton que se utilizan en el moldeo convencional. La aplicación de este proceso en PUR, involucra el adecuado mezclado y bombeo de los líquidos catalizados: el polioliol y el isocianato. El polioliol contiene la cadena de poliéster, un agente de entrecruzamiento y un catalizador. Regularmente se añade un agente espumante en cualquiera de los dos líquidos. En este proceso, para obtener las mayores propiedades en el producto final es esencial alcanzar un producto homogéneo.

El uso de materiales reforzantes, como la fibra de vidrio (menor de 2 mm de Long), en el proceso de RRIM permite obtener productos con propiedades mejoradas, por lo que cada vez se emplea más este proceso en la elaboración de partes automotrices con altos requerimientos en propiedades mecánicas (Sánchez et al, 2001, pp.100-102).

2.7 Equipos Auxiliares de Proceso

En la mayoría de los procesos se deben considerar diferentes condiciones que hacen necesario el uso de equipos auxiliares para llevar a cabo dicho proceso. El equipo auxiliar para utilizar depende generalmente del material a procesar y de las condiciones especiales que demande este, pero existen otros que independiente del material sirven para hacer más eficiente el proceso a realizar.

2.7.1 Diseños especiales de tornillos.

Aunque la mayoría de los tornillos se fabrican con base a un diseño universal, lo cual los hace aplicables a una gran variedad de materiales termoplásticos, existen diseños especiales para el procesamiento de algunos termoplásticos particulares tales como PA, PBT, PET Y POM, que requieren una zona de compresión más corta y menor profundidad de canal para generar el calor necesario para su fusión. Mientras que materiales como CA y CAB requieren profundidades mayores a las convencionales.

2.7.1.1 *Tornillos para PVC rígido.*

El PVC plastificado puede procesarse sin ningún problema utilizando tornillos convencionales; sin embargo, el PVC rígido requiere tornillos más cortos y con canales más profundos para evitar la degradación del material por esfuerzo de corte durante su tiempo de residencia. Por otro lado, es común recubrir los tornillos para PVC con aleaciones especiales que los protejan contra la elevada corrosión que produce el PVC (Sánchez et al, 2001, p.150).

2.7.1.2 *Tornillos para elastómeros.*

Los tornillos para elastómeros deben seleccionarse teniendo en cuenta que se debe evitar que el elastómero (hule) vulcanice en los canales del tornillo, y/o en la boquilla, en lugar de esto que sea transportado para que llegue dentro del molde y sea allí donde vulcanice. Esto se logra utilizando barriles con control de temperatura, tornillos cortos y con profundidad de canal que solo decrezca ligeramente para lograr un mayor transporte y menor fricción y así evitar vulcanizar el material (Sánchez et al, 2001, p.150).

2.7.1.3 Tornillos con cabezas mezcladoras.

Estos tornillos son los comúnmente utilizados en extrusores, constan de un cabezal mezclador o torpedo, el cual se monta en la punta de un tornillo. Normalmente esto reduce tres vueltas la longitud total del tornillo. La Figura 130 muestra un diseño típico de estas cabezas mezcladoras, la cual permite la obtención de una gran recirculación del flujo al obligar que este pase por los diferentes canales, formándose así una zona de barrera de altos esfuerzos de corte que permiten alcanzar una fusión total y una considerable mejoría en el mezclado, homogeneidad y dispersión del material (Sánchez et al, 2001, p.150).

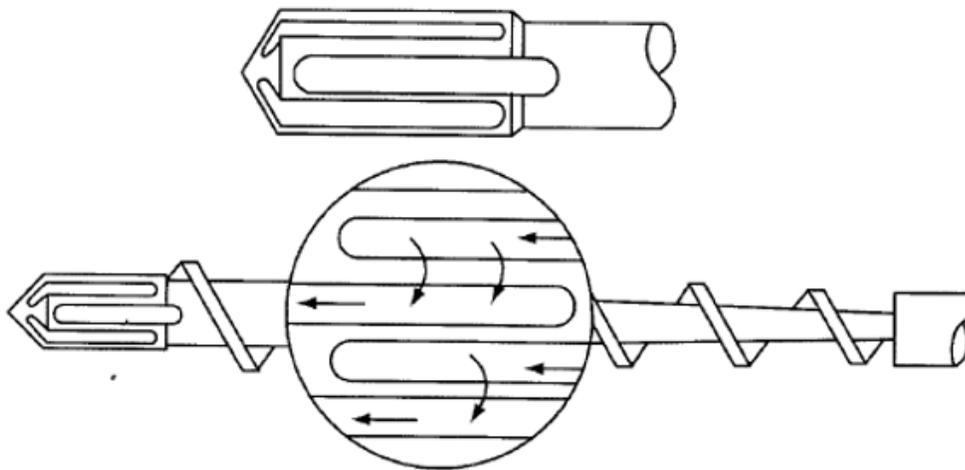


Figura 130. Diseño típico de una cabeza mezcladora. (Sánchez et al, 2001, p.151).

Debe notarse, que este tipo de diseños pueden acarrear algunas desventajas, tales como disminución en la capacidad de transporte del tornillo, excesivo desgaste del barril al usar materiales abrasivos o contaminantes, o puntos muertos donde se puede estancar material que pueda llegar a degradarse. Con base en esto, las cabezas mezcladoras no son un diseño muy común en máquinas de inyección, aplicándose solo en casos muy específicos en los que se requieren explotar sus ventajas.

Así, la razón para usar este tipo de cabeza-torpedo consiste en mejorar el efecto de mezclado producido por el tornillo y ayudar a una mejor dispersión de pigmentos, aditivos, etcétera. Además, permite mejorar uniformidad del fundido que daría lugar a menores esfuerzos latentes (tensiones congeladas) en las piezas moldeadas.

Algunos de los esfuerzos latentes en piezas inyectadas son consecuencia directa de la mala calidad del fundido. Se ha demostrado que capas de fundido con

temperaturas diferentes, provienen de los filetes del tornillo que no han sido suficientemente dispersadas o mezcladas por ellos. Así, si en el molde se introduce fundido con temperaturas distintas, se dará lugar a piezas con tensiones debido a un enfriamiento variable. Estos esfuerzos latentes han sido observados, sobre todo, en plásticos cristalinos, tales como poliamidas, e identificados como causa directa de piezas débiles (Sánchez et al, 2001, p.151).

2.7.1.4 Tornillos con zona de mezclado prolongada.

La principal diferencia de este tipo de tornillos con los de cabezas mezcladoras, está en la longitud de la zona de mezclado, pues estos constan de una sección de mezclado más larga formada por canales con diferentes profundidades y localizados de manera periódica entre sí (Figura 131). Los canales menos profundos permiten esfuerzos moderados de corte, incrementan la fusión acompañada de una variación periódica de la presión del fundido, lo cual facilita un continuo intercambio de material entre canal y canal, alcanzando un mezclado distributivo a diferencia del mezclado dispersivo de las cabezas mezcladoras.

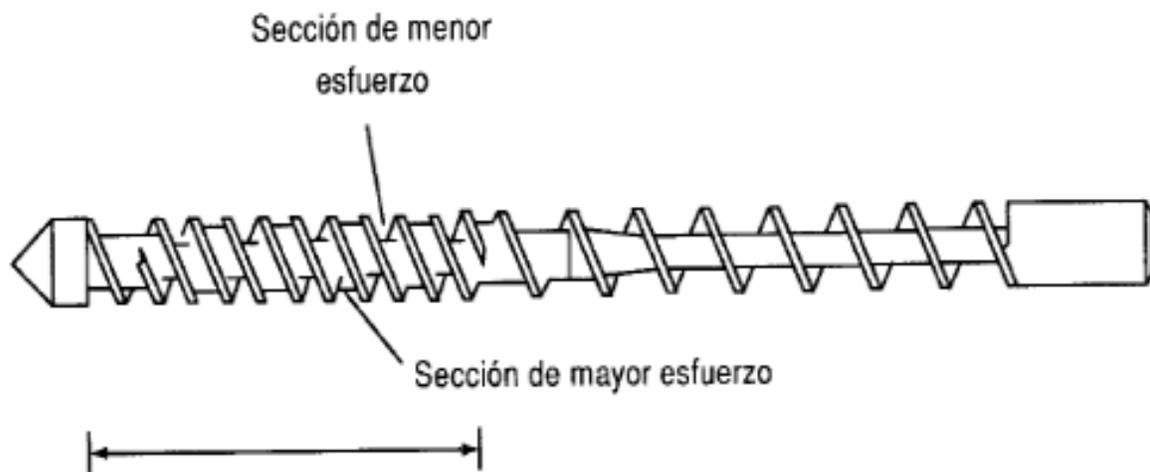


Figura 131. Diseño de un tornillo con zona de mezclado prolongado. (Rosato, 1986, citado en Sánchez et al, 2001, p.152).

Debido a que en este diseño la fusión y el mezclado ocurren en una longitud mayor del tornillo son más adecuados para el moldeo por inyección, ya que generan menos esfuerzos de corte comparados con las cabezas mezcladoras, lo cual suele ser una gran ventaja al inyectar materiales abrasivos o altamente sensibles al calor (Sánchez et al, 2001, pp.151-152).

2.7.1.5 Tornillos y barriles con desgasificación.

Este tipo de tornillos se utilizan en extrusión desde hace años para termoplásticos que van contaminados con agua y/u otras sustancias de bajo peso molecular, tales como monómeros. Esta idea se trasladó a las máquinas de inyección donde actualmente se usan tornillos con desgasificación en gran variedad de materiales, tales como: ABS, CA, CAB, CP, PA 6 Y 66, PPO, PC, PMMA, PBT Y SAN, entre otros.

Estos materiales presentan características higroscópicas (son afines para atrapar humedad), lo que ocasiona problemas como degradación y burbujas que alteran las propiedades del producto. Esta humedad puede eliminarse mediante el presecado del material con equipos de secado antes de alimentarse a la tolva o mediante el uso de máquinas con tornillos y barriles con desgasificación. En la Tabla 14 se presentan las condiciones de secado requeridas para algunos termoplásticos (Sánchez et al, 2001, pp.152-153).

Tabla 14.

Condiciones de secado para algunos materiales.

MATERIAL	ABSORCIÓN DE AGUA [%]	TIEMPO DE SECADO [h]	TEMPERATURA DEL DESECANTE* [°C]
ABS	0.2 a 3.5	2	75
CA	4.5 a 6.0	1 a 2	85
HIPS	0.08	1 a 2	70
PA 6	1.6	12	105
PA 66	1.5	12	105
PBT	0.08	2 a 3	135
PC	0.16	2	120
HDPE	0.01	1 a 1.5	85
LDPE	0.2	1 a 1.5	85
PET	0.03	2	135
PMMA	0.3	3 a 4	90
PS	0.08	1 a 2	70

**El desecante es un material con alta afinidad hacia la humedad que se utiliza para extraer la humedad al polímero. Los desecantes más utilizados para el secado de plásticos son derivados de Aluminio-silicatos.*

Sánchez et al, 2001, p.153.

En las máquinas con tornillos y barril con desgasificación el material se funde en la primera fase, luego se descomprime para que los volátiles se desprendan y salgan por un orificio (respiradero o vertedero). A continuación, el fundido se vuelve a

comprimir y pasa a la zona delantera del tornillo (segunda fase) para ser inyectada en el molde.

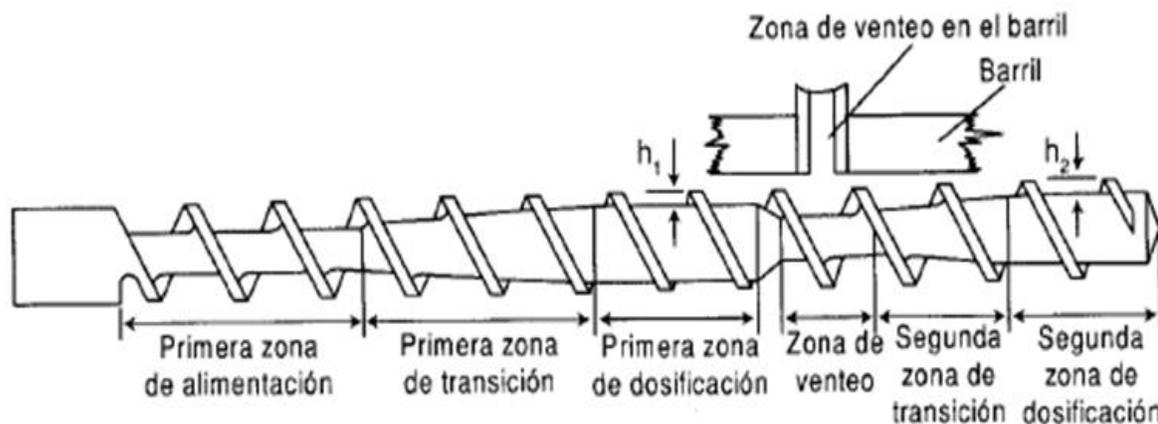


Figura 132. Esquema de las diferentes zonas de un tornillo con desgasificación o venteo. (Sánchez et al, 2001, p.154).

En el esquema de la [Figura 132] puede apreciarse que, para que los volátiles se separen con efectividad, es preciso plastificar bien el sólido (en la primera zona de bombeo). La zona de desgasificación (zona de venteo) debe ser suficientemente larga, de modo que el orificio de desgasificación siempre este situado dentro de dicha sección cuando el tornillo se mueve sea cual sea la carrera de inyección. El material vuelve a comprimirse en la segunda zona de dosificación o bombeo (Sánchez et al, 2001, pp.153-154).

2.7.1.6 Equipos de secado.

La mayoría de las resinas altamente higroscópicas requieren ser secadas antes de ser alimentadas a la máquina inyectora y, así evitar problemas de apariencia y en la propiedad del producto final. Para lograr el secado de un material y reducir su contenido de humedad, este debe calentarse y exponerse a un aire seco con contenidos de humedad muy bajos (puntos de rocío muy bajos), que ocasionan una mayor afinidad del aire por la humedad.

Estas condiciones crean una diferencia de presiones de vapor de agua entre el granulo y el ambiente circundante, lo que origina un flujo de humedad desde el granulo hacia el ambiente, de donde es arrastrada por el aire circulante hacia un depósito de desecante.

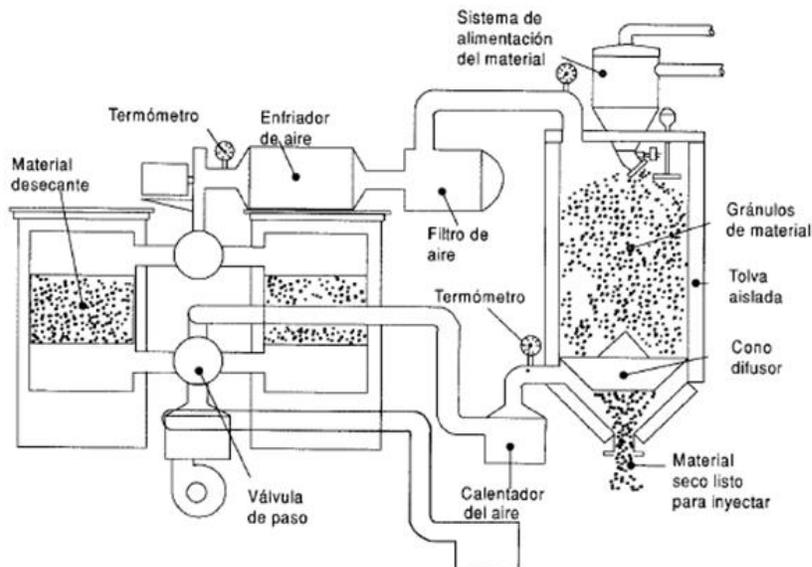


Figura 133. Diseño típico de un equipo secador para plásticos. (Rosato, 1986, citado en Sánchez et al, 2001, p.155).

Un equipo típico para el secado para el secado de materiales higroscópicos (Figura 133) consta de un depósito de material desecante con auto regeneración, calentadores de aire, filtros, intercambiadores de calor y tolvas aisladas. El proceso de secado consiste en hacer pasar aire seco con bajo punto de rocío, proveniente del depósito de desecante, hacia los calentadores donde se eleva su temperatura hasta el valor deseado. Posteriormente, este aire es distribuido homogéneamente hacia el material higroscópico para remover su humedad. Finalmente, el aire cargado con la humedad del plástico regresa hacia la cámara de desecante, pasando primero por filtros de polvos y enfriadores hasta alcanzar la temperatura requerida (Sánchez et al, 2001, pp. 154-155).

2.7.2 Válvulas de bloqueo de flujo (antirretorno).

Las máquinas inyectoras de tornillo alternativo utilizan el tornillo como si fuera un pistón. Cuando este va hacia adelante, el material puede pasar hacia atrás y volver a los canales del tornillo. En el caso de materiales muy viscosos, como el PVC, basta con poner una cabeza cónica al final del tornillo (Figura 134) para que actúe como pistón y no permita el flujo hacia atrás del fundido.

Los materiales menos viscosos necesitan la instalación de válvulas antirretorno, de las cuales hay diversos tipos siendo las más importantes la válvula de "anillo" y la de "bola" (Sánchez et al, 2001, pp. 155-156).

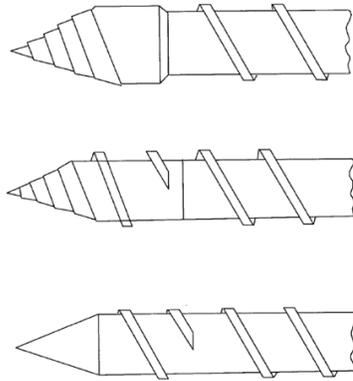


Figura 134. Diseño de cabeza antirretorno de flujo para materiales de alta velocidad. (Johannaber, 1982, citado en Sánchez et al, 2001, p.156).

2.7.2.1 Válvula de anillo.

Esta válvula se coloca en la punta del tornillo. Consta de un anillo, el cual se desliza suavemente sobre el barril (Figura 135). Cuando gira el tornillo la fuerza del plástico obliga al anillo a moverse hacia adelante, permitiendo el paso del fundido. Cuando el tornillo actúa como pistón para inyectar el material en el molde, el anillo va hacia atrás y entra en contacto con el asiento, produciendo el cierre y evitando que se regrese material hacia los canales del tornillo, durante la etapa de inyección, permitiendo además que el tornillo genere la presión necesaria para la inyección del material.

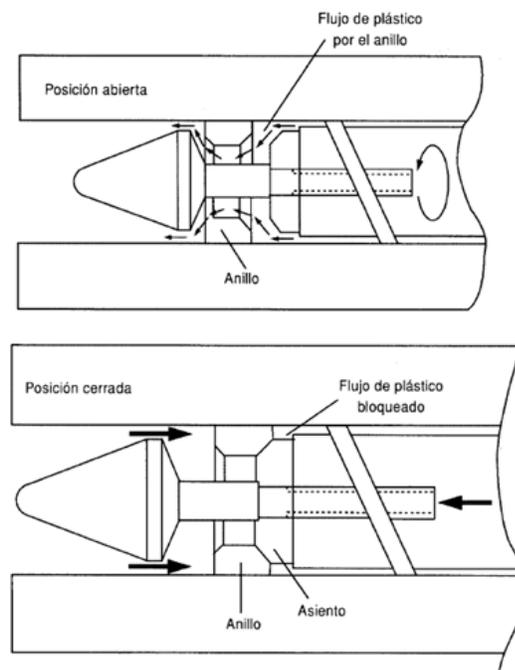


Figura 135. Válvula de anillo. (Sánchez et al, 2001, p.157).

2.7.2.2 Válvula de bola.

Esta resuelve algunos de los problemas que presenta la válvula de anillo. En este tipo de válvulas es una bola en vez de un anillo la que se mueve para hacer el cierre (Figura 136). Esta válvula debe tener un recorrido corto y una sección de paso suficientemente grande, de modo que el material plastificado pueda moverse con libertad sin producir un calor excesivo por fricción. Este tipo de válvulas tiene un mantenimiento fácil. Sin embargo, también presenta algunos problemas, tales como puntos muertos, especialmente entre los orificios de entrada y detrás de las bolas, u obstrucciones con material extraño que pueden dañar su funcionamiento (Sánchez et al, 2001, p.158).

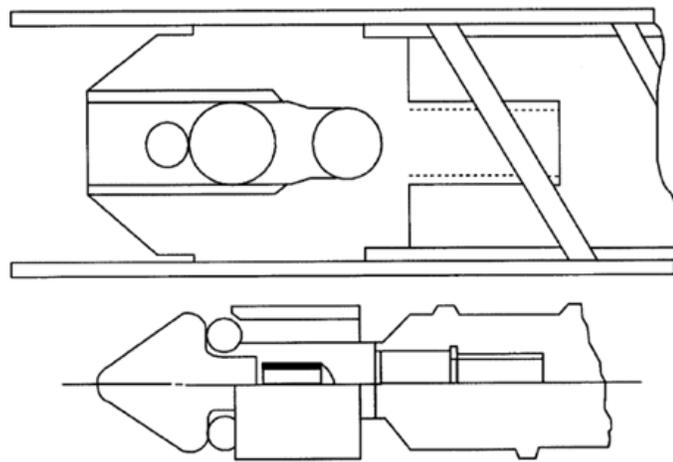


Figura 136. Válvula antirretorno de bola (Sánchez et al, 2001, p.158).

Si la válvula no cierra de manera perfecta en cada ciclo de inyección, habrá variación en la calidad de la pieza moldeada, aparecerán defectos, como malas propiedades mecánicas, defectos superficiales, rechupes e incluso variaciones en la contracción (Sánchez et al, 2001, pp.158-159).

2.7.3 Boquillas de inyección.

La boquilla se encuentra localizada en el extremo frontal del barril de calefacción, su función consiste en permitir que el paso del material fundido desde el barril de la unidad de inyección al interior del molde. La boquilla de inyección es la que hace contacto con la boquilla o bebedero del molde. El diseño de las boquillas depende mucho del tipo de polímero y del diseño del molde. Este diseño es muy importante desde el punto de vista de la presión y de la temperatura. La boquilla no debe ofrecer una grave restricción al flujo del material fundido y además debe mantener una temperatura adecuada del fundido que pasa por ellas para evitar,

por un lado, que se enfríe el material y que solidifique formando un tapón en la boquilla, y por otro lado, debe evitar el fenómeno de “goteo” que ocasiona que el material se salga o gotee por la boquilla.

La mayoría de las boquillas son esféricas para que las fuerzas que actúan sobre ellas produzcan el menor desgaste posible (Figura 137). En Estados Unidos se considera estándar un radio esférico de la boquilla de 12.7 a 19mm (1/2 a 3/4 de pulgada). En Europa se ponen radios de 10, 15, 20 y 35 mm. En todos los casos es de gran importancia que el radio de la boquilla se ajuste adecuadamente con el radio interno del bebedero para evitar que gotee material. (Sánchez et al, 2001, p.159). Puede resumirse esto en tener una diferencia de radio entre la boquilla de la máquina y el bebedero del molde siendo mayor el de este último. Por ejemplo 35 mm en la boquilla de la máquina y 40 mm en el bebedero.

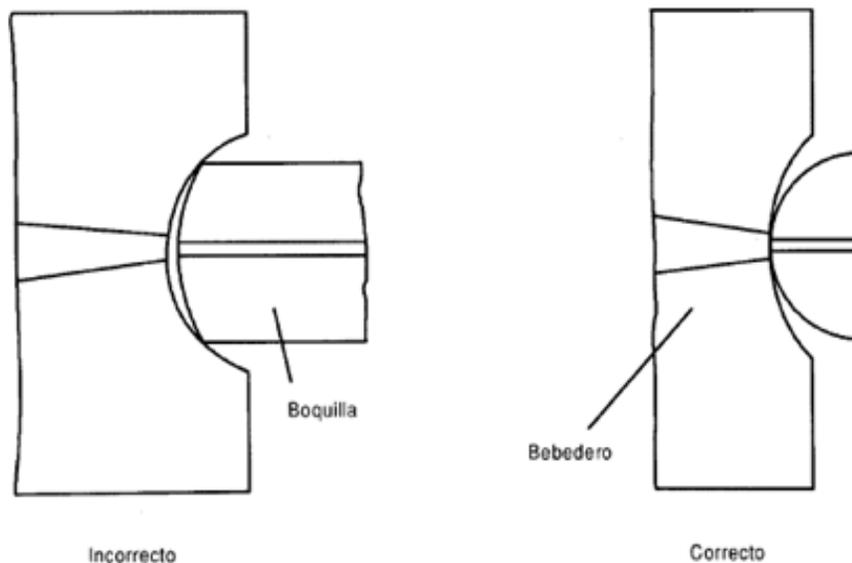


Figura 137. Ajuste del radio de la boquilla sobre el bebedero. (Sánchez et al., 2001, p.160).

Es de mucha importancia que el diámetro de salida de la boquilla sea igual o menor (normalmente de 1 a 2 mm menor) que el orificio de entrada al bebedero (localizado en el molde), esto para evitar puntos muertos (lugares donde el material se acumula sin de fluir y se degrada). En la [Figura 138] se presenta el ajuste correcto entre la boquilla con el bebedero. Normalmente, el diámetro de la boquilla varía con el tamaño de la máquina. Aunque los diámetros más comunes varían desde 1.6 a 9.5 mm. Conviene que la boquilla pueda cambiarse con facilidad para poner en cada caso la más adecuada el material y al molde (Sánchez et al, 2001, pp. 159-161).

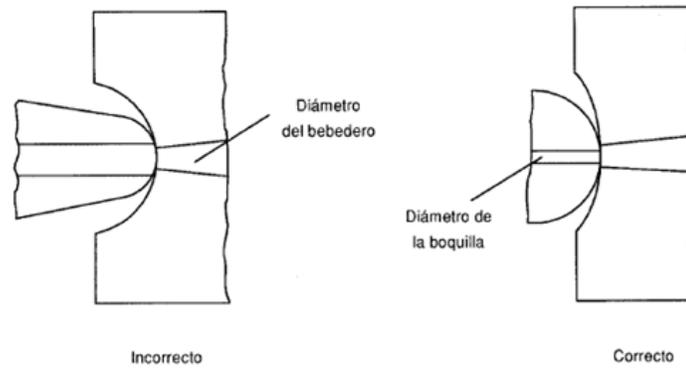


Figura 138. Ajuste del diámetro interior de la boquilla con el bebedero. (Sánchez et al, 2001, p.160).

Cuando se presentan problemas de goteo del material fundido en la boquilla, pueden resolverse mediante la descompresión del material (modificando la contrapresión del material sobre la que actúa el tornillo) o mediante el uso de boquillas de cierre.

La descompresión del material se realiza, en la mayoría de las máquinas de inyección, mediante una válvula de descompresión (Figura 139), de modo que el tornillo pueda ser retirado hidráulicamente. El objetivo de este movimiento consiste en liberar la presión del fundido en el barril y en los canales de alimentación al molde, para que no tenga lugar el goteo. Esta técnica es muy útil, ya que puede evitar el uso de boquillas de cierre. Sin embargo, debe utilizarse con mucha precaución ya que, si la descompresión es demasiado grande, puede introducirse aire u otros volátiles en el fundido. Con algunos materiales como las poliamidas (*nylons*), puede dar lugar a la oxidación o, en otros casos, producir defectos superficiales (Sánchez et al, 2001, p.161).

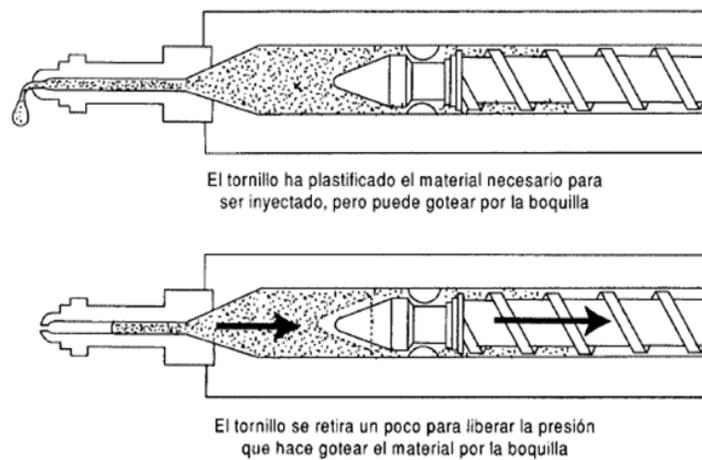


Figura 139. Mecanismo de descompresión de la máquina. (Sánchez et al, 2001, p.161).

2.7.3.1 Tipos de boquillas de cierre.

Con respecto a las boquillas de cierre existen varios tipos; entre los más importantes se encuentran los siguientes:

- **Boquilla cónica.** Este es un tipo muy común de diseño (Figura 140). La conicidad del orificio de salida facilita el desprendimiento del polímero cuando se retira la boquilla. Evita, en parte, el problema de “goteo”. Es barata, robusta y fácil de adaptar al molde. no obstante, la conicidad hace aumentar la velocidad del flujo y perder presión, sobre todo, si la boquilla es larga, es decir ofrece resistencia superior a la deseable. No se aconseja su uso cuando en la entrada de las cavidades se presentan grandes pérdidas de presión.

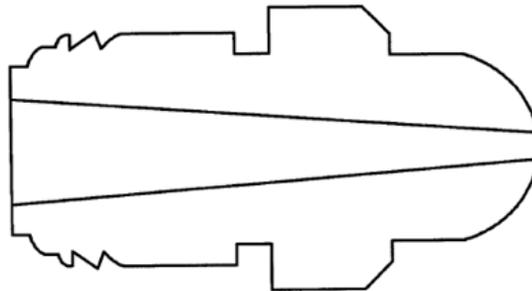


Figura 140. Boquilla cónica. (Sánchez et al, 2001, p.162).

- **Boquilla de flujo libre.** Conocida también como prolongada (Figura 141), se caracteriza por ofrecer menor resistencia al paso del material, lo que se consigue al hacer corta la longitud del orificio final y relativamente grande el diámetro del orificio principal. Este diseño permite conservar, hasta donde es posible, la presión. Es muy adecuada cuando el plástico entra directamente en la cavidad a través de un bebedero muy pequeño. La longitud de esta boquilla puede ser tan grande como sea necesario facilitando la implementación de bandas calefactoras.

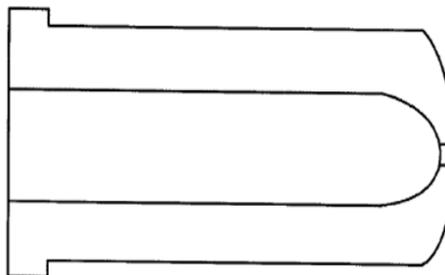


Figura 141. Boquilla de flujo libre. (Sánchez et al, 2001, p.162).

- **Boquilla de conicidad invertida.** (Figura 142) esta se usa cuando se trabaja con polímeros fundidos de muy baja viscosidad, como poliamidas (*Nylon 6 y 66*), donde se presenta el problema de goteo entre ciclos. Esta boquilla trabaja a una temperatura un poco baja, de modo que cuando no se está inyectando el material solidifica en el estrechamiento y evita el goteo; este pequeño tapón, al realizar la inyección, funde por fricción y permite el paso del fundido. Estas boquillas se utilizan con gran éxito para el moldeo del Nylon.

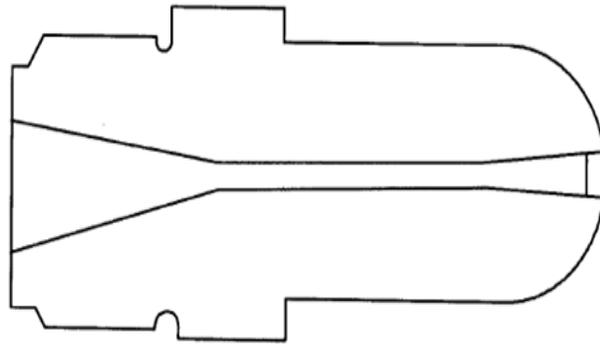


Figura 142. Boquilla de flujo libre. (Sánchez et al, 2001, p.163).

- **Boquilla con cierre mecánico.** Este tipo de boquilla está representado en la Figura 143 la cual presenta una boquilla de cierre mecánico tipo aguja, la cual usa un muelle para hacer el cierre. Cuando la boquilla apoya sobre el molde, el extremo redondeado de la aguja se aloja en la cavidad esférica ubicado al frente de ella, permitiendo el paso del fundido.

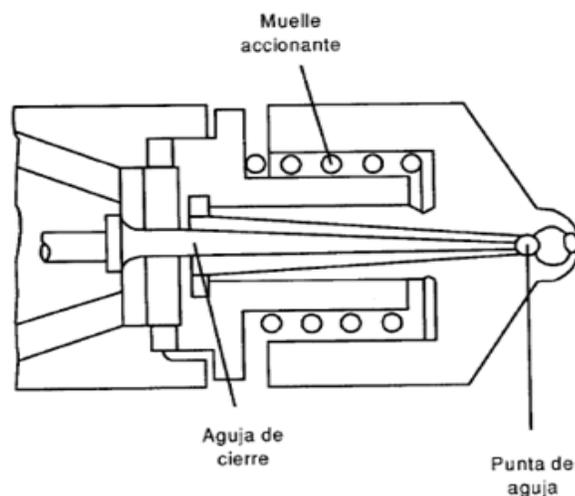


Figura 143. Boquilla con válvula de aguja. (Sánchez et al, 2001, p.164).

- **Boquilla con válvula cónica de cierre a la salida.** En la Figura 144 se representa otra boquilla con válvula cónica. Cuando el tornillo avanza, la presión del fundido actúa contra la presión del muelle y mantiene abierta la boquilla; al retroceder el tornillo, el muelle cierra la válvula.

Este tipo de boquillas requieren un continuo mantenimiento para asegurar su buen funcionamiento. Por otro lado, en estas boquillas la presión de inyección debe ser capaz de vencer la fuerza del muelle. Esto supone la generación de esfuerzos de corte adicionales y, por consiguiente, calor extra sobre el material que en algunos casos puede ocasionar su degradación.

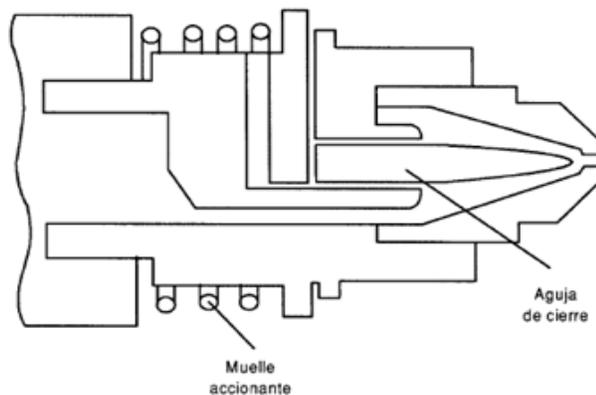


Figura 144. Boquilla con válvula cónica y muelle. (Sánchez et al, 2001, p.165).

- **Boquilla de aguja accionada externamente.** Si se desea evitar los esfuerzos de corte extra ocasionado por el vencimiento del muelle como en el caso anterior, puede emplearse una boquilla de aguja accionada externamente (Figura 145). La longitud total de estas boquillas suele ser bastante grandes (Sánchez et al, 2001, pp.162-165).

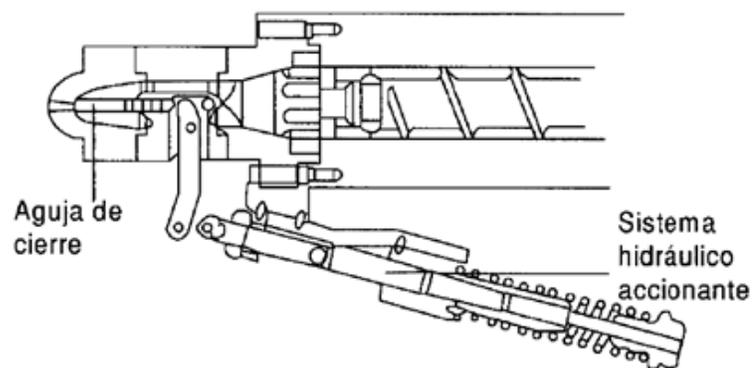


Figura 145. Boquilla accionada externamente. (Johannaber,1982, citado en Sánchez et al, 2001, p.165).

El conocimiento de los diferentes procesos de transformación es de mucha utilidad para el diseñador de productos plástico, para así poder interactuar con el equipo de transformación y poder realizar un buen control de los aspectos relacionados con el diseño del artículo plástico y los de los parámetros de transformación que fueron tenidos en cuenta durante el diseño de este.

3 Metodologías para el Desarrollo de un Proyecto de Transformación de Plástico

El propósito principal de los métodos es ayudar al hombre a resolver problemas, de tal forma que le proveen herramientas para realizar los trabajos con mayor facilidad y eficiencia, apoyando y motivando las actividades intelectuales; sin embargo, dichos métodos no toman decisiones, ni generan ideas o descubren las necesidades y problemas del mercado. Por lo tanto, un método es el proceso para realizar algo, recopilando la experiencia en diversas áreas, buscando comunicar el conocimiento de una manera más eficaz; conformándose de tres componentes principales: definición, disciplina y aplicación. La definición contiene los conceptos y la teoría detrás del método, la disciplina incluye la sintaxis del método y el formato interpretable y representable; por último, la aplicación del método depende directamente de la solución de los problemas (Mayer & Decker, 1991) [citado en Flores, 2009, p.1].

3.1 Metodología de Ingeniería de Diseño

La Ingeniería de Diseño puede definirse como toda actividad necesaria para establecer y definir soluciones a problemas no resueltos con anterioridad o nuevas soluciones a problemas previamente resueltos de forma diferente, empleando el conocimiento científico y tecnológico para asegurar que el producto diseñado satisfaga las necesidades y requerimientos del mercado, permitiendo la manufactura y ensamble por el método adecuado en los tiempos y costos programados, dando por terminado el proceso de diseño cuando el producto representa la calidad, el costo, el rendimiento y fiabilidad esperada.

De tal forma que la ingeniería de diseño representa un proceso secuencial e iterativo, considerando en cada una de las etapas la información y el conocimiento adquirido a lo largo del proceso, de tal forma que pueda generarse una retroalimentación (Hurst, 1999) [citado en Flores, 2009, p.1]. Así se ve, como Norton, 2000 [citado en Flores, 2009] divide este proceso en diez etapas como se muestra en la Tabla 15.

El proceso de diseño se basa en las restricciones del producto, siendo de suma importancia documentar de la mejor manera cada una de las características, para realizar esto existe un modelo que delimita estas características en un documento denominado PDS (por sus siglas en inglés *Product Design Specification*), definiendo las restricciones y los límites de las posibles soluciones (Flores, 2009, p.2).

Tabla 15.

Proceso de diseño y sus principales características.

ETAPAS	DESCRIPCION
Identificación de la necesidad	Definición de las especificaciones y requerimientos del producto.
Investigación de antecedentes	Recopilación de toda la información preliminar para el diseño.
Definición de objetivos	Definición de las metas u objetivos funcionales y científicos a cumplir.
Especificaciones de funcionamiento	Determinar los propósitos y funcionamiento del producto.
Ideación e invención	Ideas y posibles soluciones a los requerimientos de proyecto
Análisis	Implementación de técnicas analíticas para determinar la factibilidad.
Selección	Selección del diseño conceptual a seguir.
Diseño detallado	Diseño detallado determinando a profundidad las características.
Prototipos y pruebas	Construcción de modelos físicos y acercamientos al funcionamiento
Producción	Después de validado el diseño, comenzar la etapa de producción

Norton, 2000, citado en Flores, 2009, p.2.

3.1.1 Criterio PDS (especificaciones de diseño de producto).

Aquí se detallan los procesos necesarios para la definición de una especificación de diseño del producto (PDS). Como paso previo a la escritura de la PDS debe llevarse a cabo mucha investigación y reunir toda la información. Este es un proceso continuo y se describe en profundidad en Hurst (1999), capítulo 9. En este capítulo se explican el contenido requerido de un PDS. La escritura de un PDS es el primer paso esencial en cada proyecto de diseño.

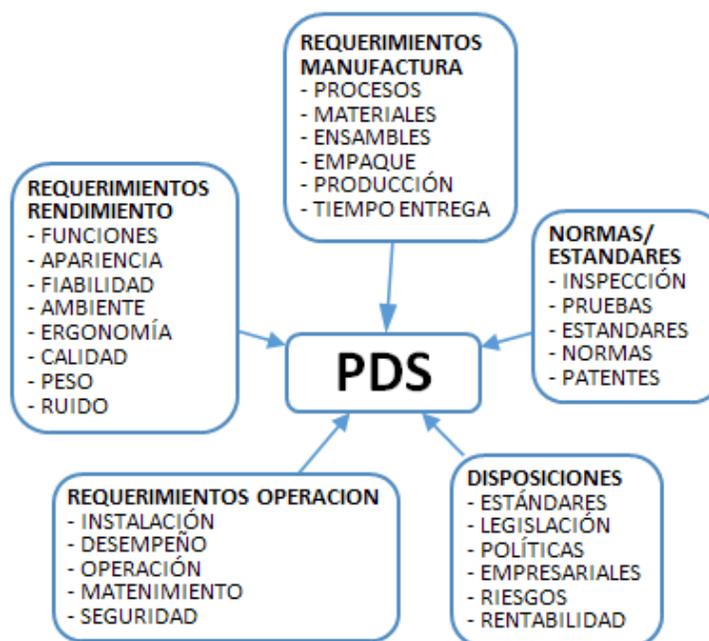


Figura 146. Características principales del documento PDS. (Flores, 2009, p.2).

A lo largo del proyecto, este documento permanece en constante evolución, incrementando la información adquirida debido a las etapas iterativas, las recomendaciones del cliente y las modificaciones del equipo de diseño. En la Figura 146 y en la Tabla 16 se presentan y definen las características que debe tener el documento PDS.

Tabla 16.

Descripción de las Características principales de las Especificaciones de Diseño del Producto (PDS).

GENERAL	PARTICULAR	DESCRIPCIÓN
Rendimiento	Función	Sintetizar la principal función del producto
	Apariencia	En ocasiones no presenta gran importancia, pero en otras es importante la estética del producto para un buen posicionamiento en el mercado, considerando forma, color y texturas.
	Fiabilidad	La vida del diseño, especificando el número de ciclos de operación del producto.
	Condiciones Ambientales	Los rangos de temperatura, humedad, presión, condiciones químicas y magnéticas a las que el producto estará expuesto.
	Ergonomía	Si el producto es para el uso de un ser humano, considerar las características necesarias para el mejor desempeño.
	Calidad	La calidad del producto debe cumplir los requerimientos del mercado en cada uno de sus componentes.
	Peso	En algunas aplicaciones, esta característica es importante.
	Proceso	Determinar los procesos que se involucran en la manufactura del producto.
Manufactura	Materiales	Características de los materiales para la fabricación y el empaque del producto, enfatizando en los criterios de selección y restricciones del diseño. Algunas consideraciones como corrosión, clima, resistencia, densidad, durezas, color, recidado, entre otras.
	Ensamblajes	Las características de los ensamblajes, determinando si es manual, semiautomático o automático, incluyendo si son necesarias líneas de ensamble.
	Empaque/Envío	Especificaciones del tamaño y pesos para el empaque y transporte del producto.
	Producción	Determinar la cantidad de producción requerida para una correcta selección de los materiales y procesos de manufactura.
Normas/Estándares	Tiempo/Entrega	Es importante definir tiempos de entrega reales para cada etapa del proceso de diseño y producción.
	Pruebas	Los métodos empleados para la verificación de la funcionalidad del producto, especificando los tiempos y pruebas necesarias.
	Estándares Patentes	Los estándares involucrados a nivel nacional, internacional y corporativo. Determinar si el diseño no infringe alguna patente existente.
Disposiciones	Estándares	Los estándares involucrados en las legislaciones a nivel nacional o internacional que se involucren en el diseño del producto, como la reutilización o reciclaje de ciertos materiales y procesos limpios.
	Legislación	Cualquier legislación gubernamental que involucre una modificación o consideración importante en el diseño.
	Riesgo	Los riesgos potenciales existentes en el proceso de diseño, que involucren dificultades al final del ciclo de vida del producto.
Operación	Instalación	Definir las características del lugar donde el producto se instalará.
	Operación	Factores que influyen en la operación como personal mínimo requerido, la habilidad requerida para la operación, los costos generados y el consumo máximo tolerable de energía estimado.
	Mantenimiento	Simplificaciones en los mantenimientos, re-ensamblajes, características y tiempos de los mantenimientos preventivos y correctivos.
	Seguridad	Protecciones necesarias para realizar una operación lo más segura posible.

Hurst, 1999, citado en Flores, 2009, p.3.

Lo anterior es de mucha utilidad para el inicio de cualquier proyecto de ingeniería y, sobre todo, en la definición del diseño del producto. Pero el método de desarrollo en cuestión de diseño de moldes puede depender del nivel tecnológico e ingenieril de la empresa que lo implementara y cual método amerita el producto después de evaluar la complejidad del producto a desarrollar. A continuación, se presentan dos métodos que se pueden usar.

3.2 Método Tradicional de Fabricación de Moldes

Como se mencionó en la introducción del presente trabajo. Kazmer (2007), describe el proceso tradicional de fabricación de moldes como se muestra en la Figura 147. Donde las características principales que deben considerarse del producto, para manufacturar el molde son:

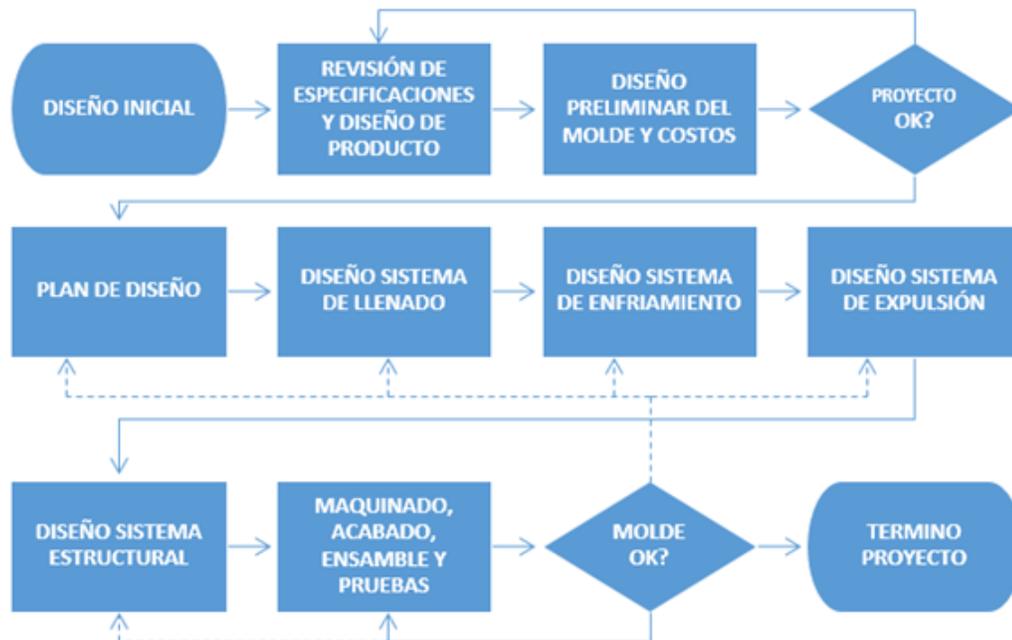


Figura 147. Proceso de diseño tradicional de moldes para inyección de termoplásticos. (Kazmer, 2007).

- Se parte de los bocetos o diseño inicial por parte del cliente.
- Se revisan especificaciones, dimensiones del artículo, espesores de pared de este, análisis y selección del material óptimo y la cantidad requerida de producción.
- Una vez reunida esta información, se debe desarrollar un diseño preliminar del molde, que consiste en la estimación de los costos de manufactura, los ciclos de procesado, la fuerza de sujeción y la velocidad de producción de la maquinaria.
- Posterior a la aprobación del diseño preliminar, se procede a detallar, mediante un plan de diseño, características como el tipo de molde, el número y posición de las cavidades y el tamaño y espesor del molde.

- Luego se desarrolla el diseño de cada uno de los sistemas que componen el molde y cuando el diseño está terminado, se guía en la preparación de la información para el departamento de fabricación, determinando tiempos y costos de manufactura.
- Una vez manufacturado el molde es necesario pulirlo y ensamblarlo, se monta en la máquina inyectora para determinar y verificar el correcto funcionamiento
- De no existir deficiencias en el molde, es posible comenzar a producir.

El mismo autor (Kazmer, 2007), nos indica que en ocasiones existen modificaciones necesarias en el diseño para la etapa de manufactura; por lo tanto, debe regresarse a fases anteriores de diseño. En algunos casos es necesario un rediseño completo debido a errores en el proceso que no pueden ser corregidos, lo que genera grandes pérdidas económicas.

3.3 Metodología de Diseño para la Manufactura y Ensamble (DFMA)

Este modelo consiste en un conjunto de técnicas y metodologías para la mejora del diseño o rediseño de un producto y tiene como objetivo principal mejorar los aspectos de fabricación, ensamblaje y controles respetando las funciones esenciales del producto. Se expondrá la metodología de aplicación de la metodología DFMA, sigue el esquema general de Ingeniería de Diseño, comenzando con la identificación de las necesidades y restricciones del producto; documentando desde el inicio mediante el PDS.

Luego dividiéndose en dos etapas, en la primera de ellas se implementa DFA (Design for Assembly) buscando simplificar la estructura original propuesta del producto; determinando y seleccionando los materiales más adecuados y los procesos de manufactura adecuados para cada uno de los componentes que integran al diseño conceptual. En base a los materiales y procesos de manufactura seleccionados se determinan los costos estimados de fabricación, buscando reducirlos al mínimo; si los resultados obtenidos en esta etapa del proceso de diseño no son los esperados comienza la iteración regresando a la etapa de diseño conceptual para las modificaciones a las propuestas iniciales hasta lograr la selección de la mejor propuesta conceptual.

En la segunda etapa, se implementa DFM (Design for Manufacture), detallando cada componente del producto, evaluando los materiales y procesos de manufactura seleccionados, determinando así la aproximación final de los costos mínimos de manufactura, determinando los planes de manufactura y mantenimientos necesarios. Es posible que dichos costos no sean los esperados y se deba recurrir a una nueva iteración regresando a la etapa de diseño conceptual, para mejorar esto.

Una vez superado este paso se realizan prototipos para determinar funcionalidad y pasar a la manufactura o producción. En la Figura 148 se resumen las medidas adoptadas cuando se utiliza DFMA durante el diseño (Boothroyd & Dewhurst, 1990, citado en Flores, 2009).

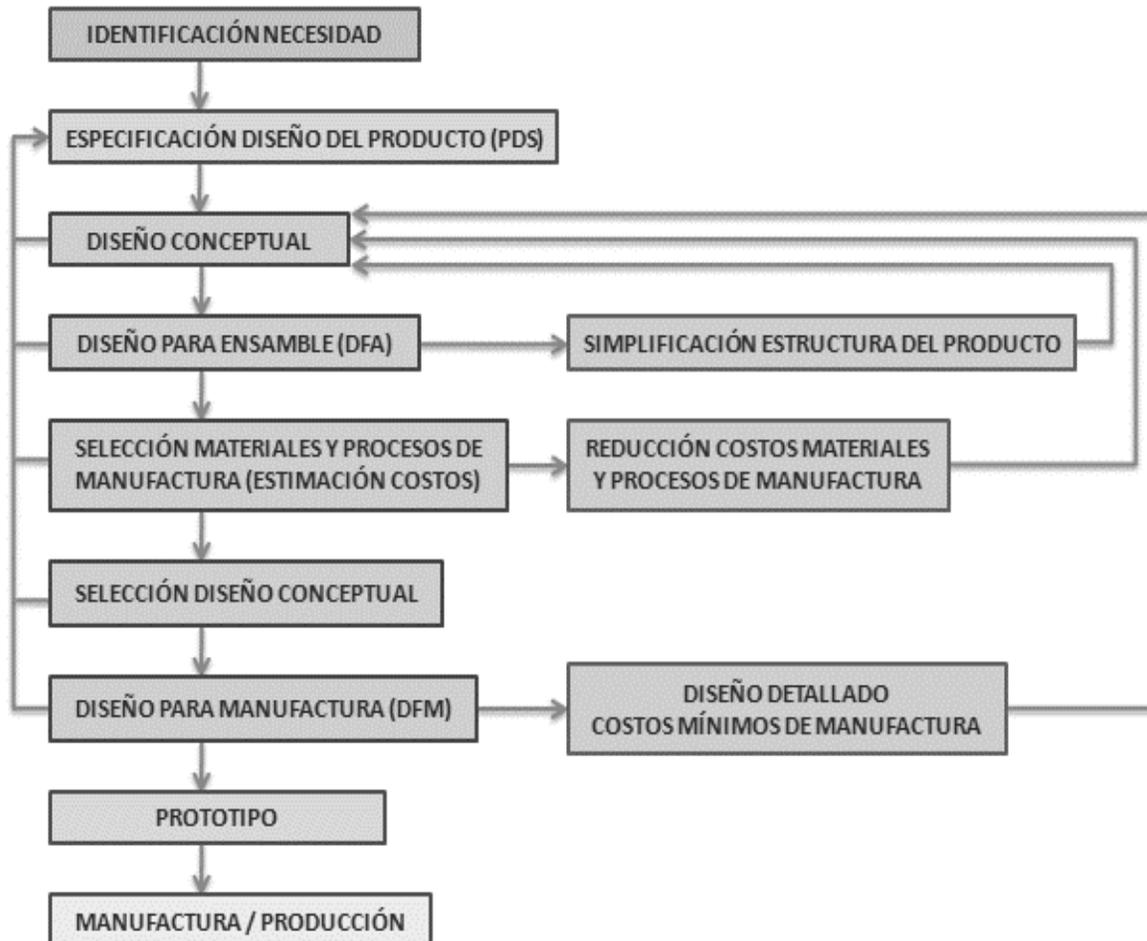


Figura 148. Diagrama de las etapas de la ingeniería concurrente empleando técnicas DFMA. (Flores, 2009, p.14).

En resumen, el análisis se lleva a cabo primero con un PDS, luego con un DFA que conduce a una simplificación de la estructura del producto. Para finalizar, utilizando un DFM, se realizan las primeras estimaciones de costos para las partes se obtienen, tanto para el diseño original como para el nuevo diseño con el fin de tomar decisiones comerciales. Durante este proceso se consideran los mejores materiales y procesos que se utilizarán para las diversas partes. Una vez se ha producido la selección final de los materiales y procesos, un análisis más a fondo para el DFM puede llevarse a cabo, para el diseño detallado de las piezas.

3.3.1 Implementación DFMA en el proceso de transformación de plásticos.

Este proceso, como ya se mencionó, se basa en principios básicos de diseño, considerando varias técnicas que permiten optimizar el diseño y bajar los costos finales del producto. También se benefician los tiempos de mantenimiento y de ensamble; en la implementación de DFMA, para un proceso de transformación de plástico, se debe considerar lo siguiente (Tien-Chien, Wysk & Hsu-Pin, 1998, citados en Flores, 2009):

- **Reducción del Número Total de partes:** es importante reducir el número de partes que conforman un molde de inyección, considerando en el diseño la manufactura de partes quizá más complejas disminuyendo la cantidad total de partes, diseñando y manufacturando únicamente las necesarias para el correcto funcionamiento del molde.
- **Diseño Modular:** en la fabricación de moldes es posible separar por módulos los sistemas de enfriamiento, el sistema de inyección, las placas porta cavidades, las placas porta corazones, el sistema de expulsión, el sistema de agarre, y los sistemas de expulsión de aire, reduciendo los tiempos de manufactura y verificando de manera independiente el adecuado funcionamiento y las mejoras necesarias.
- **Empleo de componentes Estándar:** utilizar los moldes cuentan con diversos componentes que pueden adquirirse como refacciones, entre ellos se encuentran bujes, barras guía, pines para la expulsión, dados de bloqueo, entre otros.
- **Diseñar para una sencilla fabricación:** es importante considerar que los procesos finales de acabado de las partes (pintado, pulido, maquinado final, etc.) incrementan el costo, por eso estos procesos deben considerarse únicamente cuando son necesarios por cuestiones de funcionalidad; por lo tanto, el pulido de los moldes y la exactitud de las tolerancias deben aplicarse únicamente a las partes que tienen contacto directo con el polímero procesándose. Esto aplica incluso para los montajes de mecanizado de las piezas individuales del molde, buscando realizar la mayor cantidad de operaciones de mecanizado por montaje de las piezas en la máquina.
- **Minimizar las direcciones de ensamble:** reducir las direcciones de ensamble de los componentes del molde para inyección, reduciendo así los tiempos y costos de ensamble.
- **Facilitar Inserción:** es importante diseñar en función del ensamble, considerando chaflanes y redondeos en algunos componentes de forma que faciliten la inserción, considerando herramienta especializada para cada operación (Flores, 2009, pp.5).

3.3.2 Definición integral para modelado de funciones (IDEF-0).

Un modelo es la representación de una serie de componentes de un sistema, desarrollado para el entendimiento, análisis, modificación o remplazo de sistemas compuestos por funciones interdependientes; describiendo a detalle las tareas que el sistema desempeña, lo que controla, los componentes que trabajan en él, las funciones y actividades involucradas y lo que el sistema produce. IDEF-0 es una técnica de modelado basado en una combinación de gráficos organizados y sistemáticos que garantizan el entendimiento, fundamentan el análisis, proporcionando lógica a los cambios potenciales, requerimientos específicos, o inclusive fundamentando actividades de diseño e integración. El modelado IDEF-0 para actividades de manufactura debe comprender subactividades, consideradas como únicas, manteniendo una relación jerárquica entre las diferentes actividades en los diversos niveles del modelo (Colquhoun & Baines, 1991) [citados en Flores, 2009]. Se pueden definir los principales objetivos de este modelo como (PUBS-FIPS, 1993) [citado en Flores, 2009]:

La necesidad de implementar como herramienta la técnica IDEF-0 en el proceso de diseño de moldes es porque puede representarse un modelo estructurado de todas las etapas involucradas en el diseño DFMA, detallando la relación existente a lo largo del proceso de diseño y manufactura. Bancroft define que para el modelado del proceso de diseño son necesarios tres aspectos por separado, una metodología, una técnica y una herramienta (Bancroft, 1989) [citado en Flores, 2009], definiéndose para el modelado de la manufactura de moldes como: *Metodología: DFMA. Técnica: IDEF-0. Herramienta: Visio IDEF-0* (Flores, 2009, p.6).

3.3.3 Proceso de modelado IDEF-0.

Se debe comenzar el modelo con un diagrama inicial de la función más general del proceso de diseño para la fabricación de moldes para inyección de [Figura 149], descomponiéndola sistemáticamente en subfunciones que generaran nuevos diagramas de manera progresiva, internándose en las subfunciones hasta llegar al nivel con las funciones finales (Karim, 1994) [citado en Flores, 2009, p.7] [Figura 150]:

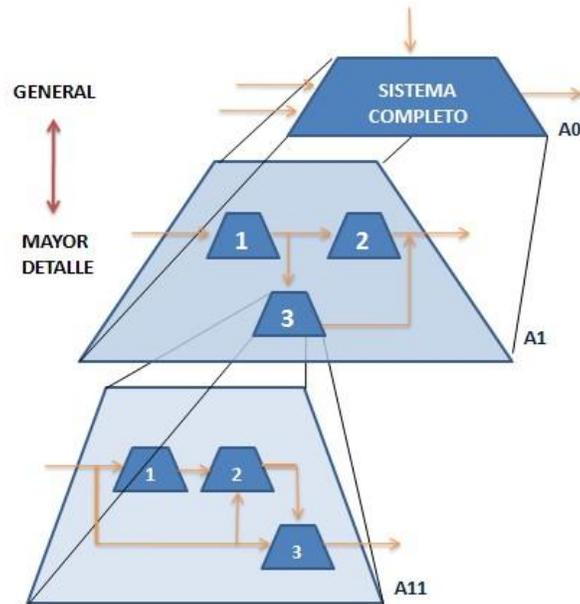


Figura 149. Modelo Jerárquico de descomposición de Funciones IDEF-0. (Haines & Evers, 1990, citado en Flores, 2009, p.7).

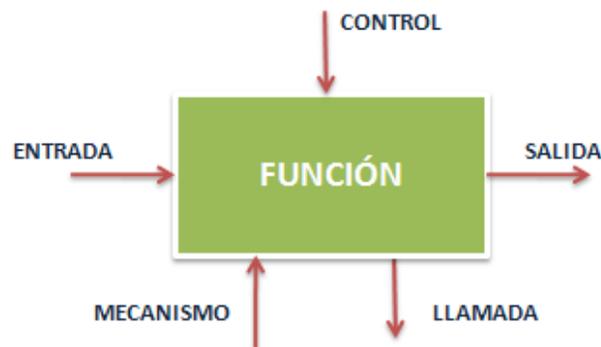


Figura 150. Modelo Fundamental de componentes IDEF-0. (Bancroft, 1989, citado en Flores, 2009, p.7).

La implementación de la técnica IDEF-0 para el modelado de sistemas de manufactura, incluyendo la fabricación de moldes de inyección para termoplásticos (en colada fría), involucra los siguientes procedimientos (Marca & McGowan, 1988) [citado en Flores, 2009, p.7].

- **Determinar el Propósito:** cuál es el objetivo de implementar la técnica IDEF-0 en el proceso de manufactura; en la fabricación de moldes para inyección el propósito de implementarlo es construir una serie de pasos a seguir en forma de diagramas, donde se contemplen todos los elementos de control (condiciones de procesamiento de los termoplásticos tanto en la máquina inyectora como en el

molde), las herramientas (paquetería informática para el diseño mecánico, simulación y validación tanto de la pieza termoplástica como del molde) e información técnica-tecnológica (documentación), de forma ordenada y coherente.

- **Adquisición de Conocimiento:** documentar acerca del sistema para modelar, incluyendo información técnica y la experiencia del personal involucrado en el proceso. Considerando toda esta información en el documento PDS, anteriormente mencionado.
- **Validación del Modelo:** realizar un proceso iterativo para determinar si existen errores en el modelado, apoyado de la información, la experiencia de las personas involucradas e inclusive con la implementación (Flores, 2009, p.8).

A continuación, se mostrará la implementación del modelo IDEF-0, de manera general, para la manufactura de moldes, definiendo su propósito, contenido y enfoque, además su modelo general. Por último, la guía de actividades que se obtiene para un molde simple de colada fría, basado en el trabajo realizado por Flores (2009), en su tesis de maestría titulada “Implementación del método de diseño para la manufactura y ensamble (DFMA) en la manufactura de moldes para inyección en colada fría de termoplásticos”.

En caso de requerir el desarrollo detallado de la implementación del modelo, referirse a Flores (2009), donde se encuentra toda la información necesaria para su desarrollo y el cual es una guía importante para la implementación del modelo a otros tipos de molde o incluso otros proyectos de ingeniería.

3.4 Modelo General IDEF-0 para la Manufactura de Moldes de Inyección

3.4.1 Propósito del modelo IDEF-0.

El propósito del modelado es describir a detalle cada una de las funciones involucradas en la manufactura de moldes; de tal forma que se genere una directriz como referencia para los equipos de ingeniería dedicados a la manufactura de moldes de inyección, buscando reducir al mínimo los tiempos de diseño, manufactura y ensamble, así como la disminución de los posibles errores desde la etapa inicial de diseño (Flores, 2009, p.14).

3.4.2 Contenido y enfoque del modelo IDEF-0.

Es importante generar un modelo completamente representativo y descriptivo del proceso de diseño y manufactura de moldes para inyección de termoplásticos, comenzando la representación de forma general y especializándola para describir cada detalle importante en la manufactura de moldes. El enfoque del modelo busca integrar en un equipo de ingeniería los conocimientos necesarios para la manufactura de moldes para inyección de termoplásticos en colada fría, involucrando un equipo de diseño (mecánico y materiales termoplásticos), de manufactura (procesos) y un equipo de documentación técnica (Flores, 2009, p.14).

3.4.3 Modelo general IDEF-0.

La entrada del modelo *IDEF-0* define cada una de las características específicas del producto termoplástico y las necesidades del cliente, especificando a detalle la funcionalidad del producto, las condiciones de operación, características estéticas, montaje y en ocasiones posibles materiales. El modelo cuenta con dos salidas, la primera de ellas es el molde para inyección de termoplásticos en colada fría ya produciendo y la segunda salida es la documentación del proyecto, incluyendo los diseños del producto y molde, programas planes de manufactura, programas de mantenimientos, listas de refacciones y el análisis de costos del diseño y manufactura. Las variables de control proporcionan condiciones importantes para el desarrollo de las funciones del modelo, teniendo siete variables (Flores, 2009, pp.14-15). Ver Figura 151.

- **C1** Los requerimientos y necesidades del cliente, incluyendo tiempos de producción y la demanda necesaria del producto.
- **C2** Las características propias de los termoplásticos como la temperatura de transición vítrea, la temperatura de fusión, entre otras.
- **C3** Los procesos de manufactura involucrados en la fabricación de Molde para Inyección, considerando características como precisión de la maquinaria, velocidades y acabados.
- **C4** Condiciones de procesado de los termoplásticos mediante el proceso de inyección, como la temperatura, las presiones involucradas, la expulsión de aire necesaria y las condiciones de enfriamiento del molde.
- **C5** Las características del moldeo por inyección, incluyendo las condiciones y propiedades específicas de la unidad de inyección y sujeción de la máquina inyectora.

- **C6** Los costos que se involucran, desde los costos de materiales termoplásticos hasta los costos de manufactura, ensamble y operación del molde.
- **C7** Las características particulares de la máquina inyectora donde se operará el molde (Flores, 2009, p.15).

Para conseguir a la salida esperada de la función principal, el sistema cuenta con diversas herramientas que se emplean a lo largo del proceso, siendo:

- **Equipo de diseño e ingeniería y/o manufactura**, integrado por personas capacitadas y calificadas para cada área de desarrollo del proyecto.
- **La metodología DFMA**, la cual incluye las directrices para el diseño para el ensamble y la manufactura del molde contemplando diagramas, estándares y procesos.
- **Las herramientas necesarias para el diseño y manufactura** del molde, como son bases de datos de materiales, condiciones de procesado, funciones de diseño, funciones de manufactura y herramientas CAD/CAM/CAE.
- **La maquinaria** utilizada para la manufactura del molde (fresadora CNC, torno CNC y toda la maquinaria disponible relacionada con la fabricación del molde) y el procesado del termoplástico (máquina inyectora donde se montará el molde). (Flores, 2009, p.15).

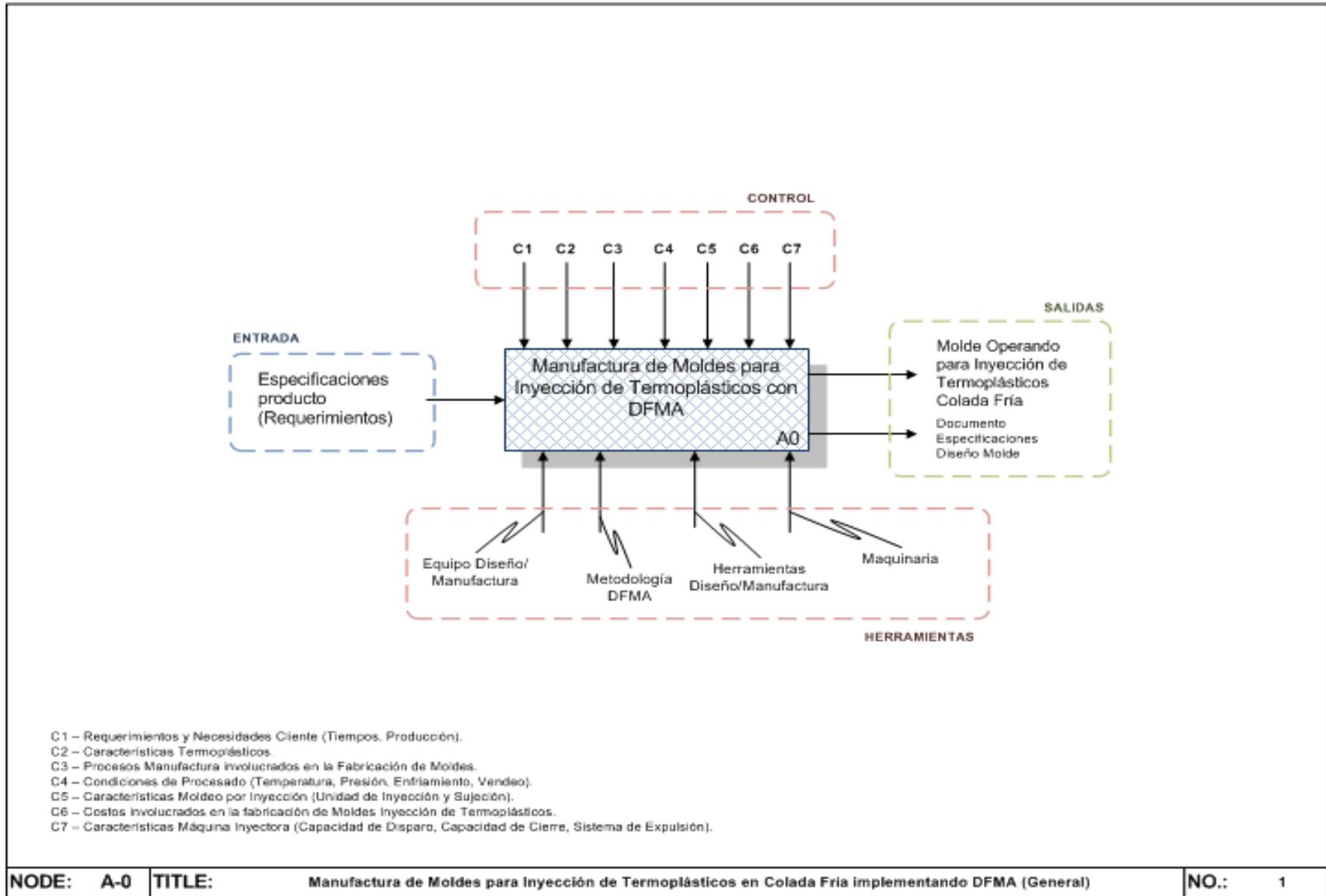


Figura 151. Modelo General IDEF-0 para la manufactura de moldes de inyección de termoplásticos. (Flores, 2009, p.16).

3.4.4 Guía de actividades del modelo.

- **A0 MANUFACTURA DE MOLDES PARA INYECCIÓN DE TERMOPLÁSTICOS COLADA FRÍA IMPLEMENTANDO METODOLOGÍA DFMA.**
- **A1 REQUERIMIENTOS DE MANUFACTURA Y MOLDEO DEL PRODUCTO TERMOPLÁSTICO.**
- A11 Análisis de los requerimientos del producto.
- A12 Selección material termoplástico para el producto.
- A13 Determinar los requerimientos de diseño del producto termoplástico.
- **A2 IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA DFMA EN MOLDE DE INYECCIÓN Y EL PRODUCTO TERMOPLÁSTICO.**
- A21 DFMA del producto termoplástico.
 - A211 Diseño técnico del producto termoplástico.
 - A2111 Diseño de las características físicas del producto termoplástico.
 - A2112 Diseño de ingeniería de polímeros del producto termoplástico.
 - A2113 Diseño de ingeniería mecánica del producto termoplástico.
 - A2114 Diseño de las condiciones de procesado del producto.
 - A2115 Diseño para moldeo por inyección.
 - A2116 Definición y desarrollo del diseño preliminar del producto termoplástico.
 - A212 Diseño para el ensamble del producto termoplástico.
 - A2121 Modificaciones del diseño para el ensamble.
 - A2122 Reducción componentes termoplásticos para moldeo.
 - A2123 Diseño para el manejo del producto.
 - A2124 Diseño para la sujeción e inserción del producto.
 - A2125 Análisis de tiempos y costos de ensamble.
 - A213 Selección diseño DFA del producto termoplástico.
 - A214 Diseño para la manufactura del producto termoplástico.
 - A2141 Condiciones de manufactura por inyección.
 - A2142 Diseño en base las tolerancias del producto.
 - A2143 Diseño en base la manufacturabilidad.
 - A2144 Análisis tiempo y costo de manufactura del producto.
 - A215 Selección diseño DFM del producto termoplástico.
- A22 Validación producto termoplástico diseñado.
 - A221 Validación de las propiedades geométricas del producto termoplástico.
 - A222 Validación condiciones de procesado del producto termoplástico.
 - A223 Validación de ensambles y tolerancias del producto termoplástico.

- A224 Validación de operación y funcionamiento del producto termoplástico.
- A23 Desarrollo del diseño del producto termoplástico.
- A24 DFMA molde para inyección de termoplásticos.
- A241 Diseño de las líneas y planos de partición del molde.
- A2411 Selección del tipo de molde para colada fría.
- A2412 Determinar la dirección de apertura del molde.
- A2413 Determinar la línea de partición del molde.
- A2414 Determinar los planos de partición del molde.
- A2415 Ajustes necesarios para la apertura del molde.
- A242 Diseño DFMA de las cavidades y corazones del molde.
- A2421 Determinar la cantidad de cavidades y corazones.
- A2422 Diseño técnico de las cavidades y corazones.
- A24221 Determinar la forma y dimensiones de las cavidades y corazones.
- A24222 Ensamblados necesarios para formar las cavidades y corazones.
- A24223 Tolerancias entre las cavidades y corazones.
- A24224 Ajustes necesarios en las cavidades y corazones.
- A2423 Diseño para el ensamble DFA de las cavidades y corazones.
- A24231 Modificación para el ensamble de las cavidades y corazones.
- A24232 Diseño para el manejo de las cavidades y corazones.
- A24233 Diseño para la sujeción e inserción de las cavidades y corazones.
- A24234 Análisis de costos de ensamble y tiempos de inserción.
- A2424 Selección de los materiales para la manufactura de las cavidades y corazones.
- A2425 Diseño para la manufactura DFM de las cavidades y corazones.
- A24251 Diseño para la maquinabilidad de las cavidades y corazones.
- A24252 Diseño en base tolerancias de las cavidades y corazones.
- A24253 Diseño de acabados y texturas de las cavidades y corazones.
- A24254 Selección de procesos de manufactura y herramientas.
- A24255 Análisis de tiempos y costos de manufactura.
- A243 Diseño DFMA de las placas y los porta-cavidades.
- A2431 Distribución de cavidades y corazones en el molde.
- A2432 Diseño técnico de las placas del molde.
- A24321 Determinar las dimensiones del sistema de guías.
- A24322 Diseño de las placas para las cavidades y corazones del molde.
- A24323 Diseño de las placas del mecanismo de expulsión del producto.
- A24324 Diseño de las placas para el sistema de enfriamiento.

- A24325 Diseño de las placas para fijación del molde.
- A2433 Diseño para el ensamble DFM de las placas del molde.
- A24331 Modificación para el ensamble de las placas.
- A24332 Tolerancias en el ensamble entre las placas del molde.
- A24333 Diseño para el manejo de las placas del molde.
- A24334 Diseño para la sujeción entre las placas y las guías.
- A24335 Análisis de costos y tiempos de ensamble.
- A2434 Selección de materiales para la manufactura de las placas.
- A2435 Diseño para la manufactura de las placas del molde.
- A24351 Diseño para la maquinabilidad de las placas.
- A24352 Diseño en base a las tolerancias de manufactura.
- A24353 Diseño de los acabados de las placas y las guías.
- A24354 Selección de los procesos y herramientas para la manufactura de las placas.
- A24355 Análisis de tiempos y costos de manufactura de las placas del molde.
- A244 Diseño de los sistemas involucrados en el molde para inyección.
- A2441 Diseño del sistema de colada fría y de las compuertas del molde.
- A24411 Determinar el tipo de colada fría y compuertas.
- A24412 Calcular las variables relacionadas con la colada fría.
- A24413 Calcular del volumen y diámetros de los canales de inyección.
- A24414 Balanceo del caudal del termoplástico en el molde.
- A24415 Ajuste de dimensiones de los canales y compuertas.
- A2442 Diseño del sistema de enfriamiento y sensado de temperatura del molde.
- A24421 Selección del modelo de enfriamiento en las cavidades y corazones.
- A24422 Calcular las variables relacionadas con el sistema de enfriamiento.
- A24423 Seleccionar y definir las líneas de enfriamiento del molde.
- A24424 Evaluar el sistema de enfriamiento.
- A24425 Definir el sistema de enfriamiento del molde para inyección de termoplásticos.
- A2443 Diseño del sistema de expulsión de aire del molde.
- A24431 Seleccionar el sistema de expulsión de aire para el molde.
- A24432 Calcular las variables relacionadas con el sistema de expulsión de aire.
- A24433 Determinar las dimensiones del sistema de expulsión de aire.
- A24434 Definir el sistema de expulsión de aire del molde para inyección.
- A2444 Diseño del sistema de expulsión del producto termoplástico del molde.
- A24441 Determinar el sistema de expulsión del producto del molde.
- A24442 Estimar las fuerzas de expulsión del producto.

- A24443 Determinar el perímetro y área de contacto para la expulsión del producto.
- A24444 Evaluación del sistema de expulsión.
- A24445 Especificación de las características de los expulsores y los componentes.
- A2445 Desarrollo del diseño de sistemas del molde.
- A245 Desarrollo del diseño del molde para inyección.
- **A3 SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO DFMA DEL MOLDE INYECCIÓN DE TERMOPLÁSTICOS EN COLADA FRÍA.**
- A31 Validación de la operación de moldeo del molde para inyección.
- A32 Validación termo-mecánica del molde para inyección.
- A33 Validación del ensamble y operación dinámica del molde para inyección.
- A34 Validación manufactura del molde para inyección.
- A35 Validación del desgaste y fatiga del molde para inyección.
- A36 Desarrollo de la validación del molde para inyección.
- **A4 MANUFACTURA Y ENSAMBLE DEL MOLDE PARA INYECCIÓN DE TERMOPLÁSTICOS EN COLADA FRÍA.**
- A41 Manufactura del molde para inyección.
- A411 Selección de los procesos y maquinaria para la manufactura del molde.
- A412 Selección de la herramienta para la manufactura del molde.
- A413 Desarrollo de la secuencia para la manufactura del molde.
- A414 Ajustes de la secuencia para la manufactura del molde.
- A415 Desarrollo de la planeación de manufactura del molde.
- A416 Manufactura del molde.
- A42 Ensamble del molde para inyección.
- A43 Desarrollo del programa de mantenimiento del molde.
- A44 Desarrollo del plan de manufactura, ensamble, mantenimiento y Refacciones del molde para inyección.
- **A5 VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MOLDE PARA INYECCIÓN DE TERMOPLÁSTICOS.**
- A51 Ensamble del molde.
- A52 Montaje del molde en la máquina inyectora.
- A53 Conexiones del sistema de enfriamiento y expulsión.
- A54 Configuración de la máquina inyectora con las condiciones de procesado.
- A55 Operación y validación del molde.
- A56 Producto termoplástico moldeado.
- **A6 DOCUMENTACIÓN DEL PROYECTO DE MANUFACTURA MOLDES INYECCIÓN DE TERMOPLÁSTICOS COLADA FRÍA.**

- A61 Documentación requerimientos del producto termoplástico (PDS).
- A62 Documentación del diseño DFMA del molde y producto.
- A63 Plan detallado de manufactura y ensamble del molde.
- A64 Plan detallado de mantenimiento del molde.
- A65 Documentación del análisis de costos y del plan de producción.
- A66 Desarrollo de la documentación del proyecto (Flores, 2009, pp.17-19).

3.4.5 Conclusiones del modelo DFMA.

El modelado del proceso de manufactura de moldes tiene como función principal generar una secuencia de pasos a seguir para estandarizar el proceso de diseño y manufactura, siendo necesarios algunos conocimientos específicos y experiencia en el ramo de termoplásticos e inyección, permitiendo reducir y delimitar los conocimientos funcionales para la manufactura. De tal forma, que con el tiempo el equipo de ingeniería puede especializarse y adaptarse a las funciones del modelo DFMA en el proceso manufactura de moldes para inyección de termoplásticos por colada fría, reduciendo aún más los tiempos de desarrollo debido a la experiencia adquirida en el modelo.

Según Flores (2009) en su análisis de resultados de la implementación del DFMA en el proceso de transformación de plásticos, determina que se experimentan mejoras considerables y marcadas en la manufactura y ensamble del molde, además de una reducción de tiempos, costos y un incremento de la producción.

Flores (2009), determina también, que el tiempo total de desarrollo del proyecto, considerando los tiempos involucrados desde la documentación de las necesidades y restricciones del cliente, los tiempos de entrega de las refacciones y materia prima, la manufactura de los componentes del molde, los tratamientos superficiales, la puesta en marcha y el molde terminado y produciendo, es considerablemente menor. Realizando una comparación con los tiempos promedio de desarrollo de otras empresas mexicanas y extranjeras para la manufactura del molde (p.98) (Tabla 17).

Tabla 17.

Comparación tiempos totales de desarrollo de proyecto, modelo actual y modelo DFMA.

	MODELO TRADICIONAL (HRS)	MODELO DFMA (HRS)
ETAPA DE PLANEACIÓN		
Identificación de necesidades y requerimientos	10	15
Identificación de restricciones	5	10
TOTAL	15	25
ETAPA DISEÑO DEL MOLDE		
Selección del termoplástico	22	18
Diseño conceptual del molde	15	10
Diseño Técnico del Producto	78	36
Diseño para el Ensamble del Producto	-	12
Selección del Producto	12	6
Diseño para la Manufactura del Producto	-	8
Costos del Producto	-	3
Selección del Producto	-	6
Validación del Producto	36	-
Validación DFMA del Producto	-	24
Diseño cavidades y corazones del molde	24	24
Diseño DFMA cavidades y corazones	-	24
Costos cavidades y corazones	-	3
Diseño Sistema de Colada	12	12
Diseño Sistema de Enfriamiento	12	12
Diseño Sistema de Expulsión	12	12
Diseño Sistema de Expulsión de aire	10	10
Diseño DFMA de los Sistemas del Molde	-	48
Costos DFMA sistemas del Molde	-	3
Validación del Molde	36	36
Selección diseño del Molde	12	12
Costos del Molde	5	-
TOTAL	286	319
ETAPA DE MANUFACTURA DEL MOLDE		
Programa de Manufactura del Molde	48	-
Adquisición de Partes	-	240
Adquisición de Materia Prima	48	48
Adquisición de Herramientas	12	12
Manufactura del Molde	1,728	286
Ajustes Manufactura del Molde	72	-
Ensamble del Molde	3	1.35
Ajustes Ensamble del Molde	24	-
TOTAL	1,935	587.35
VALIDACIÓN FUNCIONAMIENTO DEL MOLDE		
Puesta en Marcha del Molde	24	6
Ajustes del Molde	24	-
Determinación de Variables de Inyección	6	-
Operación e Inyección de Producto	3	3
Ajustes de Manufactura Molde	36	5
TOTAL	93	14
TIEMPO TOTAL DE DESARROLLO DEL PROYECTO		
TOTAL	2,329 HRS	945.35 HRS

Flores (2009), concluye:

De lo anterior, se aprecia que en la etapa de planeación y diseño se incrementa el tiempo en el modelo DFMA aproximadamente un 15% debido a que deben considerarse las características del equipo de inyección donde se montará el molde y las instalaciones de la empresa (procesos y maquinaria), además del tiempo necesario para aplicar las directrices del modelo DFMA en el diseño de cada uno de los componentes del molde. Mientras que en la etapa de manufactura y validación del funcionamiento se presenta una reducción de los tiempos aproximadamente un 70% debido a la planeación anticipada en la etapa de diseño para la manufactura y ensamble, así como la estandarización de los componentes y la adecuada planeación para los tiempos de entrega, de tal forma que el tiempo total de desarrollo del proyecto para la manufactura del molde para inyección de bobinas termoplásticas fue aproximadamente 945.35 Hrs hombre – máquina (Flores, 2009, p.99).

En la Tabla 18 se muestran los tiempos de manufactura estimados por Flores, en la etapa de diseño DFMA del molde comparado con los tiempos reales obtenidos en la fabricación del molde, considerando desde los tiempos de montaje de la materia prima en las máquinas herramienta hasta el acabado final (tratamientos superficiales y acabados) de cada uno de los componentes manufacturados; así como los tiempos estimados de ensamble comparados con los tiempos reales del ensamble para el montaje del molde en la máquina inyectora. Concluye flores, que se reduce un 21% los tiempos de manufactura de cada componente del molde y un 25% el tiempo de ensamble del molde.

Boothroyd, Dewhurst & Knight (2010), respaldan los resultados que se obtienen implementando el método DFMA, mostrando que los estudios de casos anteriores describen algunos de los éxitos resultantes de la aplicación de software DFMA.

Un resumen de los resultados de los estudios de casos publicados de diversas empresas se presenta en la Tabla 19, la cual muestra que la reducción promedio de partes es de alrededor del 53%; también muestra otras mejoras debidas a las aplicaciones DFMA mencionados en los casos estudiados. Por ejemplo, 32 estudios informaron una reducción media del 50% en el costo del producto (Boothroyd et al., 2010).

Tabla 18.

Comparación tiempos de manufactura y ensamble estimados con tiempos reales.

	TIEMPO ESTIMADO (HRS)	TIEMPO REAL (HRS)
MANUFACTURA DEL MOLDE		
Cavidades	38	39.5
Insertos Cavidades	3	2.75
Corazones	26	24.5
Insertos Corazones	9	8
Insertos Expulsión	7	6.75
Placa Sujeción Corazones	2	2.5
Placa Sistema Enfriamiento	9	8.5
Placa Porta Corazones	8	7.25
Placa Expulsora	4	4.5
Placa Porta Cavidades	10	12.75
Placa Sujeción Cavidades	2	1.5
Centrador Molde	4	3.25
Soportes Cadena Expulsión	12	8.25
Nitrurado	76	48
Rectificado	76	48
TOTAL	286 HRS	226 HRS
ENSAMBLE DEL MOLDE		
Ensamble Molde Cavidades	0.7672	0.5125
Ensamble Molde Corazones	0.5841	0.4508
Ensamble Final Molde	0.088	0.120
TOTAL	1.44 HRS	1.08 HRS

Flores, 2009, p.99.

Tabla 19.

Resultados de Caso 123 casos de estudio Publicados que muestran mejoras por la aplicación de Software DFMA.

	Average Reduction (%)	Number of Cases
Labor costs	42	8
Part count	53	103
Separate fasteners	57	21
Weight	22	21
Assembly time	59	68
Assembly cost	45	20
Assembly operations	54	25
Product development cycle	45	2
Total cost	50	32

Software DFMA. (Boothroyd, et al., 2010, p.23).

El desarrollo de técnicas para la implementación de proyecto en cualquier tipo de industria es fundamental para lograr una buena productividad y las ganancias económicas y de eficiencia que buscan los inversores de estas.

La implementación de las técnicas genera costos e inversiones iniciales, pero si el modelo implementado es bueno, los frutos recuperaran estos con creces. Lo importante es hacer los modelos respectivos acorde al alcance requerido para cada tipo de empresa, es decir a la medida de esta. Empresas pequeñas, metodologías o modelos pequeños, pero como la dinámica de crecimiento de la empresa ira aumentando conforme se aplique la metodología, dicha metodología, deberá ir creciendo a la par con la empresa o industria, o correrá el riesgo de quedarse corta y provocar estancamiento o involución del objetivo inicial.

4 Características Básicas para el Diseño Técnico de los Productos Plásticos

En la ingeniería del diseño de productos plásticos, el éxito dependerá de un factor primordial: hacer un buen uso de la variedad de propiedades y los métodos de procesamiento del plástico, para la obtención de resultados óptimos.

El diseñador debe seleccionar la mejor resina, darse cuenta de que esto es esencial para explotar el potencial completo de esta y para asegurar que la pieza moldeada satisfará tanto los requisitos funcionales y como los de costo.

Los plásticos se rigen por las mismas leyes físicas y las mismas reglas para el buen diseño, como otros materiales. Estos principios se pueden aplicar si las propiedades del polímero son adecuadas para el entorno de funcionamiento del producto en consideración.

Es necesario conocer y entender lo que el producto final tiene que hacer y bajo qué circunstancias se va a operar, antes de que se pueda hacer un análisis de diseño (Campo, 2006, p.115).

4.1 Recordando las Propiedades de los Materiales

Hay una gran diferencia entre las propiedades, los métodos de procesamiento y las aplicaciones de los materiales fabricados por diversas industrias. No hay un único material que se pueda utilizar para todas las aplicaciones. Cada nueva propiedad excepcional desarrollada en un material abre la puerta a nuevas aplicaciones, tecnologías e innovaciones que mejoran la eficiencia y la calidad de vida de los usuarios finales.

Los diseñadores de productos deben comparar las propiedades de los diferentes grupos de materiales (aceros, termoplásticos, aleaciones de aluminio, caucho, etc.), ya que cada material tiene diferentes propiedades desarrolladas para aplicaciones y mercados específicos y utiliza diferentes procesos de fabricación. Todos los materiales tienen ventajas y deficiencias (propiedades, procesos y calidad), por lo que es difícil comparar el costo de los productos terminados hechos de diferentes materiales y procesos.

Las propiedades de los materiales están directamente relacionadas con las aplicaciones de uso final, si es o no un material mejor que otro. Para ilustrar este punto, una resina termoplástica no puede sustituir a una viga de acero estructural usado en la construcción de edificios; las resinas termoplásticas no tienen la fuerza, la resistencia a la fluencia, la resistencia a la fusión o no puede ser extruida en formas con paredes gruesas, además las

vigas termoplásticas pueden presentar deformación en todas las direcciones. Sin embargo, las vigas estructurales pueden estar hechas de materiales termoestables compuestos, aunque esto es bastante costoso. En aplicaciones de menor importancia, tales como las vigas de acero en la industria de la vivienda, que están siendo reemplazadas por vigas estructurales de madera compuesta, debido a su rendimiento y peso ligero; que son fáciles de trabajar y ofrecen un precio competitivo.

Una resina termoplástica no puede sustituir el acero en carcasas de freno de disco y/o tambor de automóviles, debido a que el producto requiere la estabilidad dimensional, baja expansión térmica y alta resistencia y rigidez a temperaturas elevadas. Las resinas termoplásticas no cumplen con estos requisitos. Sin embargo, las pastillas de freno hechas de poliimida termoendurecible se han utilizado con éxito en los aviones. Los metales no pueden reemplazar a los neumáticos de goma para automóviles, fuelles, diafragmas o juntas de compresión, porque los metales no tienen la elasticidad, resistencia a la fatiga, resistencia al desgaste, y la dureza de la goma. Generalmente los metales no se utilizan para las ligeras y compactas carcasas de teléfonos celulares, porque los metales son conductores eléctricos, pesados, corrosivos, y caros. Aunque cuando el bajo costo no es el objetivo, se pueden aplicar aleaciones de materiales metálicos altamente costosos (Campo, 2006, p.115).

En la sección 1.2 se expusieron las propiedades y el comportamiento de los polímeros, en la

Tabla 3 se mostró una comparación de las propiedades genéricas de los materiales. Esto nos da una idea de cómo se puede realizar la aproximación a las propiedades que el artículo en análisis necesita. Ver ANEXO B: Comparación de propiedades para algunos plásticos de uso común.

Campo (2006) presenta los métodos recomendados para el uso de las propiedades mecánicas y los conceptos para el diseño de artículos con materiales plásticos. Incluye ejemplos para mostrar cómo las ecuaciones, desarrolladas originalmente para diseños de metal, pueden ser modificadas. El diseño dentro del módulo viscoelástico utiliza ecuaciones de diseño elástico para metales modificadas. Este método se utiliza normalmente cuando la principal preocupación es la deformación de la parte plástica. El Rendimiento del diseño utiliza los principios de diseño que se originan a partir de los principios de la elasticidad. En este análisis, el límite elástico del material es la variable de control. Se enfatiza que la principal diferencia entre los diseños de metal y plástico es la necesidad de permitir la dependencia en el tiempo de las propiedades mecánicas de los materiales poliméricos en todo el rango de temperaturas y condiciones ambientales que la parte puede encontrar durante su uso. Para

profundizar en este tema y ver el desarrollo de las ecuaciones y los ejemplos ver: [Campos \(2006\), pp. 121 a 210.](#)

4.2 Selección del Plástico Adecuado para el Proyecto

Ya se han expuesto las bases para determinar el comportamiento de los plásticos y como se pueden procesar. Ahora se expondrán los conceptos para obtener diseños funcionales de piezas plásticas y su correcto desarrollo en función del molde. Es claro que deben tenerse en cuenta los requerimientos del cliente, el cual ha realizado un proceso de mercado y de las necesidades del usuario final.

En muchas ocasiones se parte de un diseño de producto suministrado por el cliente, donde nos presenta las especificaciones funcionales (tracciones de ensamble, resistencia, permeabilidad, durabilidad, flexibilidad, etc.) y las características que este debe tener, desde el punto del usuario o consumidor final (apariencia, comodidad, medio ambiente, etc.). En otras ocasiones el cliente solo presenta una necesidad y se debe presentar una solución teniendo en cuenta todo lo antes mencionado. En cualquier caso, la mejor forma de hacerlo es contando con un grupo interdisciplinario en donde los actores sean conscientes de la importancia de lograr un producto pensado desde dos puntos de vista; *necesidades del cliente* Vs necesidades del molde de inyección.

Si la información del producto y la calidad de los datos disponibles acerca de un material no ha sido suministrada por el cliente o desarrollada por el proveedor de la resina, el diseñador debe desarrollar una lista de control para la completa recopilación de todos los hechos relacionados con la aplicación y requerimientos. Una lista de verificación típica de diseño se ha incluido aquí (Tabla 20). Se puede utilizar como una guía para desarrollar una lista de comprobación específica para cualquier aplicación. Todos los aspectos de la parte están cubiertos, incluyendo los requisitos de uso final del producto, las consideraciones estructurales, el entorno operativo, la economía, y los factores de apariencia. Esta proporciona información para hacer un rápido análisis de los requisitos de la parte, como la temperatura, el medio ambiente, la esperanza de vida del producto, y el ciclo y la velocidad de la carga.

Diseñar con plásticos requiere la maximización del rendimiento y de eficiencia del producto y del proceso de moldeo por inyección. Los siguientes principios básicos deben adoptarse en el diseño de productos plásticos.

- Libertad de diseño. Que se consigue utilizando conceptos de diseño multifuncionales.
- Al comparar los materiales que satisfacen los requisitos, recuerde que la mayoría de los metales tienen una mayor resistencia que los plásticos, y que las propiedades de todo material plástico dependen del tiempo, la temperatura, y del entorno.
- Que los principios de diseño de piezas metálicas son muy diferentes de los conceptos utilizados en el diseño de piezas de plástico.
- Los polímeros no son sustitutos de los metales; en la mayoría de los diseños la geometría del producto metálico debe ser rediseñada utilizando los principios para diseño de piezas plásticas para tener éxito.

Hay que recordar que no hay materiales termoplásticos malos, sólo aplicaciones malas para ese plástico (Campo, 2006, p.120).

4.3 Diseño Estructural de Artículos Termoplásticos

Es importante tener algunas consideraciones geométricas en el diseño de artículos plásticos, para lograr buenos resultados de llenado, desmoldeo, calidad y apariencia del producto. Algunas de estas características geométricas son:

- Espesores de pared constantes.
- Diseño de perforaciones.
- Diseño de refuerzos.

4.3.1 Espesores de pared constante.

Una regla de diseño para el moldeo por inyección de productos termoplásticos es asegurar que el espesor de pared es uniforme y simétrica, aunque esto no siempre es posible debe tenerse como prioridad el momento de diseñar cualquier pieza plástica.

La cuestión fundamental es que las secciones de pared gruesa y delgada se enfrían a diferentes velocidades: las secciones más gruesas tardarán más tiempo en enfriarse que las más delgadas. Partes con espesor de pared variable exhibirán temperaturas más altas cerca de las secciones gruesas y temperaturas más bajas cerca de las secciones delgadas.

Tabla 20.

Lista de chequeo para el diseño de artículos.

Consideraciones generales.	Pruebas requeridas para control de calidad.
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Requerimientos de desempeño (estructurales, ciclo de carga, estéticos, etc.).</i> • <i>Diseño multifuncional.</i> • <i>Diseño de producto para ensamble.</i> • <i>Carga estructural (estática, dinámica, cíclica, impacto, etc.).</i> • <i>Especificaciones de tolerancia del producto.</i> • <i>Vida del producto.</i> • <i>Selección de la resina basada en el rendimiento y uso final de aplicaciones similares.</i> • <i>Diseño del producto para el proceso de ensamble.</i> • <i>Calidad del producto Vs proceso.</i> • <i>Operaciones secundarias.</i> • <i>Ensamble y envió.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Tensión.</i> • <i>Compresión.</i> • <i>Flexión.</i> • <i>Impacto.</i> • <i>Torsión y fatiga.</i> • <i>Fluencia (tensión, flexión, temperatura).</i> • <i>Resistencia química.</i> • <i>Medio ambientales (al aire libre o acelerada).</i> • <i>Clasificación eléctrica.</i> • <i>Temperatura de servicio continuo.</i> • <i>Índice de temperatura.</i> • <i>Homologaciones de producto final.</i>
<p>Requisitos medioambientales.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Temperatura de uso final.</i> • <i>El tiempo, el clima, la tensión y grietas por estrés.</i> • <i>Otros (químicos, lubricantes, agua, humedad, contaminación, gasolina, etc.).</i> 	<p>Características de procesado para la resina.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Viscosidad y cristalización.</i> • <i>Dificultades en el moldeo de la resina.</i> • <i>Temperaturas del fundido y del molde.</i> • <i>Sensibilidad a la degradación térmica.</i> • <i>Diseño direccional de refuerzos.</i> • <i>Tensiones congeladas.</i> • <i>Control de la contracción en el molde.</i> • <i>Problemas de moldeo (flujos, rechupes, alabeo, líneas de soldadura, acabado superficial, etc.).</i> • <i>Manejo de materiales.</i> • <i>Porcentaje de remolido permitido para la mezcla con material virgen (canales de llenado y piezas rechazadas).</i> • <i>El secado de la resina virgen y remolidas de material.</i> • <i>Moldeado de producto prototipo (para resinas de comportamiento desconocido).</i>
<p>Factores de diseño.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>El Tipo, la frecuencia y la dirección de las cargas.</i> • <i>El estrés de trabajo seleccionado (tracción, compresión, flexión, combinación).</i> • <i>porcentaje de tensión seleccionado</i> • <i>Carga de deformación (tracción, azalladura, compresión, flexión, etc.)</i> • <i>Módulo de elasticidad utilizado, Tracción, flexión y cortante inicial (temperatura, fluencia)</i> • <i>La correlación de los resultados de las pruebas para condiciones de uso final y disposición ambiental.</i> • <i>Factor de seguridad</i> • <i>Diseño de productos para el moldeo eficiente</i> 	<p>Apariencia del producto.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aplicación estética del producto.</i> • <i>Control dimensional, alabeos, etc.</i> • <i>Coincidencia del color, decoloración.</i> • <i>Acabados superficiales.</i> • <i>Líneas de soldadura, rechupes, líneas de flujo, Jetting.</i> • <i>Rebabas en la línea de partición.</i> • <i>Tipo de gate (punto de inyección), tamaño, número, posición.</i> • <i>Decoración.</i>
<p>Factores económicos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Costo estimado del nuevo producto.</i> 	

Estas diferencias de temperatura y la contracción diferencial asociado, puede resultar en distorsión geométrica significativa de la parte dado el alto coeficiente de expansión térmica de los plásticos.

Espesores de pared muy gruesos y/o no uniformes pueden causar graves problemas de alabeo y de control dimensional en los productos moldeados por inyección. Secciones de pared gruesa causan no sólo contracción interna, huecos y marcas de hundimiento de la superficie (rechupes), sino también la contracción no uniforme que resulta en problemas de alabeo y de poco control dimensional.

La Figura 152 muestra un diseño de poca sección transversal con las paredes de las esquinas perpendiculares que causa problemas de moldeo, como la contracción diferencial, alabeo (cóncava) de ambas paredes y huecos internos en la esquina de la pared más gruesa. Se recomiendan los dos últimos diseños para evitar estos problemas de moldeo.

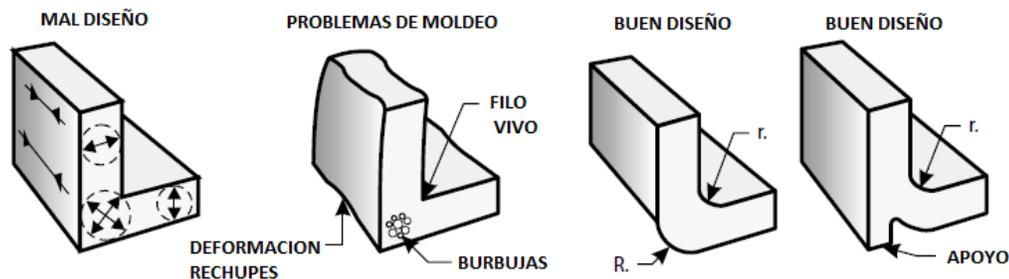


Figura 152. Diseño de esquina en paredes perpendiculares. (Campo, 2006, p.211).

La Figura 153 muestra un diseño de sección transversal de pared gruesa que podría causar problemas de moldeo y el diseño recomendado haciendo uso de una pared delgada uniforme con costillas o refuerzos proporcionales.

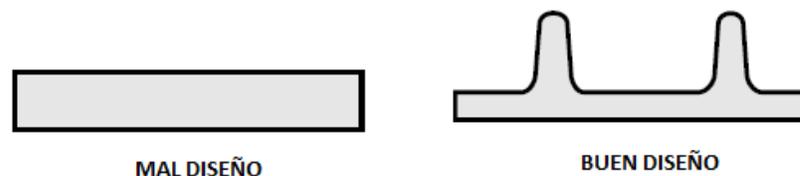


Figura 153. Diseño de pared gruesa vs diseño de pared delgada uniforme con refuerzos proporcionales. (Campo, 2006, p.211).

La Figura 154 muestra una sección de pared no uniforme que se debe sustituir con una pared delgada y uniforme que tiene la misma fuerza de la sección de pared pesada inicial.

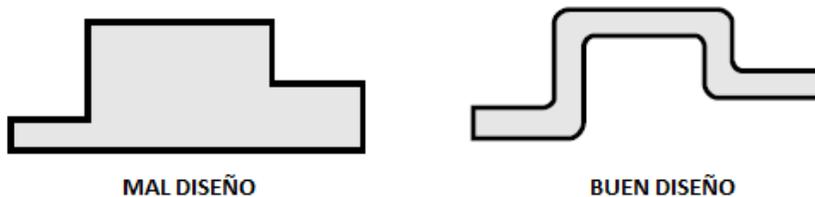


Figura 154. Diseño de paredes no uniformes vs diseño de paredes uniformes. (Campo, 2006, p.211).

La Figura 155 muestra otro mal diseño y el diseño de pared delgada uniforme recomendado.



Figura 155. Diseño de paredes no uniformes vs diseño de paredes uniformes. (Campo, 2006, p.211).

La Figura 156 muestra secciones transversales de dos diseños de pared no uniformes y los diseños recomendados con un espesor de pared uniforme para evitar el alabeo, huecos internos o burbujas, ciclos de moldeo largos, y rechupes superficiales (Campo, 2006, p.211).

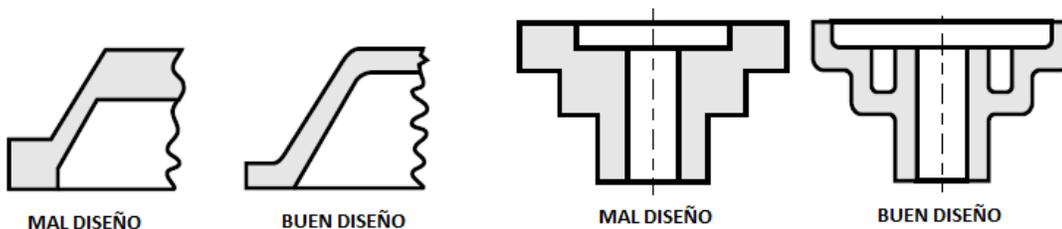


Figura 156. Diseño de paredes no uniformes vs diseño de paredes uniformes. (Campo, 2006, p.211).

La Figura 157 proporciona una progresión de diseños de moldes con diferentes espesores a través de la pieza. El diseño de la parte “lo peor” de los casos, se muestra a la izquierda, tiene la masa fundida que fluye de una sección delgada a una sección de espesor mayor con una transición brusca. Este diseño puede conducir a cuerpos moldeados con mal acabado superficial debido al chorro libre (jetting) de la masa fundida de la sección delgada a la sección de mayor espesor, así como la mala copia de la superficie del molde por la pieza y un pobre control dimensional en la sección de mayor espesor, en relación con la solidificación prematura del plástico moldeado en la sección delgada. El diseño puede ser mejorado mediante la inversión de la dirección del flujo de masa fundida, ya que la sección más gruesa

es poco probable que se solidifique antes de empaquetar la sección más delgada. El diseño se puede mejorar aún más por la transición gradual de la sección gruesa a la sección delgada. Aun así, cualquier diseño de moldes con variaciones significativas en el grosor de la pared exhibirá tiempos de enfriamiento prolongados y diferentes niveles de pérdida desconocida en secciones gruesas y delgadas (Kazmer, 2007, p.28).



Figura 157. Diseño de espesor de pared para el flujo de material. (Kazmer, 2007, p.28).

Un enfoque estándar es aumentar el espesor nominal de la pieza moldeada a fin de eliminar la necesidad de secciones gruesas en las áreas locales. La decisión de aumentar el espesor de la pared eliminará muchas cuestiones relacionadas con la calidad de la pieza, pero puede llevar a un consumo excesivo de material y tiempos de enfriamiento prolongados. Para el diseño mostrado en la Figura 157, el mejor diseño puede ser utilizar un espesor de pared más delgado junto con nervaduras en las zonas que requieren refuerzo. La altura y/o la densidad de las nervaduras pueden alterarse para cambiar la rigidez relativa a lo largo de la parte (Kazmer, 2007, p.28).

Tabla 21.

Espesores nominales recomendados.

Plástico	Espesor	Espesor	Espesor
	Mínimo (mm)	Medio (mm)	Máximo (mm)
Resina Acética	0.38	1.6	3.2
ABS	0.76	2.3	3.2
Acrílicos	0.65	2.4	6.5
Poliamidas	0.4	1.6	9.0
Policarbonatos	1.0	2.5	9.5
Polietileno de baja densidad	0.5	1.5	6.5
Polietileno de alta densidad	0.9	1.5	6.5
Polipropileno	0.6	2.0	8.0
SAN	0.7	1.6	6.5
PV	1.0	2.5	9.5

La selección de un espesor nominal depende también del plástico con el que vamos a realizar la pieza, En el llenado de la pieza van a influir de manera decisiva las propiedades viscosas del material en estado fundido. Unos espesores recomendados los podemos observar para cada tipo de plástico en la Tabla 21.

4.3.1.1 Geometrías de piezas difíciles de moldear.

Los defectos más graves causados por la geometría de la pieza durante el proceso de moldeo por inyección son alabeo, huecos internos, acabado de superficies, control dimensional, y rechupes.

Una geometría común para una pieza problemática se ilustra en la Figura 158, que muestra un diseño pobre de una bandeja rectangular de espesor de pared uniforme. Las esquinas de la superficie superior de la bandeja están combadas hacia arriba, mientras que las paredes laterales verticales están combadas hacia dentro. El diseño recomendado exige una pequeña corona en la superficie superior y las paredes laterales para compensar la deformación, con radios en todos los rincones y una pared uniformemente cónica a partir del centro (pared más gruesa para el gate) hasta los extremos de las paredes laterales.



Figura 158. Diseño problemático de una bandeja rectangular. (Campo, 2006, p.212).

La Figura 159 muestra un diseño deficiente de una caja cuadrada en el que las paredes laterales verticales de la caja moldeada se deforman hacia el interior. El diseño recomendado muestra una pequeña curvatura en contra de la deformación en las paredes laterales para compensar esta y radios en todas las esquinas.

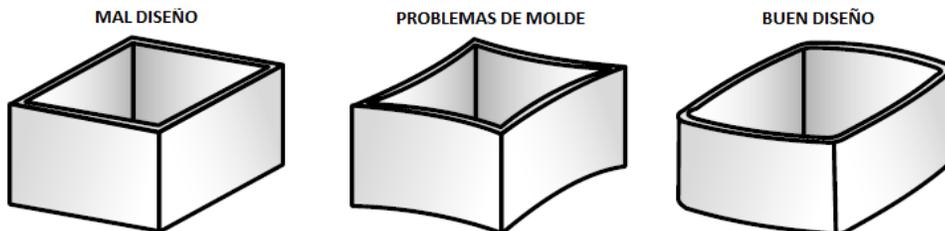


Figura 159. Diseño problemático de una caja cuadrada. (Campo, 2006, p.212).

La Figura 160, Figura 161 y Figura 162, muestran diseños pobres, donde las paredes verticales moldeadas se deforman. Los diseños adecuados han dado conicidad a las paredes y agregado radios en las esquinas (Campo, 2006, p.212).

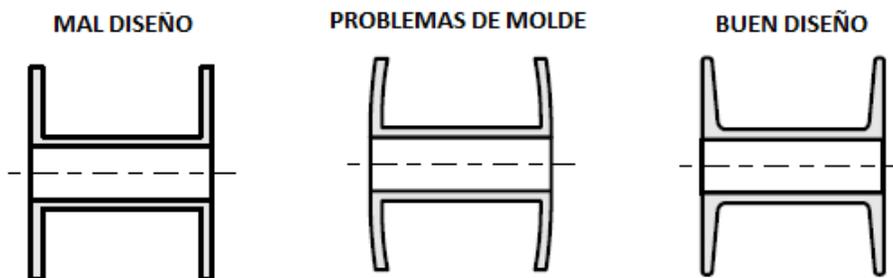


Figura 160. Bobina (carreta) eléctrica de diseño problemático. (Campo, 2006, p.212).

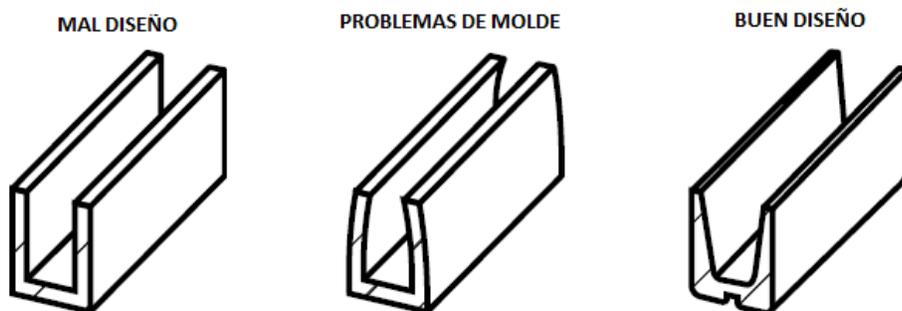


Figura 161. Diseño de una viga en "U" problemática. (Campo, 2006, p.212).

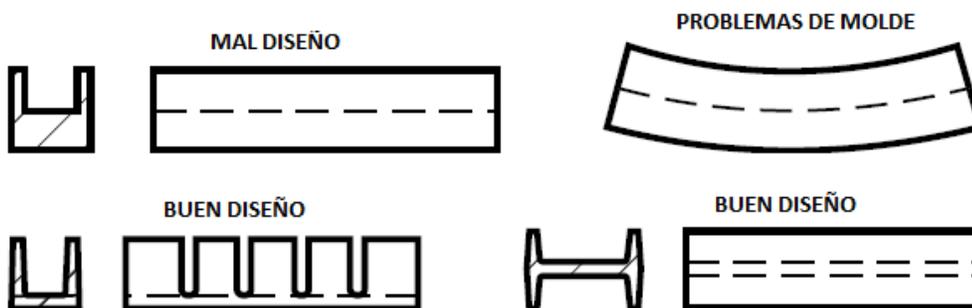


Figura 162. Diseño de la viga una viga estructural problemática. (Campo, 2006, p.212).

4.3.1.2 Ángulos de desmoldeo (Wall Draft Angle).

Los ángulos de desmoldeo para las paredes internas y externas en los modelos de las piezas, son esenciales para la expulsión de estas del molde. Las paredes externas requieren ángulos más pequeños de inclinación que las paredes internas. Recordando el proceso expuesto anteriormente; el material termoplástico se expande en volumen dentro de la unidad de plastificación y el material sólido se transforma en una masa fundida que fluye. A

continuación, la masa fundida caliente se inyecta dentro del molde. La temperatura fría en el interior de las cavidades inicia de contracción o la disminución en volumen de la masa fundida caliente. La cantidad de contracción de una parte moldeada es producto de las características de contracción del polímero, el grosor de pared de la parte, el tiempo de inyección/compactación, la temperatura del molde, y el tiempo de enfriamiento. Durante el proceso de contracción, las paredes exteriores de la pieza moldeada se encogen lejos de las paredes exteriores de la cavidad, mientras que las paredes internas se reducen en torno a la superficie o paredes del núcleo.

Los materiales termoplásticos semicristalinos tienen características de contracción del molde más altas que los materiales amorfos. Las piezas hechas de materiales semicristalinos requieren mayores ángulos de inclinación de sus paredes internas, mientras que los materiales amorfos que tienen características inferiores de contracción del molde requieren mayores ángulos de inclinación de sus paredes externas, las temperaturas más bajas del molde, y tiempos más largos de enfriamiento.

Cuando una pieza moldeada requiere una pared interna con un ángulo de inclinación mínimo, se recomienda tener un control de temperatura de molde eficiente, con las cavidades de los moldes y los núcleos hechos de acero para herramientas endurecido y buscar un bajo coeficiente de fricción en la superficie de los núcleos de la cavidad, mediante pulida en la dirección de la expulsión o con recubrimientos y tratamientos superficiales especiales para estas.

Para las paredes exteriores sin textura hechas de resinas reforzadas o no reforzadas, se recomienda un ángulo de inclinación mínimo de 0.25° a 0.5° . Para las paredes internas, se recomienda un ángulo de inclinación mínima por la pared de 0.5° a 1.0° .

Para las piezas hechas de resinas reforzadas con mineral/fibra de vidrio que tienen paredes internas sin textura de menos de 1,00 pulgada en profundidad, se recomienda un ángulo de inclinación mínima por la pared de $1,0^\circ$ a $1,5^\circ$. Para las paredes internas sin textura con más de 1.00 pulgada de profundidad, se recomienda un ángulo de inclinación mínimo por pared de $1,5^\circ$ a $3,0^\circ$.

La Figura 163 muestra la ecuación para calcular la dimensión por lado (Draft) del ángulo de desmoldeo en la pared externa de la cavidad del molde, con base en el ángulo de desmoldeo y la profundidad de la cavidad (Campo, 2006, p.213).

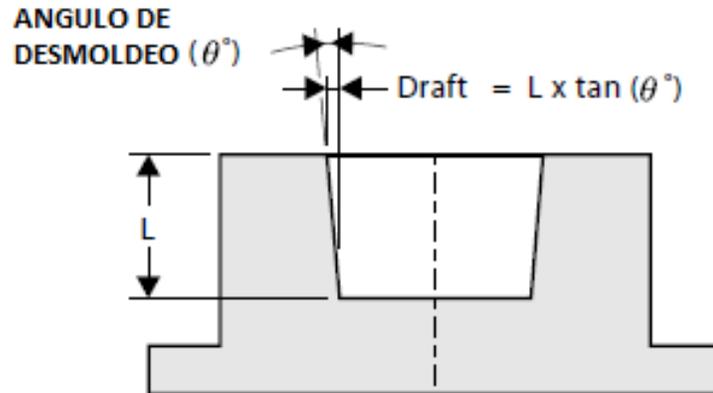


Figura 163. Pared con ángulo de desmoldeo en la cavidad del molde. (Campo, 2006, p.13).

Habrá que poner especial atención en los casos donde la superficie de la pieza vaya texturizada. En estos casos se debería intentar que la dirección del texturizado sea la misma que la dirección de la extracción de la pieza. Además, se añadirá, por la dificultad que opone el texturizado a la extracción, 1º de inclinación por cada 0,025 mm de profundidad que tenga la textura. En la [Tabla 22], se dan una serie de datos para el cálculo de este ángulo. No diseñar la pieza con suficientes ángulos de desmoldeo puede además de no permitir la correcta extracción de la pieza, causar en la superficie, la formación de arrapes o desgarro de material causados por la fricción entre el metal de la cavidad y el plástico durante el proceso de extracción (González, s.f., p.161).

Tabla 22.

Conicidades (draft) para distintos ángulos de inclinación.

Profundidad L (en mm)	Ángulos de inclinación (Draft en mm)				
	0,25°	0,5°	1°	1,5°	2°
10	0,044	0,087	0,175	0,262	0,349
20	0,087	0,175	0,349	0,524	0,698
30	0,131	0,262	0,524	0,786	1,048
40	0,175	0,349	0,698	1,047	1,397
50	0,218	0,436	0,873	1,309	1,746
60	0,262	0,524	1,047	1,571	2,095
70	0,305	0,611	1,222	1,833	2,444
80	0,349	0,698	1,396	2,095	2,794
90	0,393	0,785	1,571	2,357	3,143
100	0,436	0,873	1,746	2,619	3,492

González, s.f., p.162.

4.3.1.3 Redondeos.

El uso adecuado de radios durante el diseño reduce de un modo importante la concentración de tensiones en la pieza. Eliminar las zonas donde se producen un elevado número de concentración de tensiones, permite realizar un modelo de constitución más fuerte y eliminar, sin duda, posibles zonas de inició de una fractura. En definitiva, eliminando ángulos agudos en la geometría, lo que posibilitamos es una más larga vida de la pieza. Por tanto, siempre que lo permita la funcionalidad de la pieza, para realizar la transición de una pared a otra utilizaremos curvas, lo más abiertas posibles. En la [Figura 164], se presenta un esquema que muestran una serie de proporciones aptas para el diseño de curvas con materiales plásticos (González, s.f., p.162).

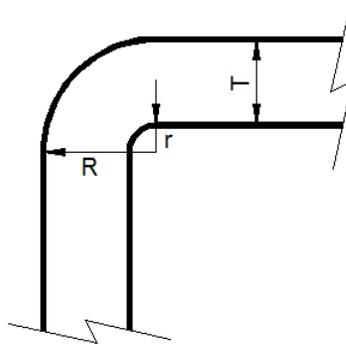


Figura 164. Radios recomendados para el diseño. (González, s.f., p.162).

La relación de radios debe mantenerse según estas recomendaciones.

$$r = \frac{1}{3T} \quad \text{Si } r < 0.38 \text{ mm, Se recomienda } r = \frac{1}{2T} \text{ o mayor.}$$

$$R = \frac{3}{2T} \text{ O mayor.}$$

En todos los casos el espesor ha de mantenerse entre el radio R y el radio r .

4.3.1.4 Diseño de cilindros (Bosses) para ensamble.

En general un cilindro perforado (*boss*) en termoplástico unido a una pared, o a una esquina y en algunos casos en zonas planas aisladas de la pieza, se usan para la unión de la pieza plástica a otra pieza o a los elementos correspondientes de un ensamble en un sistema de piezas. Para dicha unión pueden usarse tornillos autorroscantes o algún tipo de enganche especial a presión. El diseño del cilindro y el diámetro interior del agujero se basan en el

tamaño, la profundidad y el tipo de tornillos, los requisitos de par máximo, el módulo de elasticidad de la resina, la fluencia y resistencia de la línea de soldadura cilindro.

La Figura 165 muestra los problemas operativos cuando la pared del cilindro es demasiado gruesa o fina. El diseño recomendado tiene en cuenta la trayectoria de flujo de masa fundida alrededor de la pared correcta del cilindro y compensa la baja resistencia a la línea de soldadura con una costilla (Campo, 2006, p.222).

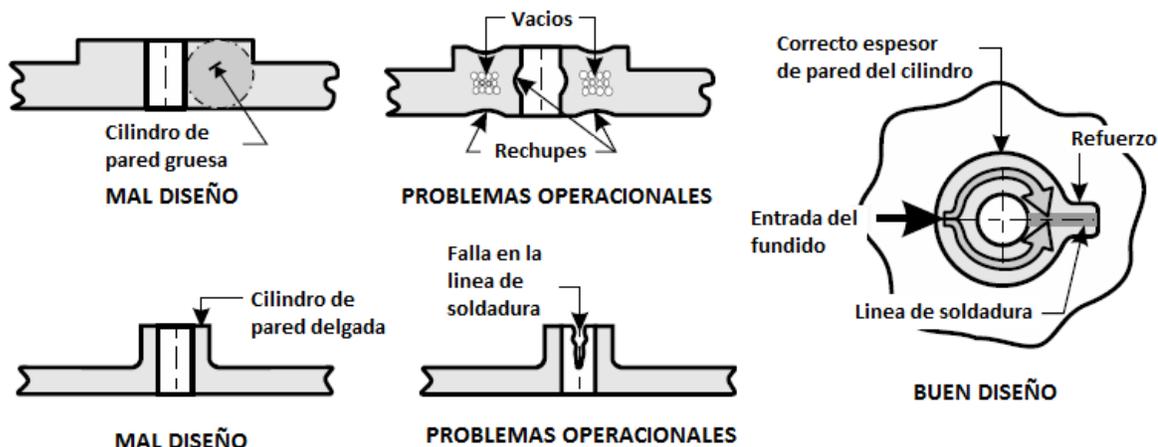


Figura 165. Cilindros con espesor de pared problemáticos y diseño recomendado. (Campo, 2006, p.223).

No se recomienda el uso de tornillos grandes y largos; lo mejor es dividir la carga usando dos o más agujeros más pequeños para eliminar los problemas de paredes gruesas. La Figura 166 muestra las dificultades causadas por tornillos grandes y proporciona recomendaciones de diseño.

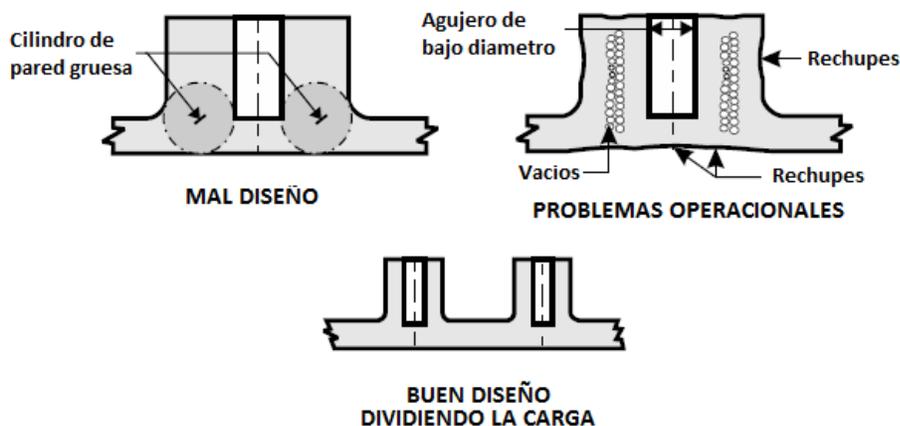


Figura 166. Cilindro de paredes gruesas que causan problemas que se pueden resolver mediante el uso de dos tornillos pequeños. (Campo, 2006, p.223).

Cuando el agujero está unido directamente a una pared del moldeo o en la esquina, se producen problemas dimensionales y de rotura. La Figura 167 y Figura 168 muestran estos problemas de funcionamiento, los diseños recomendados también se muestran eliminar estas dificultades.

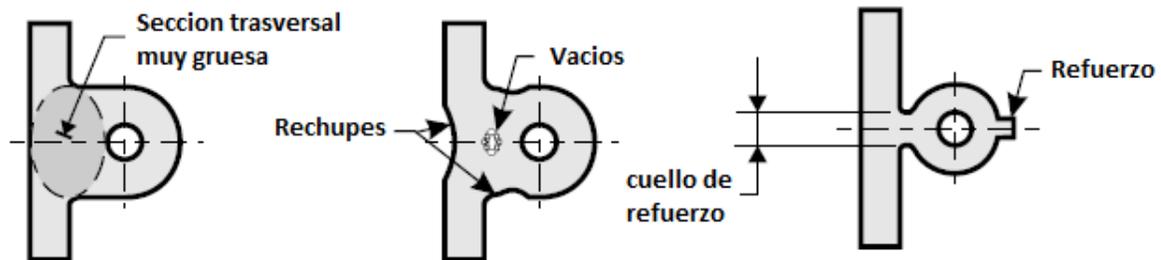


Figura 167. Cilindros moldeados conectados a una pared posterior. (Campo, 2006, p.223).

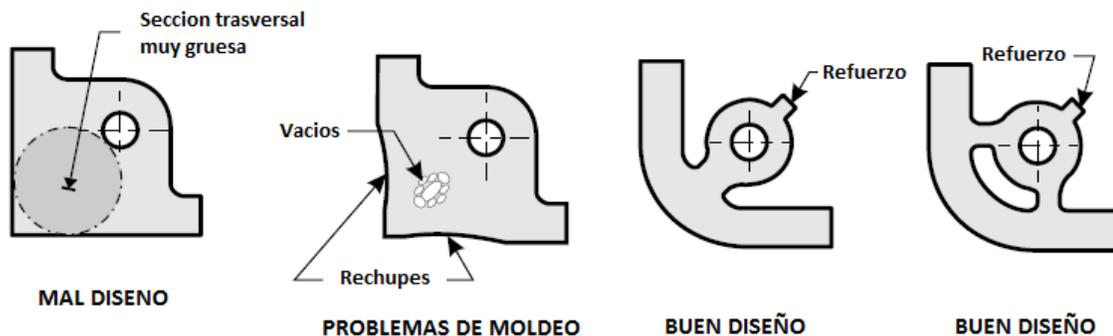


Figura 168. Moldeado de cilindros conectados a una esquina. (Campo, 2006, p.223).

Algunos diseños típicos de diferentes *bosses* se proporcionan en la Figura 169. El extremo izquierdo de diseño proporciona un cilindro cerca de una esquina con dos costillas y un refuerzo colocado en 120° . El diseño del centro muestra un cilindro de una costilla con dos refuerzos a los 90° . El más a la derecha diseño muestra un cilindro aislado con costilla o refuerzos de pie o costillas fuele, que proporcionan una superficie de montaje elevada. Todos los diseños cilindro utilizan un espesor de pared, de costilla o de refuerzo del 70% multiplicado por el espesor nominal de pared de la pieza.

En conclusión, el diseño de cilindros debe ser capaces de soportar el par aplicado durante la inserción de los tornillos autorroscantes, así como las fuerzas de extracción potencial de tracción aplicadas durante use final. Al mismo tiempo, sin embargo, los patrones no se deben diseñar con secciones excesivamente gruesas que pueden requerir tiempos de ciclo prolongados o causan problemas estéticos. Estas características de diseño son vitales para la integridad estructural de la pieza, sin embargo, son relativamente pequeñas en relación con

la totalidad de la pieza como tal. Estas características también pueden ayudar en el aumento de la rigidez y la resistencia de la pieza moldeada sin aumentar significativamente las fuerzas de expulsión.

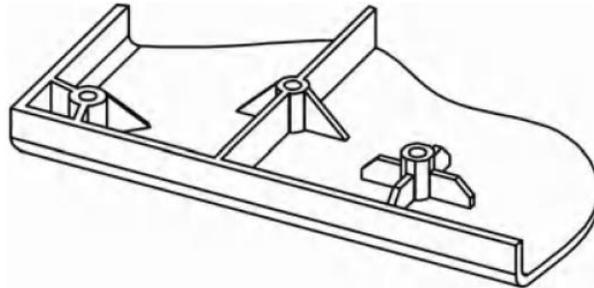


Figura 169. Diseño típico de cilindros. (Kazmer, 2007, p.30).

4.3.2 Diseño de refuerzos o costillas.

Un diseño típico de refuerzo se muestra en la Figura 170. En este, el espesor de la base de la nervadura es 70% del espesor de pared de la pieza y la altura de la nervadura es cuatro veces el espesor de pared de la pieza. Los nervios están espaciados a diez veces el espesor de pared de la pieza. El análisis indica que este diseño tiene una rigidez equivalente al de la pieza que es 30% más gruesa sin refuerzos. Sin embargo, la parte 30% más gruesa consumirá aproximadamente un 15% más de plástico y tienen un tiempo de ciclo 70% más largo que el de la parte más delgada con las costillas (Kazmer, 2007, p.29).

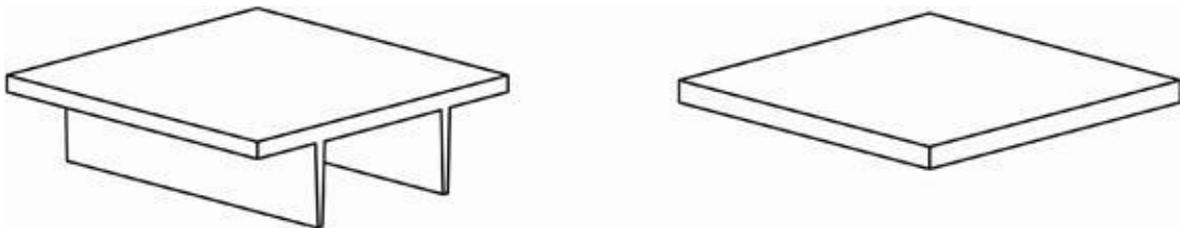


Figura 170. Diseño efectivo de refuerzos. (Kazmer, 2007, p.29).

Costillas más gruesas que 60% del espesor de pared tenderán a dibujar sombras o rechupes en el material al lado opuesto de la pared donde la base de la nervadura, cuando esta se enfría. La contracción volumétrica en esta región causará huecos internos o sumideros que aparecen en el lado de la parte opuesta de la costilla. En aplicaciones no estéticas que utilizan materiales altamente cargados con menor contracción, el espesor de la costilla se puede aumentar. De lo contrario, debe utilizarse un espesor de costilla menor al de 70% del espesor nominal de la pared en la que la costilla o refuerzo está apoyada, (Shi & Gupta, 1999).

El diseño de la costilla puede ser problemático, especialmente cuando el diseñador del producto tiene que depender de conjeturas para determinar la resistencia, la geometría, el tamaño, y la separación de las costillas. Tres diseños básicos de costillas se han desarrollado para la industria del plástico basado en el tipo de resinas termoplásticas y requisitos de la aplicación del producto. El primer diseño de costilla proporciona una buena apariencia de la superficie, el segundo diseño es para aplicaciones estructurales que no requieren buen acabado y están hechos de resinas reforzadas, el tercer diseño de la costilla es para aplicaciones estructurales con mala superficie de acabado y están hechos de armado o resinas de espuma. La Figura 171 muestra estos diseños de costilla (Campo, 2006, p.215).

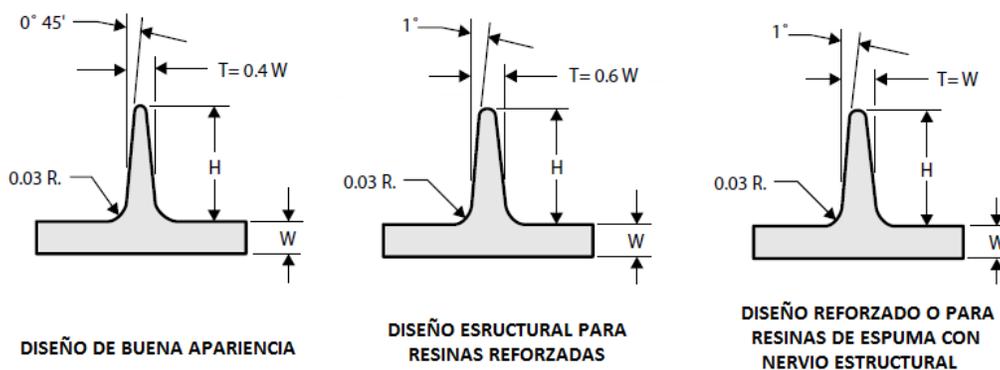


Figura 171. Tres diseños de costilla según la aplicación final. (Campo, 2006, p.215).

El método de análisis de la resistencia costilla requiere la ayuda de los gráficos computarizados para calcular el esfuerzo y la deformación de las estructuras complejas y predecir el comportamiento de una estructura termoplástica acanalado. Si se quiere profundizar en el tema seguir la referencia [Campo, 2006, p.215](#).

Estos análisis en el diseño de refuerzos pueden justificarse en base a que un aumento general de espesor en la pieza no significa obtener una mejora en la resistencia de la pieza, como ya fue mencionado; sin embargo, si supondrá un aumento directo en los costes de producción y del material (Figura 172).

Este ahorro en los costes se debe a los tiempos de mantenimiento de presión o pospresión que deben aplicarse por mm de espesor de pared de la pieza. Estos son por ejemplo son los valores aplicables hasta espesores de pared de 3 mm:

- POM = 8 seg.
- PA 66 no reforzada = 4-5 seg.
- PA 66 reforzada = 2-3 seg

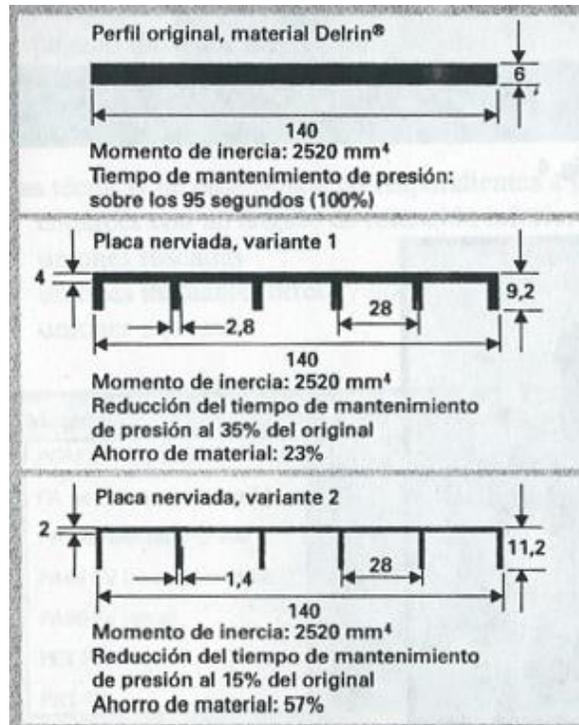


Figura 172. Ahorro potencial de costes mediante el diseño de una estructura de nervios.

4.4 Métodos de Ensamble de Piezas Plásticas

La inyección de componentes termoplásticos moldeados se presta a una serie de métodos de montaje y acabado. El mejor método adecuado para un diseño particular depende del rendimiento, costo y el número de unidades que se producirán. En la mayoría de los casos, las consideraciones de diseño deben ser examinadas de manera temprana en el desarrollo de productos.

En la ingeniería del producto termoplástico, el diseño de un elemento de una sola pieza de moldeo es la situación ideal, ya que excluye cualquier operación de montaje. Sin embargo, las limitaciones mecánicas y otras consideraciones a menudo hacen que sea necesario unir componentes termoplásticos, ya sea entre sí o con otros componentes termoplásticos o de metal para completar el montaje. En tales casos, el proceso de unión puede ser un método de producción eficiente, si se toman algunas precauciones y se siguen los procedimientos establecidos.

Diversos métodos de unión pueden ser utilizados con éxito en la mayoría de los materiales termoplásticos de moldeo por inyección. Y estos a su vez pueden agruparse básicamente en dos grupos. A continuación, se plantean los algunos de los más usados (Campo, 2006).

4.4.1 Fijación permanente.

Es importante conocer los diferentes tipos de fijación disponibles para el ensamble de artículos y así tener opciones de diseño para los proyectos que se pueden presentar.

4.4.1.1 La soldadura de placa caliente.

La soldadura por placa caliente o calefactora es la forma de soldar plásticos más simples que hay. Una placa calefactora es una placa de aluminio (plana o con forma) en la que van insertadas una serie de resistencias calefactoras que son las que aplican el calor a la placa y ésta a las piezas a soldar. Normalmente la placa calefactora se reviste de teflón para evitar que se adhiera el plástico fundido sobre ella. El procedimiento para soldar plásticos por placa caliente es muy sencillo: se presionan las piezas que se han de soldar contra las caras de la placa calefactora para empezar la fusión, se retira la placa calefactora cuando las piezas estén lo suficientemente fundidas y, después de esto, se presionan las piezas una contra la otra manteniendo la presión hasta que se enfríen (ver Figura 173).

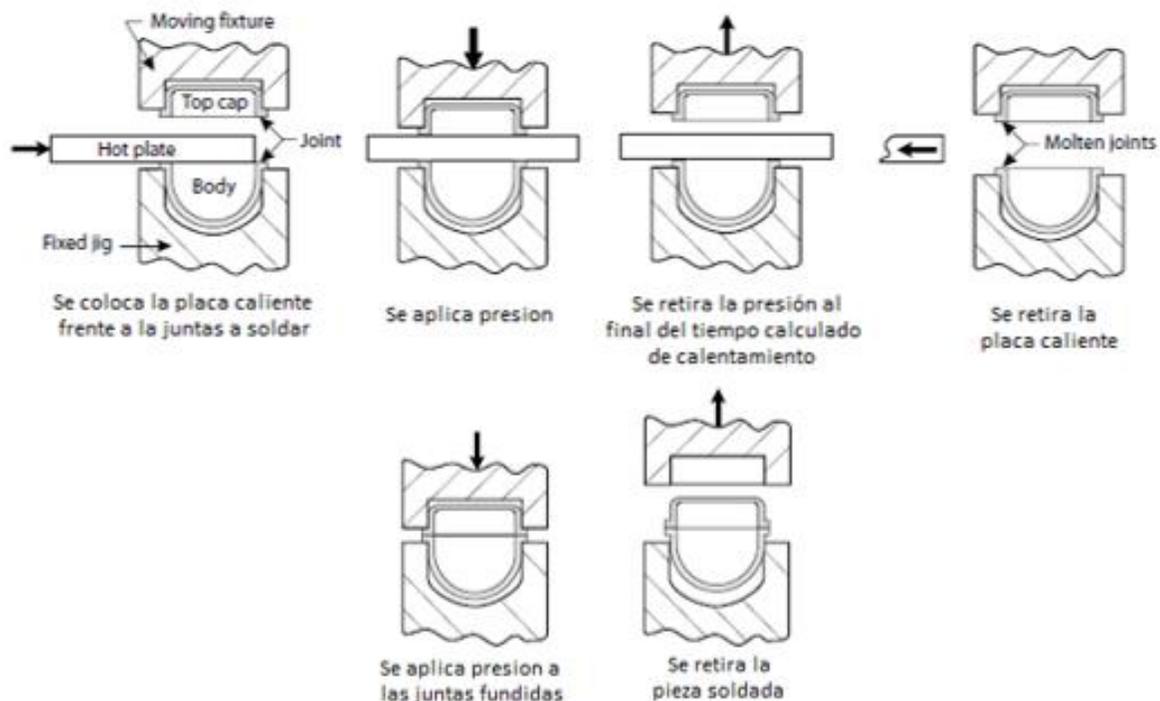


Figura 173. Secuencia del proceso del método de soldadura por placa caliente. (Campo, 2006, p.410).

Las variables que intervienen en un proceso de soldadura por placa caliente son la temperatura de la placa, la presión de soldadura, el tiempo de calentamiento y el tiempo de soldadura. La soldadura que se consigue posee una gran resistencia.

A continuación, se muestran algunos posibles diseños de junta que se pueden usar teniendo en cuenta que este tipo de proceso deja algunos bordes que dependiendo de la calidad de la pieza se deben ocultar o no. Ver Figura 174 (Campo, 2006).

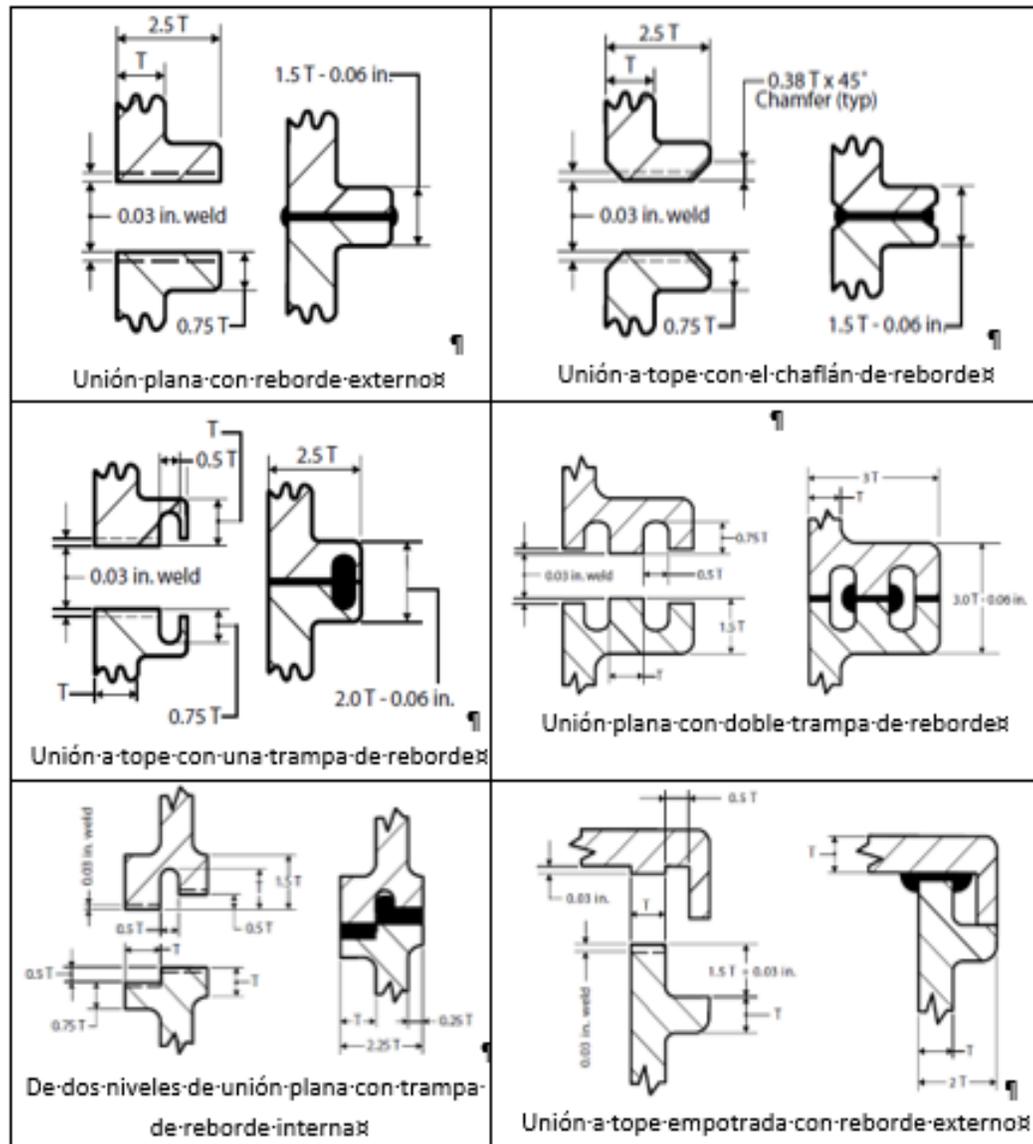


Figura 174. Algunos diseños de uniones para soldadura por placa caliente. (Campo, 2006, pp.412-413).

4.4.1.2 Estampación en frío.

La estampación en frío es un método de montaje útil en la formación de fuertes uniones mecánicas entre materiales similares o diferentes de diversas formas geométricas a bajo costo. Este método de fijación fue uno de los primeros procesos de montaje desarrollados para la industria del plástico. Es similar a las operaciones de remachado utilizadas para la

fijación de láminas de metal sobre una estructura de metálica. En este caso la cabeza del remache es formada por material plástico, creando una unión fuerte y permanente. El proceso se lleva a cabo con una herramienta de contorneado que transfiere energía al termoplástico, produciendo una fase de fusión y que ejerce presión para reformar el termoplástico. Los ensamblajes que se requieran muy ajustados requieren que la presión se mantenga hasta que el termoplástico se vuelva a solidificar en el nuevo contorno de retención (ver Figura 175).

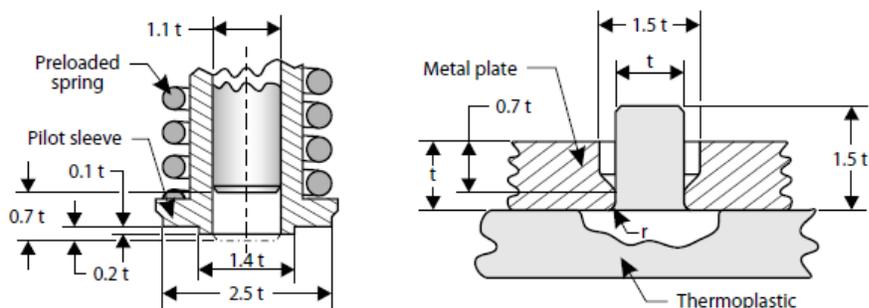


Figura 175. Diseño básico del herramental y diseño de la pieza para el proceso. (Campo, 2006, p.406).

En la Figura 176, Figura 177 y Figura 178 se muestran diferentes tipos de remachado según el resultado que se desea obtener.

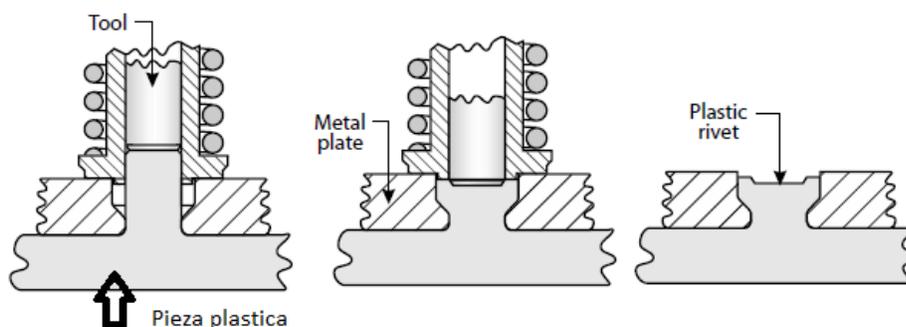


Figura 176. Etapas del proceso de estampación o remachado expandido en frío. (Campo, 2006, p.406)

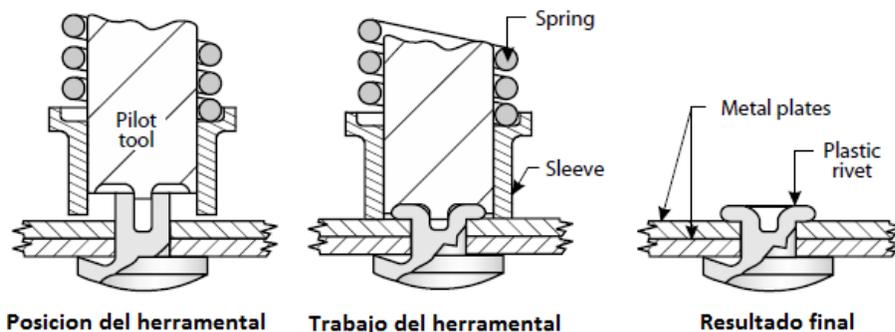


Figura 177. Etapas de proceso para el método de bridado ranurado en frío. (Campo, 2006, p.407).

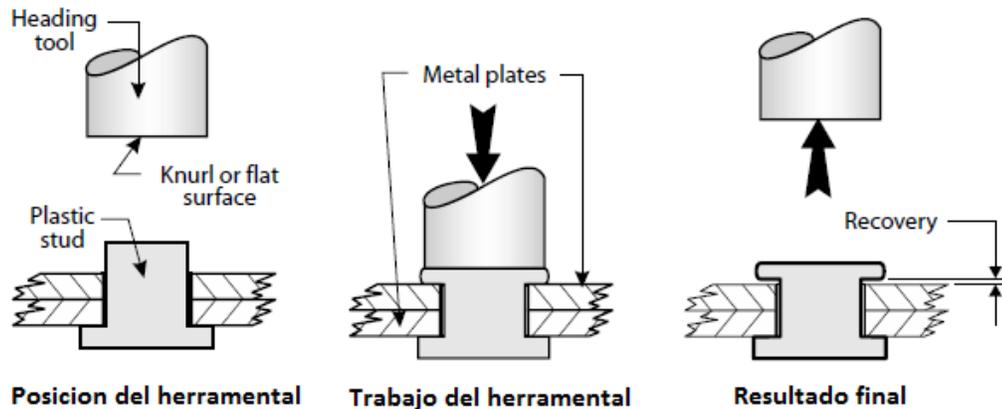


Figura 178. Etapas de proceso para el método de remachado plano en frío. (Campo, 2006, p.407).

4.4.1.3 Unión con disolvente.

La unión con disolvente, o soldadura con disolvente, como a veces se le llama, es una técnica común que se utiliza para unir componentes moldeados por inyección de resinas termoplásticas amorfas. Cuando los componentes se unen de esta manera, el disolvente diluye la superficie de los dos componentes de acoplamiento y permite que los materiales fluyan juntos. Después el disolvente se evapora, deja una unión permanente material a material.

En la aplicación de este método, los componentes deben ser humedecidos con disolvente y después se ensamblan usando presiones moderadas para mantenerlos juntos. Este proceso de humectación puede llevarse a cabo humedeciendo un trozo de fieltro o una preforma de apareamiento de madera con disolvente y presionando ligeramente las piezas a unir una contra la otra. Los componentes se pueden fijar de forma segura a un lado para secarse después de 40 a 60 s de tiempo de espera, pero no se alcanzará la fuerza de unión máxima hasta después de 24 a 48 horas. En algunos casos, puede ser deseable calentar el conjunto en un horno para eliminar el exceso de disolvente.

Es muy importante para el método de unión por disolvente, haber adaptado bien las superficies de unión de los componentes. A menudo, se hacen intentos fallidos para resolver los problemas de unión mediante el uso de cantidades excesivas de disolvente o presión sobre los componentes de acoplamiento. Estas "soluciones" sólo se traducirán en malos resultados en la unión de las piezas tales como mal aspecto, inclinaciones no deseadas o exceso de estrés en la unión, lo cual puede causar grietas en la unión. Pasadores de referencia y/o conjuntos de ranura y lengüeta pueden ayudar a proporcionar una buena adaptación parcial, así como un fácil posicionamiento de las piezas después de la aplicación del disolvente.

Ambas superficies de unión deben ser lo más planas posibles para evitar el atrapamiento de cantidades excesivas de disolvente. Si el apareamiento de los componentes moldeados presenta problemas de acople por tener superficies irregulares, suspensiones hechas de disolventes y hasta 25% de resina de base pueden ser utilizadas a manera de relleno (Campo, 2006, p.413-414).

Para muchas resinas amorfas y algunos semicristalinos hay más de un disolvente que se puede utilizar para la unión. Varios polímeros y varios tipos de disolventes que son apropiados para la unión se enumeran en la Tabla 23.

Tabla 23.

Disolventes usados para unir algunos polímeros termoplásticos.

ABS	Acrílico (PMMA)	Celulósico	Nylon (PA)
Acetona	Cloruro de metileno	Acetona	Fenol acuoso
Cloruro de metileno	Dicloruro de etileno	Metil etil cetona	Resorcinol en alcohol
metil etil cetona	El tricloroetileno		Cloruro de calcio en alcohol
Metilisobutilcetona			
tetrahidrofurano			
Poliestireno (PS)	Policarbonato (PC)	PPO/PPE	CLORURO DE POLIVINILO (PVC)
Dicloruro de etileno	Dicloruro de etileno	Tricloroetileno	Metil etil cetona
Cloruro de metileno	Cloruro de metileno	Dicloruro de etileno	Ciclohexano
Cetona de etileno		Cloruro de metileno	Tetrahidrofurano
Tricloroetileno		Cloroformo	Diclorobenceno
Tolueno			
Xileno			

Adaptada de Campo, 2006, pp.414-415.

4.4.1.4 Método de unión adhesiva.

La unión adhesiva es uno de los métodos más convenientes de montaje de un producto termoplástico ya sea para un material similar o diferente (metales). Los adhesivos distribuyen los esfuerzos en toda el área de la superficie de unión y puede proporcionar un sellado hermético si es necesario.

Los adhesivos flexibles permiten un cierto movimiento entre las superficies articulares de apareamiento y por lo tanto puede compensar las diferencias generadas por los coeficientes

de dilatación térmica lineal de los materiales. Los adhesivos son relativamente baratos y a menudo requieren poco o ningún equipo especial para su aplicación.

Hay cinco grandes familias de adhesivos, cada uno con un conjunto único de características. Al elegir un adhesivo para una aplicación específica, estas características pueden proporcionar una dirección inicial para su selección. Por ejemplo, si el ambiente de uso final será superior a 212 ° F, valdría la pena considerar un epoxi o un adhesivo anaeróbico, o si se establece que el tiempo de curado es crítico para el ensamble, un cianoacrilato o adhesivo anaeróbico podrían ser apropiados (Campo, 2006, p.416).

A continuación, se muestran en la Tabla 24 las familias de adhesivos para termoplásticos.

Tabla 24.

Familias de adhesivos para termoplásticos. Guía de características para la selección.

Familia	Características Principales de la Familia		
	<u>Descripción</u>		
Epoxy (EP)	Usualmente son sistemas de dos componentes, pueden almacenarse durante largos períodos de tiempo y no se activarán hasta que se mezclen. A diferencia de otros adhesivos, los epoxis no son a base de disolvente, pero el curado se da como resultado de una reacción química.		
	Suministro * Pasta líquida * Resistencia al corte: de 5.000 a 10.000 psi * Temperatura de funcionamiento: de -70 a 450 ° F	Ventajas * Buena adhesión * Alta resistencia a la tracción * Resistencia al cizallamiento * Resistencia a la fluencia * Buena rigidez * Alta tolerancia al calor * Fácil de curar	Desventajas * Pobre resistencia al pelado * Frágil * baja resistencia al impacto * Alto costo
Uretano (TPU)	<u>Descripción</u> Está disponible en ambos sistemas de una y dos partes. Las formulaciones de un solo componente de curado requieren calor, mientras que sistemas de dos componentes se pueden curar a temperatura ambiente.		
	Suministro * Pasta líquida a base de disolvente * Resistencia al corte: hasta 8,000 psi * Temperatura de funcionamiento: -300 a 300 °F	Ventajas * Tenacidad * Flexibilidad * Resistencia al impacto * Resistencia a la abrasión * Alta resistencia al pelado	Desventajas * Fluencia volátil y excesiva * fuerza Pobre a alta temperatura * Sensibilidad química * Carece de durabilidad a largo plazo * Por lo general, con necesidad de cebadores * Sensible a la humedad en el estado sin curar

Descripción

Hay sistemas de una o de dos partes, este último consiste en un cebador de catalizador y el adhesivo. Por lo general, los sistemas de dos partes no necesitan de mezcla. Acrílicos cuentan con un curado rápido a temperatura ambiente con un tiempo de fraguado de aproximadamente 60 a 90 s y curado completo de 30 min o menos. La aplicación de calor puede ser utilizado para reducir los tiempos de curado.

Acrílico (PMMA)	Suministro	Ventajas	Desventajas
	* Pasta líquida	* Se adhiere a las superficies contaminadas	* Olor fuerte
	* Resistencia al corte: hasta 6,000 psi	* Alta resistencia	* Problemas con la inflamabilidad
	* Temperatura de funcionamiento: entre 240 y 350 °F	* Tenacidad superior * Curado rápido	* Mínima brecha de llenado

Descripción

Estos son una familia de adhesivo termoendurecible de un componente cuyo mecanismo de curado es disparado por la ausencia de oxígeno. Esto elimina el problema del curado prematuro.

son excelentes para aplicaciones de sellado y pegado críticas en las que no se requiere un refuerzo

Anaerobicos	Suministro	Ventajas	Desventajas
	* Forma líquida	* Buena resistencia a los disolventes	* Clor fuerte
	* Resistencia al corte: hasta 5,000 psi	* flexibilidad de la pega	* Problemas con la inflamabilidad
	* Temperatura de funcionamiento: entre 65 y 400 ° F	* Alta resistencia al pelado * Buena resistencia al impacto	* Mínima brecha de llenado

Descripción

Son de un solo componente, Con un tiempo de fraguado normal de 2 a 3 s y un tiempo de curado total de 24 h a temperatura ambiente, estos sistemas son populares en las operaciones de ensamble con giros rápidos después del contacto. El curado se inicia por la presencia de humedad en la superficie, incluso en cantidades limitadas, tales como la humedad en el aire. Estos adhesivos son para usos en aplicaciones altamente precisas y específicas.

Cianoacrilatos	Suministro	Ventajas	Desventajas
	* Forma líquida	* Alta resistencia a la tracción	* Frágil
	* Resistencia al corte: hasta 5,000 psi	* No hay limitaciones de durabilidad	* No suele ser sugerido para materiales diferentes
	* Temperatura de funcionamiento: entre 65 y 180 ° F	* Adhesivo de curado rápido.	* Pobre brecha de llenado * No sugerido para la exposición constante al agua * Limitado al impacto * baja resistencia al pelado

Otras propiedades que deben ser consideradas en la elección de un adhesivo incluyen la resistencia al entorno químico de uso final, resistencia de la unión y el diseño específico de esta; además, la estabilidad por temperatura a largo plazo. La facilidad del ensamble, la vida útil, los requisitos de manipulación, y los problemas potenciales de toxicidad también deben ser considerados. Las siguientes características adhesivas deben ser evaluadas antes de tomar una decisión final.

- Resistencia química
- Resistencia de la unión
- Estabilidad bajo temperatura
- Manejo
- Toxicidad
- Costos
- Compatibilidad de materiales
- Preparación de las superficies a unir

El mejor adhesivo para un trabajo puede no ser el que produce el vínculo más fuerte para el material en cuestión. El factor más importante en la selección de un adhesivo es el uso previsto del producto. ¿Va a ser utilizado bajo el agua o expuesto a la luz solar?, ¿es el adherente transparente? o ¿requiere un adhesivo incoloro?

Algunas pautas para la selección del adhesivo adecuado se enumeran a continuación:

- **Flexibilidad:** Los materiales flexibles deben estar unidos con adhesivos flexibles. Una gota de adhesivo flexible puede actuar como alivio de tensión entre los componentes moldeados. Cuando se unen materiales diferentes, el adhesivo debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse a sus diferentes coeficientes de dilatación térmica lineal.
- **Temperatura:** Si se utiliza un adhesivo de curado por calor, los productos moldeados deben ser capaces de soportar las temperaturas de curado sin deformaciones y sin expansiones significativas.
- **Envejecimiento:** valores de retención de la fuerza de la junta con el envejecimiento (fluencia) se determinan a menudo en un laboratorio, con barras de muestras de termoplástico cargado en condiciones de temperatura y humedad controladas. Las juntas envejecidas bajo carga, en especial carga cíclica en el entorno de uso final, pueden perder su fuerza con mayor rapidez que en el laboratorio.

Otras consideraciones de ensamble

- ¿Se espera que el adhesivo se cure rápidamente y así tenga las características o especificaciones requeridas para la siguiente etapa de fabricación, o puede descansar por un tiempo fijo o determinado?
- ¿La planta de fabricación tiene acceso a equipos de curado UV o luz visible de fotocurado?
- ¿Las partes serán ensambladas por manos humanas (con riesgo de quemaduras y envenenamiento por gases) o por un equipo robótico?
- ¿Qué se puede esperar de las juntas o uniones, se desempeñan mejor en un entorno de puesta a punto de laboratorio o cuando se montan en la línea de producción?
- Un adhesivo que apenas logra las especificaciones necesarias en las pruebas o ensayos de laboratorio probablemente fallará cuando se aplica a ritmo de proceso durante la producción.

Las estaciones de desengrase de las partes usan solventes para preparar las superficies de unión y reciclan este; Por lo tanto, la calidad de las juntas puede sufrir de contaminación gradual o repentina con el solvente. Muchos adhesivos requieren la intervención humana para el acoplamiento de las partes, debido a que las superficies de unión deben ser deslizadas juntas para evacuar el aire. Un adhesivo puede producir gases de los que necesitan ser protegidos trabajadores (Campo, 2006).

4.4.1.5 Soldadura ultrasónica o por ultrasonido.

El principio detrás de la tecnología de la soldadura por ultrasonido se basa en la vibración. Una de las partes a ensamblar se hace vibrar contra la otra, que permanece estacionaria. El calor generado por la vibración funde los materiales en la interfaz de la junta para llevar a cabo la soldadura.

Los termoplásticos son los únicos polímeros adecuados para este proceso. Los materiales termoestables no se funden cuando se recalientan a causa de sus enlaces intermoleculares cruzados.

En los últimos años, la tecnología de soldadura ultrasónica se ha convertido en un método importante para innumerables aplicaciones en prácticamente todas las industrias en las que se utilizan resinas termoplásticas moldeadas por inyección. Los desarrollos recientes más significativos han sido en la tecnología de microprocesadores que han mejorado aún más los

controles para la automatización, al tiempo que producen saltos cuánticos en la precisión y la calidad del producto final ensamblado.

El montaje ultrasónico es un método rápido, limpio y eficiente para montar componentes termoplásticos rígidos moldeados por inyección. Varias técnicas de ensamblaje por ultrasonidos son utilizadas por todos los segmentos de la industria para unir plástico a plástico y plástico a materiales no plásticos reemplazando o impidiendo el uso de adhesivos y Disolventes, sujetadores mecánicos u otros métodos de soldadura.

Ventajas y beneficios en el proceso de soldadura por ultrasonidos incluyen:

- Eficiencia energética.
- No hay necesidad de sistemas de ventilación elaborados para eliminar los vapores o el calor.
- Alta productividad con menor coste que muchos otros métodos de montaje.
- Facilidad de interfaz con la producción automatizada de línea de montaje.
- Arranque inmediato y apagado sin calor residual.

La soldadura por ultrasonido se logra convirtiendo energía eléctrica de alta frecuencia a movimiento mecánico de alta frecuencia. El movimiento mecánico, junto con la fuerza aplicada, crean calor en las superficies de contacto (área de unión) de los componentes plásticos logrando que el material plástico se derrita y forme una unión molecular entre las dos piezas. El generador es alimentado por la línea de voltaje CA de 50 o 60 Hertz la cual es convertida a 20,000 o 40,000 Hertz. Esta energía eléctrica de alta frecuencia es enviada a un transductor (convertidor) piezoeléctrico, el cual convierte la energía eléctrica a vibraciones mecánicas. Estas vibraciones cuando son aplicadas a una parte bajo fuerza/presión, van a crear calor causando que el plástico se derrita en el área de unión. Cuando el plástico se enfríe, se creará una unión molecular entre los componentes.

La soldadura por ultrasonido es la aplicación más común del ensamble por ultrasonido. Al soldar, el sonotrodo hace contacto con una de las piezas, una fuerza es aplicada y las vibraciones ultrasónicas viajan a través del material generando calor en el área de unión entre las dos piezas. El material del plástico se derrite y fluye entre las superficies de ambas partes. Cuando las vibraciones cesan, el plástico se solidifica y las dos piezas quedan unidas. La Figura 179 muestra el proceso de soldadura por ultrasonido detalladamente.

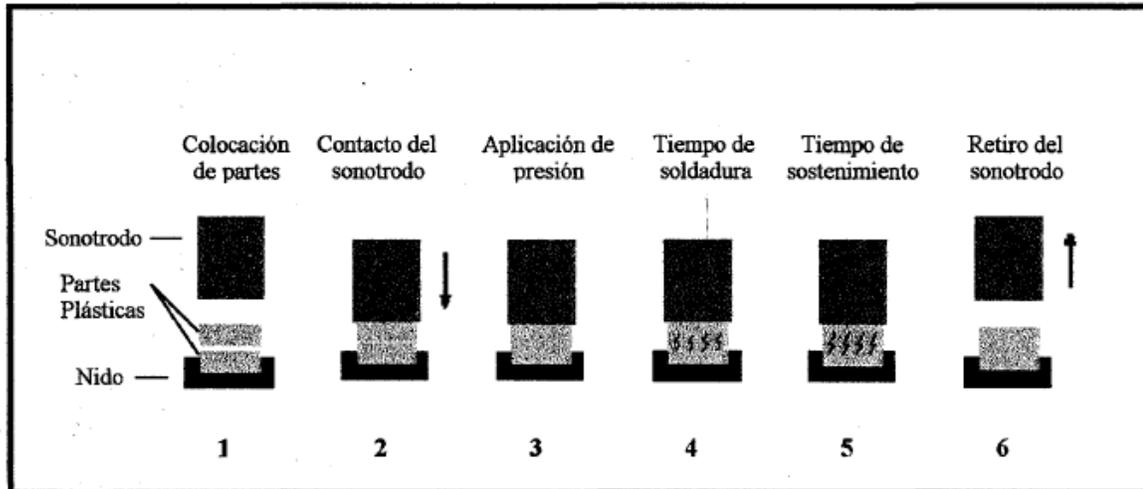


Figura 179. Esquema de la soldadura por ultrasonido. (Ojeda, 2012).

A continuación, se describe el proceso según la imagen anterior:

1. Los dos materiales termoplásticos para unir son colocados juntos, uno arriba del otro en un soporte llamado nido.
2. Un componente de titanio o aluminio llamado sonotrodo, hace contacto con la parte de plástico superior.
3. Una presión controlada es aplicada por el sonotrodo empujando las dos piezas de plástico contra el nido.
4. El sonotrodo está vibrando verticalmente, 20,000 (20Khz.) en algunas máquinas y en otras a 40,000 (40 Khz.) veces por segundo, a una distancia medida en milésimas de pulgada (micrones) por un predeterminado tiempo llamado tiempo de soldadura. Las vibraciones mecánicas son dirigidas al punto de contacto de las dos partes. Las vibraciones mecánicas son transmitidas a través del material termoplástico al punto de unión para crear calor, cuando la temperatura en el punto de unión alcanza el punto de fusión, el plástico se derrite y fluye y las vibraciones cesan. Esto permite que el plástico derretido se enfríe y se solidifique.
5. La fuerza ejercida sobre las piezas se mantiene por un tiempo predeterminado permitiendo que las piezas se unan, logrando una unión molecular. Este se conoce como tiempo de sostenimiento, en el cual se puede aplicar una fuerza mayor para mejorar la resistencia de unión entre los materiales. Esto se logra usando una doble presión sobre el material.
6. Una vez que el plástico haya solidificado, la fuerza ejercida sobre las piezas se elimina y el sonotrodo se retracta. Las dos piezas de plástico ahora están unidas como si hubiera sido moldeadas juntas y son removidas del nido como una pieza.

En la soldadura ultrasónica, la energía necesaria para realizar una soldadura es el producto de la potencia media disipada en la junta y el tiempo de soldadura. El control por microprocesador ahora permite la soldadura por energía constante, variando el tiempo para entregar la cantidad predeterminada de energía requerida para producir las mejores soldaduras de calidad.

El sistema básico del ensamble por ultrasonido consta principalmente de cuatro componentes:

- Generador (fuente de poder).
- Transductor (convertidor).
- Amplificador.
- Sonotrodo (pieza acústica).

Se necesita una prensa para sostener el convertidor-amplificador-sonotrodo (cafión) y un nido para sostener las piezas a unir para completar el sistema de ensamble plástico por ultrasonido.

El generador, cambia la energía eléctrica convencional (120Vac, 50Hz) a energía eléctrica a una frecuencia a la cual el sistema está diseñado a operar. Aunque diferentes frecuencias de operación son usadas en todo el mundo, las frecuencias más comunes usadas en la producción de manufactura son de 20,000 Hz o 40,000 Hz.

La energía eléctrica de alta frecuencia producida por el generador es enviada a través de un convertidor, el cual cambia la energía eléctrica a movimiento mecánico vertical de baja amplitud, o vibraciones. Estas vibraciones son transmitidas al amplificador, el cual es usado para incrementar o disminuir la amplitud de las vibraciones.

La cantidad de amplitud requerida depende del material, tipo de aplicación y el trabajo que se necesita hacer. A veces es necesario cambiar la amplitud de la vibración que va al sonotrodo, para que el resultado sea apropiado en una aplicación específica. El amplificador incrementa o decrementa la amplitud para hacer esto posible. La cantidad de incremento en la amplitud es expresada como la razón conocida como ganancia.

Para esto, un amplificador de 2 a 1 unido al convertidor, duplica la amplitud de la vibración en su salida. Un amplificador de 3: 1 triplica la vibración. Un amplificador de 0.5:1 decrementa la amplitud de las vibraciones a la mitad.

Después las vibraciones son transmitidas al sonotrodo de una forma y tamaño apropiado para entregar mejor las vibraciones a la pieza. Dependiendo de su forma, el sonotrodo puede incrementar la amplitud de las vibraciones.

En resumen, el generador provee la energía eléctrica de alta frecuencia al convertidor, el cual la transforma a vibraciones de alta frecuencia. El amplificador altera la amplitud de las vibraciones entre el convertidor y el sonotrodo para una aplicación específica. El sonotrodo es diseñado para aplicar las vibraciones a la parte a ensamblar.

La Figura 180 muestra la función de cada uno de los componentes básicos y como la energía es creada e incrementada.

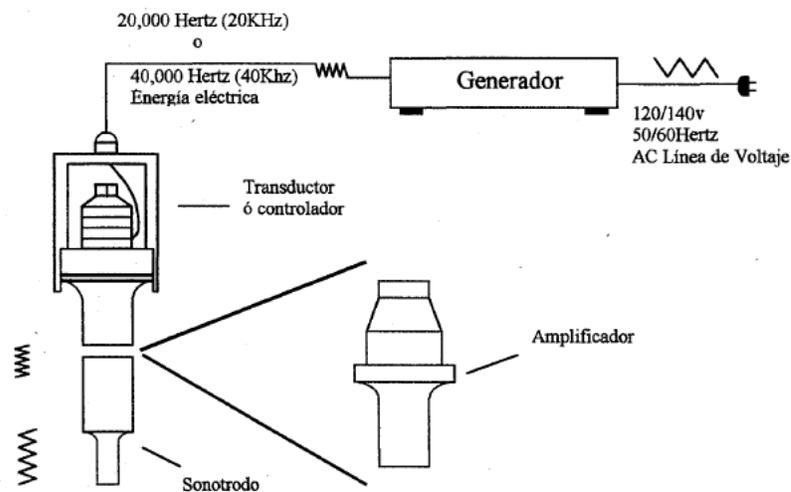


Figura 180. Componentes básicos y sus funciones, un proceso de soldadura por ultrasonido.

Las técnicas para aplicar la energía al trabajo. Es necesario tener algún tipo de sistema de ensamble por ultrasonido para aplicar la energía vibratoria a las piezas. El tipo de sistema es determinado por la aplicación. Un sistema manual se puede usar cuando es más práctico llevar la energía vibratoria a las piezas. Cuando la aplicación es muy delicada, donde se requiere un control preciso y repetitivo, se recomienda un sistema de prensa. Cuando se necesita de una mayor producción se puede usar un sistema rotatorio.

El diseño de las juntas para esta aplicación es muy importante y de vital importancia a la hora de tener buenos resultados. El diseño de la junta cortante fue desarrollado por Du Pont en 1967 y ha sido utilizado en todo el mundo con gran éxito en muchas aplicaciones. Las juntas de cizalladura proporcionan juntas herméticas de alta resistencia y permite varias configuraciones para resinas termoplásticas semicristalinas de alto punto de fusión.

En la Figura 181 se muestra la junta de cizalladura básica, la junta de cizallamiento de chaflán y las variaciones de la junta de cizallamiento básico para piezas grandes a soldar por ultrasonidos.

El contacto inicial está limitado a un área pequeña que es normalmente un rebaje o escalón en uno o ambos lados de las partes termoplásticas. Las superficies de contacto se funden primero; Luego, mientras las piezas se traslapan juntas, continúan derritiéndose a lo largo de las paredes verticales. La acción de juntar de las dos superficies de fusión elimina las fugas y los huecos, haciendo esto la mejor junta para sellos herméticos fuertes.

Se deben considerar varios aspectos importantes de la articulación de cizallamiento:

- La parte termoplástica superior debe ser lo más superficial posible
- Las paredes exteriores deben estar bien soportadas por base fija.
- El diseño debe permitir un ajuste de holgura (0.005-0.008 in) (Campo, 2006, p.189).

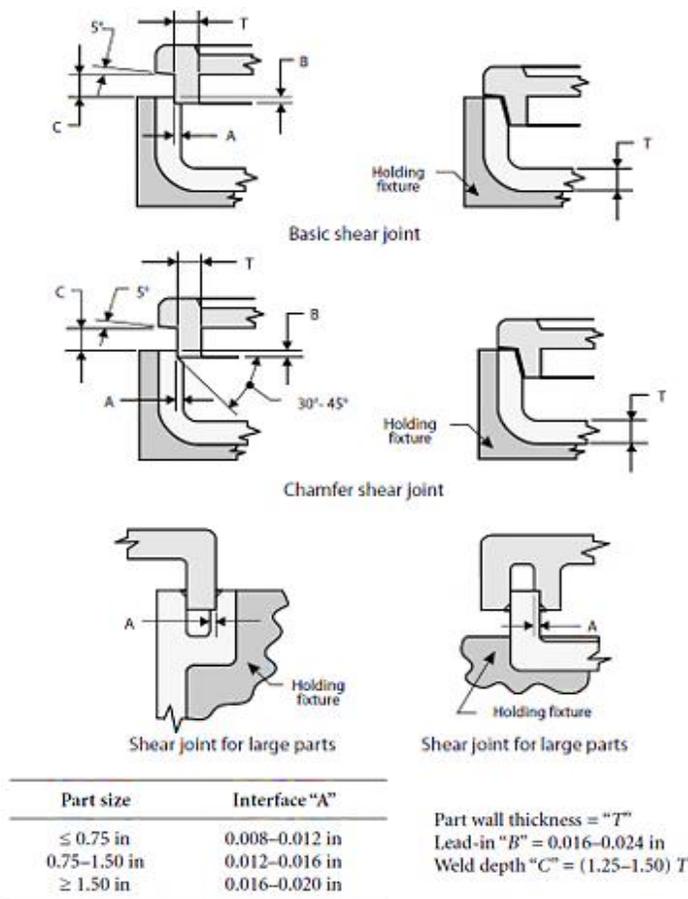


Figura 181. Variaciones de diseño de soldadura por ultrasonidos de cizallamiento básico. (Campo, 2006, p.490).

Para soldar fácilmente los polímeros amorfos, tales como ABS, SAN, acrílico, poliestireno y otros, el tamaño del concentrador de energía depende del área a unir. Las consideraciones prácticas sugieren una altura mínima del 12% del grosor de la pared de la pieza moldeada para el concentrador de energía de 90° y una altura mínima del 22% del grosor de la pared para el director de energía de 60° . La Figura 182, Figura 183, Figura 184 y Figura 185, muestran diferentes diseños para uniones

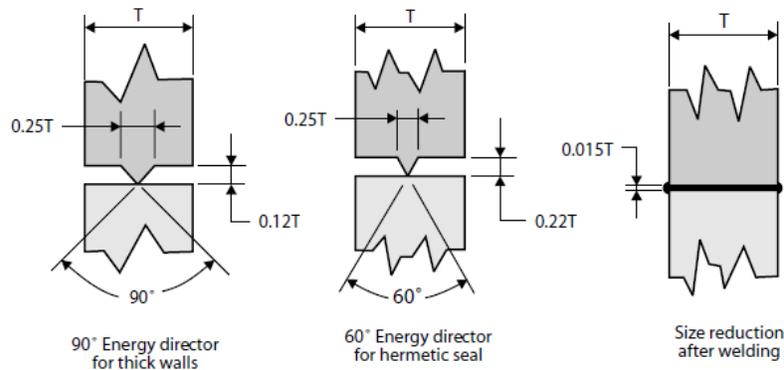


Figura 182. Tipo de concentradores de energía. (Campo, 2006, p.492).

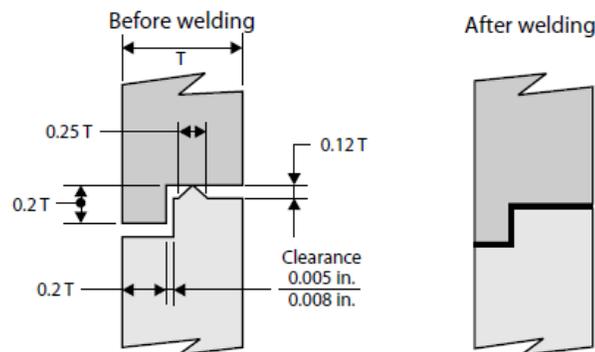


Figura 183. Concentrador de energía diseño de escalones. (Campo, 2006, p.493).

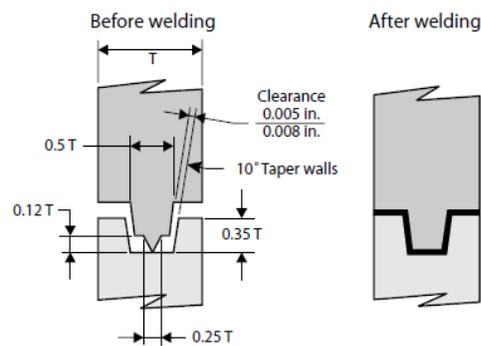


Figura 184. Diseño de la articulación de la lengüeta y del surco del director de energía 90° . (Campo, 2006, p.493).

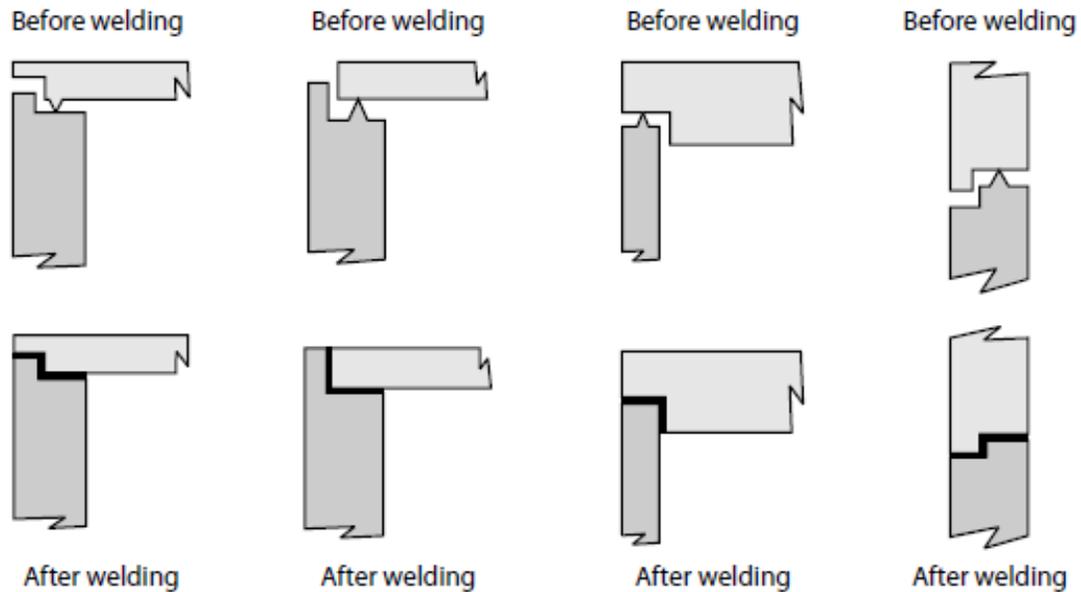


Figura 185. Otros ejemplos de concentradores de energía. (Campo, 2006, p.494).

Existen otros métodos y características de este tipo de soldadura, que son de interés debido a que es un método muy usado. Para profundizar en esto ver (Campo, 2006, p.482-510)

4.4.1.6 Soldadura por vibración.

La soldadura por vibración se basa en el principio de soldadura por fricción para unir materiales termoplásticos. Soldadura por giro, el método más común de soldadura por fricción se ha utilizado con éxito desde hace más de 75 años. En la soldadura por vibración, el calor necesario para fundir el termoplástico se genera presionando una de las partes contra la otra y haciéndola vibrar a través de un pequeño desplazamiento relativo en el plano de la junta. El calor generado por la fricción funde el termoplástico en la interfaz. El movimiento vibratorio se detiene y las piezas se alinean automáticamente. La presión se mantiene hasta que el termoplástico solidifica para unir las partes permanentemente con una fuerza próxima a la del material parental.

La soldadura por vibración no debe considerarse competencia con métodos de soldadura de ensamblajes existentes y conocidos. Proporciona un medio para unir partes para las cuales ninguno de los otros métodos es adecuado y da al diseñador considerablemente más libertad en el dimensionamiento y aspecto de los productos finales.

El tiempo de fusión generalmente oscila entre 2 y 3 segundos y el tiempo de retención es normalmente de 1 segundo o menos. El tiempo total del ciclo es de entre 6 y 15 segundos,

incluyendo carga y descarga. También se pueden utilizar accesorios de cavidad múltiple o un sistema de soldadura automatizado con el proceso de soldadura por vibración.

La soldadura angular significa que las oscilaciones se generan alrededor de un punto central, que puede estar situado dentro o fuera del área de la junta. Para las piezas de forma circular, especialmente con grandes diámetros, se oscilan alrededor de su propio centro. Por lo tanto, pueden estar provistos de perfiles de unión en forma de "V" (como por ejemplo piezas soldadas por giro), que proporcionan la mayor resistencia. En este caso, sólo se puede soldar una pieza a la vez. Puesto que no siempre es la forma más económica, las piezas circulares de diámetros pequeños están a menudo provistas de juntas a tope para permitir la soldadura de varias piezas simultáneamente.

Puesto que todas las partes no circulares requieren una junta a tope, en realidad no importa si se sueldan por los movimientos angulares o lineales.

La Figura 186 muestra las soldaduras por vibración angular para aplicaciones de forma circular y no circular.

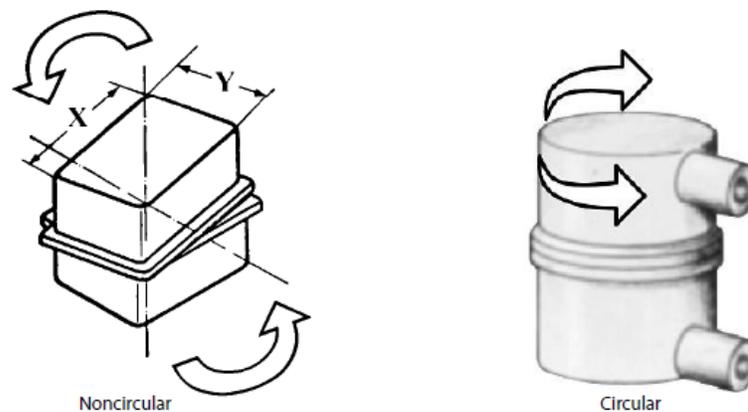


Figura 186. Ejemplos de aplicación de la soldadura por vibración. (Campo, 2006, p.467).

El diseño básico de la junta para la soldadura por vibración es una simple junta de tope. Generalmente se requiere un ancla a menos que la pared sea suficientemente rígida o soportada para evitar la flexión. Una brida facilita el agarre de las piezas y aplica una presión uniforme cerca de la soldadura. También aumenta la resistencia de la articulación por encima de la de la estructura circundante. Es deseable una anchura de brida de 2 a 3,5 veces el grosor de la pared para la máxima resistencia y soporte. La anchura mínima de la superficie de soldadura es del 60% del movimiento relativo total (amplitud pico a pico).

La Figura 187 muestra algunos diseños de juntas circulares con varios dispositivos de captura de rebabas o bordes fusionados “*flash traps*”. Si, como sucede en las partes industriales, la rebaba sobresaliente puede ser tolerada o eliminada después, las trampas de rebaba pueden ser ignoradas y la anchura total de la junta correspondientemente reducida.

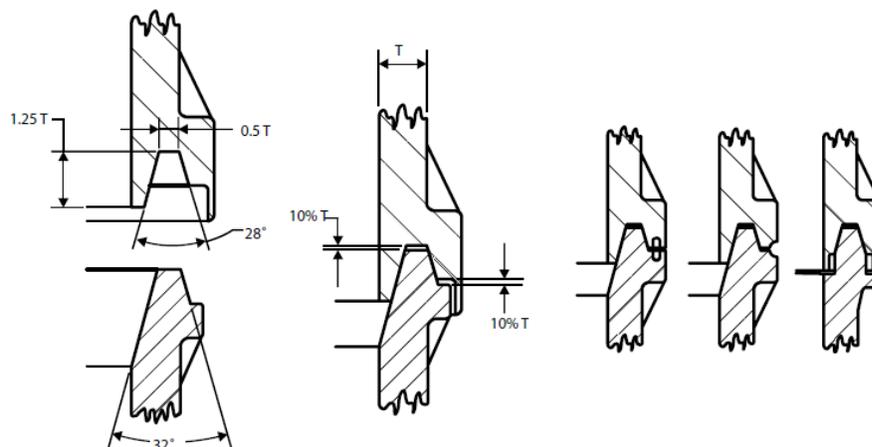


Figura 187. Articulación circular "V" con diseños de trampa de rebaba. (Campo, 2006, p.472).

Los vasos de pared delgada y todas las partes grandes deben estar provistos de una junta como se muestra en la Figura 188, abajo a la derecha, para evitar la flexión de la pared.

Las juntas a tope también se pueden diseñar con varias “*flash traps*”. Sin embargo, la anchura de la brida se incrementa, lo que puede no ser aceptable (Campo, 2006).

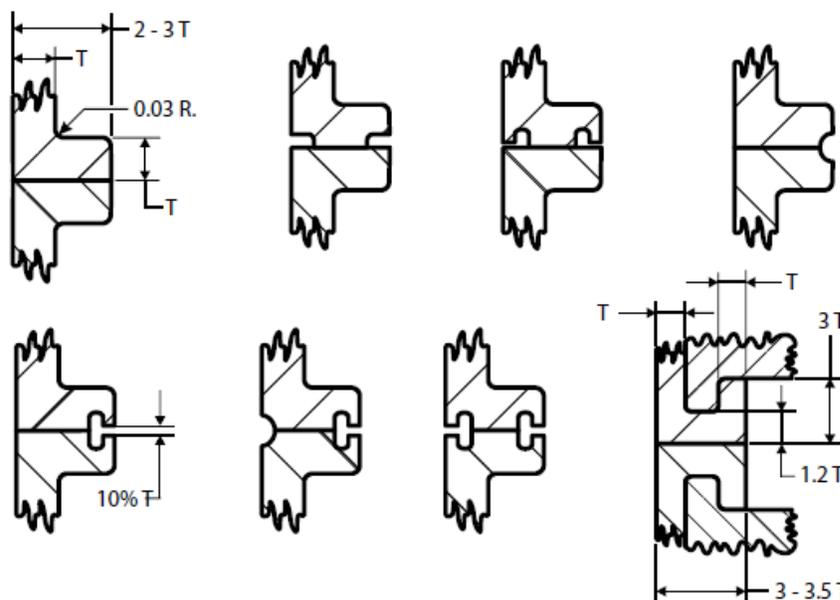


Figura 188. Articulación de extremo no circular con diseños de trampa de rebaba. (Campo, 2006, p.473).

4.4.1.7 Soldadura por fricción (giro).

La soldadura por giro es un método de montaje rápido y eficiente para producir juntas de soldadura superficiales circulares para la mayoría de las resinas termoplásticas de moldeo por inyección. La soldadura por giro debe ser considerada para componentes termoplásticos moldeados de polímeros similares que tienen juntas de soldadura de superficie circular, cuando la aplicación requiere juntas soldadas fuertes, permanentes y sin fugas. Los componentes termoplásticos de soldadura giratoria moldeados de materiales disímiles generalmente dan como resultado una baja resistencia de la junta de soldadura.

Las juntas de soldadura por fricción se hacen girando la superficie de la tapa termoplástica a soldar a altas velocidades mientras que la otra parte (base) está soportada en línea con el mandril fijo. El calor de fricción se genera por la velocidad diferencial en la unión entre las superficies cuando se mantienen unidas. Después de que se ha formado una película de polímero fundido, se detiene el movimiento relativo y se permite que la soldadura se solidifique bajo presión. El ciclo de soldadura por giro se puede automatizar y la operación completa de soldadura se realiza en 1 a 2 s.

El proceso de soldadura por centrifugación se puede realizar en una prensa de perforación de alta velocidad con una herramienta de accionamiento y un tornillo de banco o abrazadera provisto para contener una pieza termoplástica moldeada por inyección de prototipo o de bajo volumen de producción. Las aplicaciones de alto volumen requieren una prensa de perforación equipada con una herramienta de soldadura por giro, un cilindro neumático, válvulas y temporizador, o un equipo de soldadura por giro especialmente diseñado (ver Figura 189).

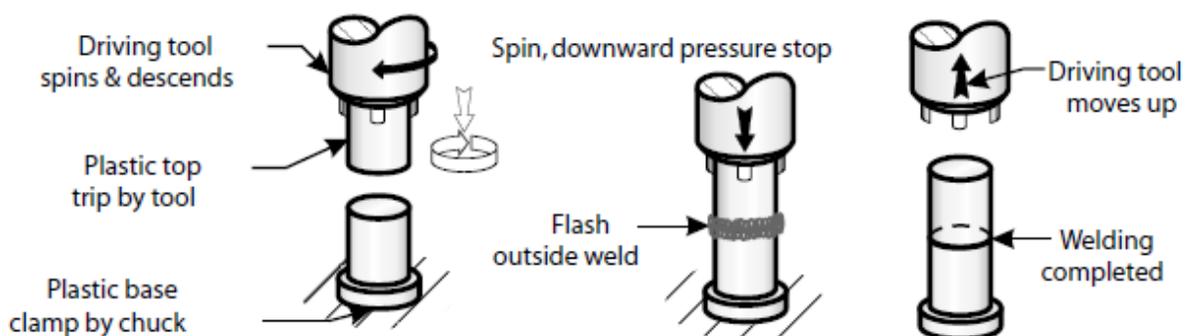


Figura 189. Secuencia básica del proceso de soldadura por fricción o giro. (Campo, 2006, p.476).

El tamaño y la geometría de la junta de soldadura giratoria son una función del grosor de la pared, la resistencia de la soldadura y la apariencia del producto.

La Figura 190 muestra el diseño de junta circular recomendado para un cilindro termoplástico de pared delgada moldeado por inyección. La Figura 191 muestra un diseño de junta circular para un cilindro termoplástico moldeado por inyección con paredes gruesas.

La presencia de rebaba en la junta después de la soldadura es esencial para asegurar una buena soldadura. En los casos en que la rebaba es censurable desde un punto de vista funcional o de apariencia, la Figura 192 muestra cuatro juntas de soldadura por giro con diseños de trampa de rebaba.

Si no es posible lograr una junta de soldadura sin rebaba, el flash se puede quitar manualmente mediante cuchillas de recorte de rebaba. Para las piezas moldeadas pequeñas, esto se puede hacer transportando la pieza plástica a través de una tolva vibratoria automática, donde usando un borde afilado la rebaba se cortan por giro (Campo, 2006).

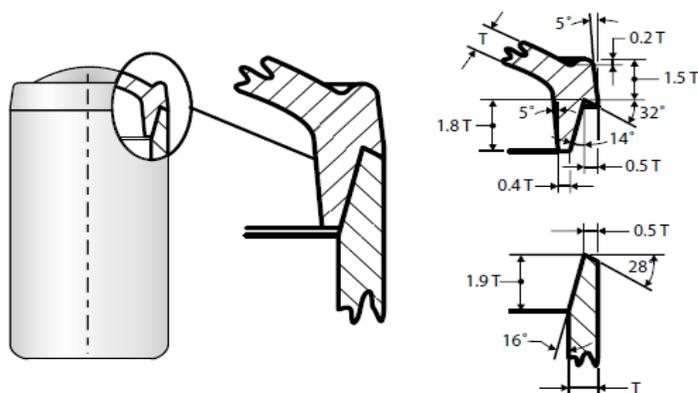


Figura 190. Diseño de junta de soldadura giratoria para cilindros de pared delgada. (Campo, 2006, p.481).

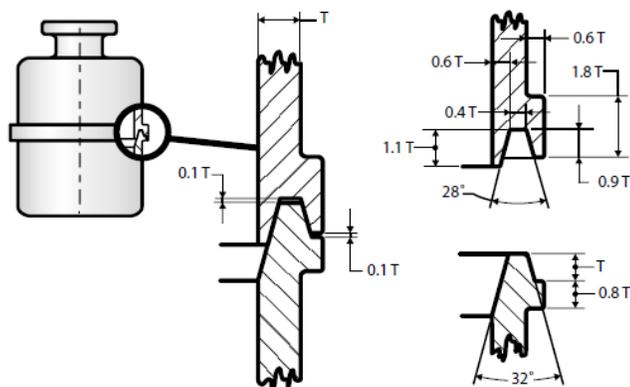


Figura 191. Diseño de junta de soldadura giratoria para cilindros de pared gruesa. (Campo, 2006, p.481).

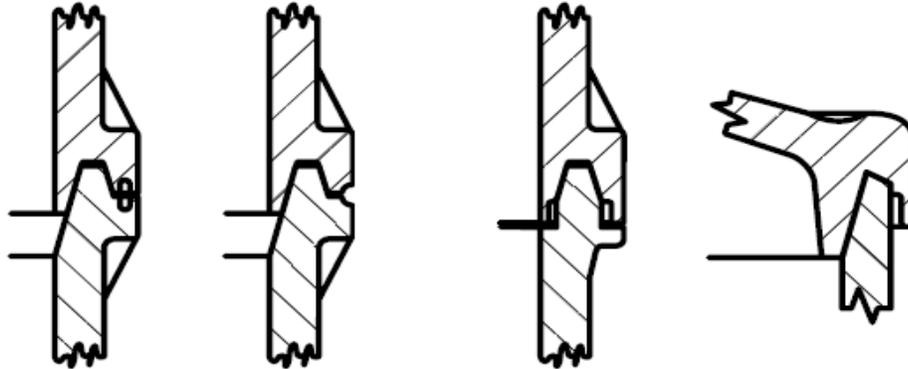


Figura 192. Junta de soldadura por giro con diseños de trampa de destello. (Campo, 2006, p.481).

4.4.1.8 Soldadura electromagnética.

La soldadura electromagnética de los componentes termoplásticos moldeados por inyección proporciona un método de montaje simple, rápido y fiable para producir sellos estructurales, herméticos o de alta presión en la mayoría de los materiales termoplásticos. Emplea los principios básicos del calentamiento por inducción mediante el desarrollo de la temperatura de fusión en la interfaz de soldadura de los componentes de la junta a soldar usando un compuesto electromagnético termoplástico inter-capa.

El proceso es lo suficientemente versátil como para soldar ciertos termoplásticos diferentes, papel y aluminio a termoplásticos, ya sean reforzados o no. La mayor parte de las resinas termoplásticas moldeadas por inyección de alto rendimiento de ingeniería pueden usarse, incluyendo materiales de soldadura tan difíciles como las poliolefinas.

La comprensión de los criterios de diseño para la soldadura electromagnética es esencial para el diseñador de nuevos productos. Comprende los materiales termoplásticos, los diseños de bobinas de inducción y los diseños de juntas electromagnéticas.

La soldadura de un componente termoplástico a otro se logra calentando por inducción un compuesto termoplástico electromagnético (capa) en la interfaz de unión a la temperatura de fusión de los componentes termoplásticos en contacto. Se obtiene un enlace químico dentro de este compuesto. La capa electromagnética consiste en una dispersión de polvos metálicos de tamaño micrométrico fino, tales como hierro, grafito de acero inoxidable o ferrita. Una matriz termoplástica desarrolla pérdidas de calor a partir de la concentración de carga en forma de corrientes parásitas y pérdidas por histéresis. Cuando el material compuesto completo está sometido a una fuente de corriente alterna de alta frecuencia (véase la Figura

193), el calor desarrollado en la carga funde la matriz termoplástica que, a su vez, funde el termoplástico a soldar.

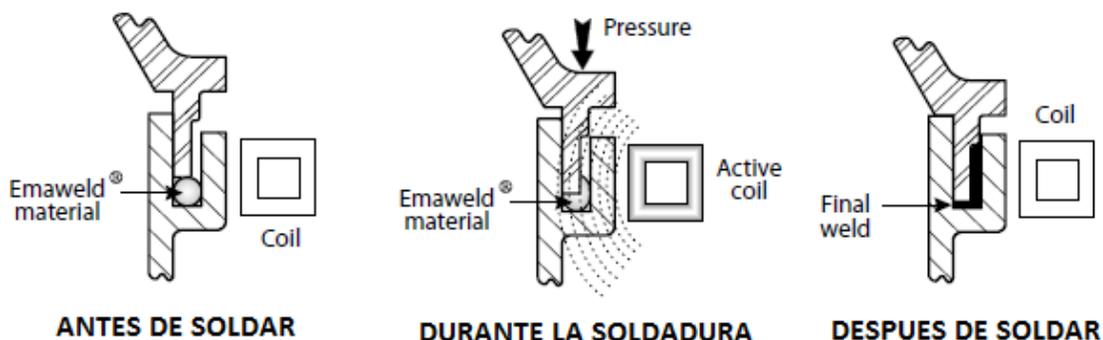


Figura 193. Principio de la soldadura electromagnética. (Campo, 2006, p.459).

Cuatro componentes básicos (ver Figura 194) comprenden el proceso de un generador de inducción que convierte el suministro eléctrico de 60 Hz de 3 a 40 MHz de frecuencia de salida. Los rangos más comunes son de 4 a 10 MHz con potencia de salida de 1 kW a 5 kW. Las bobinas son inductores de cobre refrigerados por agua que desarrollan la intensidad de campo magnético solicitada a través de la junta de soldadura. La fijación se utiliza para mantener las piezas y la junta de soldadura en su lugar en el campo magnético.

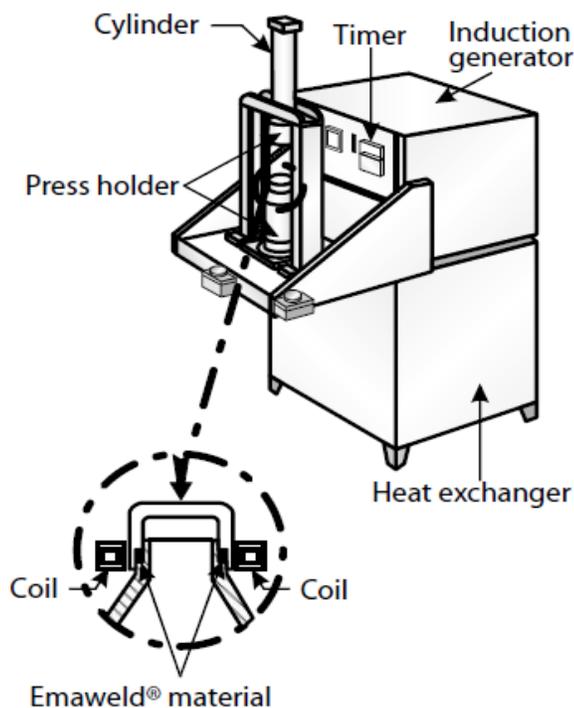


Figura 194. Proceso de soldadura electromagnética. (Campo, 2006, p.459).

Hay muchos enfoques para lograr el diseño apropiado de la junta, dependiendo de la aplicación, si la pieza es moldeada por inyección, moldeada por soplado, perfil extruido o termoformada. Idealmente, el diseño debe contener la capa de unión electromagnética haciendo que ejerza una presión interna sobre las superficies de apoyo a soldar.

La analogía es algo similar a llenar una cavidad en un molde de inyección. No debe ser insuficiente. La capa de unión electromagnética es calentada por inducción y debe transferir, por conducción, suficiente temperatura de fusión a la superficie de unión. Debido a que la capa de unión se fundirá cuando se calienta, fluirá en el camino de menor resistencia y llenará cualquier área vacía. Ver Figura 195.

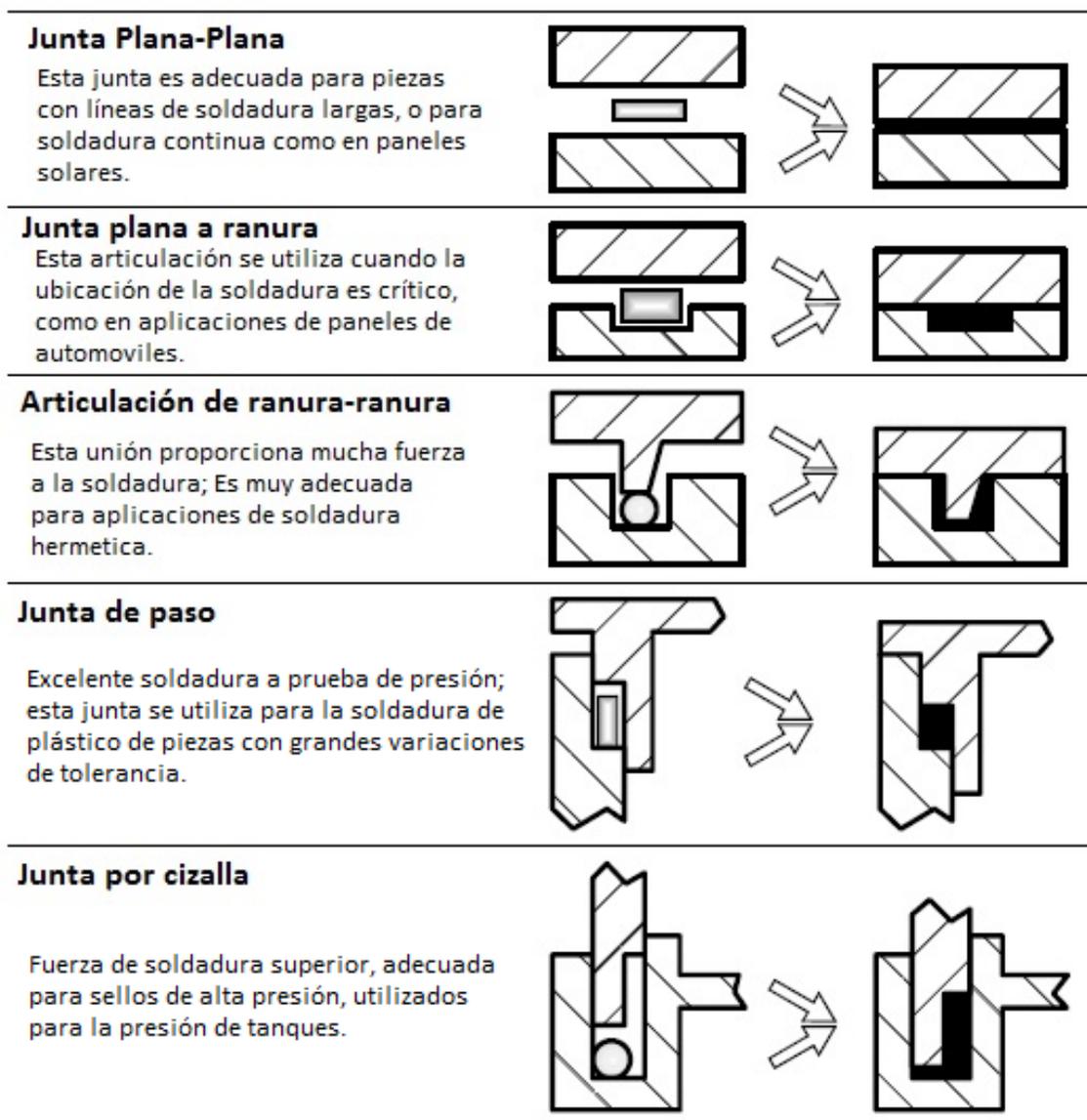


Figura 195. Diseños de juntas para soldadura electromagnética. (Campo, 2006, p.463).

Un diseño adecuado de la junta es esencial para el éxito final de la soldadura. Debido a que la junta de soldadura situada en la interfaz de la junta se funde cuando se activa, fluye bajo presión en ranuras y superficies irregulares para producir soldaduras confiables. Idealmente, el flujo fundido debe estar contenido y sometido a una presión interna contra la superficie de soldadura de apoyo.

La ecuación $A_E = A_G k$ (4-1) se usa para determinar la cantidad de material de unión requerido para llenar la junta:

$$A_E = A_G k \quad (4-1)$$

Dónde:

A_E = área transversal del material de unión

A_G = Área transversal de la ranura de la junta

K = Constante que varía de 1,02 a 1,05 dependiendo de la cantidad de presión de interfaz de la junta deseada

De la Figura 196 a la Figura 199, muestran ejemplos de configuraciones en detalle de articulaciones reales.

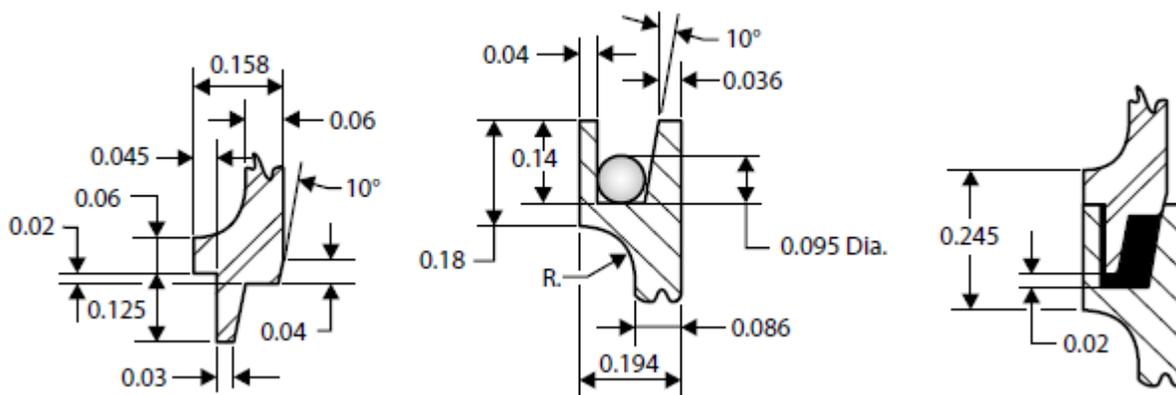


Figura 196. Unión de lengüeta y ranura. (Campo, 2006, p.464).

Un cálculo rápido mostrará que un factor de $k = 1,042$ fue aplicado en la Figura 197. La Figura 198 muestra cómo dos componentes diferentes se unen en una ranura doble de tres componentes; Los tres componentes termoplásticos moldeados por inyección se sueldan con una junta de soldadura durante un solo paso de energía electromagnética (Campo, 2006).

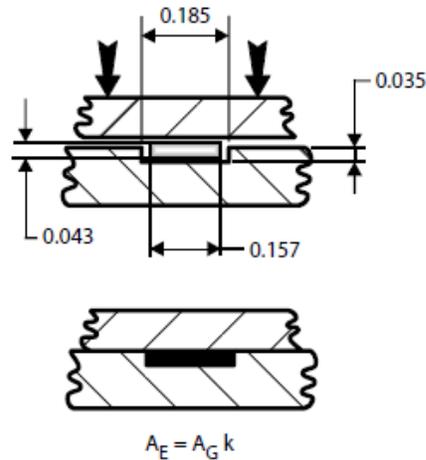


Figura 197. Junta plana-plana. (Campo, 2006, p.464).

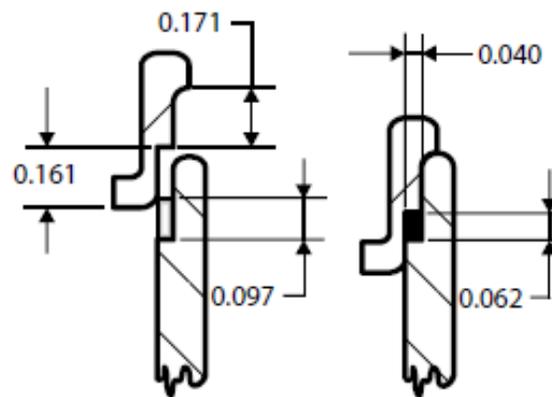


Figura 198. Junta de paso. (Campo, 2006, p.464).

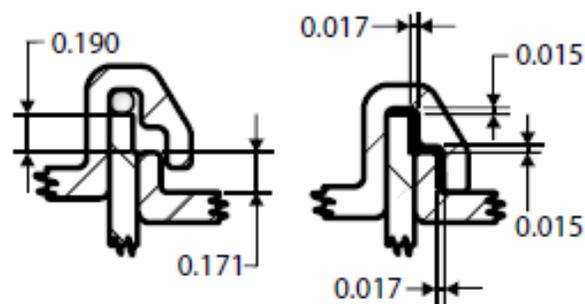


Figura 199. Junta por cizalla para tres componentes. (Campo, 2006, p.464).

4.4.2 Fijación removible.

Has ahora se han presentado métodos de unión permanente, pero es de vital importancia conocer los principios de los métodos para uniones removibles que son de gran uso en los ensambles de artículos plásticos.

4.4.2.1 Tornillos autorroscantes.

Los componentes termoplásticos moldeados por inyección se ensamblan frecuentemente con tornillos, pernos, tuercas, arandelas y muelles de bloqueo metálicos que son fiables y económicos. Algunos principios básicos de diseño deben aplicarse a los componentes termoplásticos moldeados por inyección que van a ser ensamblados con sujetadores. Los componentes termoplásticos bajo la cabeza del tornillo deben estar siempre bajo carga comprimida y nunca bajo tensión. La ilustración izquierda de la Figura 200 muestra un diseño deficiente, en el que el tornillo dobla la viga soportada, tensionando este miembro bajo la carga del tornillo. La ilustración derecha es el diseño recomendado, donde la carga del tornillo es distribuida por la arandela, comprimiendo la viga de soporte libre contra el saliente.

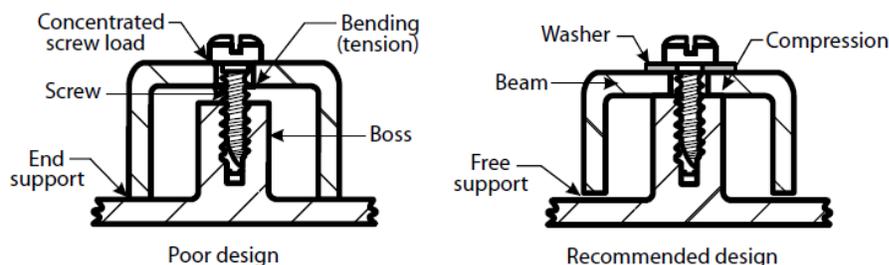


Figura 200. Tipo de carga causada por un tornillo autorroscantes. (Campo, 2006, p.428).

El diseño del saliente termoplástico depende del espesor de la pared del saliente, de la profundidad del diámetro interno del saliente, del módulo de elasticidad del material de resorte termoplástico, del tipo de tornillos autorroscantes, de la fuerza de extracción y del par de desgarramiento requerido para la aplicación. La Figura 201 muestra los parámetros básicos de los mandriles termoplásticos o salientes o “boss” para de los tornillos autopercutores.

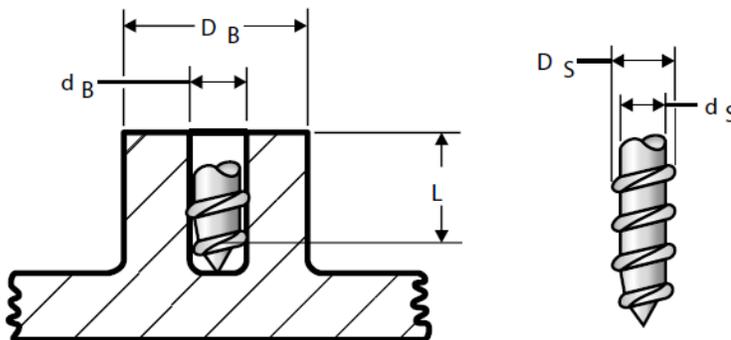


Figura 201. Diseño básico de sujeciones termoplásticas y tornillos autopercutores. (Campo, 2006, p.430).

Donde:

D_S = Diámetro principal del tornillo

d_S = Diámetro menor del Tornillo

D_B = Diámetro exterior *boss*

d_B = diámetro interior *boss*

L = profundidad total de tornillo a alojar.

- **Boss Diámetro interior (d_B):** Para obtener la máxima fuerza de extracción y el par de desmoldeo, se recomienda que el diámetro interno del saliente sea igual al diámetro de paso del tornillo autorroscantes.
- **Boss Diámetro exterior (D_B):** Se recomienda que el diámetro exterior del patín sea igual a 2,5 veces el diámetro principal del tornillo autorroscantes, o el diámetro recomendado para los tornillos autopercutores especiales. Si una pared del reborde es demasiado delgada, el saliente puede romperse y si la pared del reborde es demasiado gruesa, el saliente producirá un par de torsión inaceptable.
- **Tornillo Longitud Rosca de Enganche (L):** Los valores de fuerza de arrastre y par de apriete aumentan proporcionalmente a la rosca de acoplamiento hasta que la longitud alcanza 2,5 veces el diámetro exterior del tornillo. Esta longitud debe ser la distancia mínima utilizada para las aplicaciones de tornillo.

La fuerza de extracción de un tornillo autorroscantes montado en un saliente termoplástico puede aproximarse por la resistencia al cizallamiento de un cilindro que tiene el mismo diámetro que el diámetro del paso de tornillo y una longitud igual a la rosca de acoplamiento.

Las pruebas muestran que el aceite presente en un tornillo autorroscantes, una arandela o un resorte termoplástico que se va a montar puede causar una disminución del par de desmoldeo del 50%.

Ecuación de fuerza de extracción

$$\sigma_S = 0.577 \times \sigma, \quad A = \pi \times D_P \times L, \quad F = \sigma_S \times A$$

$$F = 0,577 \times \sigma \times \pi \times D_P \times L \quad (4-2)$$

Ecuación de par de separación

$$T = \frac{F \cdot D_P}{2} \left(\frac{P + \pi \cdot \mu \cdot v \cdot D_P}{\pi \cdot D_P - \mu \cdot p} \right) \quad (4-3)$$

Dónde:

F = Fuerza de extracción; T = Par de separación; σ_s = Tensión de corte;
 σ = Tensión de tracción; A = área de corte; D_p = diámetro del tono
 L = Enganche de longitud de rosca completa; μ = Coeficiente de fricción
 P = Recíproco de hilos por unidad de longitud

Un acoplamiento de rosca de longitud de al menos 2,5 veces el diámetro exterior del tornillo autorroscantes proporcionará una resistencia de extracción adecuada. La profundidad del diámetro interior del saliente debe incrementarse más allá del valor de acoplamiento para incluir las roscas parciales en el inicio del tornillo autorroscantes. Para los tornillos de rosca normal, la profundidad del diámetro interior del reborde también debe compensarse con las tolerancias de longitud tanto del tornillo como del orificio, el alivio de la tensión del aro en la cavidad, con 0.2 diámetros más para el juego de virutas. Además, el ángulo de desmoldeo para los orificios de los núcleos de los boss debe ser un máximo de 1° para evitar el exceso de la tensión del aro hacia el fondo del agujero (Campo, 2006).

4.4.2.2 Ensamble por interferencia o ajuste a presión.

Los métodos de ensamblaje o montaje por interferencia son universalmente aplicables para unir diferentes componentes hechos del mismo material, resinas termoplásticas diferentes o metales. El método de ajuste por interferencia no requiere equipo de soldadura ni ningún elemento extraño tal como adhesivo, sellador, cemento, expansor mecánico o inserto de metal. Aplicado correctamente, este método de ensamblaje produce juntas reparables con buena resistencia a un coste mínimo.

La Figura 202 y Figura 203 muestran dos aplicaciones de montaje ligero por interferencia.

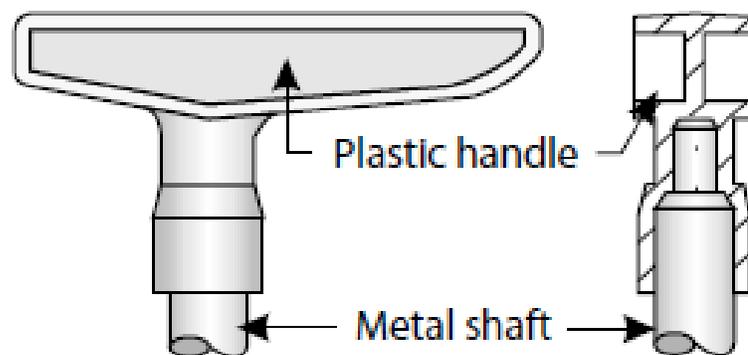


Figura 202. Mango a presión. (Campo, 2006, p.437).

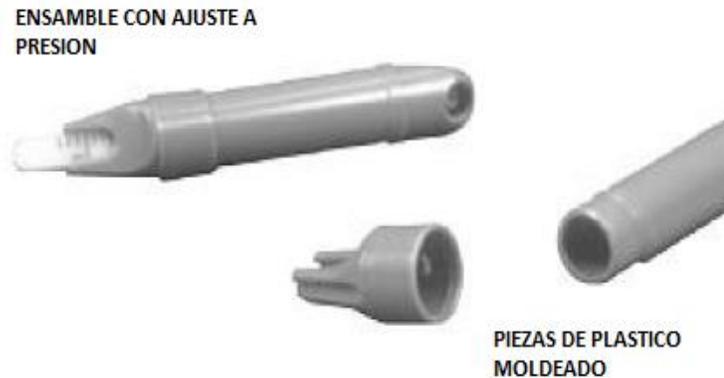


Figura 203. Manómetro de la llanta. (Campo, 2006, p.437).

El método de ensamblaje con montaje por interferencia para piezas termoplásticas moldeadas por inyección es similar al proceso de ajuste a presión usado por la industria del metal para unir diferentes componentes. Las dimensiones de holgura o de interferencia (incluidas las tolerancias) utilizadas para los componentes termoplásticos de ajuste a presión son generalmente mayores que las dimensiones requeridas para prensar metales. Se requieren dimensiones de interferencia más altas para compensar la menor resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y los efectos de fluencia de los materiales termoplásticos, en comparación con los metales.

Sin embargo, la propiedad de elongación de los termoplásticos es mayor que la de los metales; Por lo tanto, los componentes termoplásticos moldeados por inyección se pueden diseñar utilizando relaciones de deformación más altas que los valores recomendados para estos últimos. Las relaciones de deformación usadas para diseñar componentes termoplásticos moldeados por inyección dependen del diseño del producto, del módulo de elasticidad, de la temperatura ambiente y de las condiciones de humedad. Para la resistencia máxima de la junta en termoplásticos, las interferencias deben verse reflejadas en el diseño del producto, las propiedades mecánicas de la resina, las condiciones del proceso de moldeo, el sistema de inyección del molde utilizado para retirar las piezas moldeadas del molde (sin tensiones moldeadas) y las condiciones del proceso de montaje (fuerza de unión y velocidad).

Todos estos parámetros son necesarios para obtener una buena unión a presión sin tensionar el componente termoplástico más allá de su límite elástico. La relación teórica entre la interferencia y el nivel de tensión se basa en la geometría de la pieza y las propiedades mecánicas de la resina. La interferencia se puede calcular utilizando procedimientos estándar de análisis de tensiones.

La resistencia residual de la junta en las piezas termoplásticas moldeadas por inyección ajustadas a presión se ve afectada por variables complejas, como el módulo de elasticidad y el coeficiente de fricción. Para la mayoría de las resinas termoplásticas, las variaciones en el módulo de elasticidad se vuelven insignificantes después de un año y la resistencia de la junta es constante. Debido a que el coeficiente de fricción se ve afectado por la lubricación, la humedad, la temperatura y la tensión del bastidor, debe conocerse el coeficiente de fricción en cada una de estas condiciones para calcular con precisión la resistencia de las juntas de ajuste prensado. Cuando la resistencia a la torsión es crítica se deben proporcionar costillas alrededor de la protuberancia para distribuir la carga alrededor del eje. Cuando la tensión del aro es crítica, se deben usar costillas circulares. Cuando tanto el esfuerzo de torsión como el aro son críticos, un eje moleteado de diamante grueso o una combinación de ranuras para el eje y las costillas alrededor del cubo proporcionan una estructura buena y bien equilibrada.

Cuando las piezas de termoplástico moldeadas por inyección deben ajustarse a presión para obtener el máximo poder de sujeción inmediatamente después del moldeo, deben estar libres de tensiones por moldeo. Las tensiones moldeadas pueden reducirse recociendo la pieza moldeada en condiciones controladas, recomendadas por el proveedor de la resina. También en el diseño de tales uniones, las condiciones ambientales deben considerarse cuidadosamente. La expansión por calor y humedad se puede compensar diseñando el crecimiento esperado en las peores condiciones. Estos cambios dimensionales deben ajustarse además de la interferencia de prensado seleccionada para la resistencia de la junta deseada.

Las tensiones moldeadas en una pieza ajustada a presión pueden tender a promover el agrietamiento en algunos termoplásticos amorfos, como los acrílicos, el policarbonato y el poliestireno, lo que reduce la resistencia al impacto de estas resinas. Cuando una pieza moldeada se somete a cargas de impacto repetidas, se debe ejecutar un método de prueba de impacto similar a las condiciones de operación de uso final para determinar el rendimiento de la junta de ajuste prensado.

La Figura 204 muestra cómo los diseños de juntas de accesorios por interferencia de metal y termoplásticos afectan el rendimiento y la estructura de las piezas termoplásticas moldeadas, lo que provoca el fallo de los productos termoplásticos bajo cargas extremadamente altas.

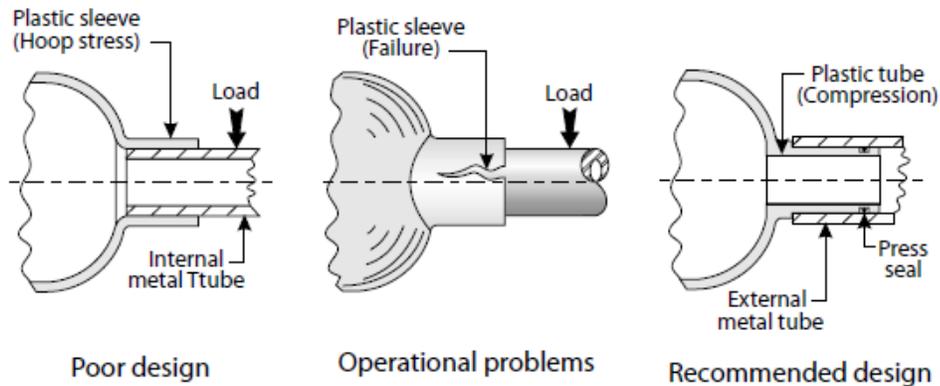


Figura 204. Diseño de junta de termoplástico y prensa de metal. (Campo, 2006, p.438).

La presión de ajuste de los cubos en los ejes no se limita solo a las partes metálicas. Las combinaciones de piezas de plástico a plástico y de plástico a metal ofrecen uniones confiables y herméticas a presión a costos moderados.

El *ajuste por contracción* es una variante de este método de ensamblaje para unir piezas moldeadas sin problemas de dimensiones de interferencia. Las interferencias para el ajuste por contracción se determinan agregando la tasa de contracción del molde termoplástico al cubo, el diámetro del eje y la expansión térmica del eje. El método de montaje de ajuste por contracción aprovecha las propiedades de reducción de volumen (contracción del molde) de la pieza moldeada inmediatamente después del moldeo (etapa de enfriamiento), mientras que la pieza moldeada aún está caliente (casi la misma temperatura de la cavidad del molde). En este momento, la parte termoplástica moldeada en caliente continúa su proceso de enfriamiento, la estructura geométrica del polímero retrocede (expansión del volumen del polímero durante la plastificación) a su estructura original (organizada, orientada, reducida y pequeña).

Esta tasa de expansión y contracción del polímero se conoce como la tasa de contracción del molde. La pieza moldeada en caliente inmediatamente después del moldeo ya ha recuperado más del 50% de su tasa de contracción durante su primera etapa de enfriamiento dentro de la cavidad del molde. La contracción restante del molde (reducción de tamaño final) de la pieza termoplástica caliente continúa cuando la pieza se expulsa del molde, hasta que la pieza se enfría a temperatura ambiente.

El proceso de ajuste por contracción comienza cuando la parte caliente (inmediatamente después del moldeo) se presiona en el eje (precalentando el eje a la misma temperatura de la parte inmediatamente después de ser expulsado del molde a la máxima temperatura

recomendada). Los cubos calientes y los ejes se colocan en un área bien ventilada para el enfriamiento y se alinean para que ambos lados del concentrador se enfríen a la misma velocidad. No debe aplicar ningún esfuerzo mecánico o permitir que se enfríe el cubo.

Para desmontar el ajuste por contracción, el eje puede enfriarse o el cubo puede calentarse para reducir la interferencia. El cambio de temperatura requerido se puede calcular por el método habitual, utilizando el coeficiente de expansión térmica lineal para las resinas involucradas (Campo, 2006).

4.4.2.3 Encaje o ajuste a presión.

El encaje a presión proporciona un medio simple, económico y rápido para unir piezas termoplásticas a otros materiales plásticos o metales. Un encaje a presión es fuerte, pero generalmente no es apretado a presión, a menos que otras características, como un sello de compresión, estén incorporadas en el diseño de la junta.

Los diseñadores pueden reducir drásticamente los costos de producción y componentes en la fijación y el ensamblaje de piezas plásticas y no plásticas aprovechando las posibilidades de diseño de los termoplásticos. La flexibilidad y la “elasticidad” de los termoplásticos permiten diseños simples y eficientes. Además, la capacidad de moldear sujetadores o elementos de unión integralmente con una pieza termoplástica ahorra hardware y operaciones de ensamblaje adicionales.

Los ajustes a presión se pueden dividir en dos categorías distintas. El primero es por juntas de encaje circular completo a presión, internas o externas, que se expulsa al extraer la pieza de un núcleo cargado por resorte del molde, por lo que se requiere la tasa de deformación correcta del material para alargar la pieza moldeada para retirarla del molde. El segundo está formado por vigas de enganche en voladizo anulares o planas individuales (Campo, 2006).

4.4.2.3.1 Juntas de encaje a presión circulares.

Los productos termoplásticos moldeados por inyección pueden tener retenciones o cambios de sección por razones funcionales o por efectos decorativos. Cuando las retenciones en un producto moldeado tienen chaflanes y son menores que el grosor de la pared y la tensión requerida para la retención es baja, es posible que se pueda extraer o expulsar el producto de la cavidad del molde de manera forzada. Sin embargo, cuando se contempla esto, el molde debe diseñarse para garantizar que la expulsión tenga lugar solo cuando el producto

moldeado de pared delgada esté libre para expandirse o comprimirse. En tales casos, puede ser necesario proporcionar al molde un anillo o placa de expulsión, en lugar de pasadores de expulsión.

La expulsión de una retención del molde por lo general no presenta problemas, siempre que la pieza y el molde estén diseñados y dimensionados correctamente. Debido a que la resina todavía está a una temperatura relativamente alta, el módulo de elasticidad es bajo y el alargamiento alto.

A menudo, una retención que se ha expulsado correctamente del molde se agrietará durante la operación de ensamblaje. Esto puede ser causado por puntos débiles, como líneas de soldadura, puntos de inyección o huecos internos al material (burbujas). Por lo tanto, un punto de inyección o "gate" nunca debe colocarse cerca de una retención. Este tipo de rotura puede ocurrir incluso mucho tiempo después de que se haya realizado el montaje debido a la excesiva contracción posterior del artículo moldeado.

Sin embargo, hay una gran cantidad de aplicaciones en las que las retenciones a presión han demostrado ser simples, económicas y confiables.

La Figura 205 y Figura 206 muestran aplicaciones típicas en las que se utilizan estas retenciones en accesorios de ajuste circular sección baja.

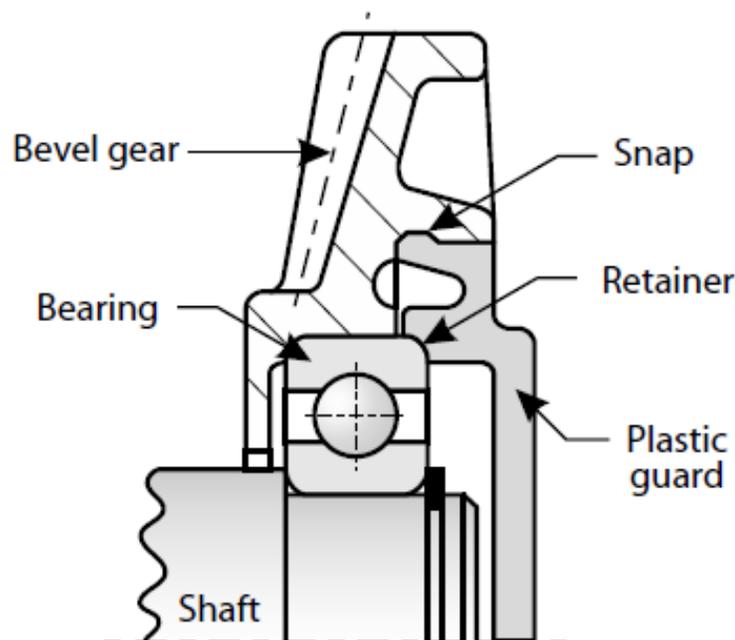


Figura 205. Encaje a presión de guarda plástica para rodamiento. (Campo, 2006, p.445).

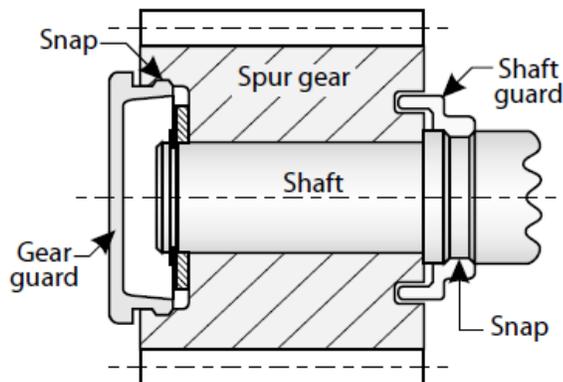


Figura 206. Encaje a presión de guardas plásticas para engranaje. (Campo, 2006, p.445).

Estas retenciones pueden tener diversas formas. La Figura 207 muestra un mal diseño de una rótula de ajuste a presión; los conos de presión son demasiado rígidos para quitarlos del molde o para instalar la rótula. Se recomienda el uso de cuatro troncos o secciones cónicas de presión de espesor de pared uniforme y una entrada cónica de 30° sin esquinas afiladas.

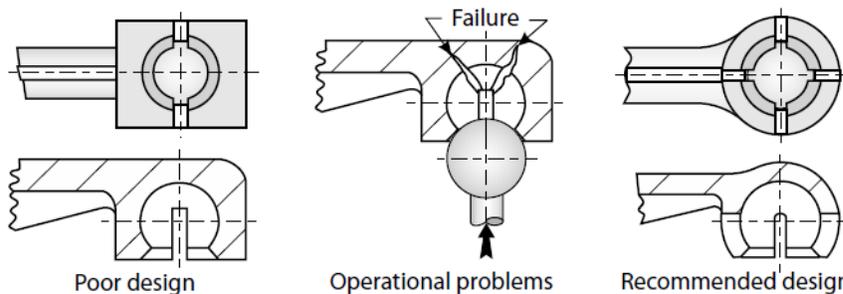


Figura 207. Diseños Rótula circular de encaje a presión. (Campo, 2006, p.445).

La Figura 208 muestra la pared vertical que restringe la expansión de la junta, lo que dificulta el ajuste a presión del eje. Se recomienda reubicar la pared hacia la parte posterior (Campo, 2006).

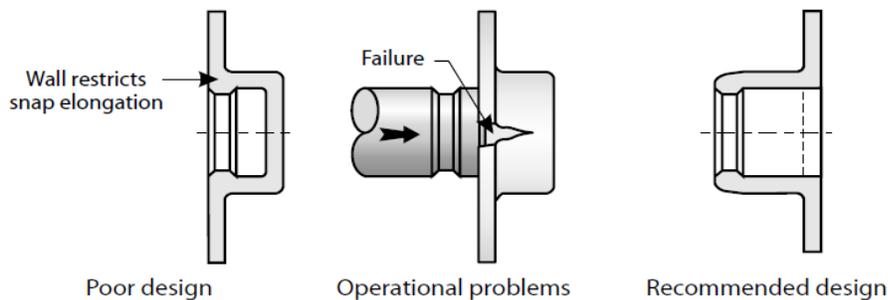


Figura 208. Diseños de juntas de ajuste a presión circular. (Campo, 2006, p.445).

Sugerencias para expulsar el ajuste circular de enganche rápido

- El producto termoplástico retenido debe ser libre de estirarse o comprimirse.
- La retención debe redondearse y achaflanarse para permitir un fácil deslizamiento del producto termoplástico sobre el núcleo del molde y para minimizar la concentración de tensión durante la acción de expulsión.
- Se debe proporcionar un área de contacto de expulsión en el molde, adecuada para evitar la penetración o el colapso del producto termoplástico de pared delgada durante la acción de extracción.
- Se puede producir alguna deformación permanente cuando se despega la retención. La deformación depende de las variables del producto termoplástico, el diseño del molde y el proceso de moldeo por inyección. En algunos casos esta deformación es permisible para el buen funcionamiento del artículo e incluso pueden no afectar la apariencia física o por lo menos ser difícil de detectar.
- **Resinas de homopolímeros de acetal POM:** es posible extraer los artículos de homopolímeros de acetal con retenciones, moldeados por inyección, de las cavidades o núcleos del molde, consulte la Figura 209 y la Figura 210, si las retenciones son menores al 5% del diámetro y tienen un cono de 30°.
- **Resinas de nailon 6/6 no reforzadas:** los productos de nailon 6/6 moldeados por inyección que tienen entre un 6% y un 10% de retención en el diámetro y un cono de 30° se pueden extraer de un molde. Para calcular los recortes permitidos (que varían con el grosor y el diámetro), consulte la Figura 209 y Figura 210.

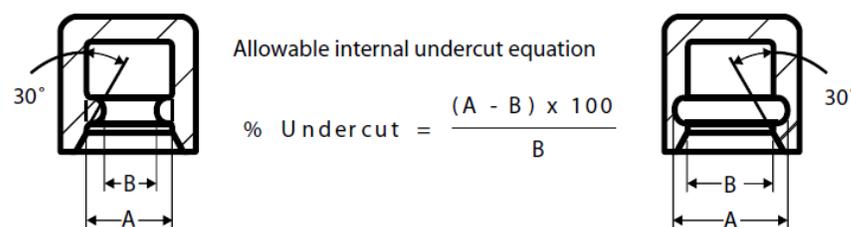


Figura 209. Diseños de enganches circulares internos para ajuste a presión. (Campo, 2006, p.446)

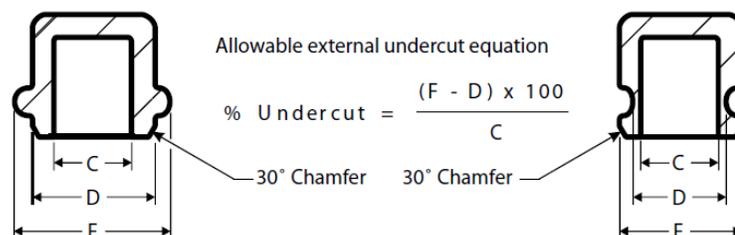


Figura 210. Diseños de enganches circulares externos para ajuste a presión. (Campo, 2006, p.446).

- **Resinas no reforzadas:** las resinas termoplásticas que tienen propiedades de alto alargamiento podrían producir componentes con ajuste a presión internos circulares utilizando las pautas de diseño generales que se muestran en la Figura 211. Para calcular la retención a usar para un material específico, las dimensiones indicadas en la Tabla 25 deben verificarse utilizando la tensión permisible y la estructura cristalina del material en cuestión (Campo, 2006).

Tabla 25.

Profundidad de enganche circular interno.

D (in) Diámetro externo	B (in) Diámetro interno	t (in) Profundidad ranura
0.197	0.078	0.0019
0.315	0.118	0.0019
0.394	0.157	0.0039
0.433	0.197	0.0039
0.669	0.394	0.0078
0.866	0.590	0.0135
1.102	0.787	0.0196
1.299	0.984	0.0255

Campo, 2006, p.447.

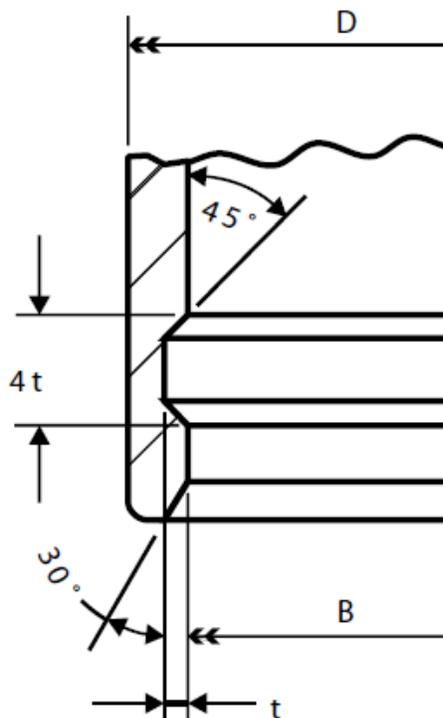


Figura 211. Sección del perfil de enganches circulares internos de fijación. (Campo, 2006, p.446).

4.4.2.3.2 Junta de encaje a presión en voladizo.

La segunda categoría en la que se pueden clasificar los ajustes a presión se basa en pestillos en voladizo, cuya fuerza de retención es esencialmente una función de la rigidez a la flexión. En realidad, son aplicaciones de resortes o aletas especiales, que están sometidas a una alta tensión de flexión durante el montaje. En condiciones de trabajo, los ojales o alojamientos se descargan completamente o se distorsionan permanentemente para las partes móviles para lograr un ensamblaje apretado. Los broches o aletas de presión proporcionan una sujeción fuerte y confiable.

Los broches de presión con pestillo o aleta en voladizo generalmente se moldean a partir de polipropileno, polietileno, nailon, acetal, policarbonato o elastómeros termoplásticos. Estos materiales son particularmente útiles porque, al ser algo elásticos, permiten uniones a presión más ajustadas y seguras que dependen de la fricción y el enganche que se pueda lograr. Los cambios en la temperatura y el contenido de humedad afectan las dimensiones y la fricción de funcionamiento.

Los cierres en voladizo siempre deben diseñarse de manera que no excedan los esfuerzos permitidos durante la operación de montaje. Una longitud de curvatura demasiado corta puede causar roturas, que se pueden corregir utilizando aletas flexibles considerablemente más largas.

Los pestillos o aletas de ajuste a presión en voladizo siempre deben dimensionarse para obtener una distribución de tensión constante en toda la longitud. Esto se puede lograr proporcionando una viga ligeramente cónica. Se debe tener especial cuidado para evitar esquinas filosas y otras posibles concentraciones de esfuerzo o estrés.

Los cierres en voladizo moldeados por inyección son el tipo más común de dispositivos utilizados para ensamblar componentes termoplásticos. El mecanismo de enganche es simple: un labio o bola al final de una palanca elástica se engancha en un labio o zócalo integrado en la superficie de acoplamiento. El diseño requiere un equilibrio de rigidez y flexibilidad, con suficiente resistencia para soportar la deflexión durante el enclavamiento y desbloqueo sin daño. Un diseño deficiente puede resultar en un conjunto permanente de sobrecargas o grietas en la base de la palanca.

De la Figura 212 a la Figura 216 y Figura 217 muestran los diseños típicos de encaje a presión de latón en voladizo termoplástico moldeado por inyección.

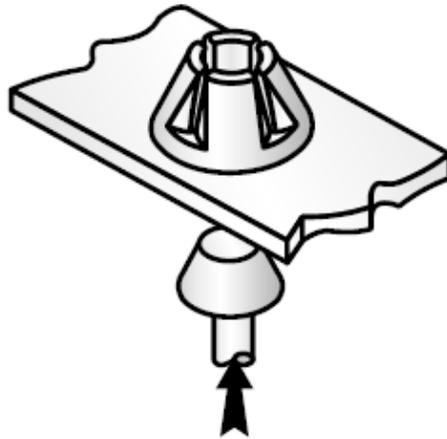


Figura 212. Enganches cónicos en voladizo para unión a presión permanente. (Campo, 2006, p.447).

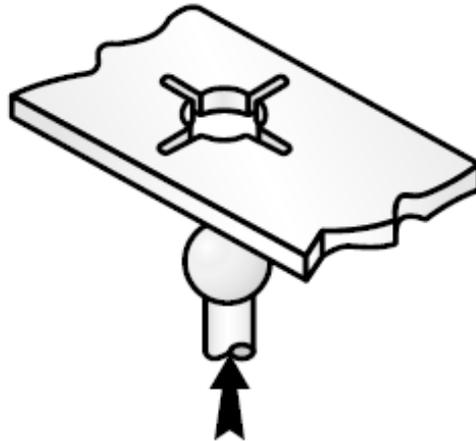


Figura 213. Enganches esféricos en voladizo para unión a presión permanente. (Campo, 2006, p.447).

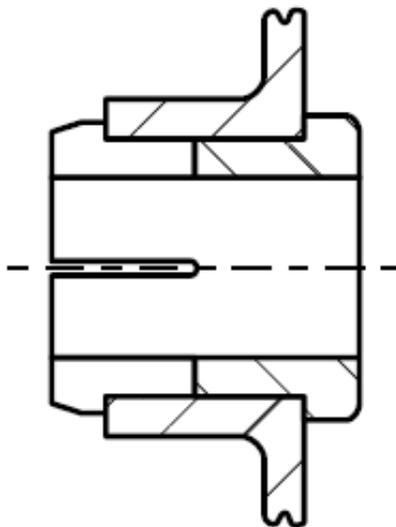


Figura 214. Enganches anulares de encaje a presión en voladizo. (Campo, 2006, p.447).

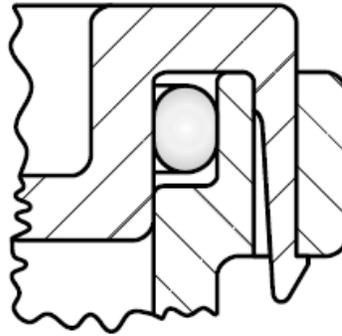


Figura 215. Válvula de presión, pestillo en voladizo con ajuste a presión y anillo en "O". (Campo, 2006, p.447).

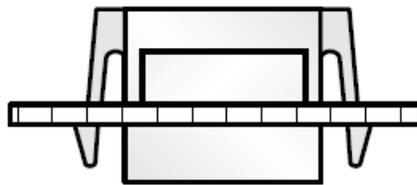


Figura 216. Conmutador montado mediante pestillos en voladizo a presión. (Campo, 2006, p.447).



Figura 217. Dispositivo con dos pestillos en voladizo a presión. (Campo, 2006, p.447).

Las diversas posibilidades de diseño se han reducido a unas pocas formas básicas y se han desarrollado principios de cálculo para los siguientes diseños básicos: pestillos de ajuste rápido en voladizo, uniones de ajuste a torsión y cierres de ajuste a presión anulares en voladizo. Con los pestillos de ajuste a presión en voladizo, la carga es principalmente de flexión. En las uniones a presión de torsión, las tensiones de corte soportan la carga. Los pestillos de ajuste a presión anulares en voladizo son simétricos a la rotación e involucran esfuerzos multiaxiales.

La Figura 218 muestra un dispositivo termoplástico moldeado por inyección con cuatro pestillos de ajuste a presión en voladizo que sostienen el componente de acoplamiento firmemente en su lugar, permitiendo que el dispositivo se retire cuando sea necesario.

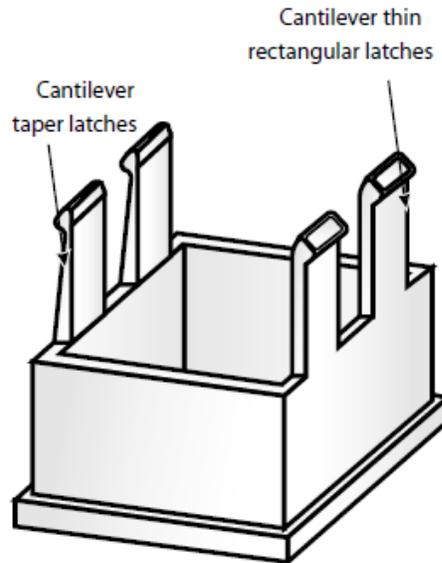


Figura 218. Dispositivo de plástico con cuatro pestillos de encaje a presión en voladizo. (Campo, 2006, p.448).

También se puede hacer una junta de ajuste a presión económica y confiable utilizando orejetas rígidas en un lado, en combinación con pestillos de ajuste a presión en voladizo en el otro lado. Este diseño es particularmente efectivo para unir dos mitades similares de una carcasa que deben separarse fácilmente. La Figura 219 muestra cómo funcionan estos cuatro cierres.

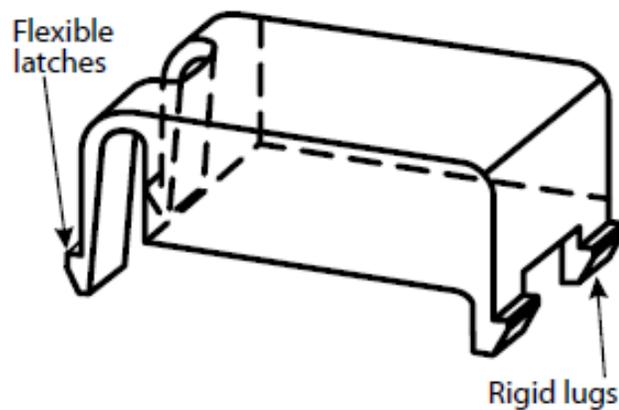


Figura 219. Combinación de dos pares de pestillos a presión. (Campo, 2006, p.448).

La Figura 220 muestra un cierre de ajuste a presión en voladizo mal diseñado con esquinas afiladas en la base. Esto causa la rotura de la base de la palanca de presión durante la carga del componente en el ensamblaje. El diseño recomendado muestra el pestillo de ajuste a presión en voladizo con una barra de flexión similar a un resorte sin concentración de tensión.

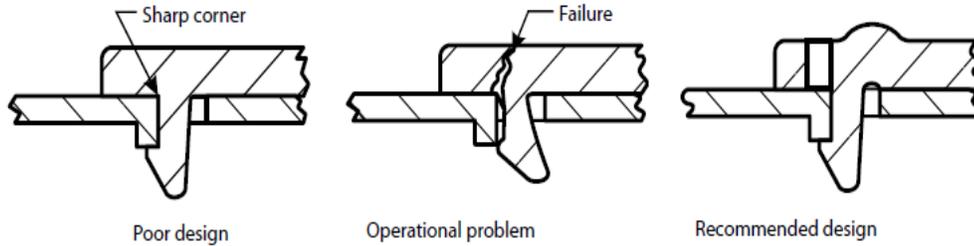


Figura 220. Diseños de pestillo a presión en voladizo. (Campo, 2006, p.448).

La Figura 221 muestra un diseño deficiente de dos pestillos de ajuste a presión en voladizo doble que están conectados, lo que hace que la estructura sea rígida e incapaz de doblarse. El diseño recomendado tiene dos cierres de ajuste a presión en voladizo separados conectados en la base con un generoso radio de filete.

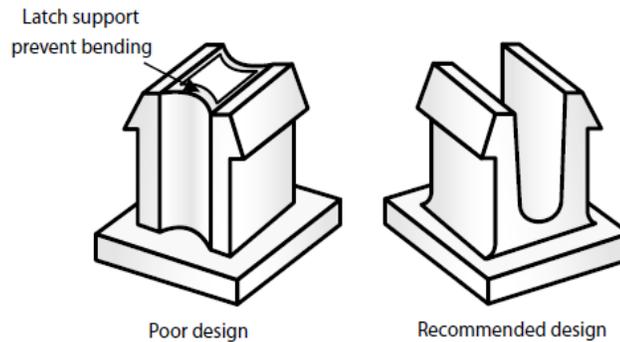


Figura 221. Diseños de pestillo de doble ajuste en voladizo. (Campo, 2006, p.448).

La Figura 222 muestra un dispositivo circular con pestillos de ajuste a presión anulares en voladizo para un ensamblaje permanente; estos pestillos tienen un tope de 90° para bloquear la cubierta redonda en su lugar y un chaflán de 30° en la base para ayudar al montaje. Los pestillos anulares en voladizo son flexibles, redondos, de anchos uniformes y distribuidos proporcionalmente, lo que se requieren para el ensamblaje.

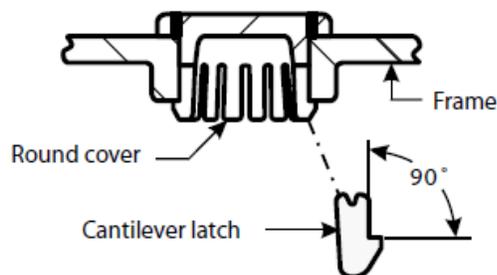


Figura 222. Diseño de enganches anulares en voladizo para fijación permanentes a presión. (Campo, 2006, p.448).

La Figura 223 muestra un tapón redondo con pestillos de ajuste a presión anulares en voladizo utilizados en aplicaciones que requieren que el tapón sea removible; estos cierres tienen una inclinación de 45° para mantener el dispositivo en su lugar y un chaflán de 30° en la base para ayudar al ensamblaje. Este tipo de diseño es muy usado en la industria automotriz para tapar perforaciones de cables y alojamientos de tornillos en los tableros y partes plásticas en general.

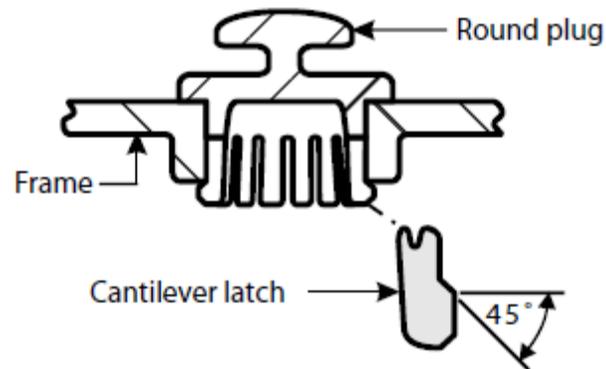


Figura 223. Diseño de enganches anulares en voladizo para fijación removible a presión. (Campo, 2006, p.449).

La Figura 224 muestra seis pestillos de ajuste a presión anulares en voladizo que son muy flexibles, redondeados con un ancho uniforme, distribuidos proporcionalmente, con un generoso radio de filete entre cada sección inferior del pestillo; Todos estos detalles son necesarios para el montaje.



Figura 224. Dispositivo de plástico con seis pestillos anulares de ajuste a presión en voladizo. (Campo, 2006, p.449).

La Figura 225 muestra una cubierta de la válvula del calentador asegurada en su lugar mediante pestillos de ajuste a presión anulares en voladizo.

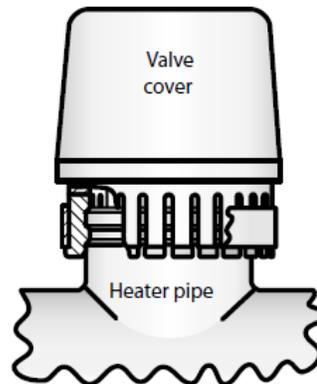


Figura 225. Ejemplo de tapa de válvula de calentador con pestillos de ajuste a presión anulares. (Campo, 2006, p.449).

La Figura 226 muestra un engranaje de tornillo sin fin dividido en homopolímero de acetal moldeado por inyección. Las dos mitades de los engranajes helicoidales están diseñadas de tal manera que cada componente se moldea por inyección utilizando la misma cavidad de molde. Las dos mitades del engranaje helicoidal se montan en el post-moldeo girando 180°, una frente a la otra, alineando las dos clavijas con los orificios y presionando ambos componentes hasta que se encajen a presión en cuatro ubicaciones. Los cuatro pestillos de ajuste a presión anulares en voladizo proporcionan una fuerte fuerza de acoplamiento con una buena alineación anular en el ensamblaje de ambas mitades de tornillo sin fin (Campo, 2006).

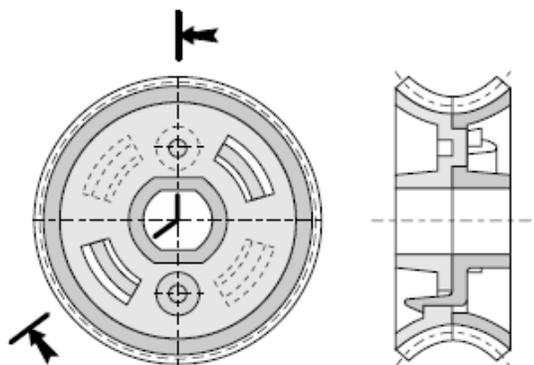


Figura 226. Ejemplo de engranaje helicoidal partido montado con cuatro enganches anulares anulares. (Campo, 2006, p.449).

4.4.2.3.3 Pautas de diseño de pestillo de ajuste a presión en voladizo.

De los métodos vistos el más económico para ensamblar componentes termoplásticos es con pestillos de ajuste a presión en voladizo. Aunque son simples en apariencia, los ajustes a

presión requieren un análisis de diseño completo para lograr un rendimiento funcional y estabilidad estructural.

Los ajustes a presión en voladizo se han aplicado con éxito en diversas industrias, desde juguetes hasta automóviles, desde electrodomésticos hasta televisores, construcción de ingeniería eléctrica y máquinas comerciales. Igualmente, importante para el ingeniero de diseño es la selección y evaluación de la resina termoplástica adecuada.

En todos los diseños de pestillo de ajuste a presión en voladizo, se supone que una de las piezas de acoplamiento permanece rígida. Si los dos componentes tienen una rigidez aproximadamente igual, se puede asignar la mitad de la deflexión a cada parte. Si un componente es más rígido que el otro, la fuerza disponible se puede utilizar al máximo.

El objetivo del diseño es desarrollar una geometría de cierre en voladizo para la resina específica que se utiliza, que puede resistir y recuperarse de la tensión producida en el cierre en voladizo durante la deflexión. Esa tensión generalmente se calcula a partir de la ecuación de luz en voladizo estándar para una luz de sección transversal rectangular o cónica.

Los estudios de análisis estructural de elementos finitos muestran que las tensiones causadas por la deflexión tienden a concentrarse en la sección o zona de la raíz de la viga en voladizo (el punto donde se une a la pared de soporte estructural) y pueden producir grietas en esta sección por la operación de carga repetida de la viga. El generoso radio de relleno de la raíz ayudará con la concentración de la tensión, además, un espesor de pared cónico ayudará a distribuir uniformemente el nivel de tensión máxima en la viga en un 25% o más.

Un objetivo importante es evitar que la viga en voladizo tome una deformación permanente o retenga la deflexión residual después de doblarla. ¿Cuánta desviación residual, si la hay, se produce y se ve afectada por la relación entre la longitud de la viga y el espesor de su pared? Cuanto menor sea la relación, mayor será la tensión que la viga puede soportar sin tomar una deformación permanente. La cantidad de estrés que se puede tolerar hasta el punto de fluencia depende no solo del polímero básico, sino también de los aditivos utilizados para reforzar o conformar las resinas termoplásticas.

La Figura 227 muestra cómo una viga en voladizo de sección transversal cónica aleja las tensiones del área de la raíz en comparación con una viga uniforme rectangular (Campo, 2006).

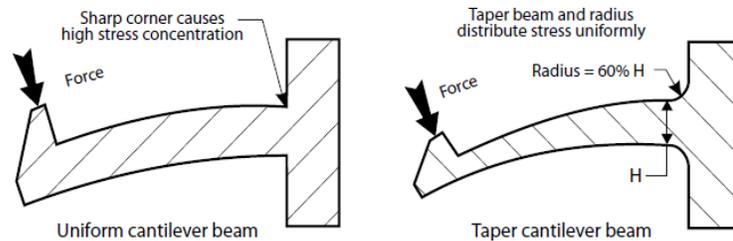


Figura 227. Vigas de cierre a presión en voladizo, diferencias de diseño. (Campo, 2006, p.450).

Modelo matemático de encaje en voladizo.

Existe una amplia gama de posibilidades de diseño para uniones de pestillo de ajuste a presión en voladizo. En vista de su alto nivel de flexibilidad, las resinas termoplásticas de moldeo por inyección y un buen diseño de producto son ideales para este método de ensamblaje. La Figura 228 muestra un modelo matemático para un haz de enganche en voladizo con una anchura y longitud cónicas utilizadas en el desarrollo de ecuaciones.

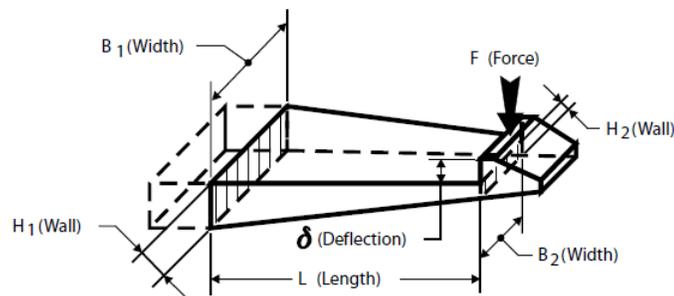


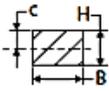
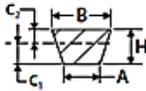
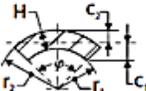
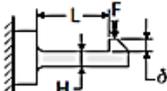
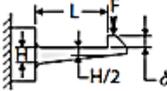
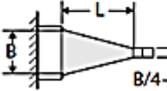
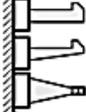
Figura 228. Modelo matemático de cierre a presión en voladizo. (Campo, 2006, p.450).

Los diseños de las juntas de ajuste a presión en voladizo tienen en cuenta el hecho de que, durante breves períodos, están sujetos a cargas mecánicas muy altas. Esto significa que el comportamiento de tensión / deformación del material ya está fuera del rango elástico lineal y el módulo de elasticidad debe ser reemplazado por el módulo secante dependiente de la deformación.

Las juntas de ajuste a presión son básicamente vigas de enganche a presión en voladizo simple (consulte la Tabla 26), que tienen secciones transversales rectangulares, trapezoidales o anulares. Se recomienda que las vigas en voladizo se diseñen de manera que el grosor de la pared o el ancho se reduzcan desde la raíz hasta el cierre rápido con un valor al final del 50% del valor de la raíz. Esta técnica de diseño permite que la sección transversal del soporte de carga (en cualquier punto) distribuya la tensión de manera uniforme. La tensión máxima en el haz termoplástico moldeado por inyección se reduce y se requiere menos material termoplástico para la aplicación (Campo, 2006).

Tabla 26.

Ecuaciones para Vigas Cantiléver o voladizo.

Cross section	Rectangle	Trapezoid	Annular
			
Design type	Permissible deflection		
Equal cross section			
	$\delta = 0.67 \times \frac{\epsilon \times L^2}{H}$ $\delta = \frac{4 \times F \times L^3}{B \times H^3 \times E}$	$\delta = \frac{B + A}{2B + A} \times \frac{\epsilon \times L^2}{H}$	$\delta = C_2 \times \frac{\epsilon \times L^2}{r_2}$
Taper cross section			
	$\delta = 1.09 \times \frac{\epsilon \times L^2}{H}$ $\delta = \frac{6.5 \times F \times L^3}{B \times H^3 \times E}$	$\delta = 1.64 \frac{B + A}{2B + A} \times \frac{\epsilon \times L^2}{H}$	$\delta = 1.64 \times C_2 \frac{\epsilon \times L^2}{r_2}$
Tapered beam width			
	$\delta = 0.86 \times \frac{\epsilon \times L^2}{H}$ $\delta = \frac{5.15 \times F \times L^3}{B \times H^3 \times E}$	$\delta = 1.28 \frac{B + A}{2B + A} \times \frac{\epsilon \times L^2}{H}$	$\delta = 1.28 \times C_2 \times \frac{\epsilon \times L^2}{r_2}$
	Deflection force		
	$Z = \frac{B \times H^2}{6}$ $F = Z \times \frac{E_s \times \epsilon}{L}$	$Z = \frac{H^2}{12} \times \frac{B^2 + 4BA + A^2}{2B + A}$ $F = Z \times \frac{E_s \times \epsilon}{L}$	$F = Z_2 \times \frac{E_s \times \epsilon}{L}$

δ = Bending deflection permissible
 ϵ = Permissible strain percentage at the root of the beam
 L = Length of the cantilever latch beam
 H = Wall thickness at the root
 B = Upper width at the root
 A = Lower width at the root
 c = Distance between outer fiber and neutral axis (center of gravity)
 I = Axial moment of inertia

Z = Section modulus, $Z = I / c$
 E_s = Secant modulus of the material
 F = Permissible deflection force
 W = Assembly force
 Z_2 = Annular modulus cross section
 C_1 = Annular concave cross section
 C_2 = Annular convex cross section
 μ = Coefficient of friction
 ϕ = Angle of inclination
 φ = Annular angle of concave width

Notas:

Si la tensión de tracción se produce en la superficie convexa, use C2 en la **Figura 228** para determinar C1 y use C2 si ocurre en la superficie cóncava; utilice C1 en consecuencia.

(c) es la distancia entre la fibra exterior y el centro de gravedad (un eje neutro) en la superficie sometida a esfuerzo de tracción.

El módulo de sección debe determinarse para la superficie sujeta a tensión de tracción. El módulo de sección para una sección transversal anular se muestra en la Figura 8-80; use el nomograma para determinar el módulo anular (Z2). El módulo de sección para otras formas geométricas básicas se puede encontrar en los manuales de ingeniería mecánica. (Campo, 2006, p.451).

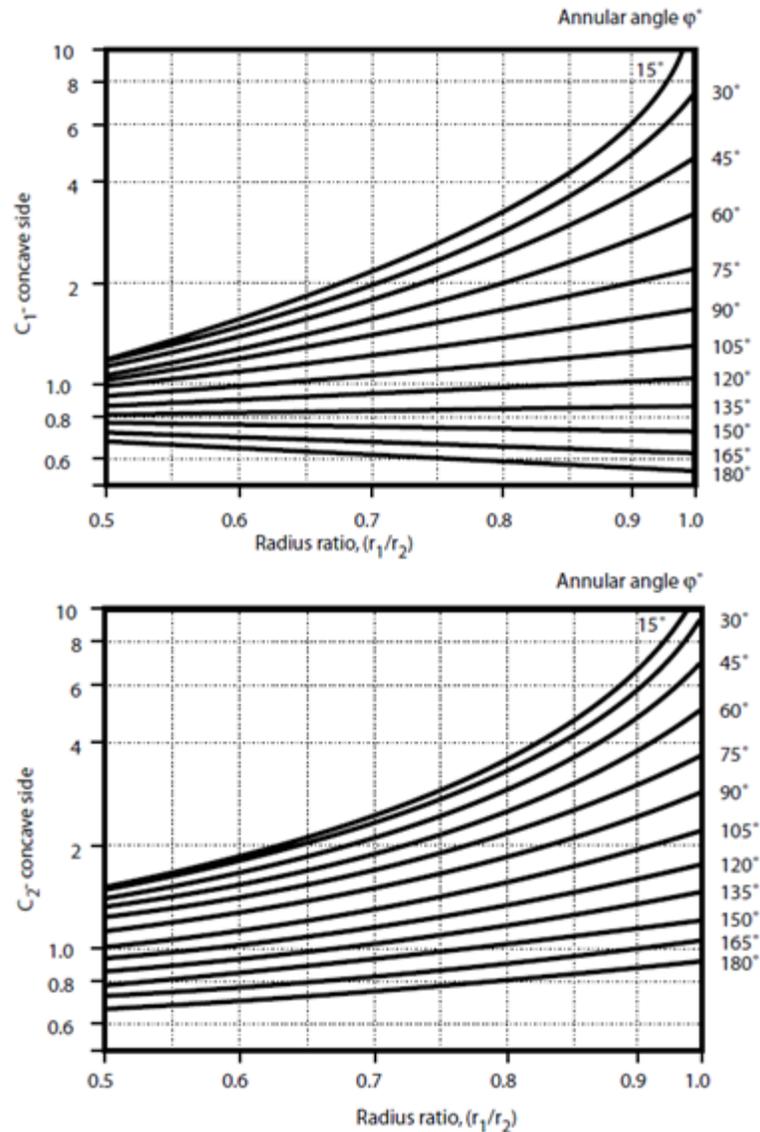


Figura 229. Curvas anulares para determinar C_1 y C_2 , constantes de la Tabla 27. (Campo, 2006, p.456).

4.4.2.3.4 Flexión admisible para retenciones en voladizo (δ).

La deflexión (δ) que ocurre durante la operación de ensamblaje es igual a la profundidad del pestillo (la profundidad de la retención). La deflexión permisible (δ) depende no solo del tamaño y la geometría del enganche a presión y de la luz del voladizo, sino también de la relación de deformación permisible de la resina termoplástica de moldeo por inyección utilizada para la aplicación.

Un buen diseño de enganche a presión de viga en voladizo, moldeado sin esfuerzos y con un termoplástico no reforzado con buenas características de velocidad de resorte, funciona

sin problemas durante la breve operación de ajuste a presión. Una fusión parcialmente cristalina (problemas de moldeo) se puede estresar casi hasta el punto de rendimiento (probablemente falla), durante la operación de ajuste a presión. Cuando se diseña con materiales termoplásticos semicristalinos no reforzados, se recomienda utilizar hasta el 70% del límite de deformación, mientras que para las resinas amorfas solo se utilizará el 50% del límite de ruptura, debido a que las curvas de tensión / deformación de las resinas amorfas no tienen bien definidos los límites de fluencia. La Figura 230 muestra las curvas de deformación permisibles para estos tipos de polímeros.

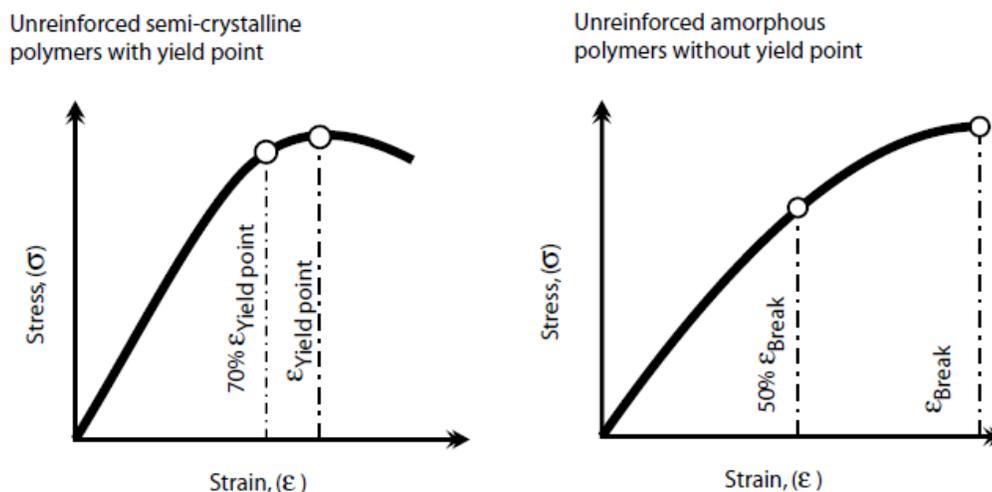


Figura 230. Tensión permisible para polímeros no reforzados. (Campo, 2006, p.452).

Los valores de prueba para las deformaciones permisibles para el moldeo por inyección de polímeros termoplásticos proporcionados por el proveedor de la resina se basan en el tipo de polímero (semicristalino o amorfo). Los valores de tensión permisibles a corto plazo para varios materiales son:

- Homopolímero de acetal al 5%.
- Nylon 6/6 no reforzado 6 a 10%
- Policarbonato no reforzado 4%
- Aleación de PC / ABS 2.5%
- Vidrio PET reforzado al 1,7%.
- PPO 4%
- Vidrio PPO reforzado 1%.

Para los diseños de viga de cierre a presión en voladizo donde se requieren separaciones y uniones frecuentes, solo se debe usar el 60% de estos valores.

Usando las ecuaciones de viga en voladizo que se muestran en la Tabla 26, la deflexión permisible δ se puede determinar para cortes transversales de formas complejas. El procedimiento se ilustra en los cálculos de muestra de ajuste a presión de viga en voladizo.

La geometría más eficiente para un enganche de ajuste a presión de la viga en voladizo es el diseño cónico, con el grosor de la viga en voladizo que disminuye linealmente a la mitad de su valor de raíz inicial. Esta directriz aumenta la desviación permisible en más del 60% en comparación con una viga en voladizo de ajuste constante de sección transversal constante.

La fuerza de desviación (F) requerida para doblar la viga en voladizo se puede calcular usando las ecuaciones en la fila inferior de la Tabla 26 con secciones transversales de varias formas. Es el módulo de elasticidad dependiente de la tensión, o módulo secante. Los valores para el módulo secante para diversos termoplásticos se pueden obtener de los proveedores de resina. El valor de tensión utilizado debe ser aquel en el que se basó el dimensionamiento del pestillo (Campo, 2006).

4.4.2.3.5 Fuerza de ensamblaje de viga de cierre en voladizo (W).

Durante la operación de ensamblaje, la fuerza de deflexión (F) de la viga de enganche en voladizo y las fuerzas de fricción deben derivarse de la relación geométrica que se muestra en la Figura 231.

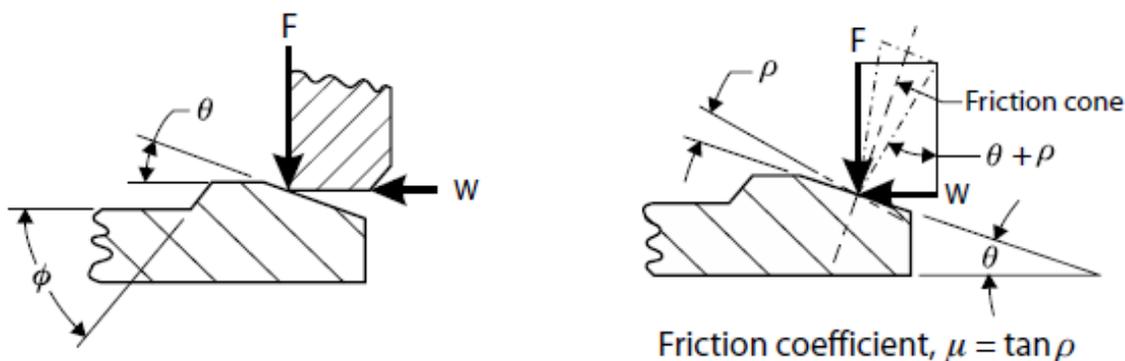


Figura 231. Relación entre la deflexión y la fuerza de montaje. (Campo, 2006, p.453).

La fuerza de montaje está dada por:

$$W = F \times \tan (\theta + \rho) = F \times \left(\frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \right) \quad (4-4)$$

Los valores para $\left(\frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta}\right)$ pueden ser tomados de la Figura 232.

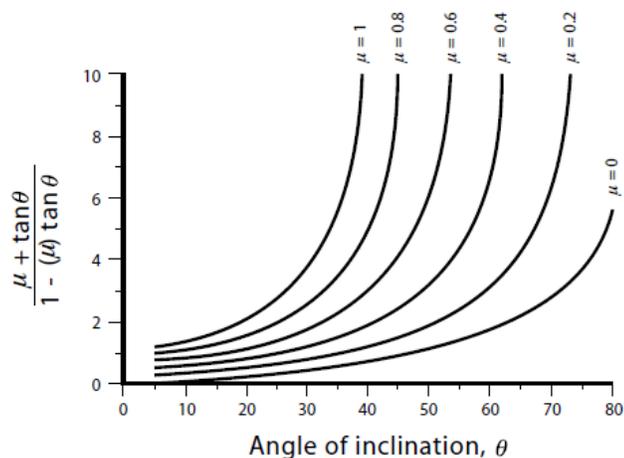


Figura 232. Diagrama para determinar $\left(\frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta}\right)$. (Campo, 2006, p.453).

El coeficiente de fricción para varios materiales puede tomarse de la Tabla 27.

Tabla 27.

Coefficiente de fricción.

Plastic	Against metal	Against itself
ABS	0.50–0.65	(×1.2)
Acetal	0.15–0.25	(×1.5)
Acrylic	0.50–0.60	(×1.2)
PA	0.12–0.21	(×1.5)
PE, flexible	0.55–0.60	(×1.2)
PE, rigid	0.20–0.25	(×2.0)
PET	0.30–0.40	–
PBT	0.35–0.40	–
PC	0.45–0.55	(×1.2)
PP	0.25–0.30	(×1.5)
PTFE	0.12–0.22	–
PS	0.40–0.50	(×1.2)
PVC	0.55–0.60	(×1.2)
SAN	0.45–0.55	–

Notas:

Los valores dependen de la velocidad de las partes acopladas, la presión aplicada y la superficie. La fricción entre dos materiales termoplásticos diferentes da valores iguales o ligeramente inferiores a los mostrados anteriormente. Con dos componentes del mismo material termoplástico, el coeficiente de fricción es generalmente más alto. Donde se conoce el factor, se ha indicado entre paréntesis.

En el caso de vigas de enganche en voladizo de juntas separables, la fuerza de separación se puede determinar de la misma manera que la fuerza de ensamblaje, utilizando la Ecuación (4-4). El ángulo de inclinación que se debe utilizar aquí es el ángulo θ . (Campo, 2006, p.453).

4.4.2.3.6 Consideraciones de diseño y materiales.

Una viga de enganche de ajuste a presión en voladizo que se somete a flexión dinámica en un conjunto de ajuste a presión debe diseñarse para que se acerque a una condición de esfuerzo "libre", o predeterminada, de esfuerzo "admisible", cuando está en su posición de bloqueo. Esto asegura una distorsión mínima del elemento a flexión por memoria de fluencia por la flexión para el acoplamiento de ajuste a presión durante las operaciones de ensamblaje repetidas. Se debe tener cuidado al diseñar el miembro en movimiento hasta el límite elástico del material termoplástico usado (normalmente por debajo de un punto de fluencia). Si se diseña incorrectamente, la tensión desarrollada puede causar deformación permanente y agrietamiento por tensión.

Debido a que los materiales termoplásticos varían en su rendimiento, esta característica de estrés-tensión combinada con las propiedades físicas del termoplástico hace que la selección del material sea una decisión crítica. Al elegir la resina adecuada, se deben considerar una variedad de factores, incluidas las tolerancias de moldeo, la exposición de la unidad ensamblada a altas temperaturas, y otras condiciones ambientales.

La elección del mejor método para el desarrollo de los ensambles de artículos plásticos requiere un conocimiento fundamental de un buen diseño de conjunto y una profunda comprensión de los efectos de la junta, el tipo de material termoplástico, la geometría y la naturaleza de los componentes, el tipo de carga involucrada, y las propiedades particulares del material termoplástico a utilizar.

Debido a estas complejidades de ingeniería, es esencial en la planificación de productos determinar con cuidado la eliminación de las juntas innecesarias. El mejor sistema de unión de dos componentes no es tan bueno como un componente bien diseñado para ser moldeado en una sola pieza.

Si quiere profundizar en estos temas tratados, en los cálculos y diseños de para el desarrollo de productos confiables referirse al texto base Referencia (Campo, 2006, pp.405-457).

4.5 Diseño Básico para Bisagras (*Living Hinges*)

En muchos diseños de piezas termoplásticas, es ventajoso crear una conexión integral entre las partes de esta que se someten a movimiento relativo o para las piezas que conforman una herramienta y después son ensambladas. Tales diseños, utilizan materiales blandos a la flexión, y se denominan comúnmente como bisagras o *living hinges*.

Una bisagra moldeada o *living hinge* es una parte muy delgada de material polimérico que une dos paredes gruesas. Proporciona la capacidad a la pieza para abrir y cerrar o flexionar sin el uso de una bisagra mecánica.

Los materiales más comúnmente utilizados para los diseños de bisagras son el polipropileno (PP) y polietileno (PE). Estos materiales se usan debido a su capacidad de flexionar muchas veces sin romperse, así como su bajo coste y facilidad de procesamiento. La mayoría de los otros materiales plásticos muestran superiores propiedades mecánicas, térmicas, químicas y las propiedades eléctricas que el PP y PE, pero rara vez se utilizan en aplicaciones de articulación de bisagra debido a su baja capacidad de flexión. El polipropileno y polietileno pueden flexionar un millón de ciclos antes de que falle; todos los demás plásticos sólo se flexionan algunas miles de veces.

Existen una serie de métodos disponibles para los ingenieros de diseño y de producto, para ser usados en el diseño de la bisagra. Estos métodos se dividen en dos categorías: diseños para su uso con el PP y PE, que se mostrara a continuación; y diseños para otros materiales, que pueden ser consultados en el libro *Designing Plastic Parts for Assembly* (Tres, 2014, pp.220-258). Estas dos categorías comprenden todos los requisitos de diseño de bisagras en el mercado.

En resumen, la segunda categoría da tres opciones: una bisagra totalmente elástica, la que podría flexionar durante varios miles de ciclos; una bisagra totalmente plástica capaz de sólo unos pocos ciclos de flexión; o una combinación de comportamiento elástico y plástico, que es capaz de sostener varios cientos de ciclos de flexión (Tres, 2014).

4.5.1 Diseño clásico para PP y PE.

La estructura de diseño más común para polipropileno y polietileno para bisagras plásticas se puede describir mejor como un puente con un rebaje en la parte superior (Figura 233 A) y un arco en la parte inferior. El uso de estos materiales sólo se restringe por sus limitaciones en las propiedades físicas.

Cuando la bisagra está en la posición cerrada (Figura 233 B), la forma de la pieza en esta zona de cavidad ayuda a crear el radio necesario, previniendo una posible grieta que eventualmente rompería la bisagra. El arco en la parte inferior de la bisagra está diseñado para proporcionar la orientación de las moléculas de polímero y permitir flexionar hasta un millón de ciclos.

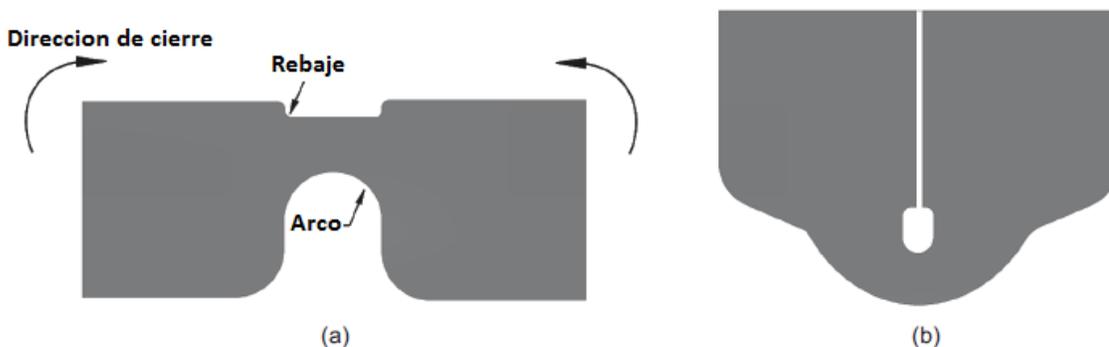


Figura 233. Diseño de bisagra para PP y PE: (a) antes y (b) después de flexionar 180°. (Tres, 2014, p.218).

Para lograr la capacidad de un número tan grande de ciclos, se deben realizar un par de flexiones rápidas de la bisagra inmediatamente después de la expulsión de la pieza del molde. La alta temperatura de la pieza, todavía presente en esta, en combinación con las pocas flexiones rápidas aplicadas por el operador de moldeo, orienta el material en la zona de la bisagra. Esto es válido en todos los casos de bisagras en polipropileno y en ciertos casos para polietileno.

En la Figura 234 se muestran los valores típicos de diseño para el diseño de la bisagra en PP y PE. La variación de 0.3mm (para la mayoría de las aplicaciones) a 0.5mm (aplicaciones de espesores grandes) depende del espesor de la pieza t en la zona de la bisagra (Tres, 2014).

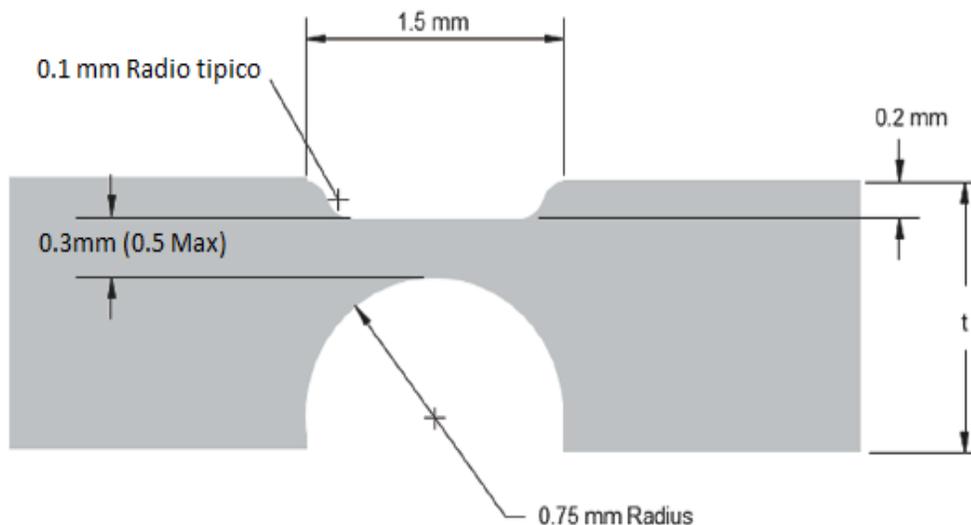


Figura 234. Valores típicos para el diseño de bisagras para PP y PE para aplicaciones en general. (Tres, 2014, p.219).

4.6 Análisis Reológico del Producto

El análisis reológico estudia el comportamiento de los materiales plásticos durante el proceso de inyección.

Los programas de CAE, usados para análisis reológico parten de un modelo CAD tridimensional. Este modelo suele ser un sólido (superficie cerrada que envuelve un volumen) que se discretiza convirtiéndolo en una malla de triángulos, malla de elementos finitos, que se usan para el cálculo.

El modelo importado debe ser mallado para obtener un modelo discretizado de elementos simples que permita ser tratado posteriormente con el método de los elementos finitos (MEF). Después debe asignarse las variables o condiciones de contorno que definen el tipo de análisis (Figura 235).

El módulo de cálculo es el encargado de realizar la simulación del comportamiento del plástico durante el ciclo de inyección.

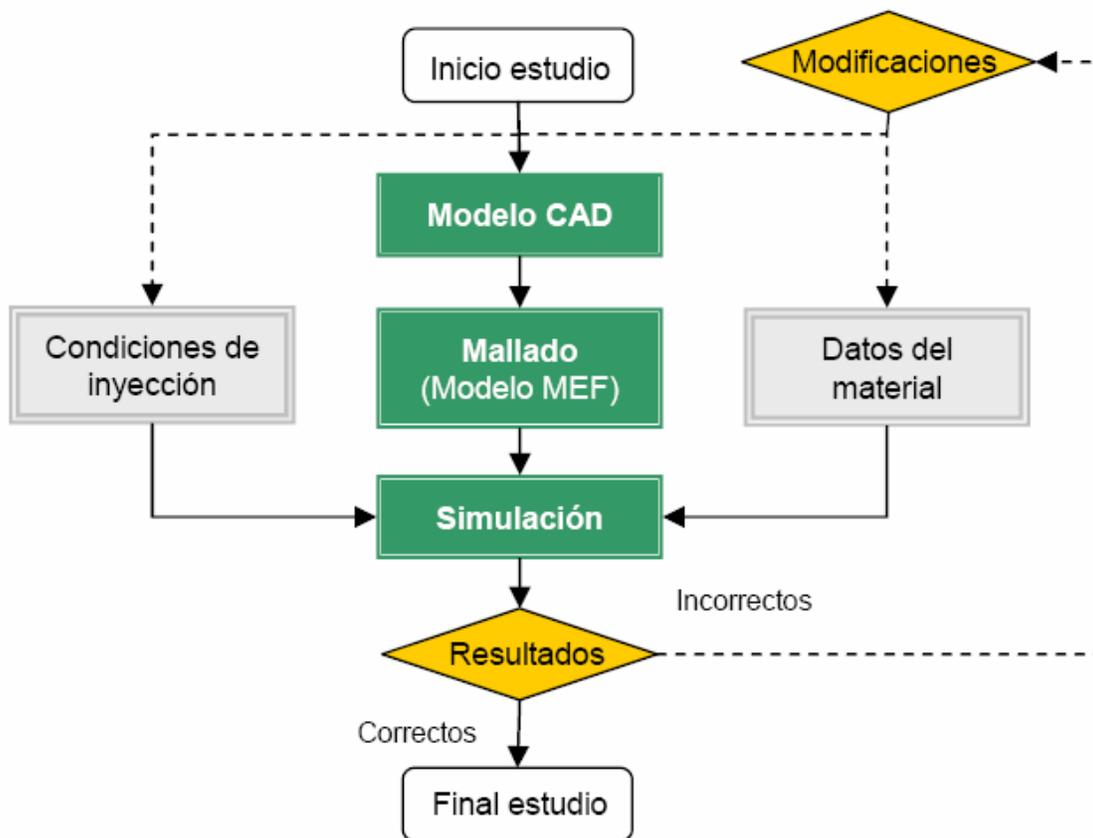


Figura 235. Etapas en el análisis de simulación reológica. (Gómez, 2010, p.67).

Los resultados numéricos obtenidos son post-procesados posteriormente y permiten ser visualizados en colores sobre el modelo CAD [Figura 236] (Gómez, 2010, p.67).



Figura 236. Modelo sólido, modelo mallado y simulación. (Gómez, 2010, p.68).

4.6.1 Etapas del proceso.

Las etapas que se siguen en la realización del análisis de un proceso de inyección son cinco:

- Diseño de la cavidad del molde sistemas de alimentación (ramas, pitorros y puntos de inyección) y de los sistemas de refrigeración en tres dimensiones.
- Mallado de la geometría tridimensional.
- Definición de las condiciones de contorno o variables de proceso.
- Cálculo matemático o simulación.
- Presentación de los resultados (post-procesado).

4.6.1.1 Definición modelo 3D.

“Se diseña el modelo CAD en tres dimensiones de la pieza a fabricar, se puede añadir las coladas y ramales de colada” (Gómez, 2010, p.68). Esto mejora la simulación del llenado pues direcciona la entrada del flujo del plástico.

Uno de los principales usos de las herramientas CAE reológicas es el cálculo y la optimización de la mejor localización del punto de inyección para la geometría de estudio. En el presente ejemplo se ha efectuado el estudio como muestra la siguiente figura [Figura 237] (Gómez, 2010, p.71).

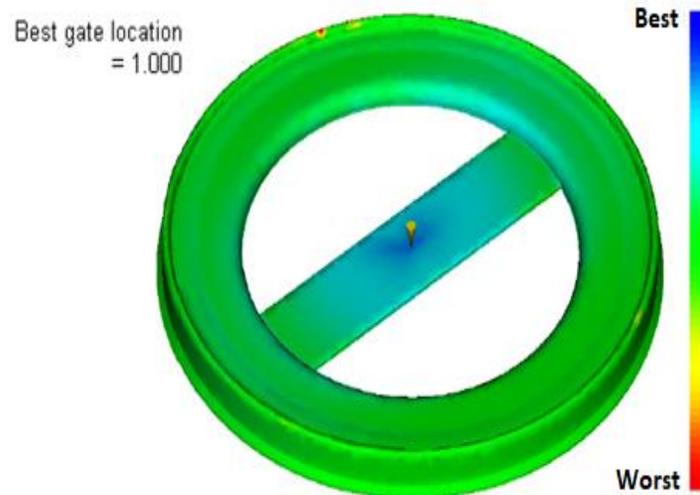


Figura 237. Localización del punto de inyección. (Gómez, 2010, p.71).

La aplicación determina la mejor localización del punto de inyección además de indicar la fuerza de cierre y la presión de inyección requerida. La localización del punto de inyección se realiza de forma visual y además se indican las coordenadas del nodo dónde debe localizarse la misma (Gómez, 2010, p.71).

Este paso es importante pues define si el punto de entrada del material a la cavidad está bien seleccionado y con esto determinar si debe reubicarse para obtener un mejor resultado. Hay que recordar que pueden existir varios puntos de inyección y según sus parámetros de definición variar los resultados del análisis.

4.6.1.2 Mallado.

Mallado de la geometría a estudiar para dividirlo en pequeños triángulos unidos por sus lados y sus vértices (nodos). La densidad de malla define el tamaño de los elementos o número de triángulos por unidad de área. Una elevada densidad define una malla fina que requiere de un mayor tiempo de cálculo y permite obtener resultados más precisos.

El mallado es realizado definiendo puntos o nodos en la superficie del modelo. La unión de nodos forma los denominados elementos. La malla se compone de los nodos y los elementos.

Las mallas pueden formarse por tres tipos diferentes de elementos: vigas, triángulos y tetraedros.

- **Elementos viga.** Son líneas rectas definidas por dos nodos en los extremos y llevan asociada una sección que determina su geometría.
- **Elementos triangulares.** Son elementos planos delimitados por tres nodos. Representan a la pieza al asignarles un espesor de forma que el programa puede calcular el avance del plástico por el elemento. Es el modelo empleado en las simulaciones realizadas (Malla Fusión).
- **Elementos tetraédricos.** Son elementos en tres dimensiones que permiten simular porciones sólidas de la pieza sin necesidad de otras aproximaciones como ocurre con los elementos viga o los triangulares.

Las superficies planas se suelen mallar con triángulos mientras que las coladas o superficies tubulares como los canales de refrigeración se mallan con elementos de dos nodos. Los elementos tetraédricos se emplean en secciones especiales que no podrían ser simuladas con tanta fiabilidad con elementos de dos nodos.

Modelos planos en 2D deben ser mallados con fibra neutra, en cambio cuando se parte de una geometría en 3D puede definirse cualquiera de los tres tipos de mallado [ver Figura 238].

Si los modelos 3D son grandes, con espesores constantes y paredes delgadas deben ser tratados con fibra neutra para crear una malla definida por elementos y nodos equidistantes a la superficie interior y exterior.

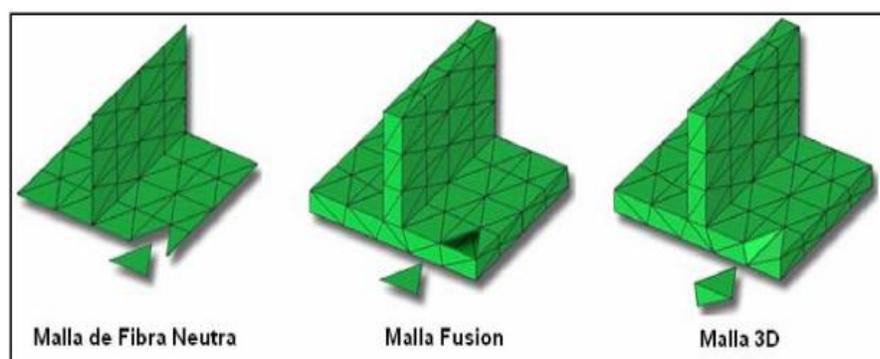


Figura 238. Tipos de mallado (fibra neutra, fusión y 3D). (Gómez, 2010, p.69).

En el caso de tener nervios, tetones y cambios de grosor es recomendable emplear la malla fusión que crea un mallado exterior y otro interior. Los elementos tetraédricos requieren de mayor tiempo de cálculo y de equipos de cómputo más

poderosos, pero arrojan resultados más cercanos a la realizada para la mejor toma de decisiones [ver Figura 239] (Gómez, 2010, pp.68-69).

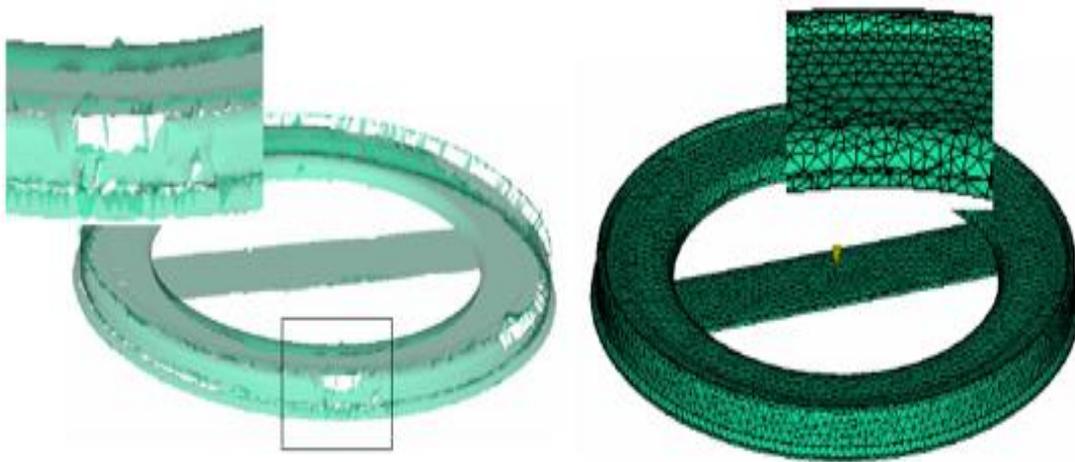


Figura 239. Izq: mado con fibra neutra. (Gómez, 2010, p.70). Der: mado 3D. (Gómez, 2010, p.72).

4.6.1.3 Definición de variables del proceso.

En esta etapa se realiza la definición de las condiciones de contorno o variables requeridas para los análisis básicos o que comúnmente se realizan:

- La temperatura de entrada del material en la cavidad
- La temperatura de refrigeración
- La temperatura del molde,
- El tipo de material a inyectar,
- El material del molde

Y las demás que se requieran según los análisis que se quieran realizar.

4.6.1.4 Cálculo.

“A través de algoritmos de cálculo se determinan los resultados para cada uno de los elementos o nodos. Estos resultados son almacenados en un fichero para su post-procesado para su análisis posterior” (Gómez, 2010, p.68).

Entre las muchas aplicaciones que pueden realizar estos cálculos, la aplicación **Moldflow Plastics Insight®** divide en diferentes fases el proceso de inyección y simula desde la entrada

del material en la cavidad hasta la extracción de la pieza considerando sus contracciones y deformaciones. Los análisis más comunes o básicos que esta aplicación permite realizar son:

- **Análisis de llenado.** Permite prever el comportamiento del plástico durante la fase de primera presión o llenado de la cavidad, considerando un molde ideal a temperatura constante.
- **Análisis del punto de inyección.** Localiza la mejor zona donde colocar el punto de inyección.
- **Análisis del equilibrado de las coladas.** Es útil para conocer las secciones de los canales de alimentación más adecuadas en el llenado de moldes con varias cavidades permitiendo que el llenado se realice de forma equilibrada y las compactaciones obtenidas sean las mismas para cada pieza.
- **Análisis de contracciones y compactaciones.** Permite determinar las contracciones, así como el perfil de la segunda presión. De esta forma puede asegurarse el dimensionado en las piezas inyectadas de forma más precisa.
- **Análisis de refrigeración.** Simula el comportamiento del proceso de inyección teniendo en cuenta el intercambio de calor producido entre la pieza y los circuitos de refrigeración. (Gómez, 2010, p.70).

4.6.1.5 *Post-procesado.*

Consiste en tratar toda la información obtenida mediante los cálculos del software y representarla de forma gráfica sobre la piel del modelo CAD. El post-procesado permite ver los resultados sobre la misma cavidad indicando mediante colores cómo varia la presión, la temperatura, las tensiones, las deformaciones o los lugares dónde se prevé que se produzcan rechupes o atrapamientos de aire, entre otros muchos resultados. (Gómez, 2010, p.68).

4.6.2 Ejemplo aplicado de análisis reológico.

Se usa el anillo que se ha mostrado en los puntos anteriores para hacerle un análisis completo y mostrar las conclusiones de cada uno de los análisis realizados.

4.6.2.1 *Modelado y mallado del aro.*

Se ha partido de un sólido tridimensional del aro realizado con **TopSolid®**. A partir del modelo sólido se ha generado un archivo estilográfico, superficies externas de la pieza sin realizar ningún tipo de simplificación, la tolerancia aplicada ha sido de 0,02mm.

Posteriormente se ha ejecutado la función de creación automática de malla de **Moldflow Plastics Insight®** [Figura 240] (Gómez, 2010, p.71).

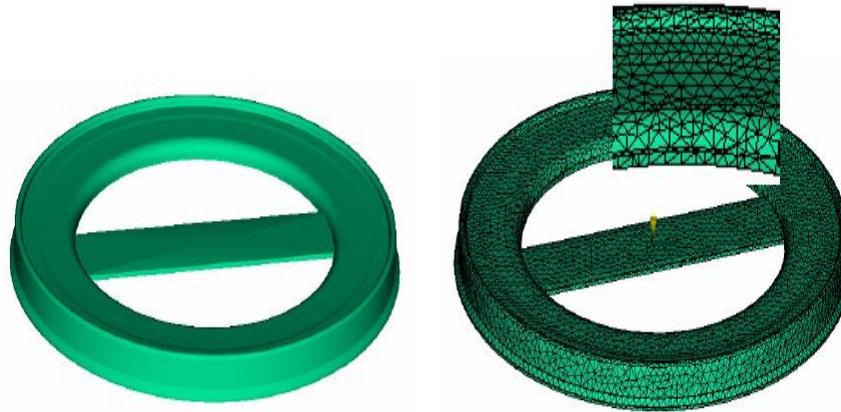


Figura 240. Modelo CAD 3D. Modelo mallado, densidad 0,02 y espesor 0.9 mm. (Gómez, 2010, p.72).

A cada uno de los elementos se le ha asignado un espesor medio de 1 milímetro, adoptando los triángulos dimensiones medias de 3,21 milímetros. La tolerancia seleccionada es de 0.01 y el tipo de **malla fusión** por tener espesores relativamente uniformes. Las principales características del mallado se indican en la [Tabla 28]. (Gómez, 2010, p.72).

Tabla 28.

Características del mallado del aro.

Características del mallado para el aro	
Número de nodos	10150
Número de elementos	20302
Dimensión media de los triángulos	3.21
Volumen total	6.61 cm ³
Área total proyectada	124.55 cm ²

Gómez, 2010, p.72.

Después de realizar el mallado se revisa la calidad de este. El reparador de malla (*Mesh Repair Wizard*) permite solucionar algunos defectos como los indicados en la [Figura 241].

- **Unión de bordes de elemento (Stich free edges).** Permite unir bordes cercanos que no están conectados(a).
- **Llenar agujeros (Fill Hole).** Genera elementos de red sobre la superficie del modelo donde hay agujeros (b).
- **Eliminar elementos no originales (Overhang).** Permite descubrir y quitar cualquier elemento de la red que no es parte de la superficie modelada original (c).
- **Separación de nodos (Degenerate Element).** Los elementos con dos o tres nodos muy cercanos entre ellos pueden repartirse de forma más homogénea (d).
- **Orientación de elementos (Flip Normal).** Permite corregir la orientación de cualquier elemento (e).
- **Superposición de elementos (Fix Overlap).** Descubrir y quitar cualquier elemento que se sienta sobre la cima de la superficie correcta del modelo (f).
- **Relación de longitud de aristas (Aspect Ratio).** Reduce la relación del aspecto de todos los elementos. La relación entre el lado más largo del triángulo y la arista debe ser menor a 7 (Aspect Ratio). [Figura 241] (Gómez, 2010, pp.72-73).

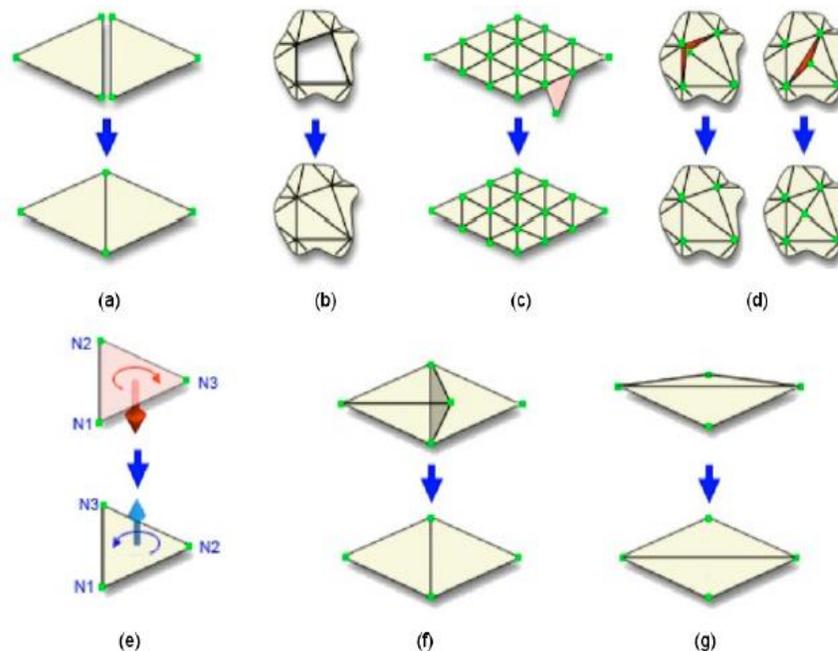


Figura 241. Reparación automática de mado. (Gómez, 2010, p.73).

4.6.2.2 Estudio de llenado.

El estudio de llenado es el primer análisis que se realiza y permite conocer el comportamiento del plástico durante el proceso de llenado de la cavidad.

En esta fase del estudio se obtiene el tiempo, la presión y la temperatura del frente plástico durante el llenado. También se obtiene información de las líneas de unión, atrapamientos de aire, velocidad de cizalla y el tiempo necesario para expulsar las piezas con garantía, entre otras.

Los análisis de llenado permiten optimizar los parámetros de inyección y seleccionar la mejor ubicación del punto de inyección. Además, permite prever los problemas de inyección según las condiciones indicadas pudiéndose modificar el diseño de la pieza, del molde o seleccionar una máquina de inyección más adecuada.

El proceso se ha simulado para forzar el llenado de la cavidad en un segundo y se espera un ciclo total de 12 segundos, teniendo en cuenta la refrigeración y expulsión final de la pieza (Gómez, 2010, pp.73-74).

4.6.2.2.1 Resultado del análisis.

- **Tiempo de inyección:** Representa el avance de flujo durante el proceso desde el inicio de la inyección hasta la llegada del flujo plástico a cada uno de los nodos. El tiempo de llenado obtenido en la simulación es de 1,117 s. [Figura 242] (Gómez, 2010, p.74).

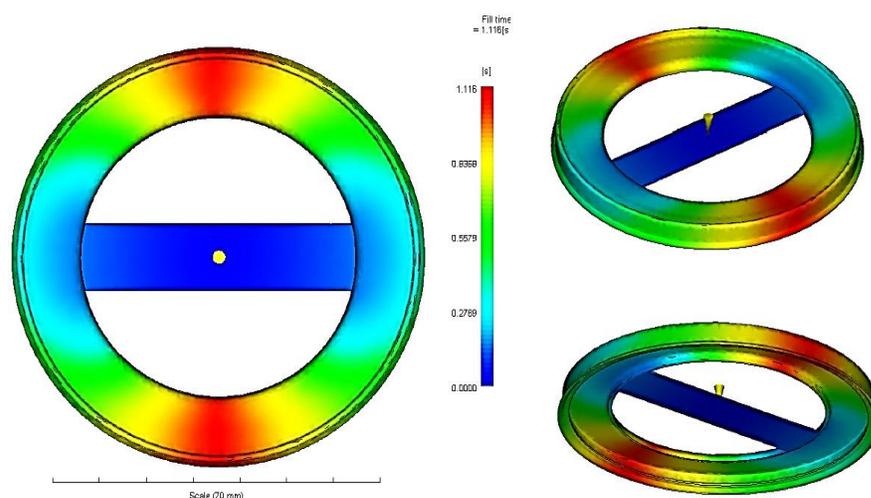


Figura 242. Llenado de la pieza con Moldflow. (Gómez, 2010, p.74).

El avance del polímero se realiza de forma homogénea y se observa como al final de la simulación se producen la unión de los dos frentes plásticos (1,0 a 1,1 s). Observando la temperatura de los dos flujos plásticos en contacto (206°C) puede afirmarse que la unión será correcta [Figura 243] (Gómez, 2010, p.74).

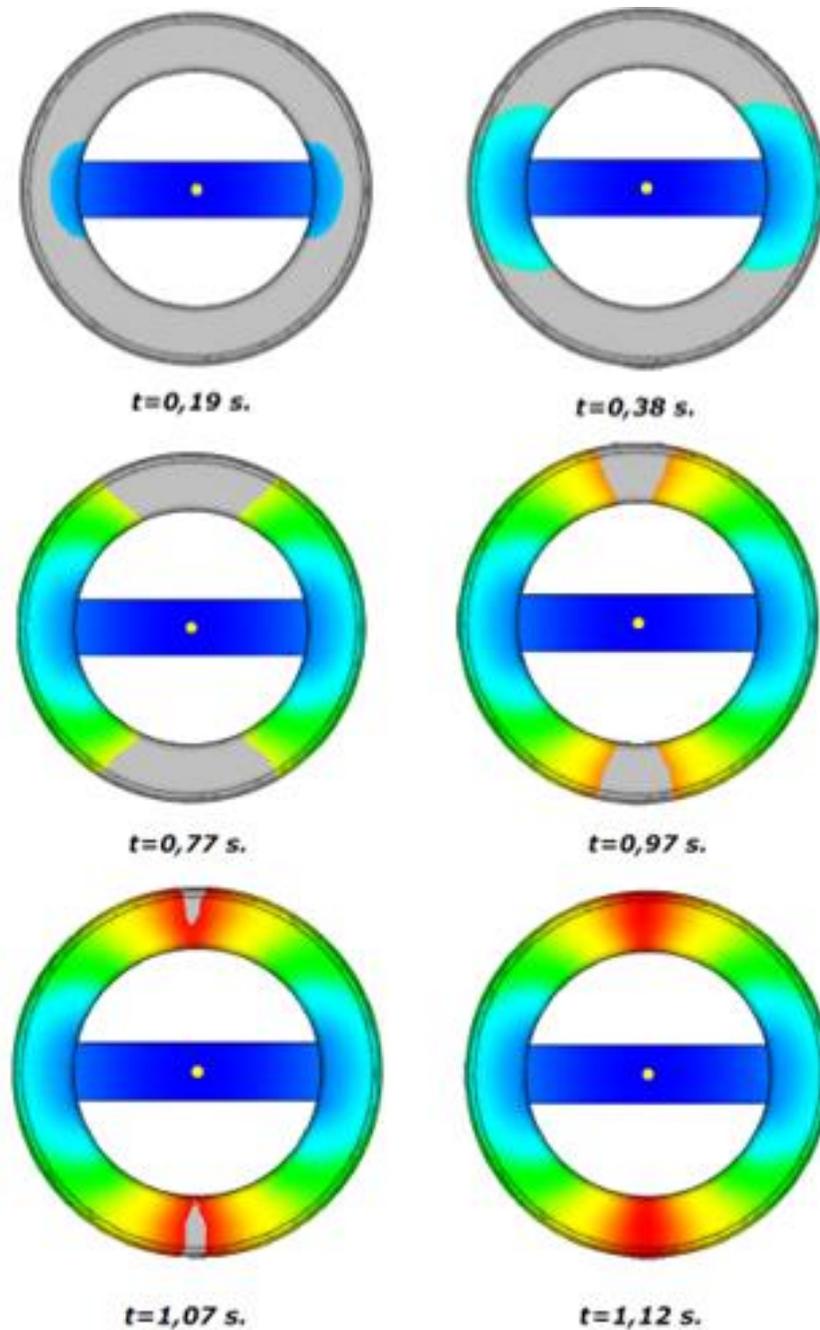


Figura 243. Secuencia de llenado del aro. (Gómez, 2010, p.75).

- Presión:** Representa la distribución de presiones en cada uno de los nodos al final del llenado. El valor máximo de presión se da en el punto de inyección (24,7 Mpa), al final del proceso de inyección (1,12 s). Se obtiene un peso del aro de 5,25 g y una fuerza de cierre de 4,72 Tn al final de la etapa de llenado. El 90 % del peso se obtiene en los 2.5 primeros segundos de la inyección [Figura 244] (Gómez, 2010, p.76).

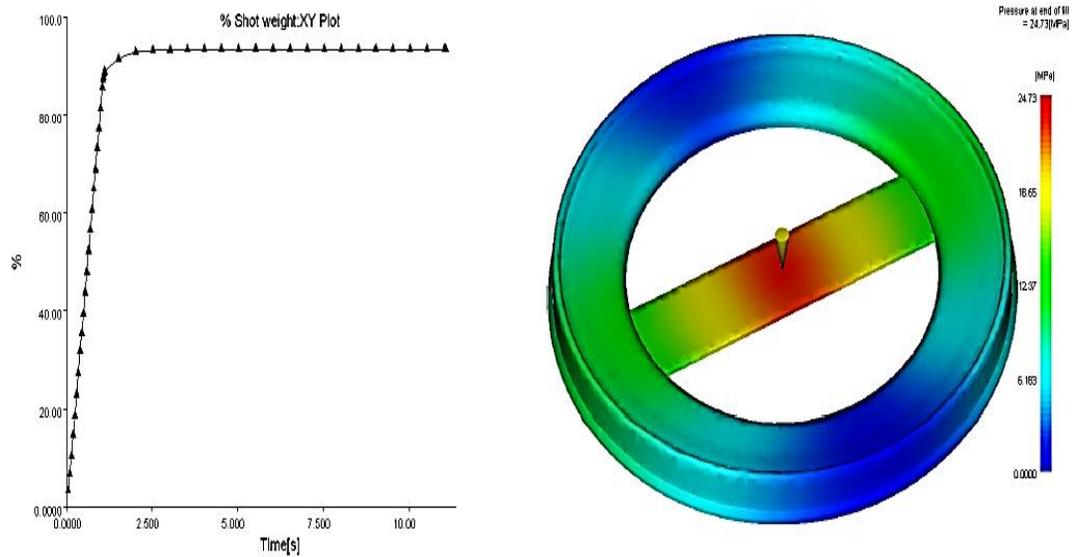


Figura 244. Presión durante la etapa de llenado y perfil de inyección. (Gómez, 2010, p.76).

- Temperatura:** Las isotermas muestran el frente de avance de flujo plástico durante el llenado y representa la temperatura en cada uno de los nodos a su llegada. La temperatura de inyección es de 220°C, temperatura recomendada para el polipropileno (PP) seleccionado. Inicialmente la temperatura aumenta durante el avance por la tira central del aro alcanzando una temperatura máxima de 225°C para continuar su descenso hasta los 206°C, temperatura mínima en la etapa de llenado [Figura 245] (Gómez, 2010, p.76).

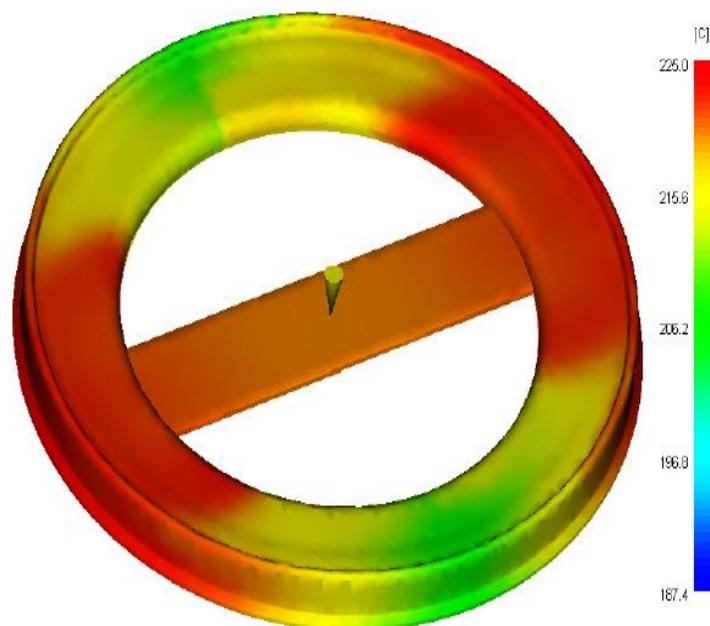


Figura 245. Temperatura de avance plástico (C°). (Gómez, 2010, p.76).

La temperatura del polímero durante el llenado de la cavidad aumenta en 5°C por la cizalla del mismo y disminuye 13,8°C durante el avance final.

La temperatura está dentro del rango de temperaturas de procesamiento recomendadas para el PP simulado (210-250°C). La temperatura admitida de expulsión para el polímero seleccionado es de 113°C y la temperatura máxima admitida por el mismo antes de degradarse de 290°C, muy por encima de las obtenidas en la simulación. La temperatura apta de inyección recomendada por el fabricante es de 230°C, 10°C por encima de la empleada. La temperatura de del molde apta es de 40°C (Gómez, 2010, pp.76-77).

- **Líneas de soldadura:** En la Figura 246 se muestran las líneas de soldadura del material por el encuentro de dos frentes de flujo y la formación de finas costuras que debilitan la resistencia del envase. Las líneas de soldadura se dan de forma simétrica en la parte media del aro y aparecen dos pequeñas líneas de unión en el mismo eje de la tira central.

Las uniones del frente de flujo son admisibles por producirse a altas temperaturas (206-214°C), produciéndose una correcta unión del material procedente de distintas direcciones (Gómez, 2010, p.77).

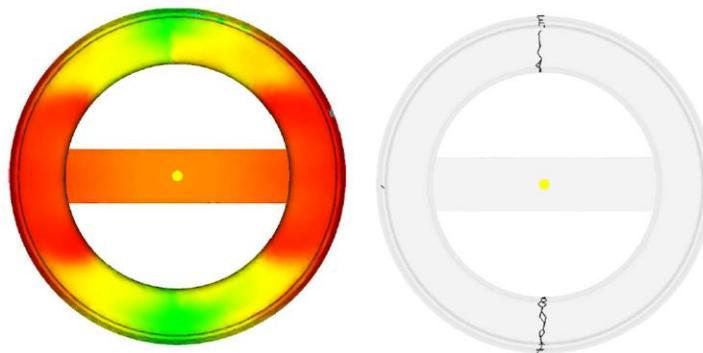


Figura 246. Temperatura de avance del flujo (Cº) y líneas de soldadura. (Gómez, 2010, p.77).

- **Atrapamientos de aire:** Representa las zonas en las que se presume que pueden quedar atrapamientos de aire dentro del modelo. Los atrapamientos de aire obtenidos en la simulación se distribuyen en los cuatro cuadrantes y especialmente en el último cuadrante que se llena. La partición del molde es una solución para evitar los posibles atrapamientos de aire [Figura 247] (Gómez, 2010, p.77).

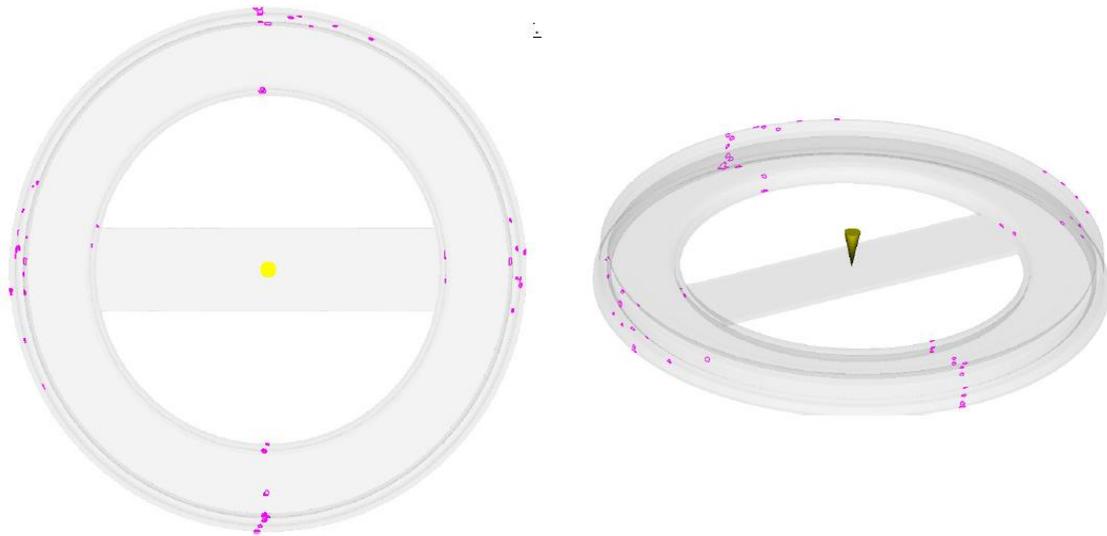


Figura 247. Atrapamientos de aire. (Gómez, 2010, p.78).

Orientación del flujo en el núcleo y en la piel: Representa la orientación más probable de la dirección del flujo después del llenado de la cavidad para el núcleo y la piel de la pieza inyectada [Figura 248]. Permite conocer cómo se disponen las moléculas y prever el comportamiento mecánico. La resiliencia es mayor en la dirección de orientación ya que las moléculas están alineadas en esa dirección (Gómez, 2010, p.78).

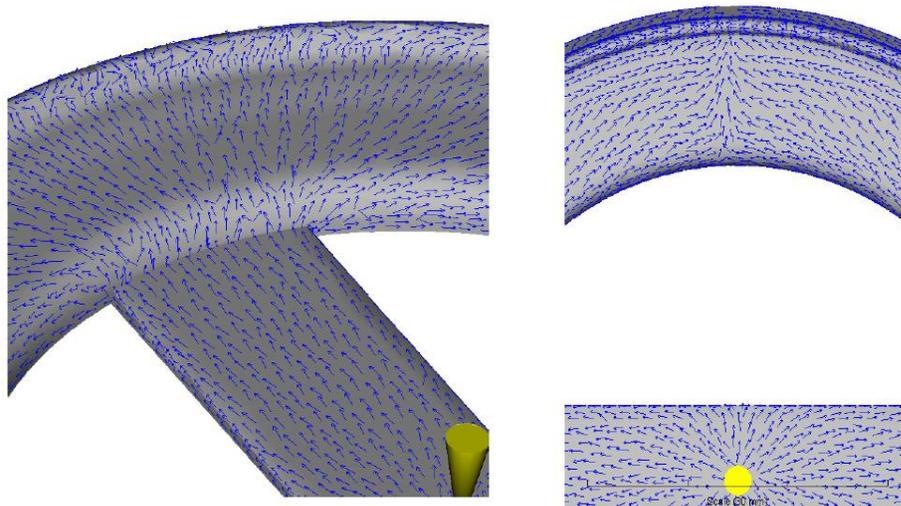


Figura 248. Orientación del flujo plástico en la superficie del artículo. (Gómez, 2010, p.78).

Es importante conocer la orientación del flujo en la zona de unión de los frentes flujos y en las zonas de paso del polímero desde la tira central hasta el aro exterior dónde se produce un aumento leve en la sección de avance (Gómez, 2010, p.78).

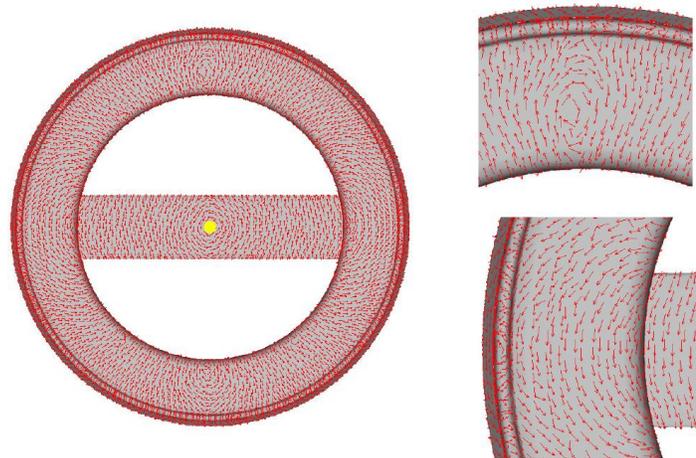


Figura 249. Orientación del flujo plástico en la superficie del artículo. (Gómez, 2010, p.79).

Tanto la orientación del flujo en la piel como en el núcleo se observa como las zonas de unión del polímero al final del llenado se produce una unión o choque de los dos frentes de flujo que puede debilitar la resistencia mecánica del aro en esta posición. La orientación en el núcleo muestra un rebufo en la zona de unión de flujos [Figura 249] (Gómez, 2010, p.79).

- **Velocidad de deformación de cizalla (Shear Rate):** Se representa la velocidad máxima de deformación de cizalla (1/s) o velocidad relativa entre las diferentes capas adyacentes. La elevada velocidad puede causar degradación cadenas y la disminución de las propiedades mecánicas del material. El máximo valor obtenido se da a 1,00 s ($1,16 \times 10^6$ 1/s) durante la fase de llenado y $4,24 \times 10^5$ 1/s al final de la etapa de llenado. En ambos casos, la máxima velocidad de cizalla se da en el punto de inyección siendo la máxima admitida para el Polipropileno ($1,00 \times 10^4$ 1/s). El valor medio de la velocidad de cizalla al final del proceso de llenado es de 184,3670 1/s, muy por debajo del máximo permitido.

Filling phase results summary for the part:

Shear rate - maximum (at 1.000 s) = 1.1602×10^6 1/s

Shear rate - 95th percentile (at 0.051 s) = 9.7362×10^5 1/s

End of filling phase results summary for the part:

Shear rate - maximum = 4.3496×10^5 1/s

Shear rate - 95th percentile = 851.2810 1/s

Shear rate - average = 184.3670 1/s

Shear rate - RMS deviation = 416.2350 1/s (Gómez, 2010, p.79).

- **Tensión máxima de cizalla (Shear Stress):** Representa la tensión máxima de cizalla (MPa) en cada nodo evaluado. La elevada velocidad de cizalla que puede degradar el polímero por rotura de las cadenas junto con el aumento de la viscosidad en las zonas donde el polímero se enfría provoca el aumento de la tensión de cizalla (MPa) a la que está sometido. La máxima tensión de cizalla admitida por el Polipropileno es de 0,25 MPa.

Se da un máximo de la tensión de cizalla (0,78 MPa) a 0,25s durante la fase de llenado y de (0,491 MPa) al final de la etapa de llenado. Durante la etapa de compactación, en ambos casos, se da únicamente en el punto de inyección, a pesar de ser muy grande es normal tener estos resultados en el punto de inyección. La tensión de cizalla media al final de la fase de llenado es de 0,090 MPa, muy por debajo de la recomendada para el polímero empleado, siendo su distribución homogénea en todo el envase. Después del empaquetado la tensión de cizalla llega a un máximo de 0,49 MPa a 1,18 s, siendo el doble de la admisible.

Filling phase results summary for the part

Wall shear stress - maximum (at 0.251 s) = 0.7849 MPa

Wall shear stress - 95th percentile (at 0.051 s) = 0.7499 MPa

End of filling phase results summary for the part:

Wall shear stress - maximum = 0.4912 MPa

Wall shear stress - 95th percentile = 0.1392 MPa

Wall shear stress - average = 0.0901 MPa

Wall shear stress - RMS deviation = 0.0289 MPa

Packing phase results summary for the part

Wall shear stress - maximum (at 1.118 s) = 0.4961 MPa

Wall shear stress - 95th percentile (at 1.118 s) = 0.1388 MPa (Gómez, 2010, p.80).

- **Fuerza de cierre:** La fuerza de cierre puede estimarse como el producto de la presión media dentro del molde, el área proyectada y el coeficiente corrector según la ecuación 3.1 para un molde de una única cavidad. La presión media puede calcularse mediante diagrama conociendo la relación entre la longitud del flujo y el espesor medio del envase.

$$F_c = A_{\text{proyectada}} \times P_{\text{presión dentro del molde}} \times 1,2 \cdot 10^3 \quad (4-5)$$

F_c = Fuerza de cierre (Ton).

$A_{\text{proyectada}}$ = Superficie del envase proyectado (mm^2).

$P_{\text{presión}}$ dentro del molde (Kg/mm^2).

Factor de corrección (experimental) $\approx 1,2$

La fuerza de cierre (F_c) máxima simulada durante la etapa de llenado es de 4,72 Ton. En la etapa de contrapresión la presión sube hasta las 4,76 Ton, a los 1,18 seg. [Figura 250] (Gómez, 2010, p.80).

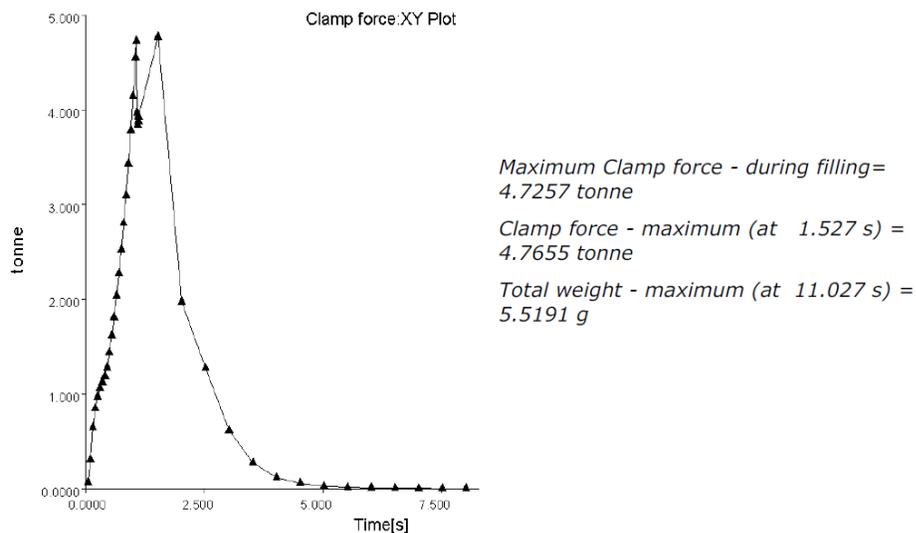


Figura 250. Gráfica Fuerza de cierre vs tiempo. Valores. (Gómez, 2010, p.81).

4.6.2.2.2 Conclusiones.

- El perfil de llenado del aro obtenido en la simulación es el esperado, se realiza de forma homogénea y presenta dos grandes líneas de unión en la mitad del mismo a elevadas temperaturas (206°C) por lo que no se espera debilitamiento en esa zona. El llenado de la cavidad se produce a 1,117 segundos.
- El valor máximo de presión se da en el punto de inyección ($24,7 \text{ Mpa}$), al final del proceso de inyección (1,12 s). Se obtiene un peso del aro de 5,25 g y una fuerza de cierre de 4,72 Ton al final de la etapa de llenado. El 90 % del peso se obtiene en los 2.5 primeros segundos de la inyección.
- Se observa como la temperatura del frente de flujo aumenta 5°C por la cizalla del mismo durante el llenado de la tira central para posteriormente disminuir $13,8^{\circ}\text{C}$ en las etapas finales de llenado.
- Las uniones del frente de flujo (líneas de unión) se producen de forma simétrica en el aro inyectado y se consideran admisibles por producirse a altas temperaturas

(206-214°C), produciéndose una correcta unión del material procedente de distintas direcciones.

- Los atrapamientos de aire obtenidos en la simulación se distribuyen en los cuatro cuadrantes y especialmente en el último cuadrante llenado. La partición del molde es una solución para evitar los posibles atrapamientos por lo que los resultados son considerados como correctos.
- La orientación del flujo en la piel y en el núcleo muestra cómo la zona de unión del polímero al final del llenado se produce por el choque brusco de los dos frentes de flujo y cómo la orientación en el núcleo presenta forma de rebufo. Este tipo de unión puede debilitar la resistencia mecánica del aro en esta posición.
- La velocidad de cizalla (1/s) o velocidad relativa entre las diferentes capas adyacentes que puede causar degradación cadenas y la disminución de las propiedades mecánicas del material muestra un valor máximo a 1,00 s ($1,16 \times 10^6$ 1/s) durante la fase de llenado y de $4,24 \times 10^5$ 1/s al final de la etapa de llenado. En ambos casos, la máxima velocidad de cizalla se da en el punto de inyección siendo la máxima admitida para el Polipropileno ($1,00 \times 10^4$ 1/s). El valor medio de la velocidad de cizalla al final del proceso de llenado es de 184,3670 1/s, muy por debajo del máximo permitido.
- Se da un máximo de la tensión de cizalla (0,78 MPa) a 0,25 s durante la fase de llenado y de (0,491 MPa) al final de la etapa de llenado. Durante la etapa de compactación, en ambos casos, se da únicamente en el punto de inyección. La tensión de cizalla media al final de la fase de llenado es de 0,090 MPa, muy por debajo de la recomendada para el polímero empleado, siendo su distribución homogénea en todo el artículo. Después del empaquetado la tensión de cizalla llega a un máximo de 0,49 MPa a 1,18 s, siendo el doble de la admisible (Gómez, 2010, pp.81-82).

4.6.2.3 *Análisis de deformaciones.*

Este análisis “permite predecir las deformaciones que sufre el artículo una vez enfriado debido a posibles tensiones internas acumuladas durante el proceso” (Gómez, 2010, p.83).

4.6.2.3.1 *Resultado del análisis.*

Representa el desplazamiento en cada nodo respecto a la posición original en milímetros después de finalizar el proceso de enfriamiento [Figura 251]. Las zonas rojas muestran los máximos desplazamientos simulados en el envase que coinciden con el punto de inyección (1,579 mm) (Gómez, 2010, p.83).

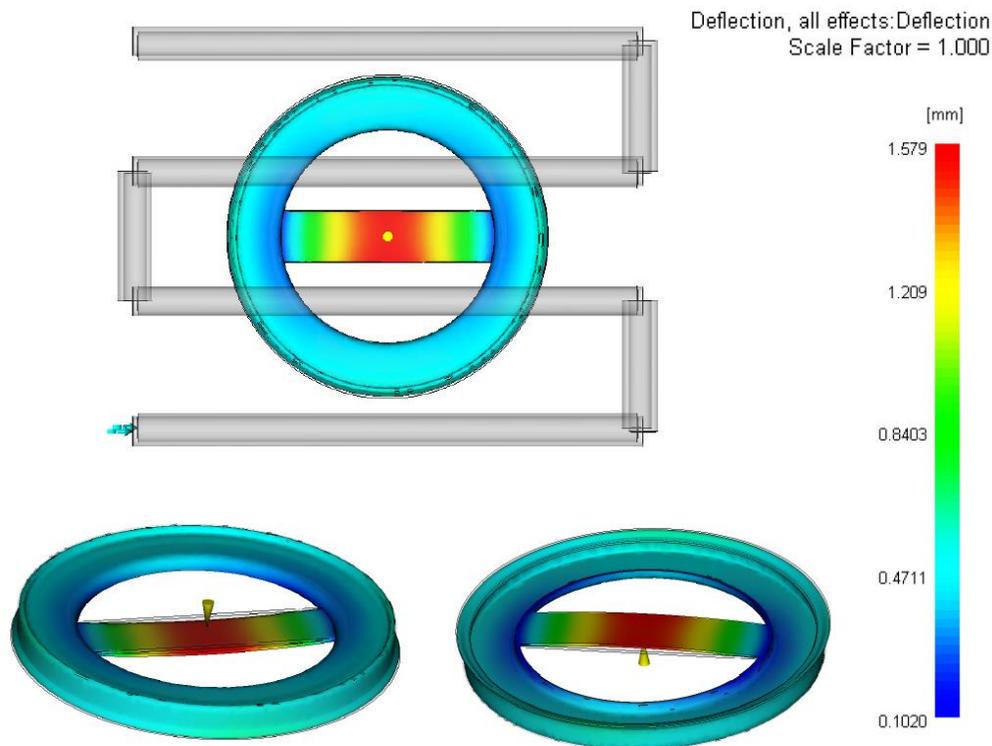


Figura 251. Análisis de las deformaciones. (Gómez, 2010, p.83)

La mayor deformación se produce en la tira central del aro. Las deformaciones van desde el máximo 1,579 mm hasta 0,45 mm al final de la tira. El resto del aro (zona exterior) presenta deformaciones inferiores a 0,4 mm.

Las principales causas que provocan deformación son: la refrigeración no uniforme del molde, las diferencias de evacuación de calor por diferencias de grosor y los empaquetamientos no uniformes cerca del punto de inyección. Salvo la última de las causas, el resto no debería afectar al [artículo].

- **Diferencias de contracción:** La deformación se produce como consecuencia de la diferencia de compactación de la pieza. (*Deflection diferencial*).
- **Diferencias en el enfriamiento:** Deformaciones debidas a problemas de enfriamiento de la pieza. (*Deflection, diferencial cooling*).
- **Diferencias de orientación:** Deformaciones debidas a las diferencias de la orientación de las moléculas y su posterior contracción. Son consecuencia del grosor de la pieza y de la localización del punto de inyección. (*Orientation effects*) (Gómez, 2010, pp.83-84).

4.6.2.3.2 Conclusiones.

“La gran deformación observada en la tira central de la pieza es debida a diferencias de contracción por lo que son admisibles dentro de los valores observados” (Gómez, 2010, p.84).

4.6.2.4 Análisis de refrigeraciones.

El análisis de refrigeración efectúa un análisis del intercambio de calor entre el refrigerante, el molde y el envase de plástico durante el ciclo de inyección. Para su simulación se han empleado dos circuitos de refrigeración de 8 mm de diámetro. El número de Reynolds se ha establecido para que tengan un flujo turbulento ($Re=10000$). [Ver Figura 252].

Se emplea agua como refrigerante a una temperatura de entrada de 25 °C, un caudal de 3,39 litros/minuto y un número de Reynolds turbulento de 10.000. Los dos circuitos incrementan 0,2 °C durante la refrigeración del aro y se establece un tiempo de ciclo final de 12 segundos (Gómez, 2010, pp.84-85).

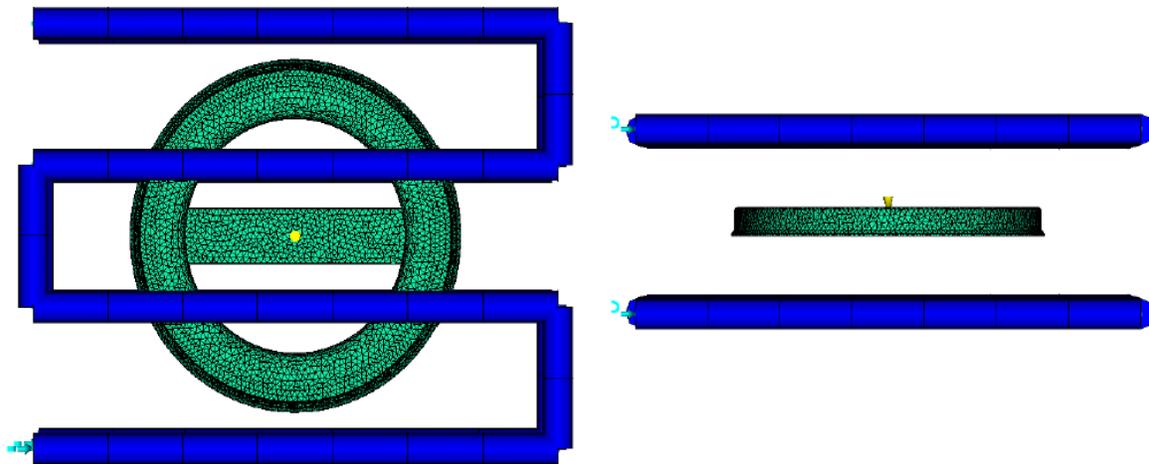


Figura 252. Circuitos de refrigeración del aro. (Gómez, 2010, p.85).

4.6.2.4.1 Resultado del análisis.

Se estudia la eficiencia de los circuitos, el caudal, el incremento de la temperatura de los circuitos de refrigeración, las temperaturas de interfaz pieza-molde, así como otros parámetros.

- **Temperatura del refrigerante:** El incremento de la temperatura entre la entrada y la salida de refrigerante es inferior a $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por lo que prácticamente se mantiene constante. No es recomendable incrementos elevados en la temperatura de los circuitos de refrigeración porque pueden provocar enfriamientos no uniformes y crear tensiones residuales asimétricas [Figura 253].

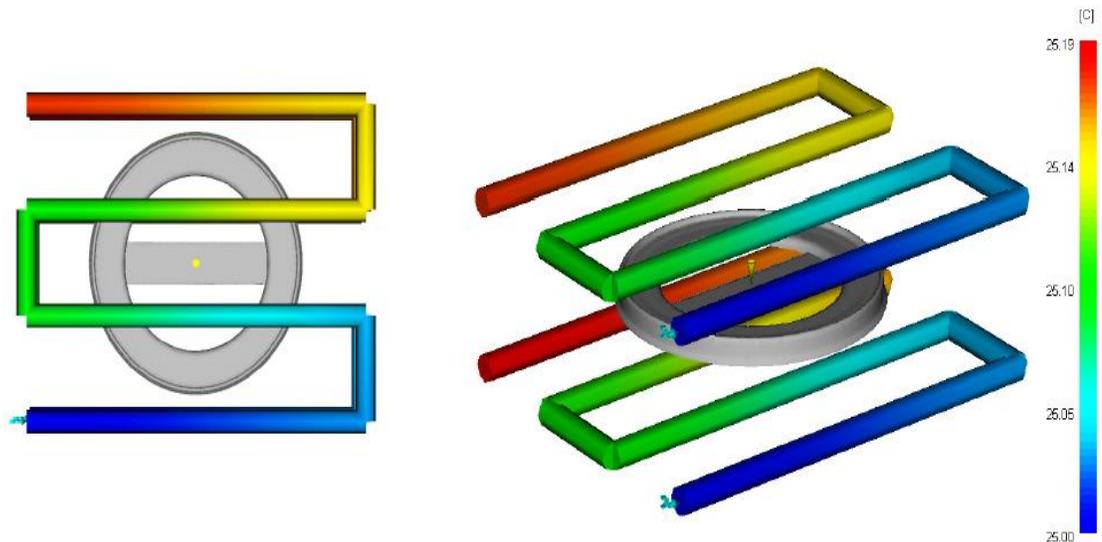


Figura 253. Temperatura en los circuitos de refrigeración. (Gómez, 2010, p.85).

Se observa que el incremento térmico a la salida de los circuitos es el mismo por lo que se supone que van a extraer el mismo calor en la parte del punzón y de la cavidad. En la Tabla 29. y en la Tabla 30. se indican los principales resultados obtenidos en la simulación de la refrigeración.

- **Temperaturas:** La temperatura máxima de la cavidad de la pieza es de $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ al final del proceso de refrigeración, la temperatura media es de $35,11\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura del molde exterior es de $12\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Temperatura Top:** Muestra la temperatura en la intercara molde/pieza. En la [Figura 254] se presentan los resultados obtenidos en el lado de expulsión y en el lado de inyección. Se observan diferencias de temperatura entre las dos partes opuestas de aro de hasta $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las diferencias de temperatura pueden causar deformación en la pieza después de ser extraída.

Tabla 29.

Resultados del análisis de refrigeración.

Inlet node	Flowrate in/out (lit/min)	Reynolds No. range	Press. drop over circuit (MPa)	Pumping power over circuit (kW)
10155	3.39	10000.0 - 10000.0	0.0067	3.784e-04
10190	3.39	10000.0 - 10000.0	0.0067	3.784e-04

Now beginning the task: Solution of equilibrium THP field
Current time is: Sat May 29 17:56:42 2010

External iteration	Cycle time (s)	Avg temp iteration	Avg temp deviation	Dif temp iteration	Dif temp deviation	Circ temp residual
1	12.000	11	25.000000	0	0.000000	1.000000
1	12.000	12	10.000000	0	0.000000	1.000000
1	12.000	11	7.500000	0	0.000000	1.000000
1	12.000	9	22.348400	0	0.000000	1.000000
1	12.000	5	1.369380	0	0.000000	1.000000
1	12.000	1	0.012542	0	0.000000	1.000000
1	12.000	1	0.007444	0	0.000000	1.000000
2	12.000	21	0.180244	0	0.000000	1.000000
2	12.000	1	0.010849	0	0.000000	1.000000
2	12.000	2	0.009895	0	0.000000	1.000000

Summary of Cavity Temperature Results

Cavity surface temperature - maximum	= 42.0710 C
Cavity surface temperature - minimum	= 25.0000 C
Cavity surface temperature - average	= 35.1120 C
Average mold exterior temperature	= 25.2690 C
Cycle time	= 12.0000 s

Gómez, 2010, p.86.

Tabla 30.

Diferencia de temperatura en los circuitos de refrigeración.

Coolant Temperatures		
Inlet node	Coolant temp. range	Coolant temp. rise over circuit
10155	25.0 - 25.2	0.2 C
10190	25.0 - 25.2	0.2 C
Final circuit temperature residual: 5.47405E-04		

Gómez, 2010, p.86.

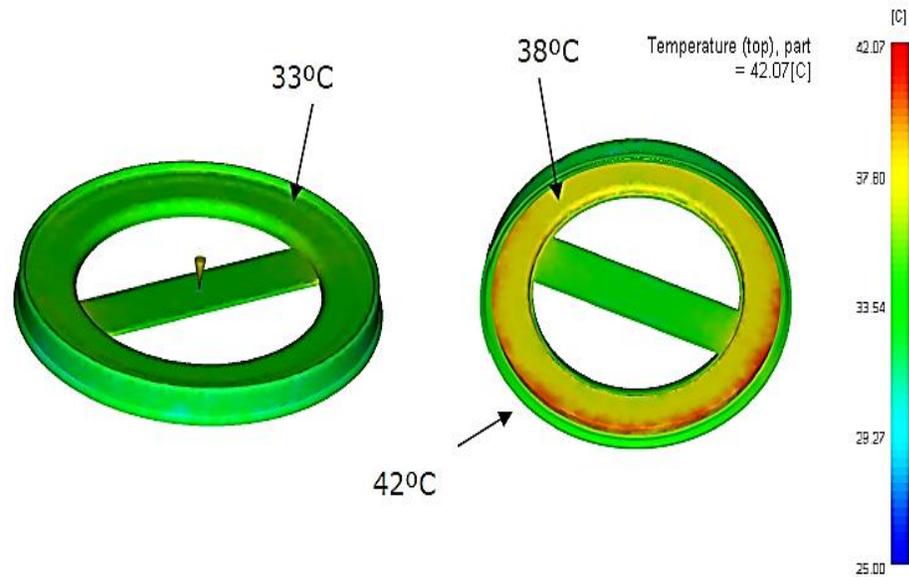


Figura 254. Temperatura top. (Gómez, 2010, p.87).

- Máxima temperatura Part:** La máxima temperatura de la pieza después de la refrigeración es de 72,8 °C y tan solo se da en dos puntos del aro. El resto, la mayoría del mismo, toma temperaturas homogéneas de entre 30 y 40 °C. (Figura 255) (Gómez, 2010, p.85-87).

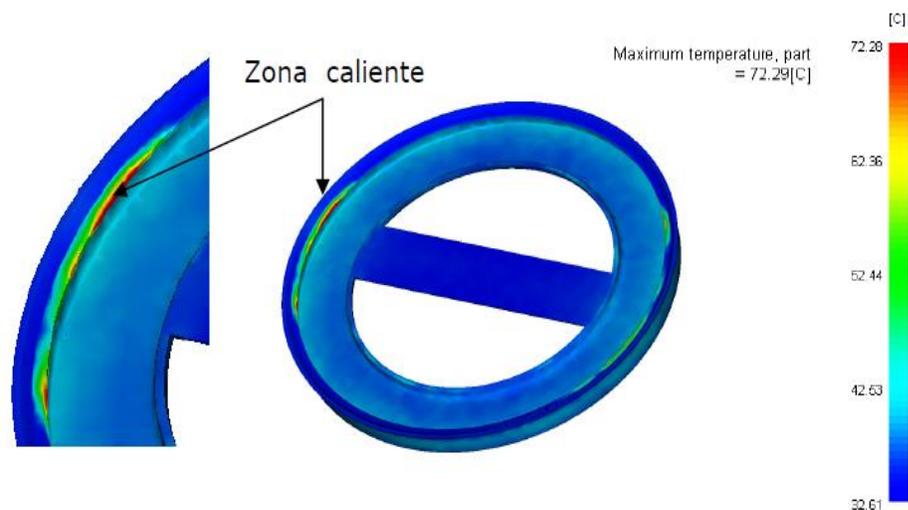


Figura 255. Máxima temperatura de la pieza. (Gómez, 2010, p.87).

4.6.2.4.2 Conclusiones.

- El incremento térmico observado en los circuitos de refrigeración, así como su eficiencia muestra como el sistema de refrigeración diseñado extrae el máximo calor y refrigera la pieza de forma simétrica y homogénea.

- Debe evaluarse de forma más precisa la diferencia de temperatura en la interfaz pieza/molde de las dos cavidades (inyección y expulsión) por observarse diferencias de temperatura mayores a 10 °C.
- El resto de los resultados son aceptables y están dentro de los valores esperados (Gómez, 2010, p.88).

4.7 Consejos de Diseño y Posibles Soluciones a Problemas en el Artículo Durante la Inyección

En esta sección se enlistan algunos lineamientos de diseño para componentes de plástico, se comienza con las que se aplican en general y siguen las aplicables a la extrusión y moldeo (moldeo por inyección, por compresión y transferencia).

4.7.1 Consideraciones generales.

Estos lineamientos generales se aplican sin importar el proceso de formado. Sobre todo, son limitaciones de Los plásticos son un material importante de diseño, pero el diseñador debe estar alerta a sus limitaciones los materiales plásticos que el diseñador debe tomar en consideración.

- **Resistencia y rigidez:** Los plásticos no son tan fuertes o rígidos como los metales. No deben usarse en aplicaciones en las que se vayan a encontrar esfuerzos grandes.
- **Ubicación del punto de inyección:** La ubicación del punto de inyección es una variable crítica para el funcionamiento, el llenado de la pieza, las dimensiones finales, la contracción y la apariencia de la pieza. Cuando el diseño del artículo debe ser estético y el punto de inyección será visible en lo posible se deben usar calotas (geometría cóncava que permiten esconder el punto de inyección) para lograr una apariencia homogénea y estética.
Antes de seleccionar la ubicación y tamaño del punto de inyección es ideal simular el llenado y el comportamiento reológico del artículo para visualizar posibles defectos que puedan surgir en el proceso de producción de la pieza y posicionar adecuadamente las líneas de soldadura del artículo.
- **La resistencia al escurrimiento** plástico también es una limitante. Las propiedades de resistencia varían en forma significativa entre los plásticos, y en ciertas aplicaciones las razones resistencia a peso de algunos de ellos son competitivas con las de los metales.
- **Resistencia al impacto:** La capacidad que tienen los plásticos de absorber impactos por lo general es buena; se comparan de modo favorable con la mayoría de los metales.

- **Temperaturas de servicio:** Con respecto de las de los metales y cerámicos, las de los plásticos son limitadas.
- **Expansión térmica:** Es mayor para los plásticos que para los metales, por lo que los cambios dimensionales debidos a las variaciones de temperatura son mucho más significativos que para los metales.
- Muchos tipos de plásticos están sujetos a **degradación** por la luz solar y otras formas de radiación. Asimismo, algunos se degradan en atmósferas de oxígeno y ozono.

4.7.2 Piezas moldeadas.

- **Cantidades económicas de producción:** Cada pieza moldeada requiere un molde único, el cual para cualquiera de estos procesos es costoso, en particular para el moldeo por inyección. Las cantidades mínimas de producción para este proceso son de alrededor de 10 000 piezas; para el moldeo por compresión, 1000 piezas es lo mínimo, debido a los diseños más sencillos del molde que se necesita. El moldeo por transferencia se ubica entre las dos cifras anteriores.
- **Complejidad de la pieza:** Si bien las configuraciones geométricas más complejas de la pieza significan moldes más costosos, puede ser económico diseñar un molde complejo si la alternativa involucra muchos componentes individuales que se ensamblen juntos.
- **Espesor de pared:** Las secciones transversales gruesas por lo general son indeseables; con ellas se desperdicia material, es más probable que se causen pandeos por la contracción y les toma más tiempo endurecer.
- **Costillas de refuerzo:** Se emplean en las piezas de plástico moldeado para obtener mayor rigidez sin un espesor de pared excesivo. Las costillas deben ser más delgadas que las paredes que refuerzan, a fin de minimizar las marcas de hundimiento en la pared exterior.
- **Radios de las esquinas y biseles:** Las esquinas agudas, tanto externas como internas, son indeseables en las piezas moldeadas; interrumpen el flujo suave del material fundido, tienden a crear defectos superficiales y ocasionan la concentración de los esfuerzos en la pieza terminada.
- **Agujeros:** Es muy factible que ocurran en los moldes de plástico, pero complican el diseño del molde y la remoción de la pieza. También generan interrupciones en el flujo del material fundido.
- **Ángulos de desmoldeo:** Una pieza moldeada debe diseñarse con un ahogado o Angulo de desmoldeo en sus lados para facilitar la remoción del molde. Esto tiene importancia especial en la pared interior de una pieza en forma de taza, porque el

plástico moldeado se contrae contra la forma positiva molde. El ahusado recomendable para los termofijos es alrededor de $1/2^\circ$ a 1° .

- **Tolerancias:** Especifican las variaciones permisibles de la manufactura de una pieza. Aunque la contracción es predecible en condiciones muy controladas, son deseables tolerancias generosas para los moldeos por inyección dado que la variación de los parámetros del proceso que afectan la contracción, y a la diversidad de formas geométricas que existen para las piezas. En la Tabla 31 se listan las tolerancias comunes para las dimensiones de piezas moldeadas con plásticos seleccionados.

Tabla 31.

Tablas Afnor para tolerancias de artículos para diferentes materiales.

Tolerancias Generales segun AFNOR NF T58-000 Materiales: EVA, POM.			Tolerancias Generales segun AFNOR NF T58-000 Materiales: ABS, PA6, PA66, PC, PET, Copollester, PMMA, PS, PVC, SANI.		
Rango nominal de dimension	Categoria 3		Rango nominal de dimension	Categoria 4	
	CASO 1	CASO 2		CASO 1	CASO 2
0 < a ≤ 1	±0.06	±0.09	0 < a ≤ 1	±0.04	±0.07
1 < a ≤ 3	±0.07	±0.10	1 < a ≤ 3	±0.05	±0.08
3 < a ≤ 6	±0.08	±0.11	3 < a ≤ 6	±0.06	±0.09
6 < a ≤ 10	±0.09	±0.12	6 < a ≤ 10	±0.07	±0.10
10 < a ≤ 15	±0.10	±0.13	10 < a ≤ 15	±0.08	±0.11
15 < a ≤ 22	±0.11	±0.14	15 < a ≤ 22	±0.09	±0.12
22 < a ≤ 30	±0.13	±0.16	22 < a ≤ 30	±0.10	±0.13
30 < a ≤ 40	±0.15	±0.18	30 < a ≤ 40	±0.11	±0.14
40 < a ≤ 53	±0.17	±0.20	40 < a ≤ 53	±0.13	±0.16
53 < a ≤ 70	±0.20	±0.23	53 < a ≤ 70	±0.15	±0.18
70 < a ≤ 90	±0.24	±0.27	70 < a ≤ 90	±0.17	±0.20
90 < a ≤ 115	±0.29	±0.32	90 < a ≤ 115	±0.20	±0.23

Caso1: Copia directa de una pieza del molde
Caso2: Generado por interacción de 2 o más piezas del molde

Tolerancias Generales segun AFNOR NF T58-000 Materiales: PP, PEAD, PEBD, SURLYN		
Rango nominal de dimension	Categoria 5	
	CASO 1	CASO 2
0 < a ≤ 1	±0.08	±0.18
1 < a ≤ 3	±0.09	±0.19
3 < a ≤ 6	±0.10	±0.20
6 < a ≤ 10	±0.11	±0.21
10 < a ≤ 15	±0.13	±0.23
15 < a ≤ 22	±0.15	±0.25
22 < a ≤ 30	±0.17	±0.27
30 < a ≤ 40	±0.20	±0.30
40 < a ≤ 53	±0.24	±0.34
53 < a ≤ 70	±0.28	±0.38
70 < a ≤ 90	±0.34	±0.44
90 < a ≤ 115	±0.41	±0.55

Caso1: Copia directa de una pieza del molde
Caso2: Generado por interacción de 2 o más piezas del molde

Notas:

Caso 1) dimensiones conformadas por una sola pieza en el molde

Caso 2) dimensiones conformadas por 2 o más piezas del molde.

4.7.3 Plásticos extruidos.

- **Espesor de pared:** En la sección transversal extruida es deseable un espesor uniforme de la pared. Las variaciones de éste darán como resultado un flujo no uniforme del plástico y enfriamiento irregular que tenderá a pandear el extruido.
- **Secciones huecas:** Éstas complican el diseño del troquel y el flujo del plástico. Es deseable utilizar secciones transversales extruidas que no sean huecas, pero que satisfagan los requerimientos funcionales.
- **Esquinas:** En la sección transversal deben evitarse las esquinas agudas, dentro y fuera, porque dan como resultado un flujo irregular durante el procesamiento, y concentraciones de esfuerzos en el producto final.

4.7.4 Selección del material.

Existen dos grandes tipos de plásticos, los **termoplásticos**, que no sufren cambios en su estructura química durante el calentamiento una y otra vez y los **termoestables**, que una vez transformados por acción del calor, ya no pueden modificarse nuevamente

Es natural entonces, que las piezas inyectadas sean fabricadas usualmente en **termoplásticos** a excepción de ciertos casos especiales. Los termoplásticos se dividen en 2 grandes grupos amorfos y semicristalinos (Figura 255).

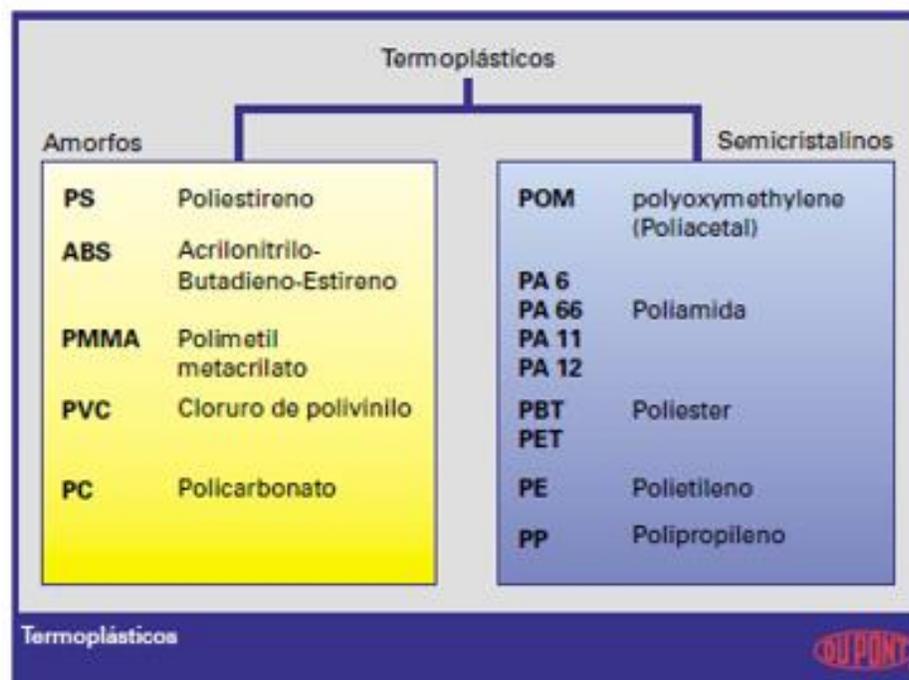


Figura 256. Clasificación de termoplásticos. (Hasenauer, et al., s.f., p.4).

“A modo de generalización, los termoplásticos semicristalinos son usados principalmente para componentes que están expuestos a tensiones mecánicas importantes mientras que los amorfos se usan más en contenedores debido a su menor tendencia a la deformación” (Hasenauer, et al., s.f., p.4).

4.7.5 Refuerzos o nervios.

Los refuerzos o nervios se usan generalmente como una alternativa a aumentar el espesor de pared o cuando es necesario aumentar la rigidez de la pieza. Para lograr la rigidez necesaria y evitar pandeos bajo carga en los refuerzos, es ideal seguir ciertas recomendaciones que se muestran en la Figura 257.

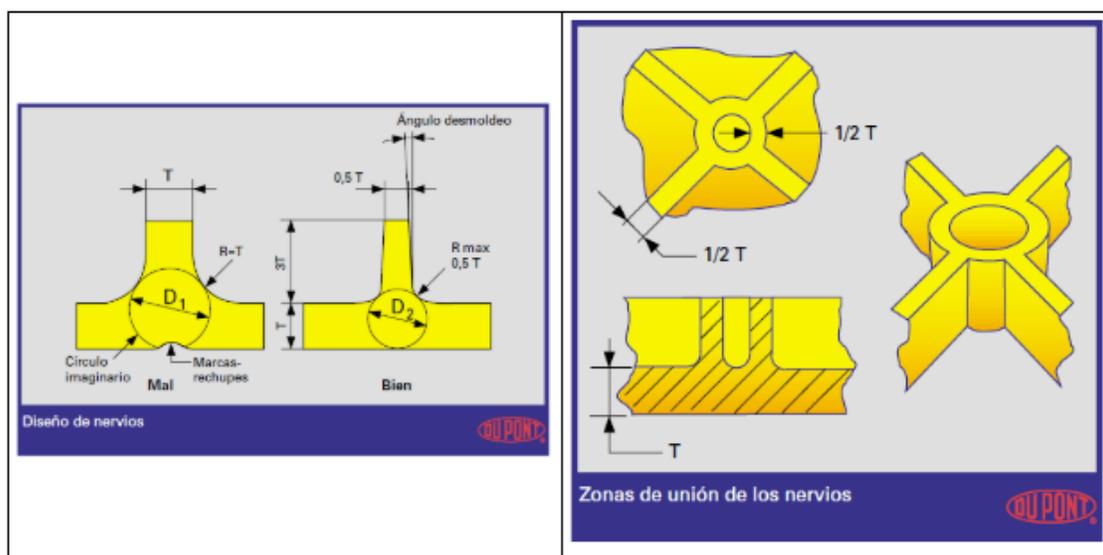


Figura 257. Geometría recomendada para el diseño de nervios. (Hasenauer, et al., s.f., pp.12-14).

Además del material, se debe seleccionar adecuadamente un ángulo de desmoldeo acorde a la longitud del nervio para asegurar la expulsión sin problemas.

5 Moldes de Inyección

“Los moldes se emplean para transformar los polímeros en productos con una amplia diversidad de formas y tamaños, permitiendo liberar los productos después de haberse inyectado. Cualquier molde para inyección de plásticos se compone de elementos básicos” (Rees & Catoen, 2006, citados en Flores, 2009, p.11), los cuales serán descritos a continuación.

5.1 Partes del Molde de Inyección

- **Sistema estructural** compuesto por un diverso número de placas que soportan cada uno de los elementos y sistemas. También se acostumbra a denominarlo porta molde (PMO) o porta cavidades. Se busca diseñarlo de tal forma que pueda soportar varios tipos de cavidades o versiones de artículos plásticos similares.
- **Métodos de guiado** para alinear las cavidades (hembras) y corazones (machos) en el molde para su adecuado funcionamiento y ensamble.
- Una o más **cavidades** y corazones (hembras y machos), este grupo de elementos puede denominarse versión de molde y el objetivo es que en lo posible pueda ser montado en diferentes PMO y que sean lo más estándar posible para poder ser montadas en cualquier alojamiento de cavidad dentro del PMO. Este elemento define el tamaño y funcionamiento del molde, puesto que determina el espacio entre las cavidades y la manera en que se formara y expulsara el artículo. En la actualidad existen moldes que cuentan hasta con 144 cavidades e incluso estas pueden estar mecanizadas directamente en las placas del molde, configurando un molde fijo sin posibilidad de intercambiar cavidades de manera simple.
- **Sistema de llenado** o “colada” que conduzca el termoplástico fundido desde la boquilla de la máquina inyectora hasta los espacios interiores de las cavidades, esto incluye el gate o entrada del plástico a la cavidad. Cuando el molde es de canal frío o colada fría, genera un elemento que puede denominarse “*rama de alimentación*”, que dependiendo del material puede reintegrarse al proceso de forma parcial o totalmente.
- **Sistema para evacuar el aire** atrapado en las cavidades del molde. Se denominan comúnmente “*salidas de aire*”.
- **Sistema de enfriamiento** que permite una solidificación suficiente para permitir la extracción del producto plástico del molde sin que esta sufra deformación.
- **Sistema de extracción o desmoldeo** de la parte plástica del molde. Dependiendo del tipo de extracción, esta puede tener sistemas auxiliares de apoyo, tales como aire, cilindros neumáticos o hidráulicos, correderas, resortes, piñones, cremalleras, machos

colapsibles, expulsores por etapas, devolvedores, sensores, contadores de aperturas, entre otros.

- **Mecanismo de acople** para el ajuste o montaje del molde a la máquina inyectora. Este puede ser por tornillos de posiciones fijas que van determinados por la especificación de la máquina o con bridas de acople que usan las mismas posiciones de los tornillos correspondientes a la máquina pero que aseguran el molde por presión contra las placas de la máquina.

En las Figura 258 y Figura 259 se muestra la distribución típica de los elementos de un molde de inyección.

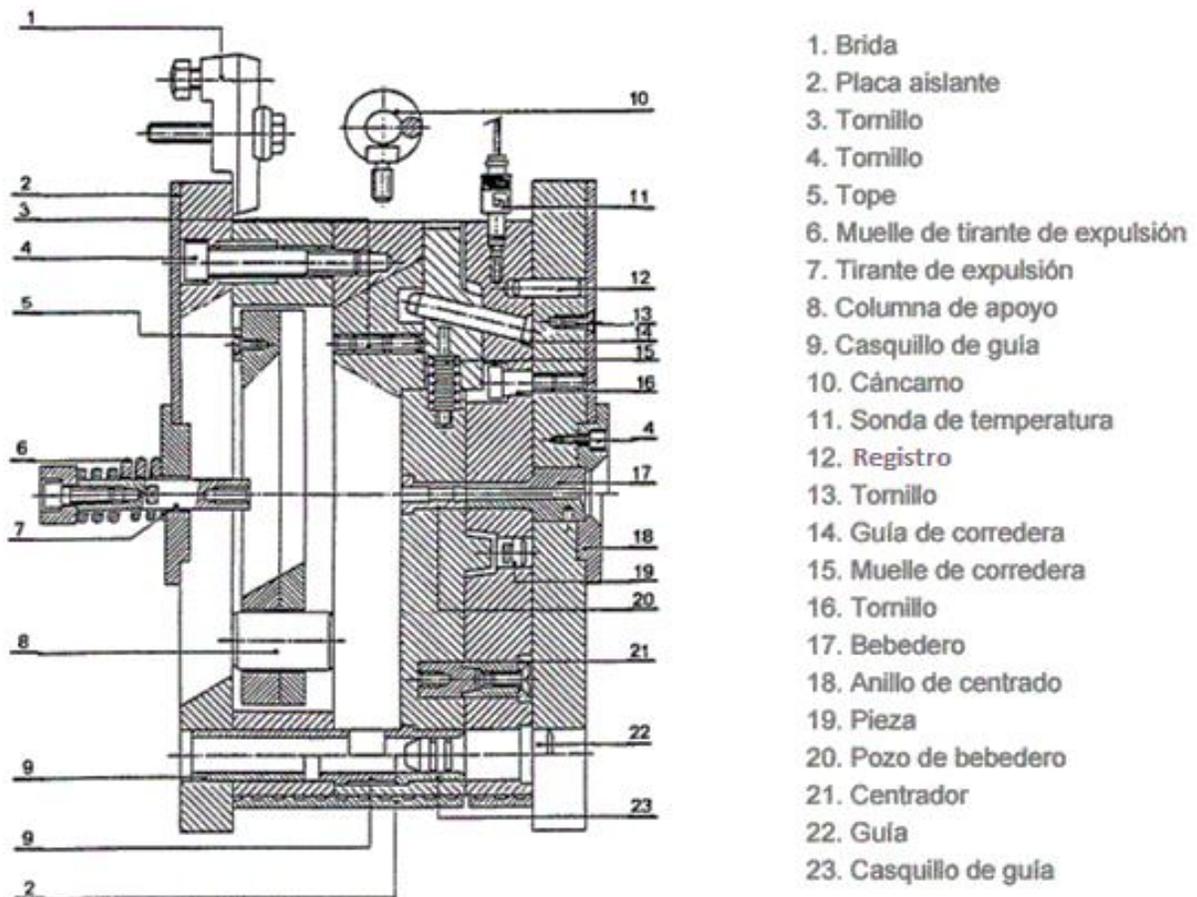


Figura 258. Distribución típica de los elementos de un molde 1. (Marquez, s.f., p.2).

Debe tenerse presente, que el ingeniero siempre deberá evaluar las experiencias a las cuales tenga acceso para mejorar en el nuevo diseño y construir algo mejor, en lugar de copiar la anterior solución y estar expuesto a cometer los mismos errores o falencias del diseño de partida. Pero toda empresa de manufactura de moldes, con el paso del tiempo y la experiencia, debe tender a clasificar sus moldes y a estandarizar sus moldes para los artículos predominantes. Esto aumentara su eficiencia en la producción de moldes y artículos.

La clasificación de moldes de inyección se rige lógicamente por las características principales de construcción y función. Estas son:

- El tipo de colada y su separación.
- El tipo de expulsión de las piezas inyectadas.
- La existencia o no de contrasalidas exteriores en la pieza a inyectar.
- El tipo de desmoldeo.

La Figura 260 representa un esquema de clasificación y desarrollo metódico y planificado clásico para moldes de inyección.

Para la construcción y dimensionado de piezas de inyección y sus correspondientes moldes se utilizan cada vez con mayor frecuencia el método de elementos finitos (FEM), mediante el uso de programas de diseño y simulación CAE para plásticos como TopSolid®, Cadmould®, Moldflow®, Moldex 3d®, Inventor®, Solid Works®, Solid Edge®, ProEnginier®, Creo®, etc. Con estos métodos se pueden reducir el tiempo de desarrollo y los costos, así como optimizar la funcionalidad de las piezas.

Sólo cuando se ha determinado la pieza a inyectar y todas las exigencias que influyen en el diseño de un molde, se puede ejecutar la construcción definitiva de éste.

La norma DIN E16750 «Moldes de inyección para materiales plásticos» contiene una división de los moldes según el siguiente listado:

- Molde estándar (molde de dos placas).
- Molde de mordazas (molde de correderas o patines).
- Molde de extracción por segmentos.
- Molde de tres placas.
- Molde de pisos (molde sándwich).
- Molde de canal caliente.

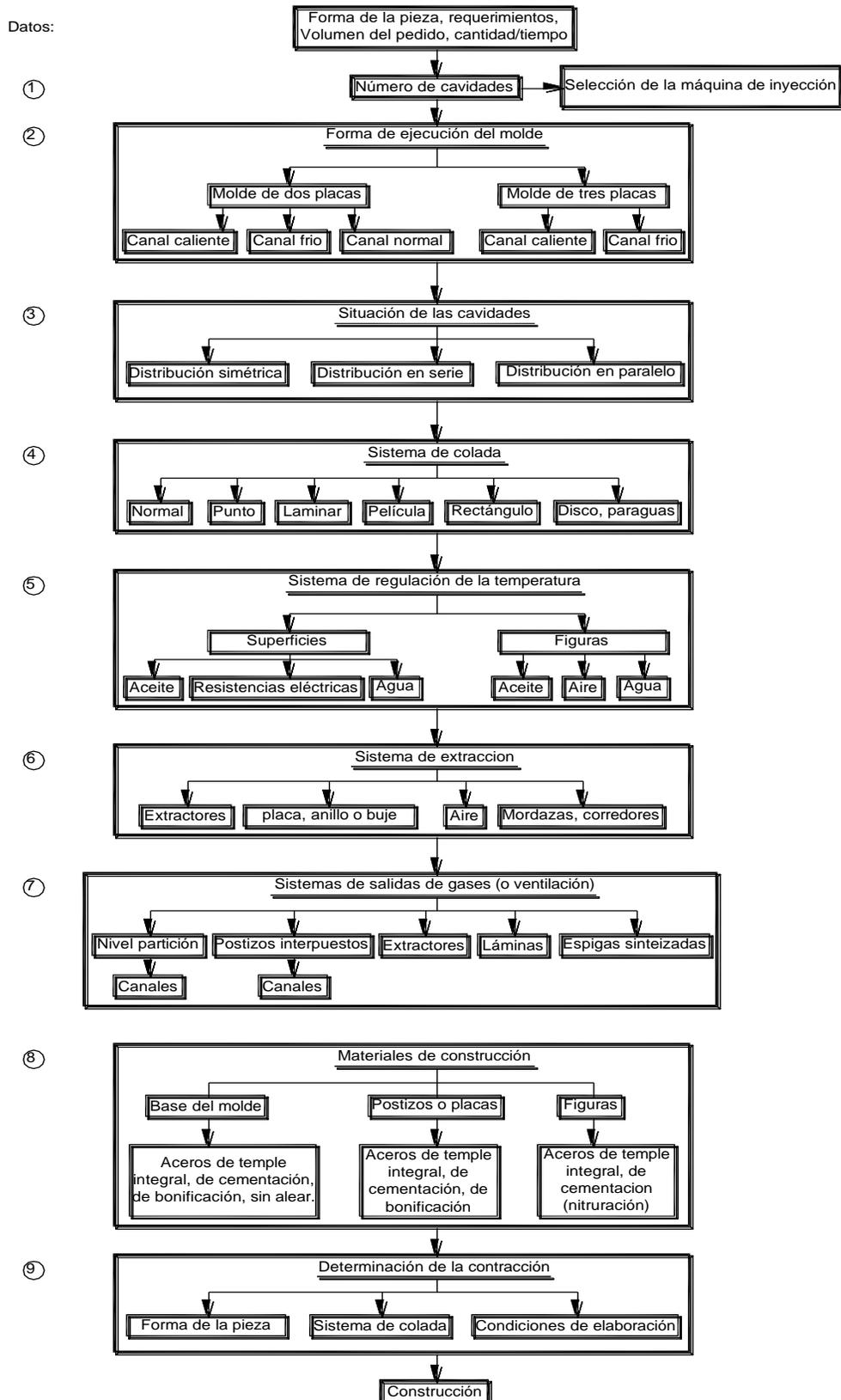


Figura 260. Esquema de clasificación y desarrollo metódico y planificado clásico para de moldes de inyección. (Unger Gastrow, 1998, p.1).

Aunque esta es la clasificación por norma, es posible que, dependiendo del tipo de industria y grado de tecnificación de la empresa, esta pueda presentar variaciones para uso interno y mejor aprovechamiento de los recursos disponibles. Esto se da desde el enfoque práctico y de *know-how* adquirido por la empresa en sus años de recorrido. Además, si la empresa tiene una buena práctica de anotación o record de las experiencias adquiridas, esta deberá haber influido en el desarrollo de los diseños y de la clasificación de estos (Unger, 1998, pp.1-2).

Una de las características que pueden determinar esta clasificación se basa en los métodos más comunes para la construcción del núcleo y cavidad los cuales son:

- **Método integral:** tanto el núcleo como la cavidad van directamente mecanizados en la placa. Lo cual lo hace un molde único para el artículo predeterminado y no existe recambio de cavidades lo que hace muy costoso cualquier reparación o modificación en el artículo.
- **Métodos postizos:** núcleo y cavidades están hechos sobre postizos que se colocarán en la placa móvil y fija respectivamente. Este método permite emplear el mismo molde con otras piezas de tamaños y características parecidas. Además de poder usar el molde para realizar ensayos y cavidades de prueba para el mismo artículo a artículos nuevos con características similares.

Otra característica que puede influir en esta clasificación se basa en el método de desprendimiento del punto de inyección lo cual nos da otra variable de clasificación:

- **De desprendimiento automático:** lo cual significa que el molde entrega la pieza separada de la rama y por métodos mecánicos internos al molde. Esto optimiza el proceso y facilita la automatización de este, haciendo uso de bandas separadoras, bandas de alimentación a módulos de ensamble, redireccionamiento de las ramas a molinos de picado para realimentación del proceso, etc.
- **De desgrane manual:** contrario al desprendimiento automático, en este caso el molde entrega la pieza pegada a la rama y requiere un proceso adicional de desgrane manual. Este tipo de moldes se usa mucho por la simplicidad y economía en su fabricación y diseño. Y es muy común verlos en sistema de producción poco tecnificados o de producción de piezas de poco valor agregado. Es el mejor método para la elaboración de piezas donde no es importante el aspecto físico o la calidad del producto final.

Al momento de considerar el uso de uno u otro de los métodos de desprendimiento del punto de inyección, debe considerarse primordialmente los costos de implementación, pues puede ser más costoso implementar el sistema de desprendimiento automático, que la mano de obra del desgrane manual, pero esto puede sacrificar la productividad.

5.2.1 Moldes de dos placas.

El molde de dos placas es el diseño más empleado en la industria. Esta combinación ofrece muchas ventajas a la hora de diseñar, manipular el molde, utilizar elementos normalizados, etc. y por tanto es la más económica.

Se construye en dos partes, mitad núcleo y mitad cavidad. La cavidad va situada en el plato fijo de la máquina y el núcleo va situado sobre la parte móvil junto con el sistema de expulsión.

La refrigeración se aplica a ambas partes del molde para poder controlar mejor la temperatura de cada parte (Fernandez, 2014, p.37).

Su característica principal es que tanto la rama como las piezas son expulsadas del molde por la misma línea de apertura de este. Esto implica que los canales de alimentación o llenado están en la misma línea de partición del molde. Ver Figura 261.

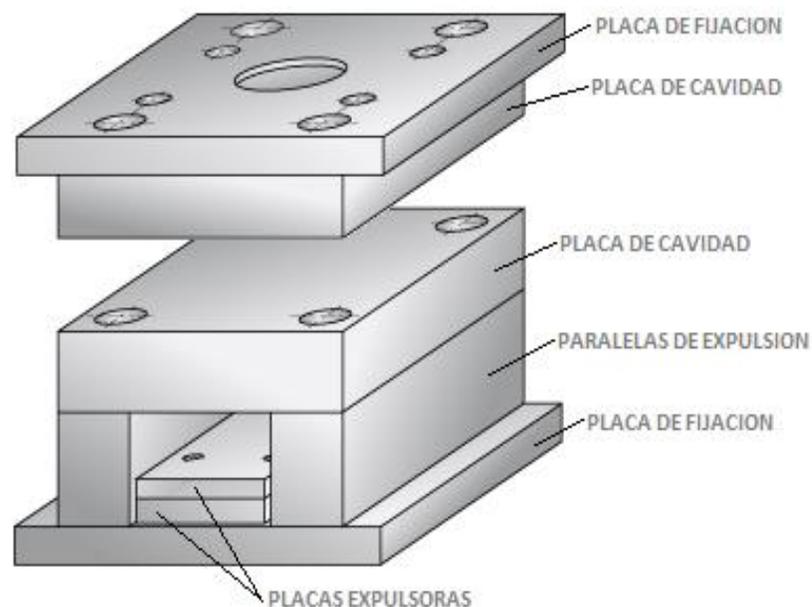


Figura 261. Representación básica de un molde de 2 placas. ([Meusbürger Georg GmbH & Co KG](#), s.f.).

Este tipo de moldes presentan otra característica importante, con respecto al desprendimiento del punto de inyección. Dicha característica lo hace automático en caso desprenderse este de la pieza moldeada en forma mecánica o semi automático en caso de que se necesite intervención manual para “desgranar” es decir, desprender los puntos de inyección de las piezas moldeadas de los canales de alimentación de forma manual. Ver Figura 262

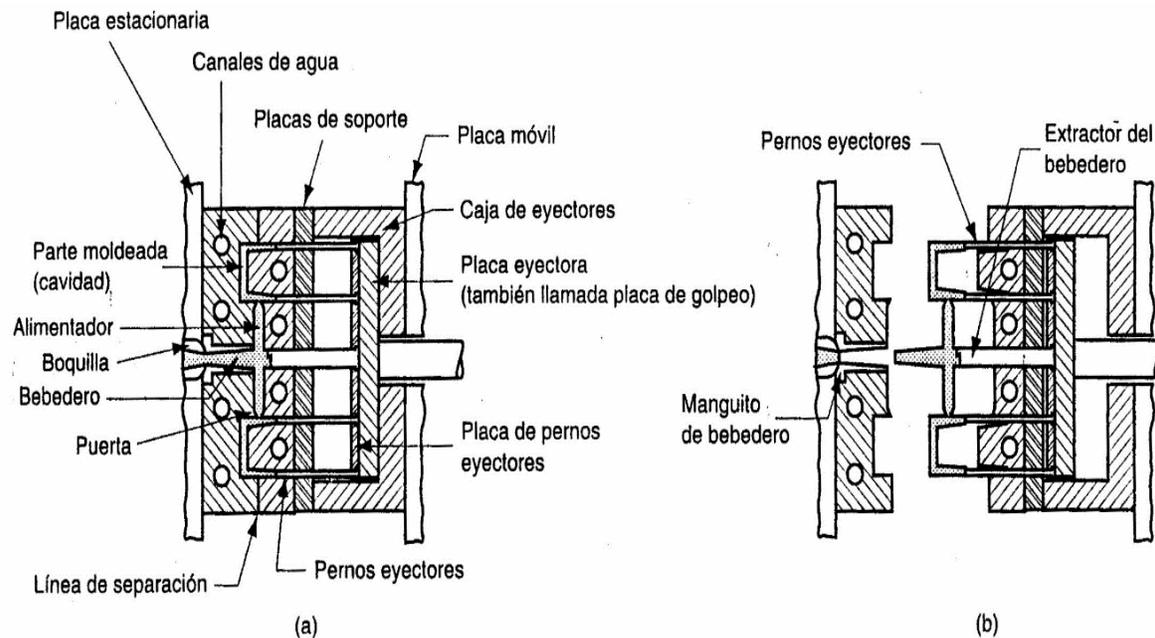


Figura 262. Esquema de apertura de molde de dos placas. a) molde cerrado. b) molde abierto. (Castrejón, 2019, p.114).

5.2.2 Moldes de tres placas.

Este tipo de molde se usa cuando se desea tener un sistema de canales de colada en un plano diferente del plano de unión de las placas del molde. Este podría ser el caso de un molde con varias cavidades, en el cual es deseable tener una alimentación central para cada una de ellas o una alimentación del material a través de un sistema de canal caliente. En este tipo de molde la separación de los puntos de inyección se realiza de generalmente de forma automática y el sistema de canales y bebederos son expulsados separadamente (Chávez, 2019, p.24). Ver Figura 263 y Figura 264.

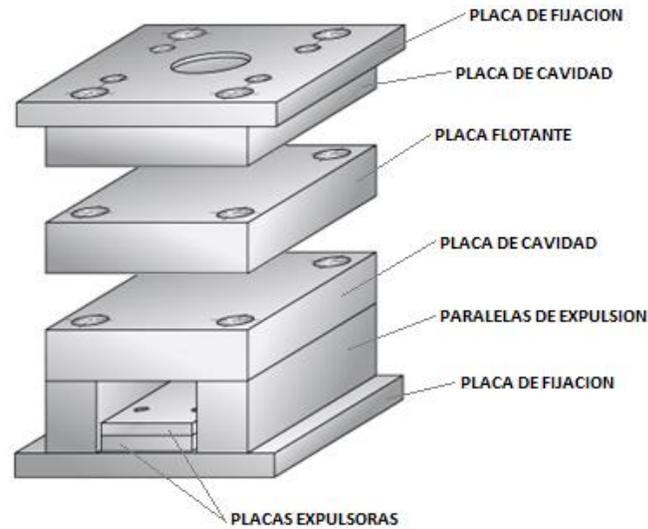


Figura 263. Representación básica de un molde de tres placas. ([Meusburger Georg GmbH & Co KG](#), s.f.).

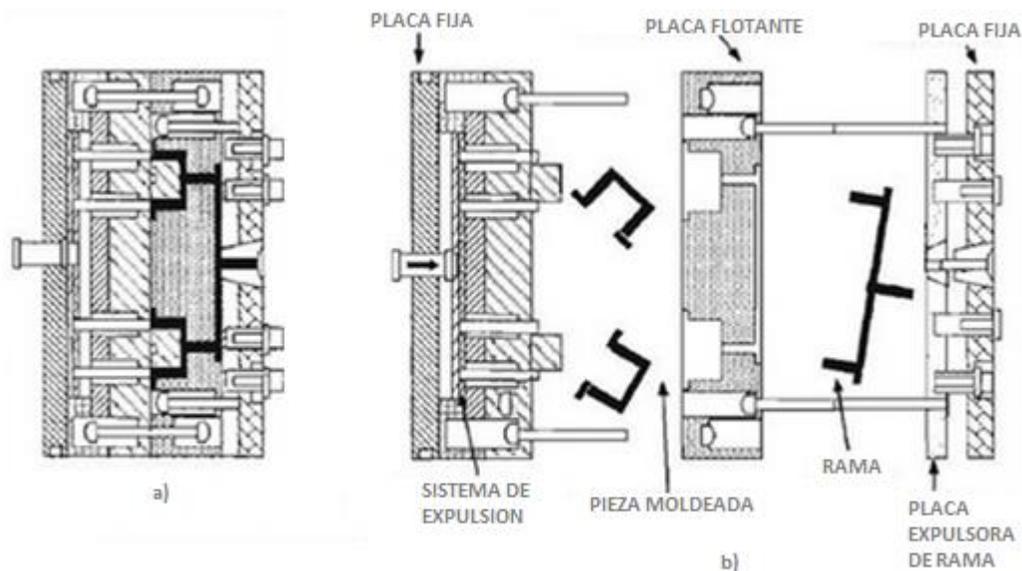


Figura 264. Esquema de apertura de molde tres placas. a) Molde cerrado. b) Molde abierto. (Lidomar, 2012).

En este tipo de sistema se montan prácticamente dos moldes en serie en el sentido de cierre, sin que se requiera el doble de fuerza de cierre. La condición previa para este tipo de moldes es una elevada cantidad de piezas relativamente fáciles, como por ejemplo piezas de forma plana o cilíndrica. Como ventaja esencial se han de mencionar los bajos costos de producción. Los moldes de tres placas o “pisos” hoy en día y en la industria global, se equipan con sistemas de canal o “colada” caliente los cuales demandan extremadas exigencias y altos costes de fabricación, pero proveen al molde de un gran al equilibrio térmico (homogeneidad térmica) y bajos costes de producción de los artículos plásticos. Así que la decisión de usar

colada caliente o rama de alimentación depende del punto de equilibrio entre los costos de fabricación y los de producción.

5.2.3 Moldes según el tipo de inyección.

Otro parámetro que influye en la clasificación de los moldes es la forma y/o posición del punto de inyección, ya que este determina en gran parte la complejidad del molde pues influye en la selección o desarrollo de sistema de expulsión, la refrigeración de las piezas de la cavidad, el tamaño de la rama y por consiguiente el tamaño del molde.

Podemos dividir esta clasificación en tres grandes grupos, aunque puede haber variaciones leves en estos y posiblemente determinadas piezas, no pertenezcan a ninguno de ellos.

- De inyección externa.
- De inyección interna.
- De inyección "Subgate" o subterráneo.

5.2.3.1 De inyección externa.

La inyección externa se configura como la entrada de material a la cavidad que conforma la pieza, se da por cualquier punto exterior de la pieza y la forma más simple es la centrada. En este punto de inyección intervienen los fondos, las hembras y en algunos casos los patines del molde. El artículo se expulsa desde el lado de móvil de la máquina. Ver Figura 265 y Figura 266.

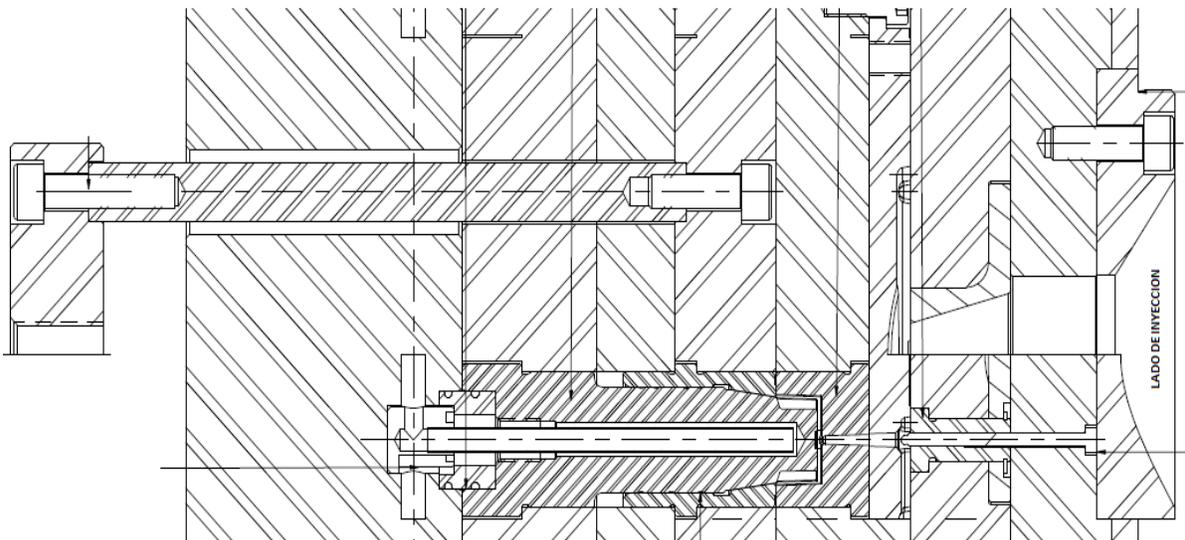


Figura 265. Ejemplo de punto de inyección externo central. Elaboración propia.

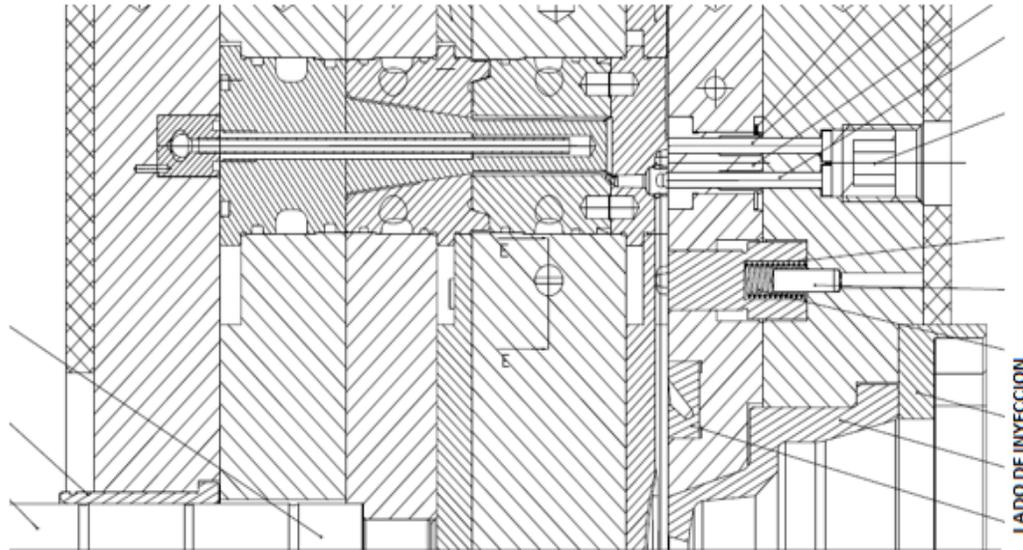


Figura 266. Ejemplo de punto de inyección externo central. Elaboración propia.

5.2.3.2 De inyección interna.

Este tipo de inyección se realiza a través de los machos o núcleos del molde, lo cual aumenta el tamaño de la rama. Esto se usa cuando la estética del artículo es muy importante y no se permite un punto de inyección visible. Pero debe considerarse que el costo del molde aumenta y puede conllevar a sacrificios de ciclo por el aumento el tamaño de rama y en algunos casos imposibilita la refrigeración de los núcleos que es un aspecto de gran importancia en cualquier molde. La expulsión del artículo se realiza desde el lado de fijo o de inyección de la máquina. Ver Figura 267.

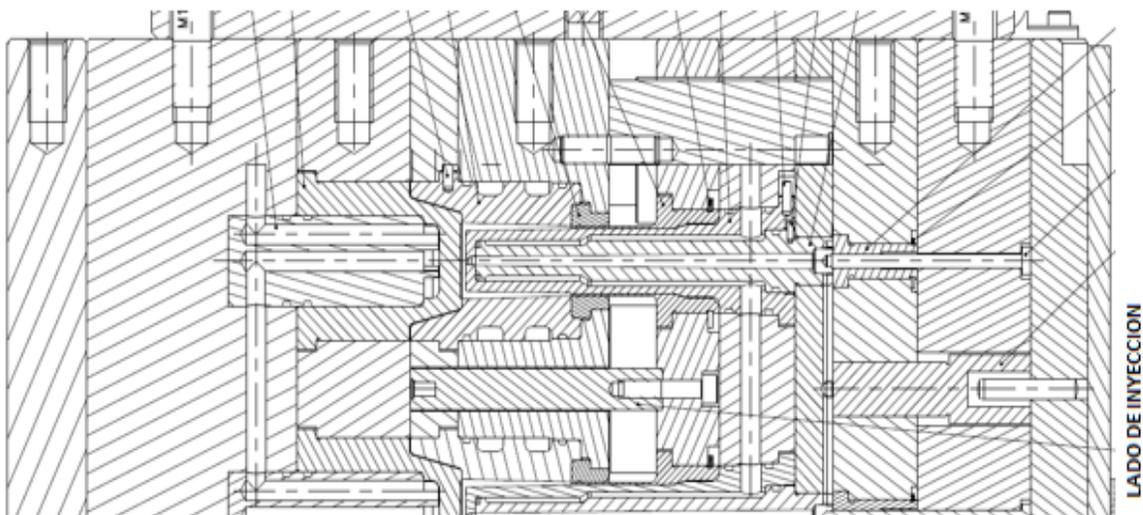


Figura 267. Ejemplo de punto de inyección interno central. Elaboración propia.

Para obtener puntos de inyección interna, generalmente la pieza debe invertirse con respecto al sistema de inyección y esto por consiguiente también invierte su expulsión y no puede usarse el sistema de vástago expulsor de la máquina, lo que implica usar sistemas adicionales o auxiliares de expulsión. De allí que los costos tanto en fabricación como en tiempo de ciclo sean un contra que pagar por tener un punto de inyección interno. Ver Figura 268.

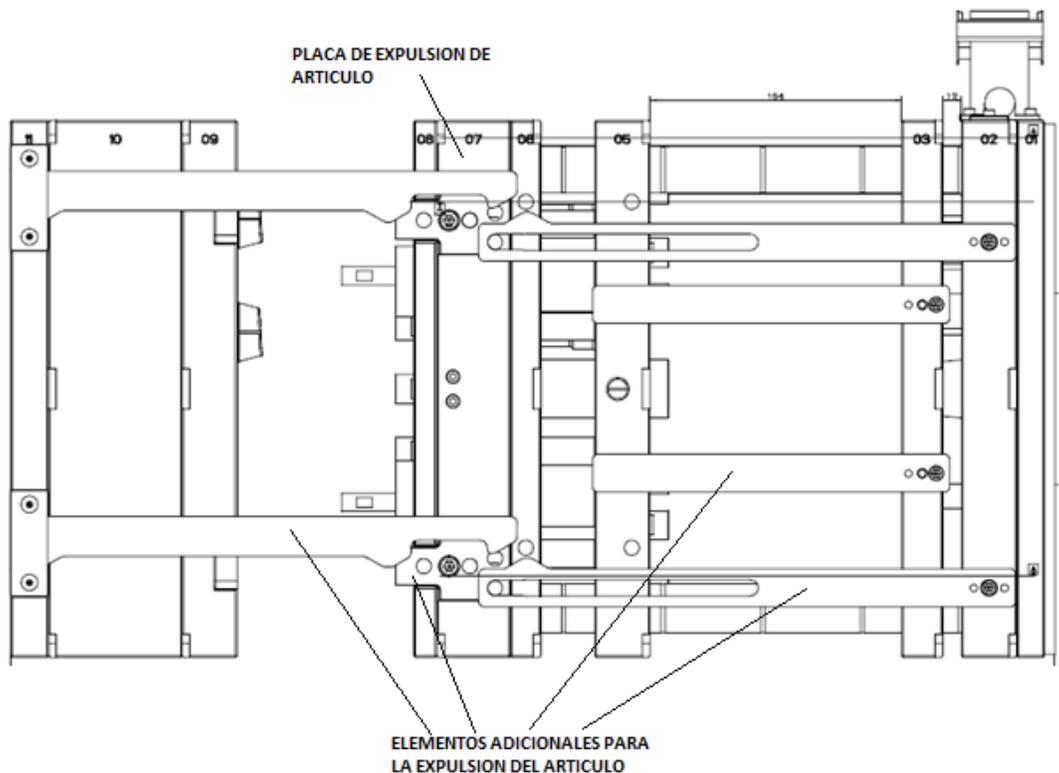


Figura 268. Ejemplo de elementos auxiliares para lograr la expulsión de un artículo con punto de inyección interno. Elaboración propia.

5.2.3.3 De inyección "Subgate" Subterráneo.

Este tipo de puntos de inyección se dan generalmente en moldes de dos placas, esto con el fin de lograr desgrane automático de los artículos. En este tipo de puntos se garantiza el desprendimiento de punto de forma mecánica, pues para que el artículo sea desmoldado debe pasar por un cortador metálico.

Este cortador es un inserto en el molde el cual tiene parte del pitorro y el punto de inyección, incluso parte de la cavidad y por lo general está en la placa de expulsión. Su movimiento dentro del molde es en dirección contraria a la del artículo y la rama desmoldada. Ver Figura 269.

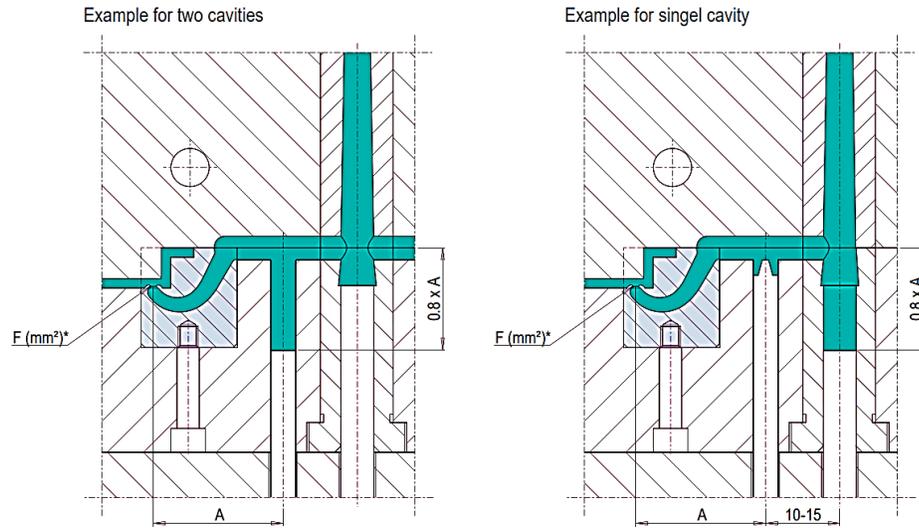


Figura 269. Ejemplo de inserto de inyección para contornos bajos, no apto para plásticos reforzados. ([Meusburger](#), s.f.).

Este tipo de puntos, debido a que tienen que girar dentro del inserto para poder liberarse, dependen del tipo de material para poder lograrlo. Para puntos con curvas muy pronunciadas los materiales reforzados no son admisibles, pues se revientan dentro del inserto, como se ve en la figura anterior. Pero en general para plásticos con hasta 60% de refuerzo y para variados materiales funciona. Estos insertos se consiguen comercialmente y en los catálogos del proveedor se presentan los requerimientos dimensionales y de funcionamiento para el material requerido. Por ejemplo, ver [Meusburger](#), (s.f.). Esta información también es útil para diseñar los insertos requeridos en los diseños sin recurrir a la compra del elemento comercial. Ver Figura 270.

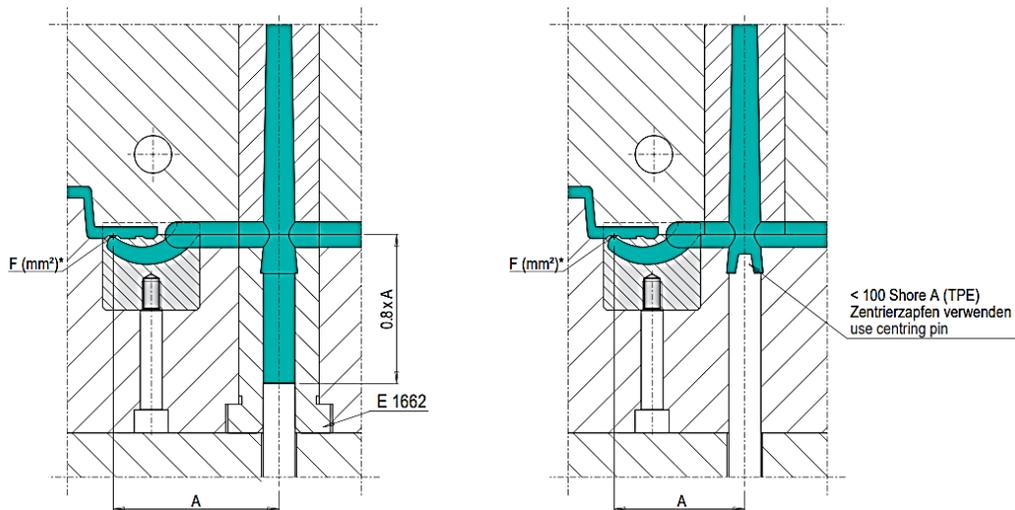


Figura 270. Ejemplo de inserto de inyección para contornos bajos, no apto para plásticos reforzados. ([Meusburger](#), s.f.).

5.2.4 Moldes de patines.

Los patines son elementos que se usa en los moldes para lograr desmoldeo de piezas que tienen formas que presentan contrasalidas en el sentido de apertura del molde. Pueden denominarse patines o correderas dependiendo de su tamaño y función. Ver Figura 271.

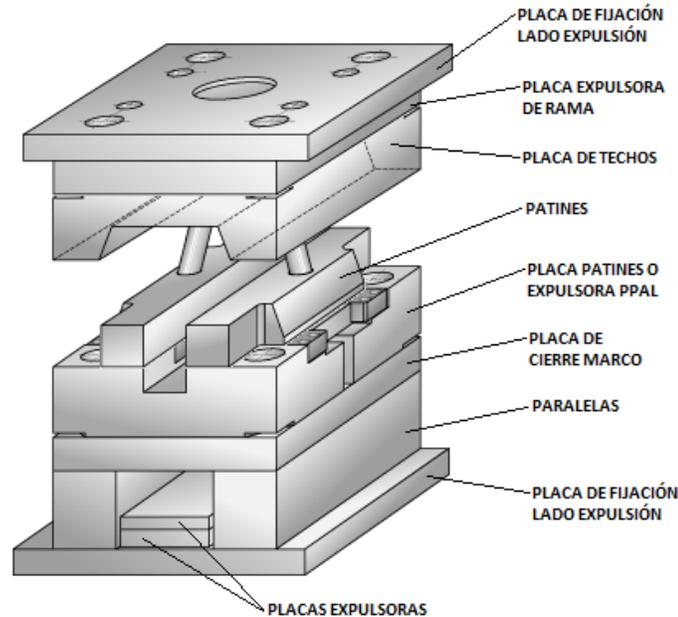


Figura 271. Representación básica de un molde de patines. ([Meusburger](#), s.f.).

Su funcionamiento se basa en un principio simple de deslizamiento y movimiento relativo por medio de superficies o guías inclinadas. Aprovechando el movimiento lineal axial del molde, se separan los patines de las placas y mediante el ángulo de la guía se obliga la apertura de los patines con un movimiento perpendicular relativo al movimiento de apertura de máquina.

La placa de techos o la que mantiene cerrados los patines, debe ser lo más rígida posible pues las presiones que soporta tienden a fletarla. Dicha flexión permite que el patín o corredera se abra y se generen líneas pronunciadas o visibles en los artículos. No es recomendable que los techos del patín sean insertados en la placa, es mejor que sean integrales con esta, a pesar de que esto genera grandes mecanizados de desbaste y tratamientos de alivios de tensión posteriores. Ver Figura 272.

También es importante que en moldes cuya expectativa de vida sea alta, deben ponerse platinas sufridoras en los techos para controlar el desgaste y mantener la precarga necesaria en los patines que ayuden a tener un buen sello entre estos y las demás piezas que conforman

el artículo. Estas precargas se dan del orden de 0.03 a 0.05 mm perpendicular al ángulo del patín.

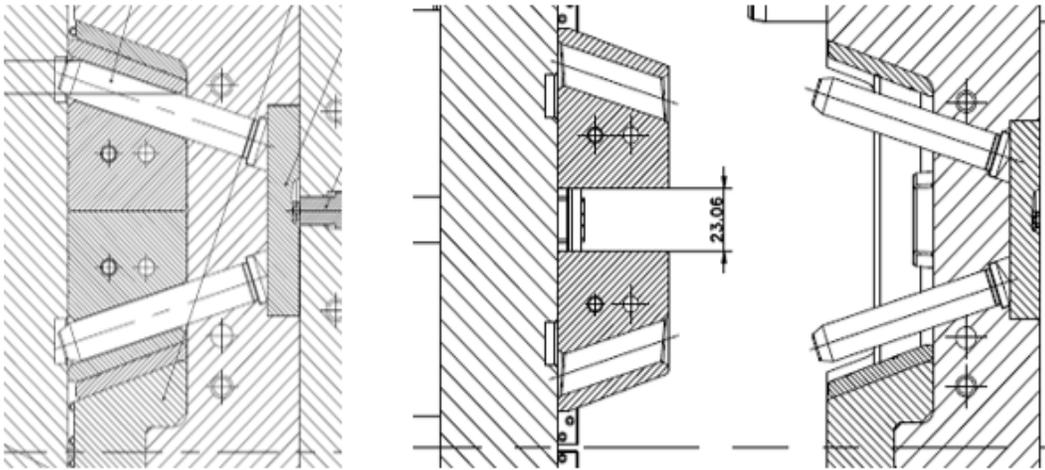


Figura 272. Ejemplo de movimiento de patín cerrado (der) y abierto (izq). Elaboración propia.

La combinación de movimientos de apertura y diferentes dispositivos pueden lograr una gran gama de tipos de desmoldeo y variedad sistemas para lograr expulsar artículos con contrasalidas especiales o particularmente complicadas.

Los patines pueden formar varias piezas o ser independientes. Cuando son de varias cavidades estas pueden ser directamente mecanizadas en la cavidad o ser usados con insertos intercambiables como se ve en la Figura 273.

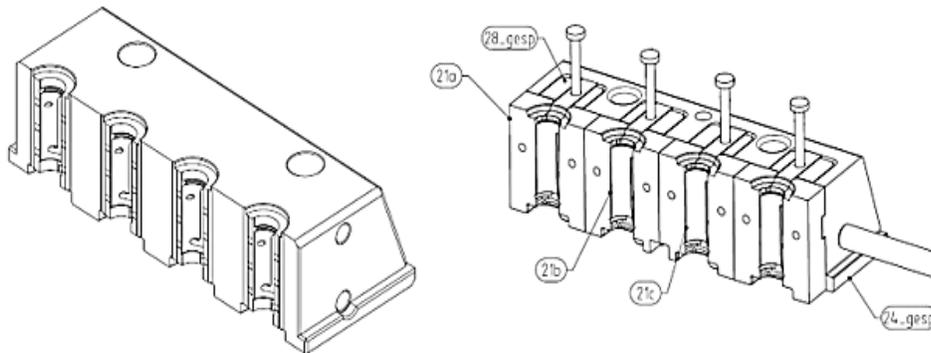


Figura 273. Ejemplo de patín con cuatro cavidades mecanizadas directamente (izq). Patín insertado (der). Elaboración propia.

Los patines insertados tienen la ventaja de que se puede reemplazar las cavidades que presenten problemas, sin desechar el patín con las cavidades buenas, como pasaría en el caso de los patines completos, además que puede utilizarse para ensayos de nuevas piezas plásticas similares o incluso tener varias versiones de diferentes artículos para producción.

Para tomar la decisión de hacer patines con las cavidades directamente mecanizadas o insertar estas, debe tenerse en cuenta que los patines con las cavidades insertadas incrementan los costos de mecanizado, pero a largo plazo pueden resultar más económicos en términos de reparación y mantenimiento del molde, pues se incrementan las posibilidades de uso y vida útil de este.

Las correderas son sistemas de menor tamaño, pero presentan un principio de funcionamiento similar al de los patines, haciendo uso de colas de milano y pequeñas superficies de guía para su deslizamiento y generación de movimientos relativos. Estas se usan para eliminar contrasalidas que se generan por enganches, perforaciones o zonas de pequeñas contrasalidas que se presentan en el artículo. Ver Figura 274.

Para las correderas también se deben tener precargas con las piezas que hacen de techo de estas, para así lograr los sellos necesarios para evitar rebabas. Estas precargas son menores a las de los patines pues son de menor tamaño las piezas que las conforman, con respecto a las que conforman los patines de cavidad.

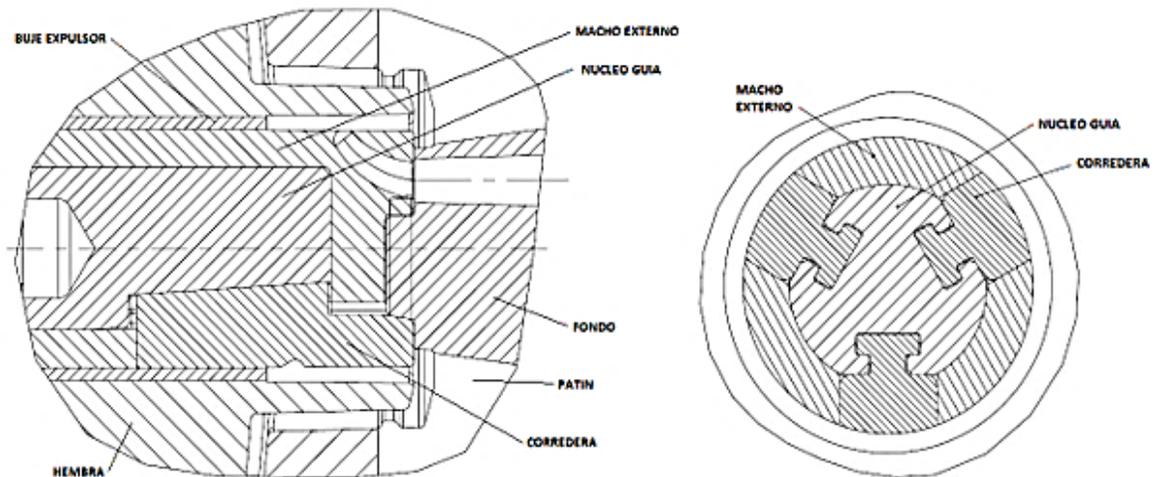


Figura 274. Ejemplo de macho colapsible diseñado para una aplicación específica. Elaboración propia.

Las correderas pueden ser diseñadas y fabricadas específicamente para el molde objetivo o ser implementadas correderas comerciales o estándares suministradas por los diferentes proveedores. Ver Figura 275.

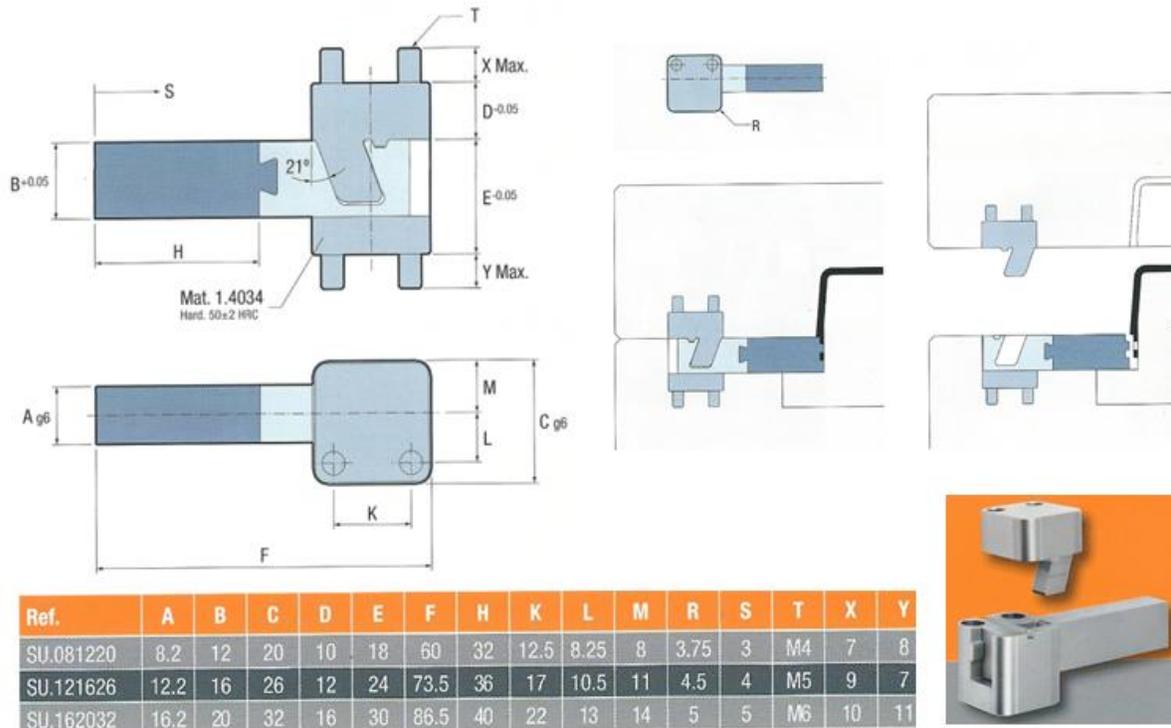


Figura 275. Ejemplo de corredera estándar comercial. Página típica de un catálogo de proveedor comercial. (CUMSA, 2011, p.1.04).

5.2.5 Otros tipos de molde.

Hemos centrado la atención en los moldes típicos para producción de piezas pequeñas orientado a la industria cosmética. Pero cabe resaltar que estos principios son válidos para la mayoría de las industrias de transformación de plásticos. La combinación de múltiples sistemas en un mismo molde determina el alcance de este, en la consecución de la pieza requerida.

Además de los moldes estudiados en este documento. Podemos mencionar otro tipo de moldes de interés que complementan el conocimiento para lograr en objetivo de la transformación de plásticos de maneras más eficientes y productivas según la industria y el alcance que se quiera lograr.

Tenemos así:

- Moldes de **extrusión soplado**. Estos moldes se usan típicamente para elaborar envases o recipientes con bocas roscadas. El principio es simple: se extruye una manga plástica “*Párison*”, mediante un molde de se cierra está realizando los cortes de cuello, hombro y fondo. En el corte del cuello del envase también se forma la

rosca y por el macho interno que formara el envase se introduce el aire que sopla el envase contra las paredes del molde. (Figura 276).

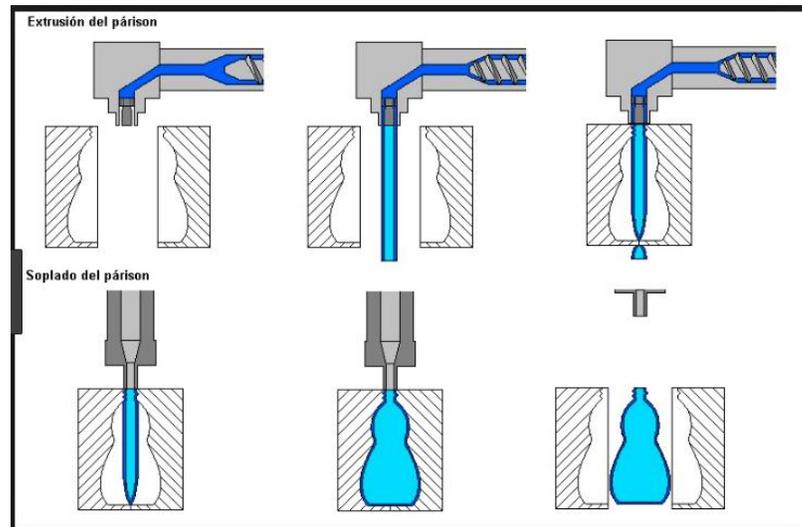


Figura 276. Esquema del proceso de extrusión soplado. (Ojeda, 2012).

- Moldes de **inyecto soplado**. Estos también tienen como función generar envases o recipientes con bocas roscadas, pero buscando mayor precisión y calidad de acabados y estabilidad dimensional. Se componen de dos moldes: uno donde se inyecta una preforma con su respectiva rosca y otro donde se realiza el soplado de esta. La máquina consta de tres o cuatro estaciones, por las cuales rota el producto; inyección, calentamiento, soplado y expulsión. Las máquinas de tres estaciones carecen de la estación de calentamiento. (Figura 277)

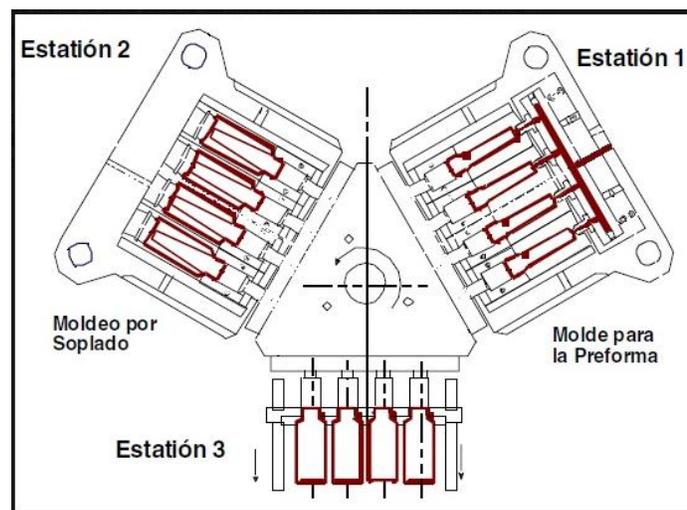
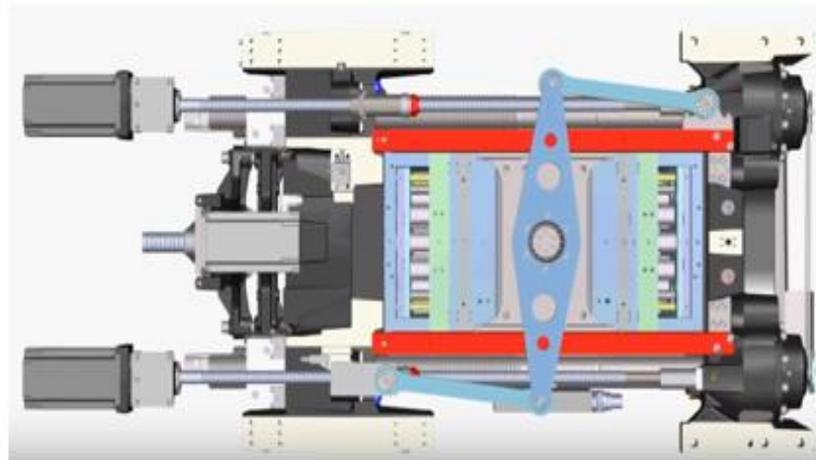


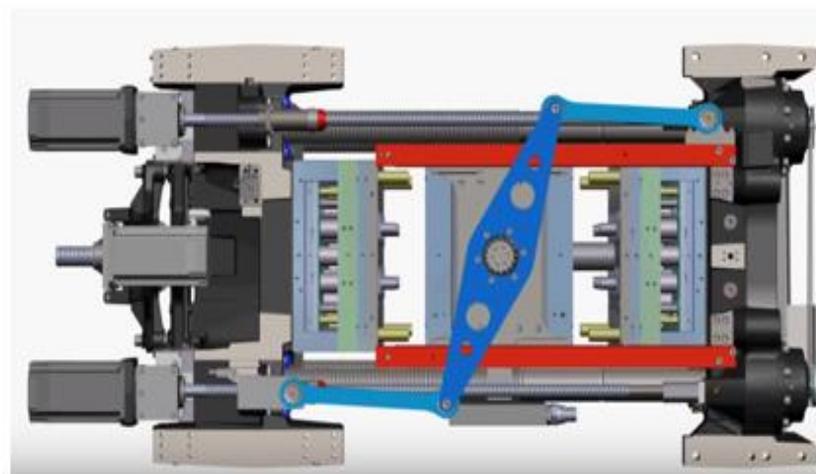
Figura 277. Esquema del proceso de inyección soplado para una máquina de tres estaciones. (Ojeda, 2012).

- **Moldes de pila** o “*stack molds*”. En comparación con los moldes convencionales de una sola cara, los moldes apilados pueden duplicar virtualmente la salida de una máquina de moldeo por inyección distribuyendo la masa plástica en dos o más superficies separadas de separación del molde.

La característica definitoria de un molde apilado es las dos (o más) superficies de separación del molde o líneas de división del molde. Un molde de apilamiento no requiere mucha más fuerza de sujeción que un molde de una sola cara porque las áreas de superficie de las partes proyectadas de las cavidades en ambos lados del bloque central se anulan entre sí. Una regla de oro para una estimación de la fuerza de sujeción es tomar el área de superficie de la parte proyectada por la presión de fusión y multiplicarla por un factor de 1.1. (Figura 278) Ver [Anexo C](#).



Stack mold cerrado



Stack mold abierto

Figura 278. Ejemplo de molde apilado (*stack mold*). ([Niigon Machines](#), 2015).

- **Moldes de coinyección** o multicomponente. Estos básicamente se refieren a la máquina inyectora, pues se tienen dos moldes montados en un plato rotativo en la máquina, que mediante un giro de este combinan las partes del molde de modo que en una primera inyección y posición de los moldes inyectan un tipo de material o color y después del giro inyectan otro tipo de material o color sobre el anterior. Produciendo así una pieza de varios colores o materiales por capas. (Figura 279).

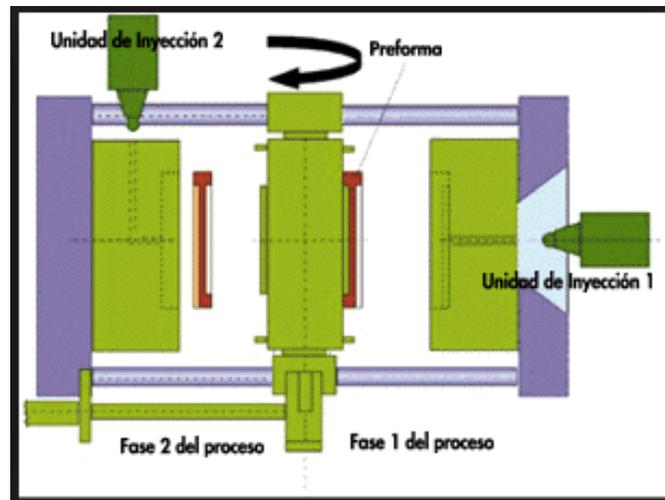


Figura 279. Ejemplo de molde de coinyección. (Niigon Machines, 2015)

5.3 Funciones Básicas del Molde y sus Sistemas

A continuación, se describen y se dan pautas de funcionamiento y consideraciones de diseño para los sistemas más significativos y usualmente usados en los moldes de inyección.

5.3.1 Sistema de guiado.

El sistema de guiado es de vital importancia para lograr un buen molde. Este influye en el buen sello de las diferentes piezas que conforman las cavidades y en la durabilidad de las mismas, pues evitan roces innecesarios entre estas, producto del movimiento de apertura y cierre del molde. Cuando existen placas flotantes siempre se requieren guías internas en el molde y de estas depende que el molde no presente desalineaciones por el movimiento de dichas placas. Figura 280.

Cuando las placas flotantes están muy lejos de la placa fija que tiene el soporte de la guía es muy probable que por la flexión de estas que es provocada por el peso de las placas flotantes haga que el cierre del molde se dé mal, lo que se denomina cierre con caída. Este se considera un problema que puede generar desgastes y movimientos indeseados en el molde y se

soluciona con barras laterales de sección rectangular que por su robustez disminuyen en alto grado la caída del molde. Vale acotar que esto genera costos adicionales en la fabricación del molde y debe sopesarse esto con la cantidad de piezas a producir y el retorno de la inversión. Ver Figura 281.

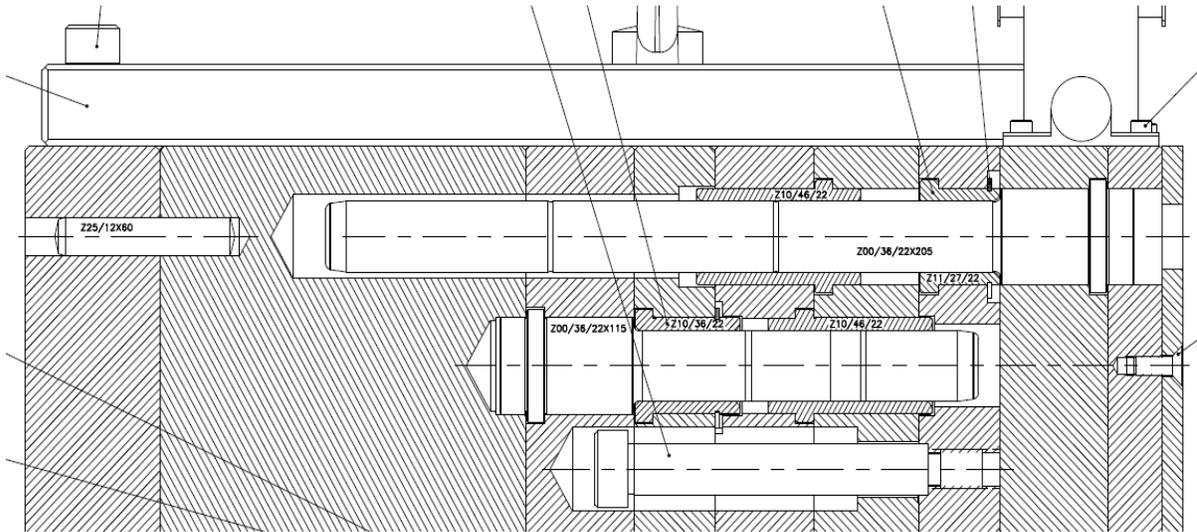


Figura 280. Guías y bujes para alineación de moldes. Ejemplo de disposición interna en el molde. Elaboración propia.

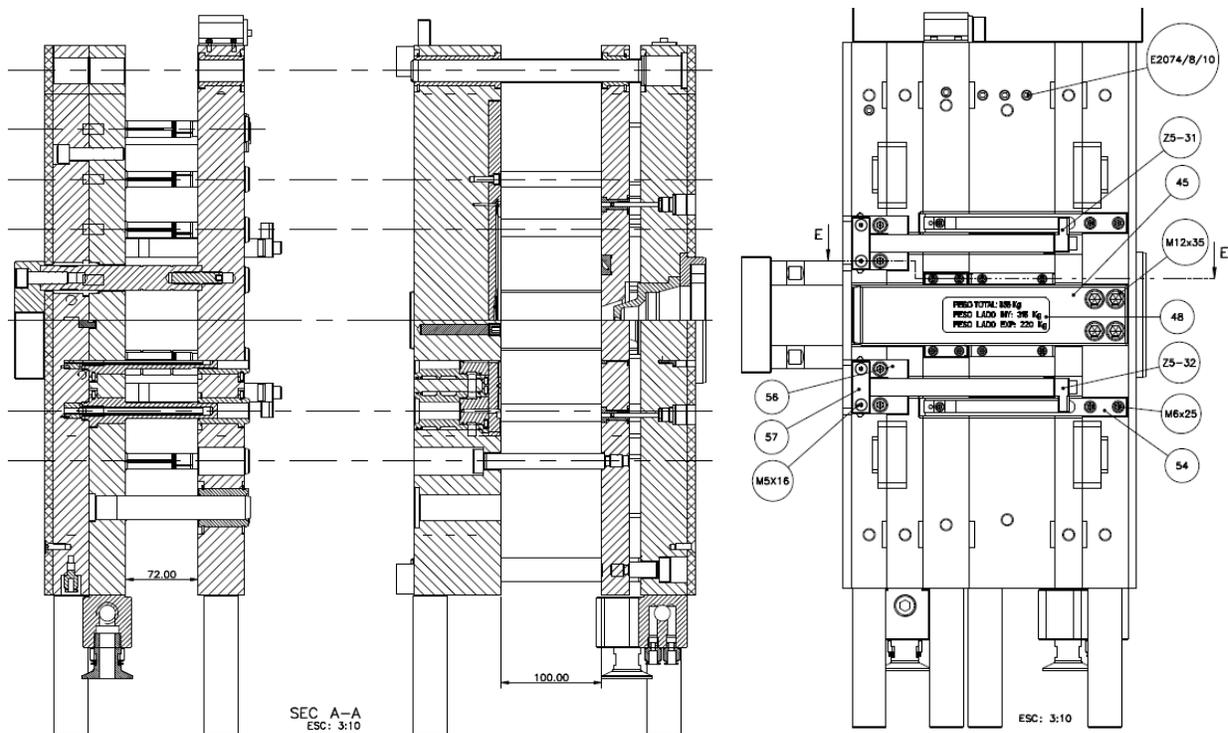


Figura 281. Apertura de molde. Muestra guías principales y placa flotante de molde lado inyección. (Izq) Ejemplo de un requerimiento de guía rectangular lateral central por peso (der). Elaboración propia.

Por lo anterior las partes móviles del molde se han de guiar y centrar. La calidad del centrado y tipo de guías a usar en el molde, dependen de:

- La exigencia en calidad de las piezas.
- La forma de la pieza a moldear.
- Las líneas de partición requeridas para la conformación de la pieza.
- Cantidad y complejidad de las partes móviles en el molde.
- El tamaño, peso y amplitud de desplazamiento de las placas o grupos de placas en el molde. Estas placas que se desplazan por el molde y se alejan de las placas fijas a la máquina se le denominan generalmente “placas flotantes”.
- Requerimiento de durabilidad del molde.

De lo anterior cabe recalcar que las columnas de guía de una placa móvil en un molde de inyección son, como mucho, un pre-ajuste basto y difícilmente tolerado. Pero antes de evaluar la posibilidad de usar guiados de mayor precisión, considerar la verdadera precisión requerida para la aplicación desarrollada. Pues el incremento de los costos puede no ser justificable.

De las condiciones anteriores, la más crítica tiene que ver con las placas flotantes, sobre todo si presentan grandes desplazamientos y además un peso significativo. Esto hace necesario siempre un «ajuste o alineamiento interno» del molde de inyección. Esto se debe a que el peso de las placas en movimiento genera flexión en las guías, en otras palabras, que el molde presente flexiones. Figura 282.

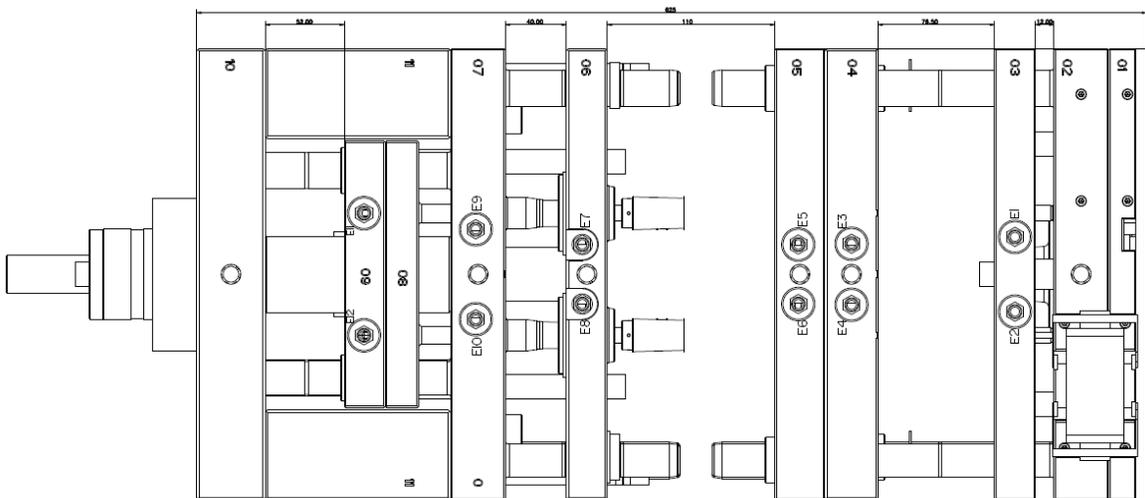


Figura 282. Apertura de molde de tres placas (vista superior). Mostrando un sistema de guiado típico. Elaboración propia.

Existen muchos elementos que pueden ser usados para centrar y alinear las diferentes partes del molde. Estos pueden ser diseñados para el molde específico o ser estándares comerciales suministrados por diferentes proveedores.

El tener conocimiento de los estándares que pueden ser adquiridos comercialmente puede ayudar mucho a diseñarlos a medida y combinar principios de funcionamiento para lograr nuevos diseños funcionales y aplicarlos al diseño del molde que sea requerido. Ver Figura 283 y Figura 284.

Guiado			
Subcategorías * Todas las subcategorías Guiado estándar Guías planas Guías paquete de expulsión Guías inclinadas Guiado dematrices grandes Accesorios	E 1000		Columna guía con centrador
	E 10025		Columna-guía con centrador, sin ranuras de lubricación, con recubrimiento DLC
	E 1010		Columna guía sin centrador
	E 10125		Columna-guía sin centrador, sin ranuras de lubricación, con recubrimiento DLC
	E 1020		Guía con doble diám. de ajuste y ranuras de lubricación
	E 1030		Guía inclinada con cabeza cilíndrica
	E 1032		Guía inclinada con cabeza inclinada
	E 1034		Guía inclinada
	E 3060		Alojamiento de guía inclinada
	E 1035		Guía con valona para unidad de guiado de bolas
	E 1040		Guía para unidad de guiado de bolas
	E 1050		Guía para expulsor central
E 1060		Casquillo guía	

Figura 283. Algunos elementos de guiado comerciales suministrados por proveedores internacionales. ([Meusburger](#), s.f.).

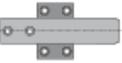
Centradores		
	E 1170	Casquillo de centraje con un diámetro de ajuste
	E 1304	Centrador recto
	E 1306	Centrador fino
	E 1308	Centrador recto horizontal
	E 1352	Centrador recto
	E 1310	Centrador cónico
	E 1311	Centrador fino cilíndrico
	E 1312	Arandela distanciadora para centrador cónico
	E 1314	Disco de sujeción para centrador cónico
	E 1315	Guía plana con centraje final, vertical
	E 1316	Soporte para guía plana, vertical
	E 1317	Placa de deslizamiento para guía plana, vertical
	E 1320	Guía plana con centraje final, horizontal

Figura 284. Algunos elementos de centrados comerciales suministrados por proveedores internacionales. ([Meusburger](#), s.f.).

Los mismos proveedores suministran guías técnicas de funcionamiento, montaje y fabricación de los alojamientos y amarre de los sistemas que suministran.

Un factor de gran importancia en el diseño del sistema de guiado es garantizar que el centro entre los sistemas móviles del molde, se transfiera de manera confiable. Para esto no siempre es suficiente con las guías principales del molde y debe recurrirse a otros elementos que garanticen esto.

Dichos elementos pueden ser registros, centradores, guías especiales con ajustes más precisos, bujes de bolas para más precisión y disminución de fricción, etc. Algunos de estos elementos se muestran en la Figura 285 y se da un ejemplo de montaje y ajuste en la Figura 286. (Ver catálogos online de las empresas proveedoras de partes estándares para moldes).

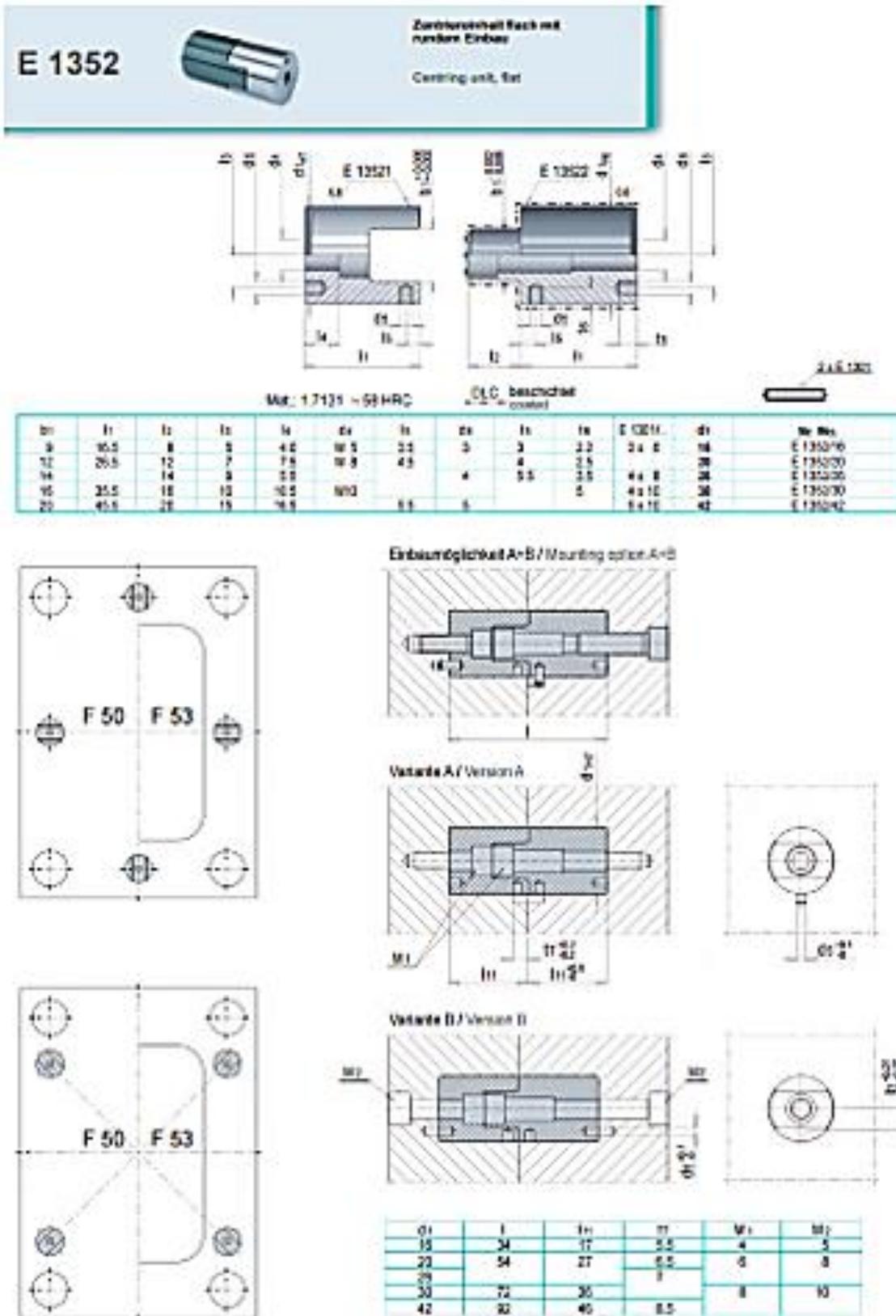


Figura 285. Ficha técnica de un elemento de centrado comercial, suministrado por el proveedor, para implementarlo en un molde objeto de diseño. (Meusburger, s.f.).

5.3.2 Sistema de cavidades de molde.

El sistema de cavidades como ya se ha mencionado, puede ser de dos tipos.

Uno se refiere a las cavidades que se mecanizan directamente en las placas del molde y que obligan a que el molde sea único para el artículo a inyectar. Este puede presentar dificultades y obligar a paros prolongados en la producción, en caso de trauma en alguna de las cavidades. Ver Figura 286.



Figura 286. Esquema de molde con cavidades de artículo grabadas directamente en las placas del molde. (SoloStocks, 2000-2019).

El otro tipo de sistema son las cavidades intercambiables, las cuales se montan en una estructura base denominada porta-molde como ya se ha hecho referencia. Este sistema presenta muchas ventajas al momento de reemplazar cavidades con problemas o realizar ajustes en una cavidad específica. También se presta para hacer cavidades de artículos similares en forma y tamaño usando la misma estructura de porta-molde. Así al sistema de cavidades para cada artículo, podemos denominarlo versión de molde. Ver Figura 287.

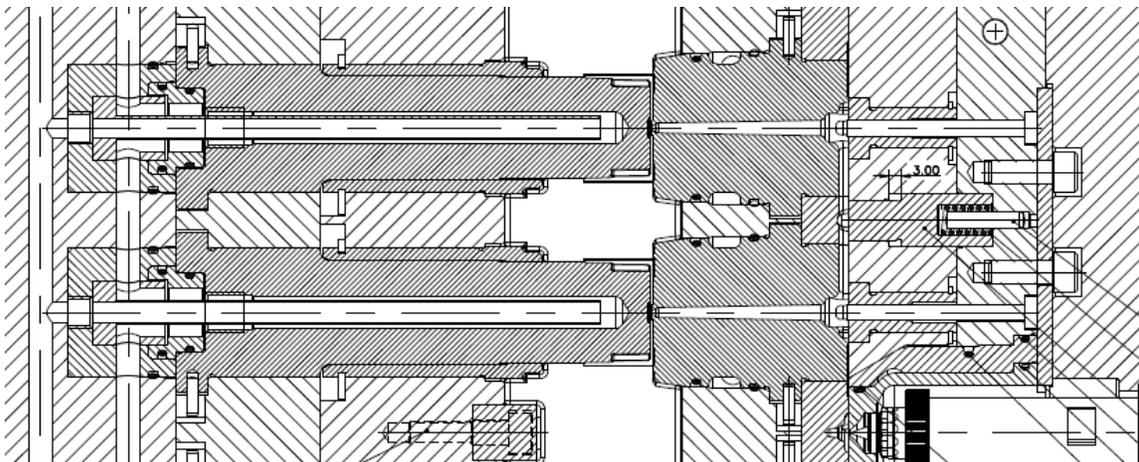


Figura 287. Esquema de versión típica para una tapa. Elaboración propia.

En el diseño de los sistemas de cavidades es muy importante tener presente que la alineación y centrado de estos sea el adecuado para que los sellos entre las piezas de este pueda ser garantizado, con el fin de evitar fugas de plástico o rebabas en las piezas. Normalmente, estos sellos pueden verificarse entintando las piezas y cerrando el molde con la presión de la máquina de inyección o prensas hidráulicas. Las prensas manuales posiblemente nos den una idea de cómo están los sellos, pero la fuerza de cierre puede no ser suficiente para cerrar bien el molde, sobre todo en aquellos que tienen patines, pues estos generalmente tienen precargas para mantenerlos cerrados.

En los sistemas de cavidades intercambiables, las versiones deben tener una consideración importante en la forma en que se ajustan en sus respectivos alojamientos en el porta-molde. Las tolerancias de los diferentes elementos deben garantizar el centrado de las respectivas piezas de estas, además de permitir los movimientos requeridos evitando fricciones que puedan causar grano entre los materiales.

La mejor practica para lograr lo anterior es considerar en el análisis de tolerancias, “fijar” una de las piezas de la versión a su respectivo alojamiento en la placa que lo porta mediante tolerancias y usar esta como medio para pasar los centros a las demás piezas de la cavidad, que deberán estar un poco más sueltas en sus respectivos alojamientos en sus placas portadoras en el porta-molde.

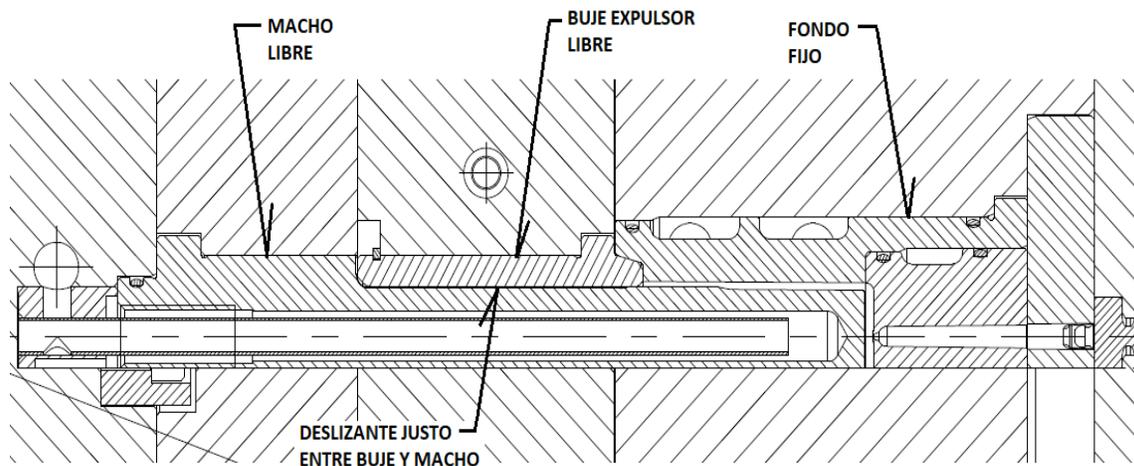


Figura 288. Esquema de versión típica para análisis de ajustes. Elaboración propia.

El término “fijar” se refiere a tener de dos a cuatro centésimas de milímetro (0.02 mm a 0.04 mm) entre la pieza fija y su alojamiento en el porta-molde, mientras que en las demás se hablaría de cuatro a seis centésimas (0.04 mm a 0.06) entre ellas y sus alojamientos en las

placas. Es muy importante realizar un análisis muy técnico e intuitivo, ojalá usando experiencias previas y analizando muy bien la transmisión de los centros del molde, para tomar las mejores decisiones acerca de cuál debe ser la pieza a fijar. Tener en cuenta que las piezas de la versión, entre ellas mismas, deben tener ajustes más estrechos. Ver Figura 288.

Las cavidades intercambiables, pueden tener variadas formas estas dependen en parte, de la forma de artículo; circulares para tapas y bases de labiales, cuadradas para estuches, tapas de lociones grandes, hombreas de lociones, etc. Pero lo más importante al definir la forma y el tamaño de los insertos de cavidad, es como esto afecta el tamaño del molde y la distancia entre centros de las cavidades, pues esto también afecta la longitud de la rama y por tanto el ciclo y el desperdicio de material por la rama. En conclusión, los costos de producción.

5.3.3 Sistema de colada.

El sistema de colada del molde es el encargado de transportar el plástico desde la boquilla de la máquina hasta la entrada de la cavidad de la pieza o artículo, pasando por una rama de canales fríos o calientes dependiendo del sistema, hasta la entrada a la cavidad.

La colada se compone de tres elementos básicos:

1. Bebedero (*Sprue bush*); canal cónico inyectado desde la punta de la unidad de inyección como una unidad a parte del molde.
2. Las ramas; estas se componen de los canales que van desde el final del bebedero hasta los pitorros que van unidos a la pieza mediante el punto de inyección
3. Los puntos de inyección (*gates*); estos so la entrada del material plástico a la cavidad del molde para formar el articulo plástico.

Para esto tenemos dos sistemas básicos colada fría y colada caliente, estos a su vez se dividen en dos respectivamente, coladas de boquilla fría y coladas de boquilla caliente para el primero y coladas full caliente y coladas semi-caliente para el segundo. Esta distribución de los sistemas de coladas son los más comúnmente encontrados en la industria.

5.3.3.1 Colada fría.

La colada fría tiene los 3 componentes principales, el bebedero que es el canal que une la máquina de inyección con el molde, los canales o rama y los puntos de inyección.

Una colada fría es toda la “araña” de ramas, bebedero y puntos de inyección que se enfrían junto con las piezas en cada tiro, mientras que una colada caliente es un sistema dentro del molde que mantiene la resina caliente para que se alimente material directo a las cavidades sin necesidad de enfriar o solidificar la colada.

Este sistema presenta una variación en uno de los tres componentes, la boquilla, cuya variación es tener o no resistencia para mantener su parte de la rama caliente o no.

5.3.3.1.1 Colada de boquilla fría.

Este tipo de boquilla no presenta ningún calentamiento, puesto que la boquilla no tiene resistencia. En algunos casos dependiendo de la longitud o distancia entre la boquilla de la máquina y el punto de entrada a la rama se determina poner una resistencia a la boquilla o nariz de la tobera de la máquina, pero esto es externo al molde.

Se le llama colada fría porque los tres elementos descritos anteriormente se solidifican con la pieza en cada ciclo de inyección. Ver Figura 289.

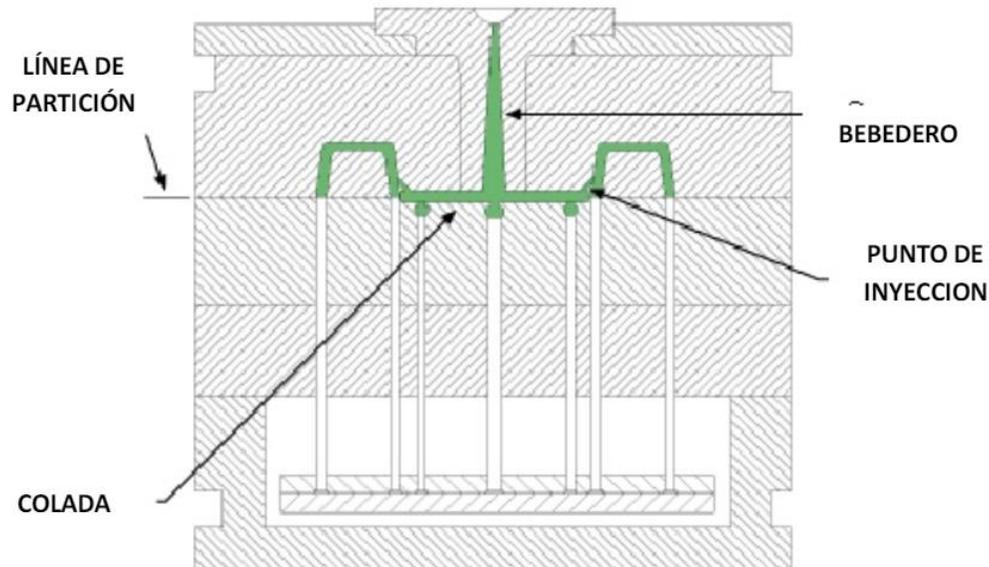


Figura 289. Esquema típico de una colada con boquilla fría.

Las principales ventajas de los moldes de colada con boquilla fría:

- Bajo costo en comparación a moldes de colada caliente. Tanto en costos de fabricación como de mantenimiento.

- Se puede utilizar tanto para polímeros de uso general como para polímeros de ingeniería.
- La purga de los materiales y los cambios de color son más simples que en una colada caliente

Las principales desventajas de los moldes de colada boquilla fría son:

- Tiempos de ciclo altos, mientras más grande la rama más tiempo de solidificación necesita para poder ser retirada del molde
- Alto desperdicio de material (aunque se puede reutilizar un porcentaje de la rama y el bebedero para ser reintegrado al proceso de inyección)
- Mecanismos complejos de desmoldeo cuando el molde es de 3 placas
- Carreras de expulsión elevadas sobre todo si el molde es de inyección interna.
- El llenado del molde es más lento que en una colada caliente

5.3.3.1.2 *Colada de boquilla caliente.*

Es un tipo de colada fría en el cual la boquilla del molde cuenta con una resistencia para evitar el degradado del material en el recorrido hasta el punto de inyección. En este caso el bebedero permanece fundido dentro de la boquilla, por lo tanto, no pertenece a la rama.

No son muy usadas por el alto costo, tanto de la boquilla caliente como del mantenimiento y requiere de mecanizados adicionales en las placas de respaldo para todo el cableado eléctrico de la resistencia. Ver Figura 290.

Las principales ventajas de los moldes de colada de boquilla caliente:

- Bajo costo en comparación a moldes de colada caliente. Tanto en costos de fabricación como de mantenimiento.
- Menor peso de la rama, pero poco significativo con respecto a la colada de boquilla fría.
- Leve reducción en el tiempo de ciclo, pero poco apreciable en relación costo beneficio.
- La purga de los materiales y los cambios de color son más simples que en una colada caliente

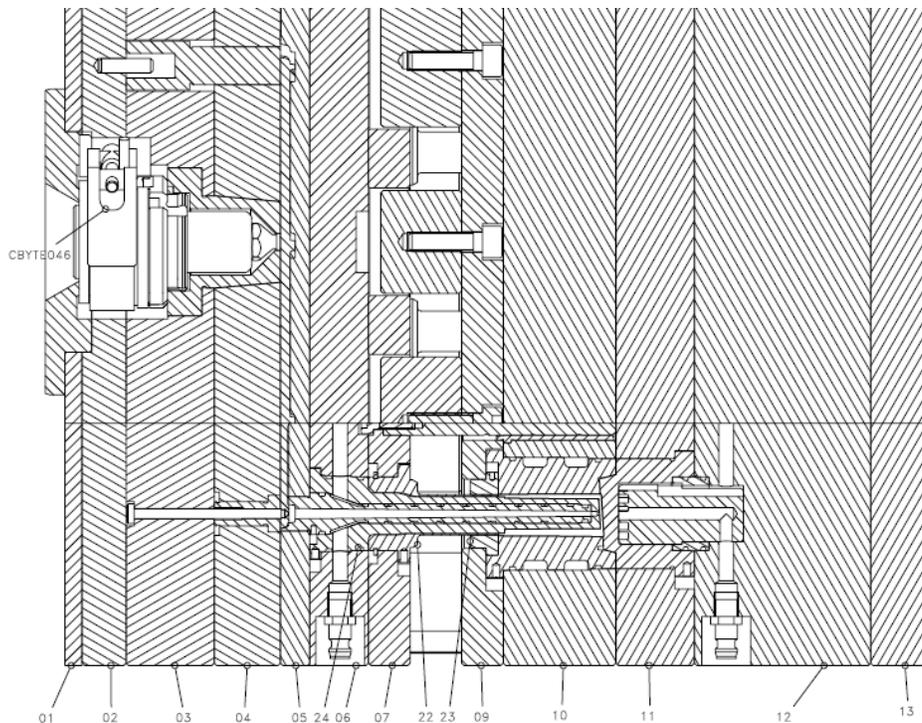


Figura 290. Esquema típico de una colada fría con boquilla caliente. Elaboración propia.

Las principales desventajas de los moldes de colada de boquilla caliente son:

- Tiempos de ciclo altos, mientras más grande la rama más tiempo de solidificación necesita para poder ser retirada del molde
- Alto desperdicio de material (aunque se puede reutilizar un porcentaje de la rama y el bebedero para ser reintegrado al proceso de inyección)
- Mecanismos complejos de desmoldeo cuando el molde es de 3 placas
- Carreras de expulsión elevadas sobre todo si el molde es de inyección interna.
- Babeos de la boquilla o hilos plásticos que contaminan el molde y las inyecciones siguientes.
- Mantenimientos delicados y de alto costo. Pueden requerirse con más frecuencia.
- Usualmente son de uso dedicado, esto quiere decir que no se pueden para cualquier polímero, son diseñadas para grupos específicos de estos.

5.3.3.2 Colada caliente.

El objetivo de un sistema de colada caliente bien diseñado es distribuir el material de la nariz de la máquina a cada boquilla disminuyendo los efectos adversos a las propiedades del material. Las boquillas poseen resistencias que mantienen el plástico fundido y lo llevan a la cavidad en diferentes configuraciones de punto de inyección.

Por lo tanto, usando coladas calientes se elimina parcial o totalmente la presencia de ramas o canales de inyección, esto dependerá de si se trata de una *colada full caliente* o de una colada *semi-caliente*.

Los sistemas de colada caliente son diseñados para una aplicación o procesamiento de un artículo específico buscando el objetivo primario. Lo que las limita en su posible utilización en para diferentes proyectos, a menos que estos sean de gran similitud y elementos comunes (Husky, 1993, p.5-8) Ver Figura 291.

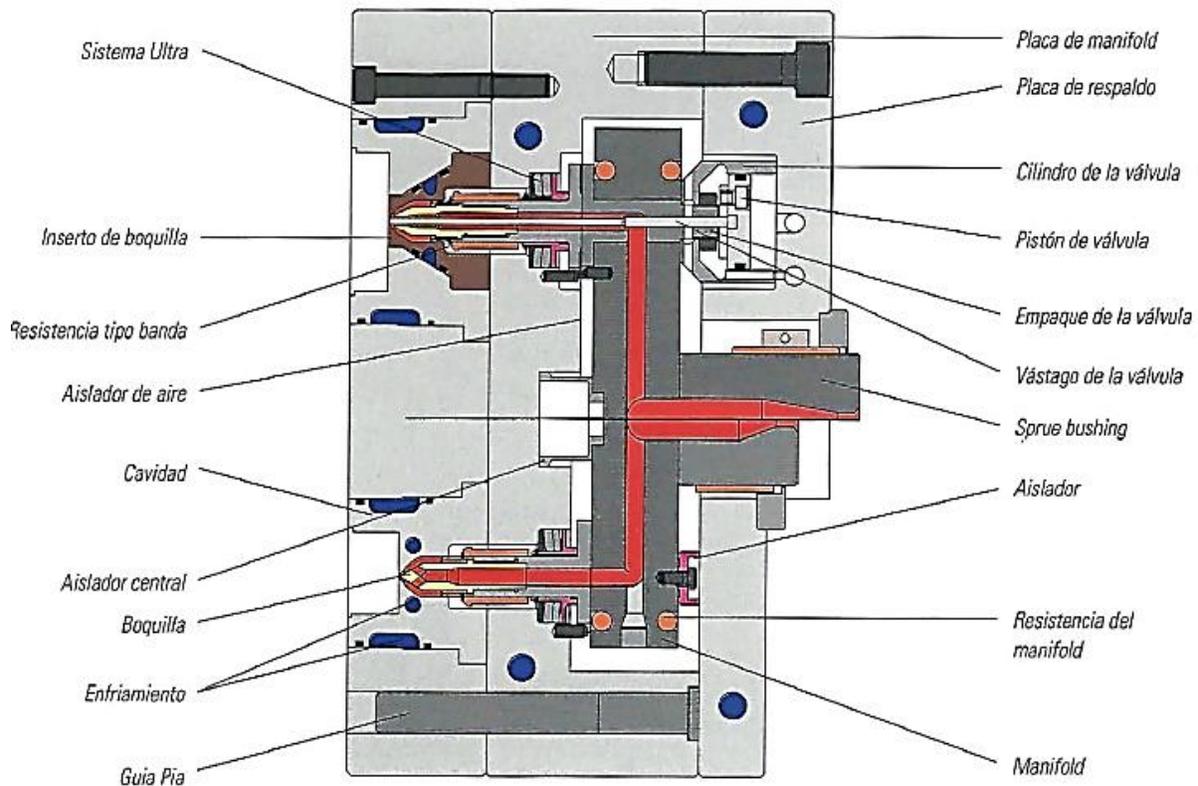


Figura 291. Esquema de ensamble típico de un sistema de colada caliente. (Husky, 1993, p.5).

Todos los sistemas de la colada son calentados externamente para ofrecer un flujo abierto no restringido en los canales de flujo disminuyendo pérdidas de presión y posibles áreas de estancamiento.

El manifold es suspendido en una bolsa de aire y sostenido por aisladores de titanio para disminuir la transferencia de calor. Los circuitos de enfriamiento en las placas del manifold mantienen un alineamiento constante del sistema hacia la placa de cavidades asegurando la misma expansión térmica.

Cuando el manifold se calienta y expande, este se dirige en dirección de las boquillas, las cuales están firmemente sujetas a su placa. Manteniendo una posición constante de la boquilla, el alineamiento de la boquilla se mantiene, no importando la temperatura del manifold.

Usando tecnología de inyección, sellado y calentamiento. Las boquillas son seleccionadas para las necesidades de la parte a moldear y de las del material.

Siguiendo estos objetivos y un exacto criterio de diseño. Varios proveedores ofrecen un sistema óptimo para cada aplicación.

El manifold está diseñado con canales de flujo, longitud y tamaño similar para entregar la resina de la máquina a cada cavidad con la misma caída de presión y fricción. El diseño de multinivel previene un flujo preferencial y contribuye al llenado de las cavidades a un mismo tiempo. Esto hace que el flujo sea balanceado. Figura 292.

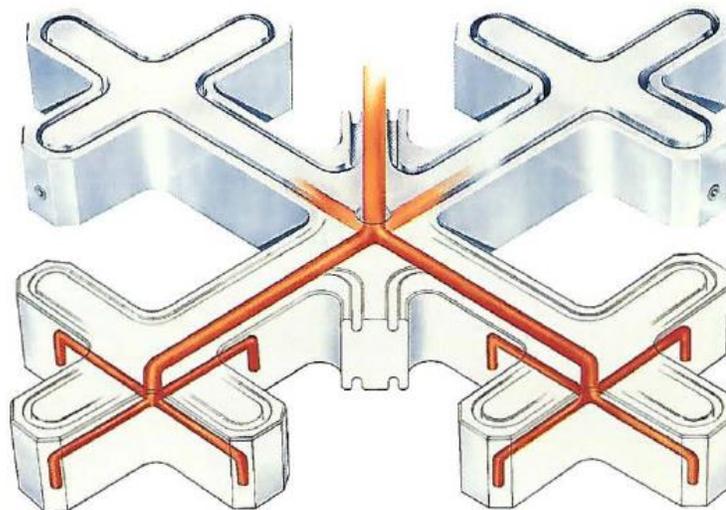


Figura 292. Esquema de canales balanceados en una colada caliente. ([Husky](#), 1993, p.6).

Cada aplicación tiene un peso único de parte, tiempo de llenado, resina, y necesidades de proceso las cuales son consideradas en el análisis de flujo de cada sistema de manifold. Esto ofrece un tamaño óptimo del canal de flujo. Canales pequeños incrementan fricción y caída de presión mejorando cambios de color y reduciendo tiempo de residencia. Los canales más amplios son seleccionados para resinas sensitivas a la fricción y aplicaciones limitadas a la presión. Figura 293.

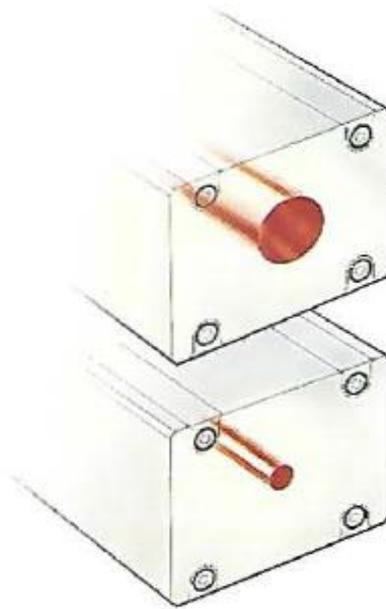


Figura 293. Esquema de canales balanceados en una colada caliente. ([Husky, 1993, p.6](#)).

Un sistema de colada caliente sin puntos de estancamiento y adecuados tamaños de canal reducen el tiempo requerido para los cambios de color. También mejora el proceso de materiales sensitivos al calor.

5.3.3.2.1 Colada full caliente.

La característica principal de una *colada full caliente* es eliminar la necesidad de canales de inyección o ramas, pues esta lleva el plástico fundido desde la nariz de la inyectora hasta cada una de las cavidades del molde. Esta colada como puede verse necesita una boquilla caliente por cada cavidad, es decir si el molde tiene 16 cavidades se necesitan 16 boquillas.

Como puede imaginarse los costos de la colada se incrementan a medida que aumentamos el número de cavidades. Por tanto, debemos tener en cuenta el costo beneficio de la implementación de este sistema.

Estas coladas se implementan teniendo en cuenta que la proyección de la producción del artículo supere con creces el tiempo de recuperación de la inversión. Este sistema se presta para eso pues el consumo de material plástico se reduce dramáticamente con este tipo de colada por no generar ramas ni remolidos. En la Figura 294 puede verse un ejemplo de colada full caliente de 4 cavidades y en la Figura 295 una representación de la colada de 4 puntos fuera del molde.

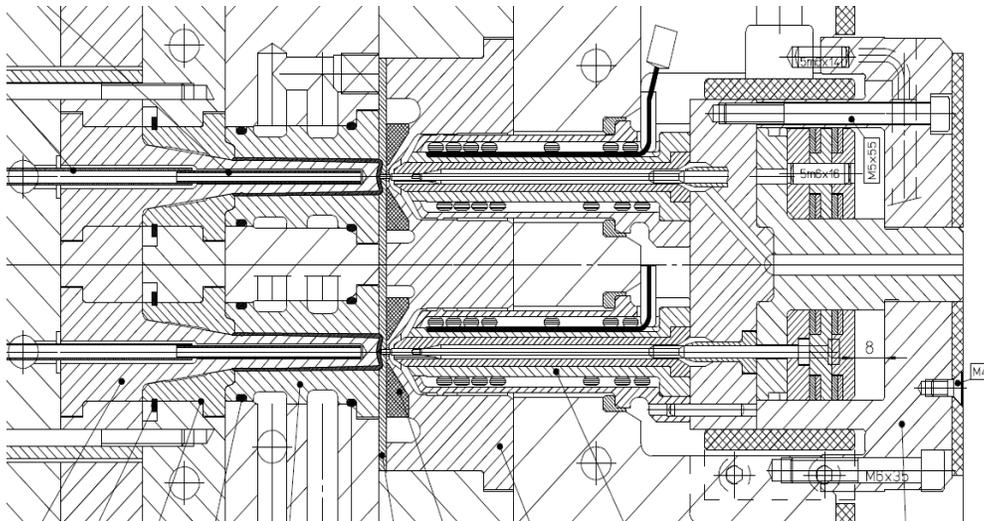


Figura 294. Esquema en plano de ensamble de una colada full caliente. Elaboración propia.

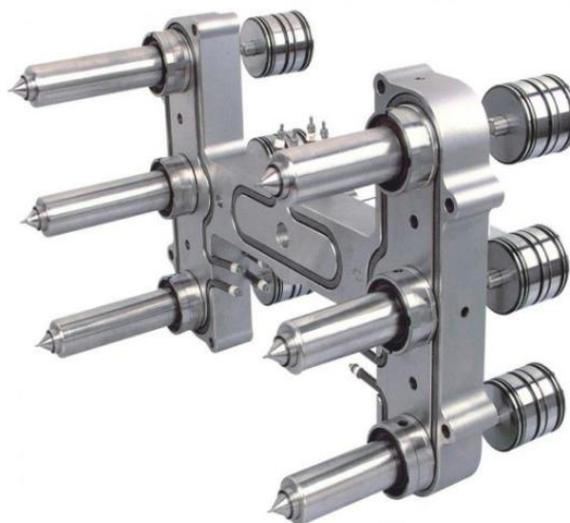


Figura 295. Ejemplo de colada caliente de 6 puntos. ([Xiamen DTG Tech co. Ltda.](#), 2019)

5.3.3.2.2 Colada semi-caliente.

En este tipo de coladas se trata de superar o mitigar los altos costos de las *coladas full calientes*, haciendo que no sea necesario llevar una boquilla por artículo, sino haciendo que con una boquilla alimente varias cavidades e incluso en algunos casos generando pequeñas ramas entre estos, pero que no conforman una rama única general.

Esta colada como puede verse puede configurarse de diferentes formas, por ejemplo, en un molde de 16 cavidades con una colada semi caliente de 8 puntos, se tiene una boquilla cada dos cavidades y una rama por cada punto de la colada. Ve ejemplo en la Figura 296.

En el caso de moldes de colada semi-caliente, debe buscarse que las ramas que se generen sean del menor peso y longitud posible para que el ciclo no dependa de esta.

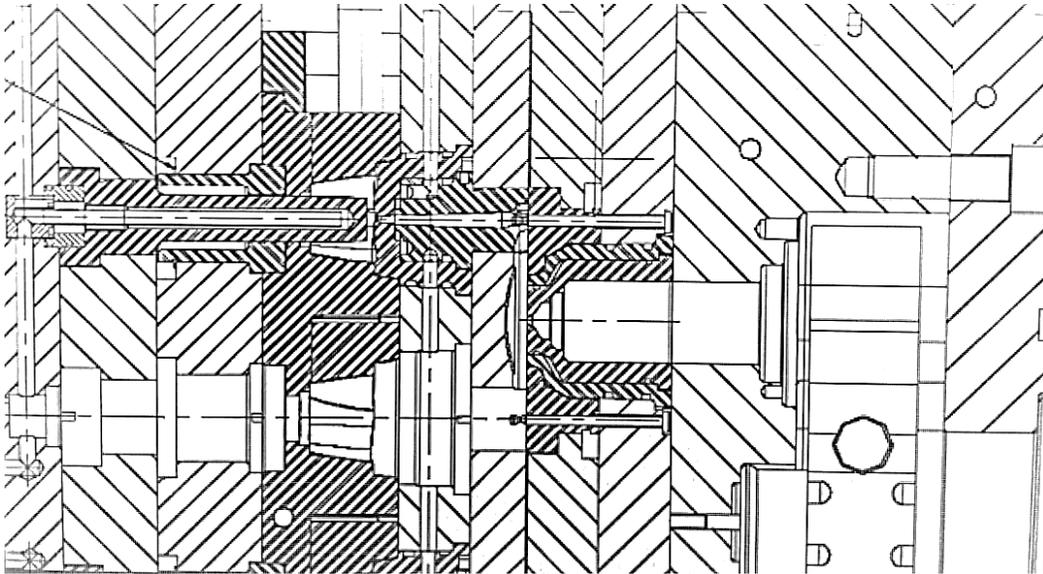


Figura 296. Ejemplo de colada caliente de 4 puntos para molde de ocho cavidades con colada semi-caliente, que produce 4 ramas por cada dos cavidades. Elaboración propia.

Las principales ventajas de los moldes de colada caliente:

- Producen alta rentabilidad en moldes de alta producción y tiraje largo. Solo así se retorna la inversión inicial que es alta pues se presenta un mayor volumen de piezas producidas por ciclo de moldeo, cuando se usan moldes de múltiples cavidades.
- Alta estabilidad del proceso y de los artículos por su excelente balanceo ya que la distribución del flujo hacia las cavidades es más balanceada.
- Menor presión utilizada por la máquina inyectora para el llenado de la cavidad del molde, lo que alarga su vida.
- La no existencia de rama o en el caso de los moldes de colada semi-caliente, mucho menor peso de esta.
- Alta reducción en el ciclo por la no existencia de rama y el no tener que solidificar esta para retirar el artículo del molde.
- Mantenimientos menos frecuentes.
- Se simplifican los sistemas del molde en la parte de la inyección, pues el manifold y las placas que lo soportan, son diseñados por el proveedor de la colada en base a estándares de la industria.

- La mayor parte de los moldes pueden ser adaptados a este sistema.
- Versatilidad en el cambio de colores.
- Mayor tiempo de vida útil del molde.
- Variedad de boquillas y puntas estándar.

Las principales desventajas de los moldes de colada boquilla fría son:

- Alto costo de la colada y delicado mantenimiento de esta.
- Carreras de expulsión elevadas y grandes dimensiones de molde sobre todo si el molde es de inyección interna.
- Babeos de la boquilla o hilos plásticos que contaminan el molde y las inyecciones siguientes. Esto puede aliviarse con boquillas calientes valvuladas, pero con incrementos de costos significativos.
- Usualmente son de uso dedicado, esto quiere decir que no se pueden intercambiar materiales, a no ser que sean de la misma familia y con características altamente similares, o sea que son diseñadas para grupos específicos de estos.

5.3.3.3 Normas de selección de boquillas para colada caliente.

Haciendo uso del catálogo de un proveedor de coladas calientes se puede visualizar el proceso de selección de uno de estos sistemas, para así tener más claro cómo se deben abordar el reto de diseño.

Para seleccionar la boquilla correcta para una aplicación, se requiere la siguiente información:

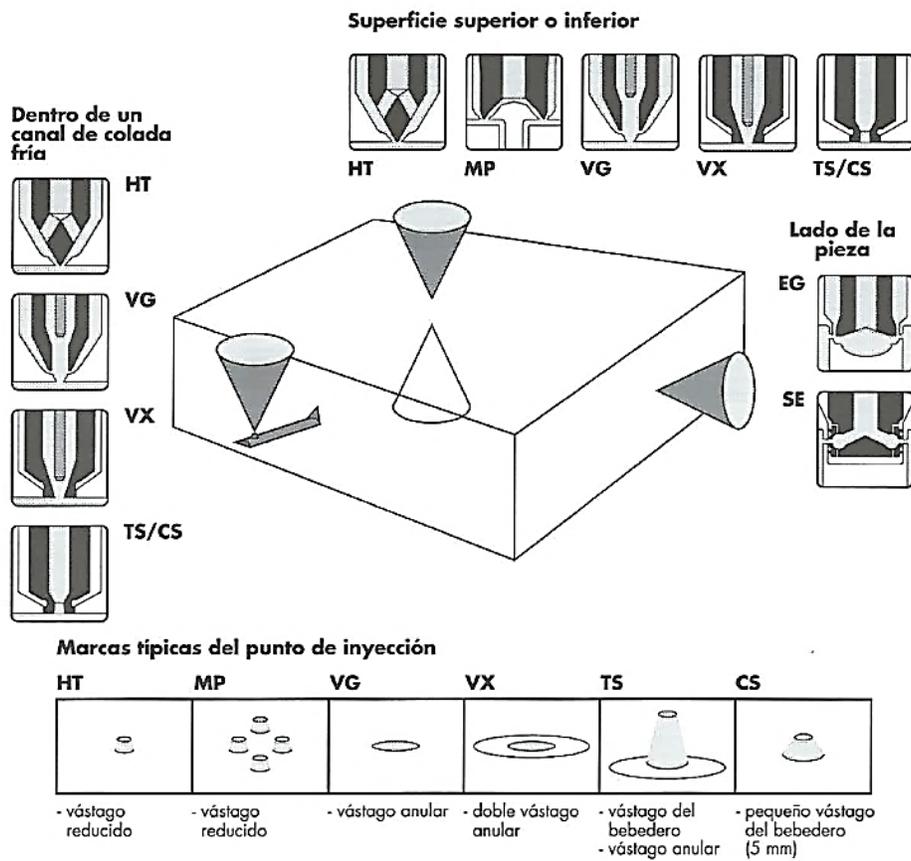
- Posición y vástago del punto de inyección aceptable.
- Material y aditivos para la selección de la boquilla adecuada.
- Peso de la pieza y capacidad de flujo deseada para cada boca de inyección.
- Requerimientos de cambio de color.

El proceso de selección de la boquilla comienza con la determinación de la ubicación del punto de inyección de la pieza. Por ejemplo, si es importante que en la superficie superior de una pieza no queden marcos visibles del punto de inyección, automáticamente quedan eliminados varios métodos de inyección. Se recomienda confirmar tempranamente en el proyecto la posición de la marca visible del punto de inyección, a fin de eliminar dificultades futuras. El proveedor puede suministrar puntas de inyección del tamaño necesario para cada aplicación, por medio de un análisis de flujo.

El siguiente paso se basa en el material y los aditivos. Algunas boquillas fueron diseñadas para materiales amorfos y otras, para cristalinos. También deben tomarse en cuenta las consideraciones de los materiales filamentosos, sensibles a la temperatura, abrasivos y a los cambios de color.

Luego se determina el tamaño de la boquilla, basándose en la viscosidad del material y en la capacidad de flujo de cada punto de inyección. Una vez que se determine la serie y el tamaño de la boquilla, se puede obtener la información para la instalación, a fin de proseguir con el diseño del molde.

Las boquillas se dividen por familias o series, con el fin de abarcar una amplia variedad de tamaños para las piezas moldeadas y los diversos materiales que pueden manejar. Igualmente, cada serie presenta diversas opciones de punto de inyección. A continuación, se muestra la clasificación que presenta la marca **Husky**[®] que uno de los proveedores de este sistema. Ver Figura 297.



Los puntos de inyección SE y EG producen marcas de dimensiones reducidas debido al punto de inyección en el lado de la pieza, similares a un punto de inyección con túnel o submarino.

Figura 297. Ejemplo de clasificación de boquillas para coladas calientes según el tipo de punto de inyección. (Husky, 1993, p. 2.7).

Existe una amplia variedad de boquillas con diferentes tipos de salidas, diferentes capacidades de inyección y para multiplicidad de materiales. Los detalles del punto de inyección de las boquillas estandarizadas pueden ser utilizados para realizar los trazados iniciales del molde y es de mucha utilidad ponerse en contacto con el proveedor si necesita información específica acerca de cada aplicación. Para profundizar en este tema se recomienda visitar las páginas en línea de los diferentes proveedores como *Husky®*, *DME®*, *Polimold®*, *Athena®*, *Synventive®*, entre otros.

5.3.4 Sistemas de canales de entrada y gates.

El diseño de los canales de llenado del molde o rama es de vital importancia, pues estos determinan el buen llenado de las cavidades del molde. Como ya se ha expuesto la rama puede influir o en el peor de los casos limitar el ciclo del molde, pues si esta se enfría más lento que los artículos estos podrían no ser expulsados hasta que la rama se pueda expulsar.

El camino del material hasta la cavidad debería ser lo más corto posible para, entre otras cosas, minimizar las pérdidas de presión y de calor. El tipo de ejecución y la situación de la colada/sección de entrada tienen mucha importancia respecto a:

- fabricación económica.
- Propiedades de la pieza inyectada.
- Tolerancias.
- Uniones.
- Tensiones propias del material, etc. (Unger, 1998, p.2).

En la Figura 298 se muestra un diseño típico de rama para un molde de colada fría de 16 cavidades con punto de inyección lateral externo.

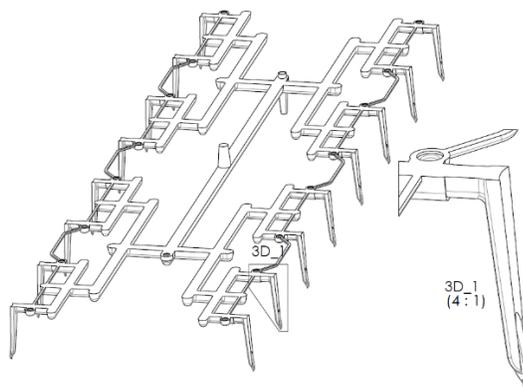


Figura 298. Diseño típico de rama de colada fría para un molde de 16 cavidades y tres placas.
Elaboración propia.

Como ya se ha expuesto se debe llegar a la rama con boquilla fría o caliente y en el primer caso se debe considerar cierta geometría para que este proceso sea de manera eficiente.

Luego se darán las condiciones de diseño de los canales de la rama, pues en este también deben considerarse condiciones geométricas y de distribución para que el proceso de llegada a las cavidades se produzca en las condiciones más favorables para el proceso.

Por último, se debe analizar la mejor forma de entrar el material a la cavidad, evaluando cuál de los diferentes tipos de punto de inyección es el más adecuado para la aplicación requerida.

5.3.4.1 Inyección directa a rama.

Este tipo es uno de los más simples y antiguos. Es de sección transversal circular, larga y ligeramente afilada que se denomina “pitorro de boquilla”. La sección circular más grande d_f va en la rama y la más pequeña d_A a la boquilla de la máquina. La geometría de este tipo de pitorro de inyección depende de la ubicación de éste con respecto a la rama y sigue las siguientes reglas generales ilustradas en la Figura 299.

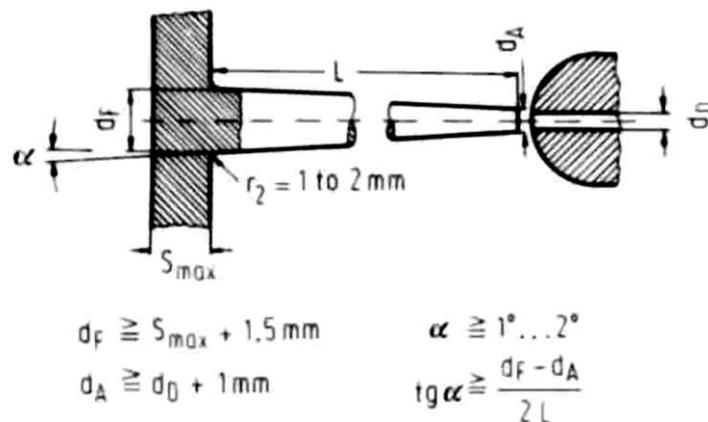


Figura 299. Pitorro de boquilla para inyección directa a rama. (Menges & Mohren P., 2001, p.150).

Entre otros aspectos a considerar se puede mencionar que, si el punto de inyección es muy largo, hay que poner atención y cuidado en el ángulo de salida. Las propiedades de extracción dependen mucho del acabado superficial, se debe evitar cualquier acabado aplicado perpendicularmente a la extracción. Como regla se debe pulir la superficie que rodea al punto de inyección. En la base debe estar redondeada en su perímetro, es decir, se deben evitar equinas rectas.

Para este tipo de pitorro existen elementos comerciales estándar, que, al implementarles una buena refrigeración en el molde, y un material altamente conductor del calor y una buena resistencia al desgaste, mejoran la expulsión del pitorro y reducen el ciclo del molde. Un ejemplo de estos elementos comerciales puede verse en la Figura 300.

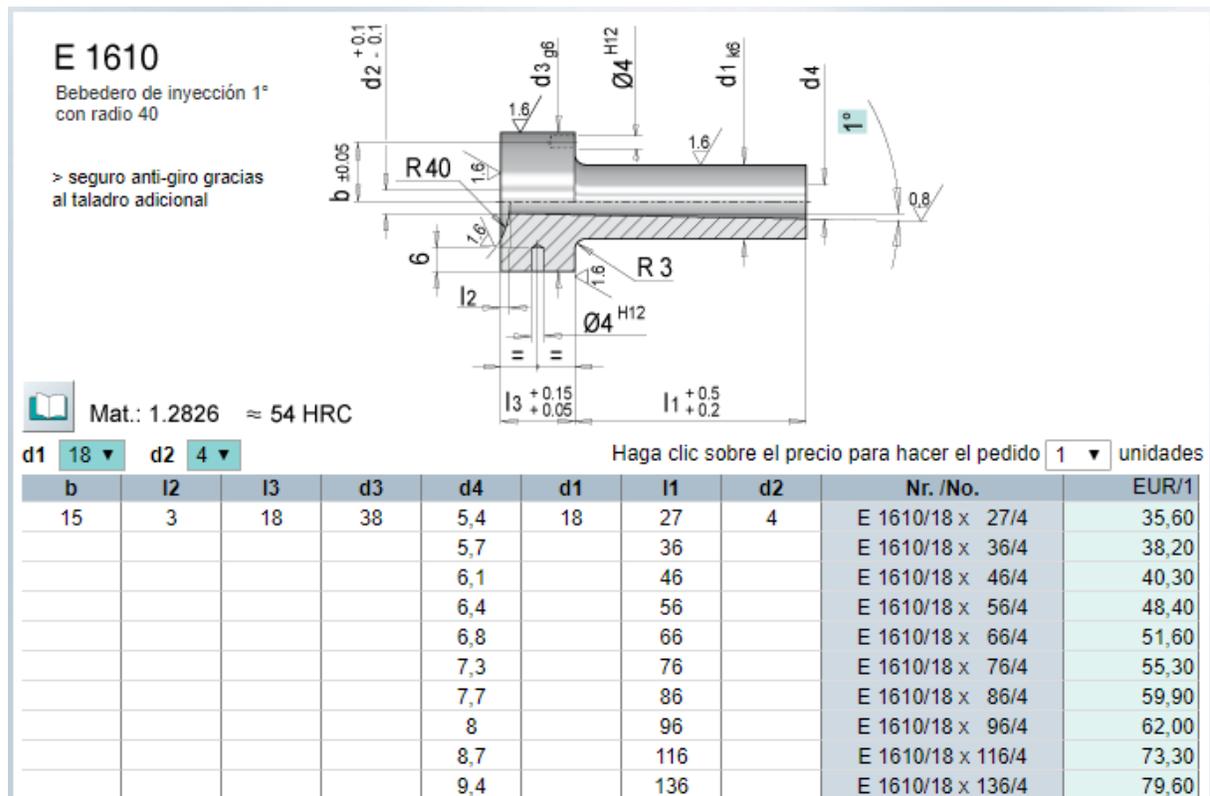


Figura 300. Ejemplo de bebedero o elemento comercial para pitorro de boquilla suministrado por proveedor de estándares comerciales. ([Meusbarger](#), s.f.).

Al seleccionar o diseñar este tipo de elementos debe tenerse en cuenta el radio de apoyo de la tobera de la máquina (R40 mm en la Figura 300) y que el diámetro de entrada a la boquilla que es $d_2 = d_A \geq d_0 + 1$ mm (Ver d_A la Figura 299).

5.3.4.2 Directrices de diseño de los canales de la rama.

Los canales de distribución se han de construir de la forma más recta posible, evitando cualquier recodo innecesario, para conseguir que, independientemente de la situación, las cavidades de un molde múltiple se llenen de forma simultánea y homogénea (suponiendo que las cavidades son idénticas) y que las cavidades dispongan de un mismo tiempo de conformación.

Distribuciones en forma de anillo o de estrella [Figura 301] ofrecen la ventaja de distancias iguales y cortas. Pero están en desventaja cuando, por ejemplo, se han de construir correderas (Unger, 1998, p.4).

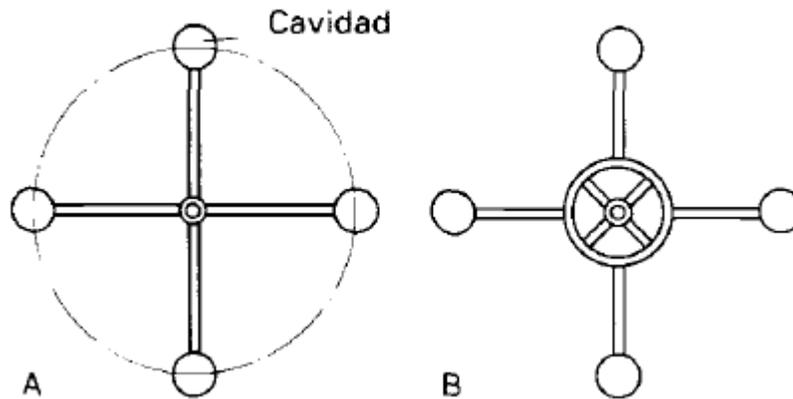


Figura 301. Distribuidor en estrella (A) y distribuidor en anillo (B). (Unger, 1998,p.4).

Aquí se ofrecen las distribuciones en serie [véase Figura 302 A], con la desventaja de que las distancias son desiguales. Pero esta desventaja se puede compensar ampliamente con un equilibrado artificial, por ejemplo, con la ayuda del análisis Moldflow. En este análisis se varían los diámetros de los canales, pero no las secciones de las entradas correspondientes. La [Figura 302 B] muestra un distribuidor en serie con equilibrado natural. Pero por lo general esta disposición muestra una relación relativamente desproporcionada del volumen de la pieza respecto al volumen de los canales de distribución (Unger, 1998, p.4).

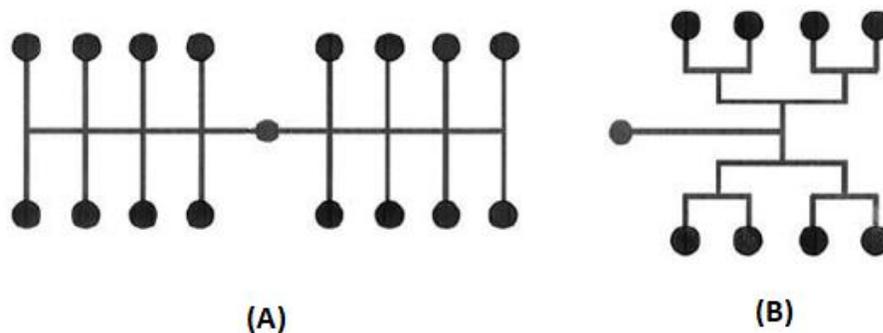


Figura 302. Longitud de colada desigual (A) y longitud de colada constante (B). (Unger, 1998,p.4).

Por lo tanto, de manera ideal se busca que la colada este balanceada de manera geométrica, esto quiere decir que la longitud desde el bebedero hasta cada cavidad sea igual.

Además de lo anterior, la sección del canal y el flujo de material sean iguales para así lograr un llenado parejo y al mismo tiempo de todas las cavidades. Esto es de gran importancia para la estabilidad del proceso y lograr igualdad dimensional y de características de los artículos inyectados.

Ahora para lograr el flujo adecuado por la rama, para el llenado de la cavidad debe elegirse una sección del canal que cumpla este cometido. En la Figura 303 se muestran secciones de canal típicas para el diseño de moldes. Unas más eficaces que otras y que se eligen dependiendo también de los costes de fabricación vs la necesidad de precisión de los artículos.

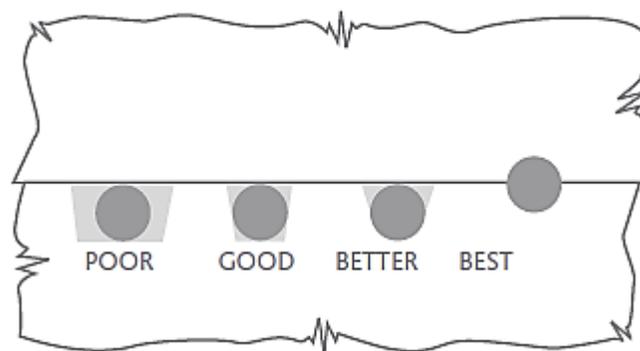


Figura 303. Tipos de secciones de canal de rama más usuales y en orden de eficiencia de flujo ([Eastman Corporate Headquarters](#), 2017, p.15).

El más recomendado por facilidad de mecanizado, por el hecho de tener toda la rama a un lado de la placa evitando líneas de unión y por ser el que más se aproxima al canal circular que sería el de mejor flujo para el material, es el trapezoidal redondeado. Las dimensiones recomendadas para la geometría se muestran en la Figura 304.

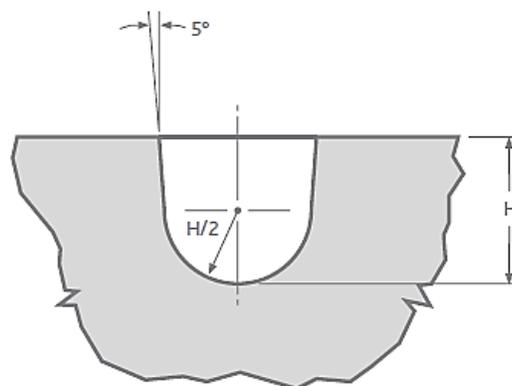


Figura 304. Definición de la geometría recomendada del canal de rama. ([Eastman Corporate Headquarters](#), 2017).

Empíricamente para iniciar los diseños de la rama se puede tener como punto de partida un H que sea igual al máximo espesor de la pieza más 1.5 mm y un peso total de la rama que no supere el 60% del peso del peso total de las cavidades. Esto en la mayoría de los casos no es posible, pero como ya se dijo es solo un punto de partida.

También cabe anotar que, aunque el balance geométrico de la rama, el diseño del canal y el peso de esta esté bien planteado, en general se presenta un desbalance térmico de los canales de rama. Este provoca que las cavidades no llenen de manera pareja cómo se espera. En la Figura 305 se muestra este desbalance térmico pues puede verse que existe balance geométrico.

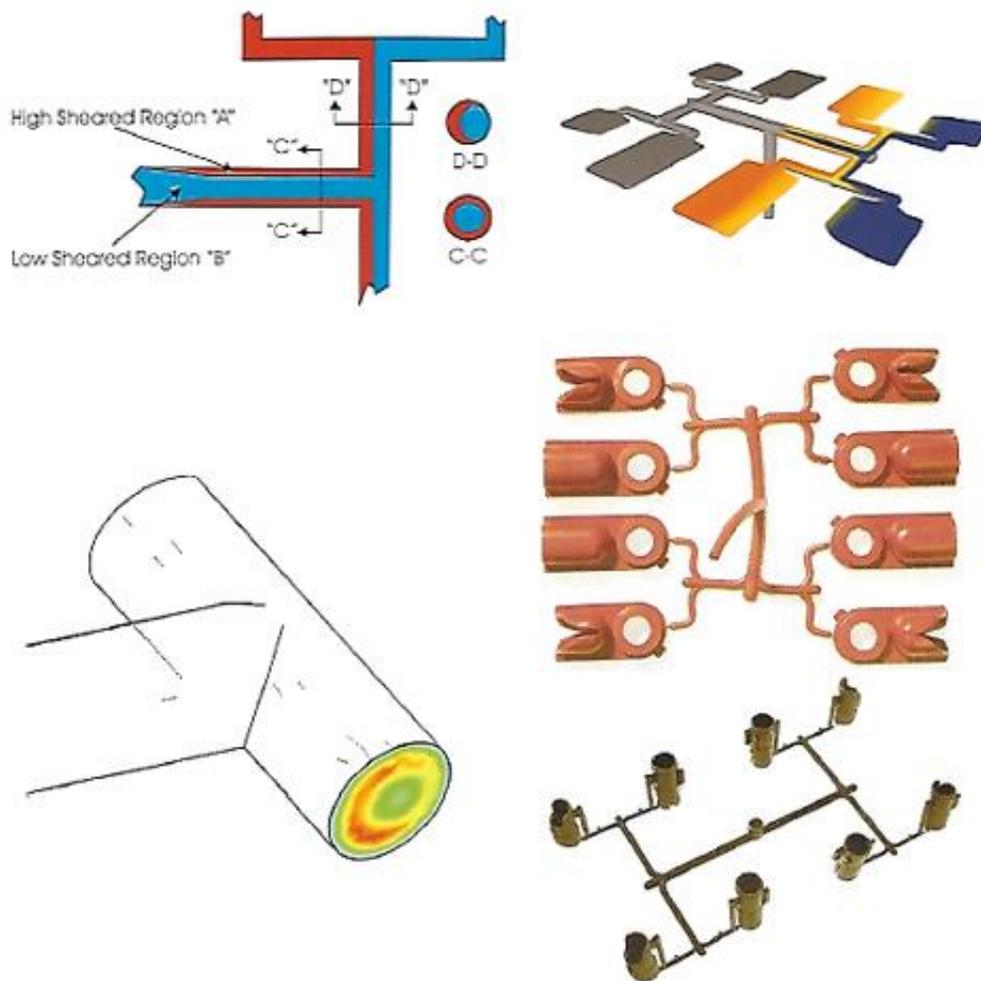


Figura 305. En la imagen se muestran elementos para analizar el desbalance térmico de la rama. (Beaumont, 2004, pp. 95-96).

El desbalance térmico en la mayoría de los casos no afecta en mayor grado el objetivo del proceso, pero para aquellos artículos que por la precisión requerida se pueden ver afectados,

se debe realizar un análisis mayor y tratar de preverlos o corregirlos haciendo uso de las herramientas de simulación antes vistas. Una de las posibles soluciones puede darse cambiando el tamaño geométrico de los canales según las cavidades que estén llenando a destiempo. Para profundizar en este tema ver: [J. P. Beaumont \(2004\), pp. 85-125](#).

5.3.4.3 Tipos de puntos de inyección para la llegada a la cavidad "Pitorros de cavidad"

A continuación, se expone un resumen de los tipos de sistemas de coladas y entradas frías más usuales.

- **Pitorro cónico directo (sin punto de inyección)**, con o sin barra (Figura 306). Se aplica por lo general para piezas de espesores de pared relativamente gruesos, y también para la transformación de materiales de elevada viscosidad en condiciones térmicamente desfavorables. La barra ha de separarse después del desmoldeo de la pieza de forma manual.

Este podría usarse con una boquilla fría que en lugar de ir a la rama iría directamente a la cavidad. Pero no es recomendable para artículos donde la buena estética del punto de entrada del material sea de importancia.

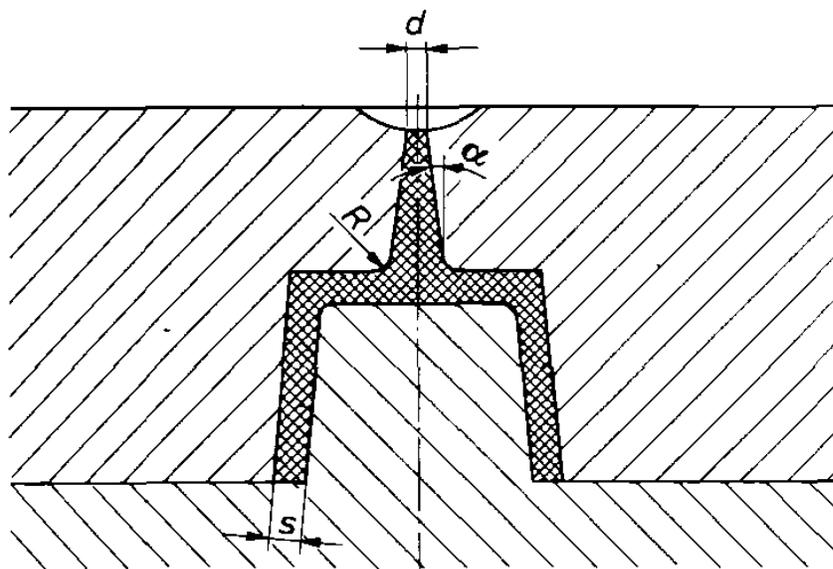


Figura 306. Diseño de una colada cónica directa a la cavidad. (Unger, 1998, p.3).

- **Pitorro con entrada o "gate" puntiforme (o capilar)** (Figura 307). A diferencia de la colada de barra, la colada de sección puntiforme se separa generalmente de forma automática es la más usada en los moldes de inyección.

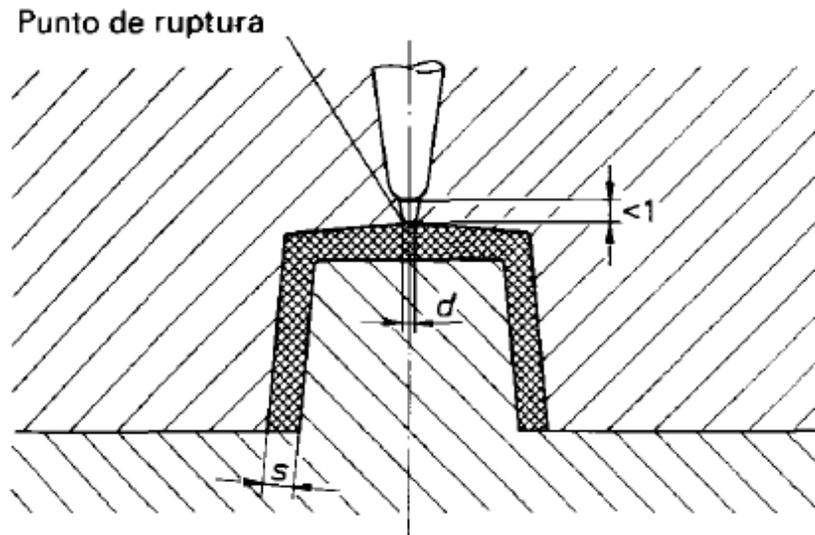


Figura 307. Diseño típico de colada con entrada a cavidad tipo capilar. (Unger, 1998, p.3).

Si molestan los pequeños restos de esta sección, que normalmente se denominan “*puntos altos*”, «d» puede tener la forma de una pequeña cavidad lenticular “denominada calota” (Ver Figura 308) en la superficie de la propia pieza. Para la expulsión automática de una colada o rama con este tipo de pitorro, se utilizan sistemas especiales de extracción de rama haciendo uso de pines retenedores que se verán más a detalle en el [capítulo 6](#).

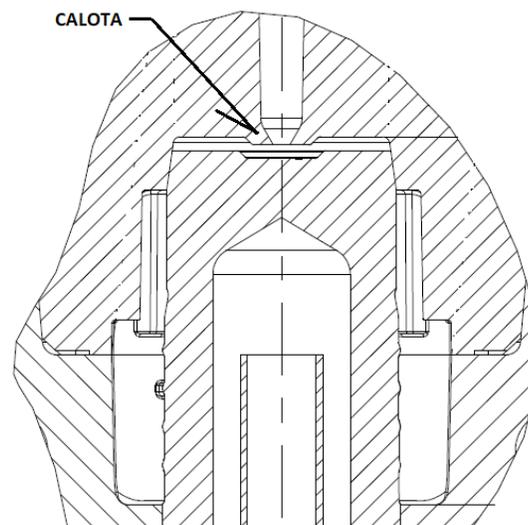


Figura 308. Detalle de cavidad con “calota” para esconder punto de inyección alto. Elaboración propia.

- **Colada de paraguas** (Figura 309). La colada de paraguas es adecuada para la fabricación, por ejemplo, de cojinetes de fricción con una precisión de redondez elevada, evitando además al máximo la existencia de líneas de unión. Las

desventajas son el apoyo unilateral del noyo central y la necesidad de operaciones de mecanizado para eliminar la colada.

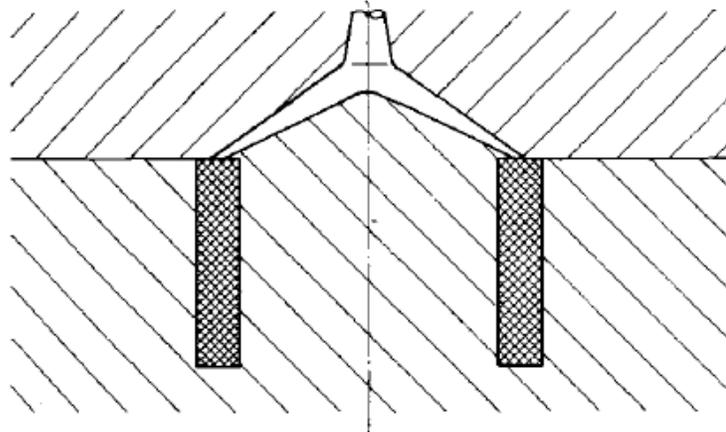


Figura 309. Colada tipo paraguas. (Unger, 1998, p.3).

- **Colada de disco** (Figura 310). Aquí se unen preferentemente piezas cilíndricas por el interior, sin líneas de unión residuales. En el caso de materiales fibrosos de refuerzo (por ejemplo, fibras de vidrio), la colada de disco puede favorecer la tendencia a la contracción. La colada se ha de eliminar después del desmoldeo.

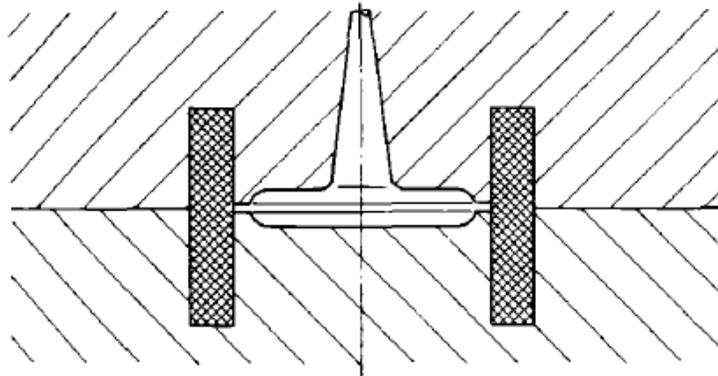


Figura 310. Diseño típico de colada tipo disco. (Unger, 1998, p.3).

- Este tipo primeramente es usado en moldes de cavidades múltiples para la producción de piezas pequeñas que pueden ser inyectadas lateralmente en especial, como ya se mencionó, en moldes de 2 placas. La pieza y el canal están en una misma mitad del molde, el canal está situado muy cerca de la cavidad donde adquiere una geometría angulada. Termina en una punta afilada la cual se conecta directamente a la cavidad. Comúnmente se tienen dos opciones de diseño las cuales se muestran a continuación. Ver Figura 311 y Figura 312.

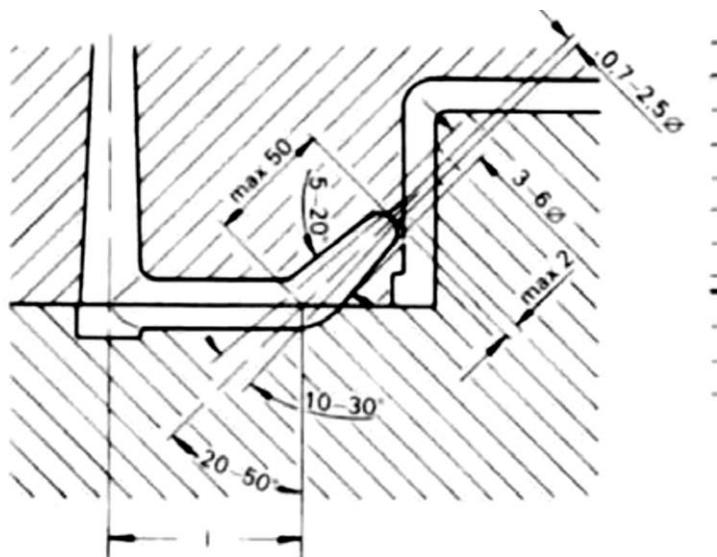


Figura 311. Diseño de punto. (Menges & Mohren P., 2001, p.211).

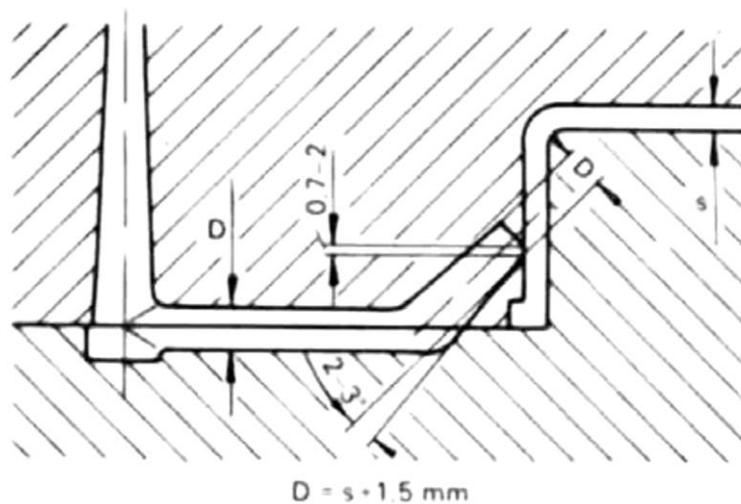


Figura 312. Diseño de punto. (Menges & Mohren P., 2001, p.211).

En el primer caso el contacto con la cavidad es puntual, y en el segundo caso es en forma elíptica. Para fines de extracción la pieza y el canal deben permanecer en la mitad 71 móvil del molde. El sistema opera sin problemas si se utilizan plásticos dúctiles. Con materiales frágiles se corre el riesgo de una ruptura del remanente del punto de inyección. Por la misma razón es aconsejable diseñar los canales un tanto robustos para que éste permanezca caliente y por tanto más flexible a la hora de la extracción. Ver [sección 5.2.3.3](#) para puntos “Subgate estándar”.

5.3.5 Sistemas de respiración o de evacuación de aire.

Desde que la técnica de electroerosión por penetración se aplica para la fabricación de moldes, se han acentuado los problemas de oclusión de gases en las cavidades. Si antes las cavidades se componían de varias partes con la posibilidad de una salida de gases eficaz en las superficies de contacto entre estas partes, hoy es posible en muchos casos fabricar una cavidad a partir de un bloque macizo utilizando la técnica de electroerosión por penetración.

Por lo tanto, se ha de asegurar que la inyección desplace totalmente los gases. También se han de evitar oquedades a causa de los gases, sobre todo en puntos críticos. Una cavidad mal purgada puede producir una cascarilla o “costra” de recubrimiento en el molde, o puede producir el efecto Diesel y en última consecuencia, generar problemas de corrosión. El tamaño de un orificio de ventilación depende en gran medida de la viscosidad del material a inyectar. La anchura de estos orificios oscila entre 1/100 y 2/100 mm. Con materiales de viscosidad extremadamente baja pueden ser suficientes orificios de $\sim 1/1000$ mm de anchura. Se ha de tener en cuenta que donde existan estos orificios tan pequeños no es posible, por lo general, una ventilación eficaz además de su difícil mecanizado en el molde.

Se pueden implementar métodos para sacar el aire de las cavidades haciendo ranuras lo más cerca posible a la cavidad, y con profundidades que dependen de la fluidez del material a inyectar y la zona de la colada donde se requiera sacar el aire. Estas profundidades van desde 0.015 hasta 0.035 mm en la zona del artículo y desde 0.05 hasta 0.07 mm en la zona de los canales de rama esto con una tolerancia de ± 0.005 mm. Los canales de salida de aire deben comunicarse con canales más profundos (0.3 mm) y a una distancia de mínimo 1.5 mm del canal menor y comunicados fuera del molde haciendo uso de descargas o los chaflanes del molde. En la Figura 313 se muestran ejemplos de estas salidas de aire.

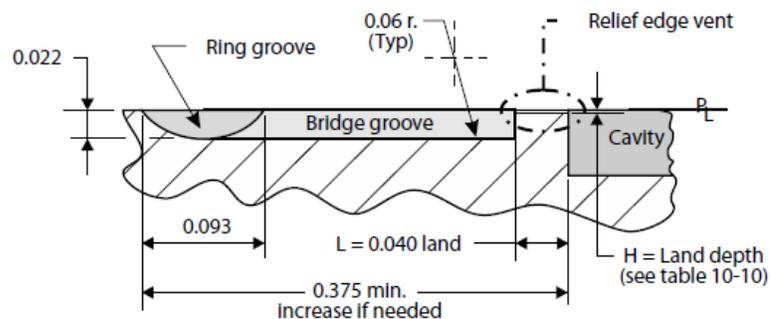


Figura 313. Ejemplo de diseño de ventilación de una cavidad con apertura perpendicular a la línea de unión (in). (Campo, 2006, p.677).

Para ver valores típicos de h para los diferentes materiales ver [Anexo D](#).

En el caso de piezas circulares o machos, dichas salidas de aire deben hacerse en paralelo a la superficie y cubriendo por lo menos el 50% del área perimetral. Ver Figura 314.

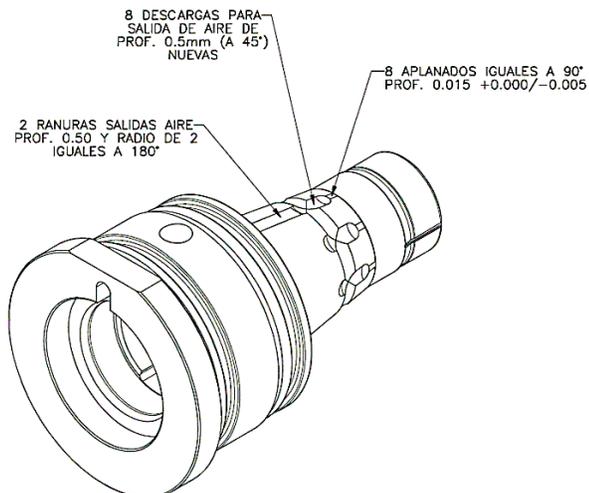


Figura 314. Ejemplo práctico de salidas de aire en un macho. Elaboración propia.

La implementación de un buen sistema de salidas de aire reduce los paros de producción por limpieza del molde. A continuación, se muestran ejemplos típicos de distribución de salidas de aire para diferentes tipos de piezas. Ver Figura 315.

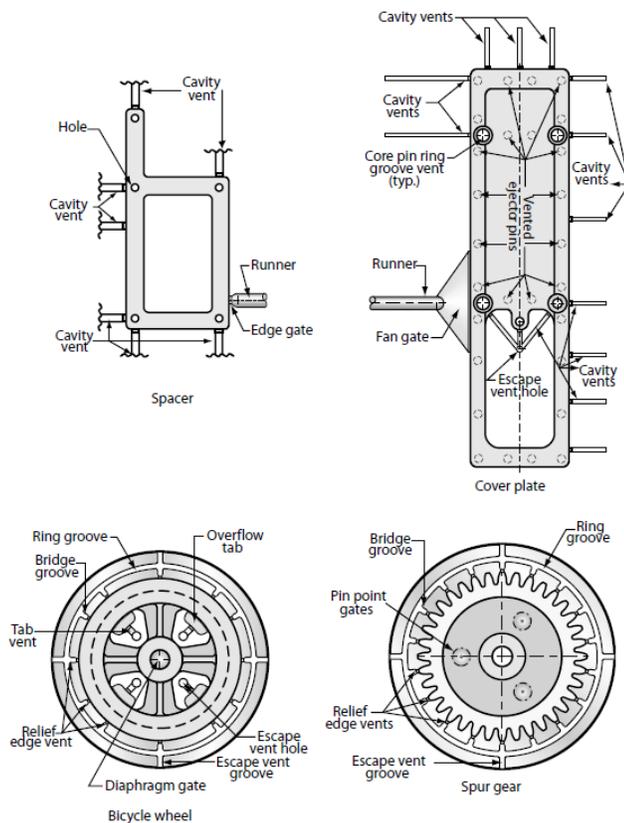


Figura 315. Ejemplo de salidas de aire para piezas rectangulares y circulares. (Campo, 2006, p.678).

Existen innumerables posibilidades y combinaciones para la implementación de las salidas de aire, la multiplicidad de tipos de artículos y líneas de partición que pueden requerirse hacen de este proceso de diseño un reto para el ingeniero de diseño de moldes. Apoyarse en las teorías ayuda, pero también la experiencia adquirida de diseño en debe tenerse documentada para facilitar este el acceso rápido a las soluciones exitosas ya implementadas. Para profundizar más en el aspecto teórico ver: [E. A. Campo, 2006, pp. 674-697.](#)

En la siguiente imagen se muestra un esquema de la implementación de las salidas de aire en el molde y como se comunican las salidas de aire hacia el exterior de este. Ver Figura 316.

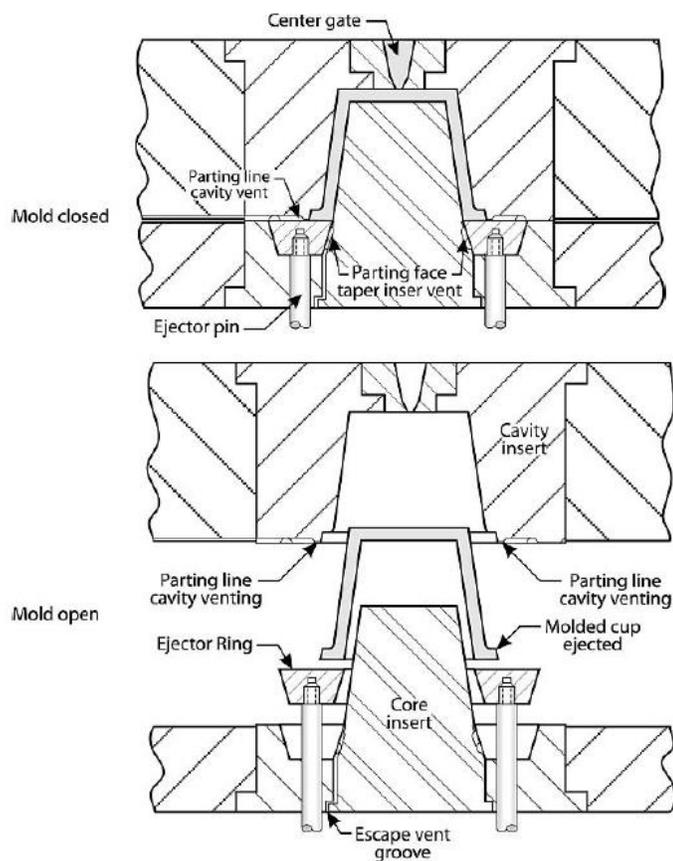


Figura 316. Ejemplo de salidas de aire con molde abierto y cerrado, comunicadas al exterior del molde. (Campo, 2006, p.681).

5.3.6 Sistemas de refrigeración o calefacción.

Un principio fundamental del proceso de moldeo por inyección termoplástica es que la colada caliente que ingresa a la cavidad del molde se debe enfriar rápidamente a una temperatura a la que este lo suficientemente sólida para retener la forma de la cavidad y además soporte las fuerzas que se ejercen durante la expulsión.

Por lo anterior el objetivo del sistema de refrigeración del molde tiene como función principal, la búsqueda de un equilibrio entre lograr que la temperatura del molde sea suficiente para que el material fundido llegue hasta el último rincón de las cavidades y que solidifique rápidamente después de esto. En otras palabras, un molde muy caliente llena rápido, pero enfría muy lento y un molde muy frío solidifica el plástico antes de que llene la cavidad. Así que se debe hacer un compromiso entre los dos extremos para obtener el ciclo de moldeo óptimo.

El proceso de moldeo por inyección termoplástico incorpora la capacidad tecnológica, la innovación y la eficiencia requeridas para el moldeo por inyección de un producto, al tiempo que maximiza la cantidad de ganancias.

La eficiencia del proceso de moldeo por inyección termoplástica se ve afectada por el diseño de enfriamiento del molde. La diferencia de productividad entre un diseño correcto e incorrecto de enfriamiento del molde puede representar un aumento del 20 al 40% en los costos del proceso de moldeo.

El término enfriamiento del molde significa bajar la temperatura del termoplástico fundido en la cavidad para formar un producto moldeado. Cuando los moldes requieren calor para funcionar correctamente, igual se están enfriando ya que la temperatura del molde y del refrigerante es más baja que la temperatura de fusión del termoplástico. La transferencia de calor fluye desde una fuente de alta temperatura a un elemento de contacto de temperatura más baja.

La principal fuente de eliminación de calor o enfriamiento del molde se obtiene mediante un control adecuado de la temperatura de circulación y el control de volumen del fluido de enfriamiento. Si se dispone de una cantidad adecuada de agua tratada adecuadamente a cualquier temperatura y volumen requerido por el proceso de moldeo, el molde se enfriará adecuadamente.

La eliminación del calor depende de la temperatura, la presión, la viscosidad, la difusividad y la conductividad térmicas. Los cálculos de transferencia de calor se basan en condiciones de equilibrio o estado estable. En el proceso de moldeo por inyección termoplástica, la temperatura, la presión y la viscosidad cambian constantemente a medida que la masa fundida fluye y se enfría en la cavidad del molde. Las complejidades de las formas de los productos moldeados están más allá de la determinación analítica. El peso molecular, la estructura molecular y la distribución de la masa fundida termoplástica no son constantes.

A pesar de todas estas variables, se han desarrollado varios programas de análisis computarizados de enfriamiento de moldes al hacer muchas suposiciones de transferencia de calor para simular el proceso de enfriamiento del molde y el comportamiento térmico de la masa fundida. Estos programas de enfriamiento de moldes son aproximaciones y tienen cierto valor técnico en el desarrollo de nuevos productos y para un ingeniero novato que está aprendiendo la tecnología de enfriamiento de moldes de inyección termoplásticos.

Durante la etapa de llenado de la cavidad, el material más caliente estará cerca del punto de entrada, es decir, el gate, y el material más frío estará en el punto más alejado de la entrada. Sin embargo, la temperatura del líquido refrigerante aumenta a medida que pasa a través del molde. Por lo tanto, para lograr una velocidad de enfriamiento uniforme sobre la superficie de moldeo, es necesario colocar el líquido refrigerante entrante junto a las superficies de la cavidad del molde. En última instancia, adoptar el enfoque idealizado no siempre es práctico y el diseñador de moldes debe usar una buena cantidad de sentido común al diseñar circuitos de refrigeración para evitar moldes innecesariamente costosos.

El diseño de un circuito a menudo se complica por el hecho de que los canales de enfriamiento no deben perforarse muy cerca de cualquier otro agujero en la misma placa de molde. La placa de molde tiene varios orificios o huecos, para encajar pasadores de expulsión, pilares de soporte, bujes de guía, casquillos de salida, cavidad e insertos de núcleo, etc.

Para obtener la mejor posición posible para un circuito de enfriamiento del molde, es una buena práctica colocar el circuito lo antes posible en el diseño del molde. Los otros componentes del molde, como los pasadores de expulsión, los bujes, los respiraderos, etc., pueden colocarse en consecuencia (Campo, 2006, pp.615-616).

5.3.6.1 Factores que afectan la refrigeración del molde.

La temperatura del molde se ve afectada por varios factores del proceso de moldeo por inyección termoplástica relacionados con el enfriamiento del molde:

- Material termoplástico (temperatura de fusión del proceso, tasas de cristalización, módulo de elasticidad).
- Espesor de pared de la pieza, tamaño, complejidad, control dimensional y acabado.
- Peso del disparo, automatización del proceso, tiempo de enfriamiento.
- El material de las placas de molde, de la cavidad y del núcleo.
- Tamaño y forma del molde, cavidad y núcleo.

- Eficiencia de los sistemas de enfriamiento del molde.
- Tamaño y ubicación de los canales de refrigeración.
- Velocidad, capacidad, caída de presión y temperatura del fluido de enfriamiento.
- Condiciones ambientales de operación (temperatura, humedad y flujo de aire) (Campo, 2006, p.617).

5.3.6.2 Ubicación de los canales de enfriamiento.

La velocidad de eliminación de calor del molde variará directamente proporcional a la conductividad térmica del material utilizado en la construcción de los componentes del molde. La Tabla 32 muestra los valores de varios materiales utilizados para la construcción de moldes. Desde esta tabla, podemos ver que el cobre de berilio eliminará el calor aproximadamente seis veces más rápido que el acero para herramientas y ocho veces más rápido que el acero inoxidable (Campo, 2006, p.619).

Tabla 32.

Conductividad térmica de materiales para moldes.

Mold material	Description	Thermal conductivity (BTU/h/ft ² /°F/in)
1020 Alloy steel	Hot rolled steel	20.00
4135 Alloy steel	Medium carbon steel	24.70
P-20 Steel	Tool steel	20.00
S-7 Steel	Alloy tool steel	21.00
H-13 Steel	Alloy tool steel	16.30
420 Alloy steel	Stainless steel	14.40
440 Alloy steel	Stainless steel	14.00
Kirksite	Cast low Carbon steel	62.00
Brass	Brass casting	70.00
Moldmax® copper alloy	Beryllium copper	60.00
Ampco 940 copper alloy	Ampco copper	125.00
Protherm® copper alloy	Beryllium copper	145.00
2024 Aluminum alloy	Aluminum	70.00
6061 Aluminum alloy	Aluminum	96.00
7010 Aluminum alloy	Aluminum	92.00
7075 Aluminum alloy	Aluminum	75.00

Campo, 2006, p.619.

Con los datos de la tabla puede determinarse cuál es el mejor material para fabricar piezas o insertos que ayuden a evacuar el calor del molde rápidamente. Esto se hace en casos especiales donde la relación costo beneficio es importante ya que los costos de materiales como el cobre berilio es bastante alto.

La Figura 317 muestra los perfiles de temperatura de la superficie, en función del diámetro del canal de enfriamiento y el espaciado. La ubicación mínima del canal de enfriamiento en referencia a la superficie de la cavidad para un enfriamiento máximo para mantener la integridad del molde varía con el módulo de elasticidad del material de inserción de la cavidad.

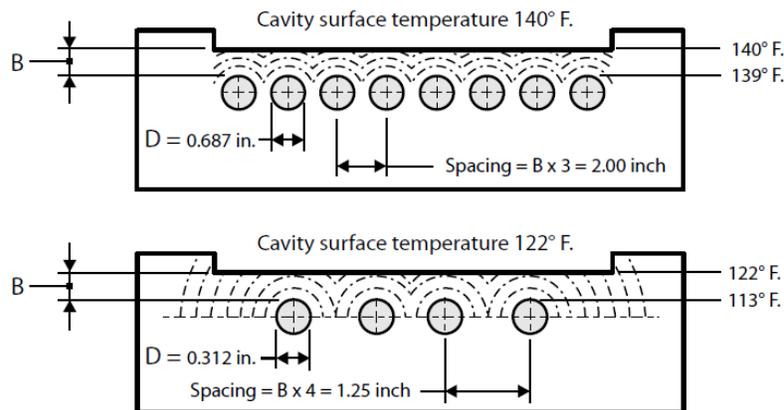


Figura 317. Perfil de temperatura de la superficie por diámetro de canal, ubicación, espaciado y temperatura del fluido de enfriamiento. (Campo, 2006, p.620).

Por ejemplo, si el inserto de la cavidad está hecho de acero para herramientas, la distancia del borde desde la superficie de la cavidad a la tangente del diámetro del canal de enfriamiento (B) debe ser equivalente al diámetro del canal de enfriamiento (B). Si la placa de la cavidad está hecha de cobre berilio, esta distancia (B) debe ser de 1,50 diámetros. La razón es que el módulo de elasticidad del acero para herramientas es de 30,000,000 psi, mientras que el del cobre de berilio es solo de 20,000,000 psi. Por lo tanto, la distancia desde el canal de enfriamiento hasta la superficie de la cavidad es 50% más para el cobre de berilio que para el acero para herramientas. Esto reduce la ventaja de enfriamiento efectivo del cobre de berilio sobre el acero para herramientas a un factor de dos en lugar de tres. Cuanto más cerca esté el canal de enfriamiento de la masa termoplástica, mayor será la tasa de eliminación de calor.

Perforar largos canales de enfriamiento requiere una adecuación precisa. Si el orificio se acerca demasiado al borde de la superficie de la cavidad, la placa puede colapsarse bajo las presiones de moldeado. Si la separación entre los canales de enfriamiento y la superficie de la cavidad varía, también lo hará la velocidad de enfriamiento.

La muy baja conductividad térmica de los materiales termoplásticos evita la rápida transferencia de calor desde el interior de la pared termoplástica fundida a la superficie

externa, donde puede moverse por la conducción a través del metal del molde hacia el fluido refrigerante (Campo, 2006, p.620).

5.3.6.3 Espacio entre canales de enfriamiento.

Cuanto menor sea la separación, más uniforme será la temperatura en la cavidad del molde y más alta aumentará la temperatura en la superficie de la cavidad durante la inyección. Se recomienda que el espacio entre los canales de enfriamiento sea entre tres y cuatro diámetros de canales de enfriamiento (D). Sin embargo, si el diseño requiere una mayor separación entre los canales de enfriamiento, también debe aumentar la separación (B) de la superficie de la cavidad y el diámetro del canal (D). Con el aumento del grosor de la pared, se debe eliminar más calor del molde, lo que requiere un incremento en los diámetros del canal de refrigeración (D). En la Figura 318 se muestra otro ejemplo de una distribución de canales de refrigeración.

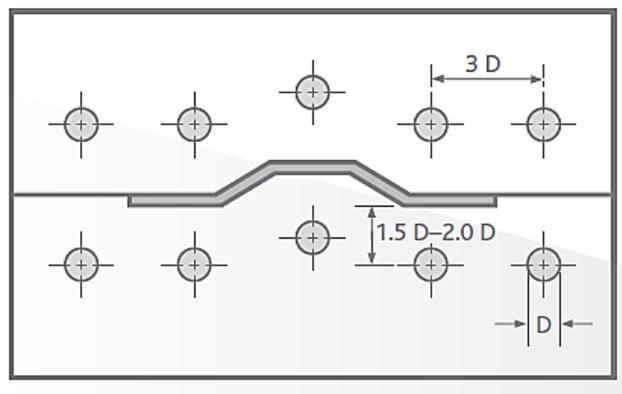


Figura 318. Perfil de temperatura de la superficie por diámetro de canal, ubicación, espaciado y temperatura del fluido de enfriamiento. ([Eastman Chemical Company](#), 2017, p.15).

5.3.6.4 Análisis de remoción de calor del molde.

Algunos de los factores que afectan la velocidad y la cantidad de transferencia de calor son el material termoplástico, el tamaño, geometría y grosor de la pared de las piezas moldeadas, la velocidad de flujo del fundido, la viscosidad del fundido, el calor específico, la conductividad térmica, la densidad, el proceso de moldeo y las condiciones de temperatura de operación del molde.

La cantidad de calor transferida en el molde se calcula utilizando un conjunto complejo de ecuaciones para obtener los valores para el número de Reynolds, el número de Prandtl, el número de flujo laminar de Nusselt, el número de flujo turbulento de Nusselt, el coeficiente de transferencia de calor y la tasa de transferencia de calor.

Numero de Reynolds.

En un flujo laminar, el fluido se deslizará a lo largo de las paredes (de forma paralela a la pared), es improbable que colisione con las paredes u otras moléculas o que distraiga el flujo de la trayectoria de la línea recta. En un flujo turbulento, las moléculas de fluido se mueven a una velocidad mucho mayor y chocan con las paredes, lo que proporciona mejores características de transferencia de calor. Es deseable tener un número de Reynolds superior a 3.500 como punto de inicio mínimo para controlar la temperatura del molde.

Por ejemplo, la tasa de flujo turbulento del agua de enfriamiento a 50 °F tiene características de enfriamiento similares a la tasa de flujo laminar del agua a 32 °F.

Ecuaciones para el cálculo de la cantidad de calor transferido:

Ecuación del número de Reynolds.

$$R_e = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{12 \cdot \mu_F} \quad (5-1)$$

Ecuación del número de Prandtl.

$$P_r = \frac{3600 \cdot C_P \cdot \mu_F}{K} \quad (5-2)$$

Ecuación del número de fluido laminar de Nusselt.

$$N_u = 1.86 \cdot \left(R_e \cdot P_r \cdot \frac{D}{12 \cdot L} \right)^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_C}{\mu_F} \right)^{0.14} \quad (5-3)$$

Ecuación del número de fluido turbulento de Nusselt.

$$N_u = 0.116 \cdot P_r^{0.33} \cdot (R_e^{0.66} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{v \cdot D \cdot \rho}{12 \cdot \mu_F} \right)^{0.66} \right] \cdot \left(\frac{\mu_C}{\mu_F} \right)^{0.14} \quad (5-4)$$

Ecuación del coeficiente de transferencia de calor.

$$U = \frac{N_u \cdot k \cdot 12}{D} \quad (5-5)$$

La tasa de transferencia de calor es igual al coeficiente de transferencia de calor, multiplicado por el área de enfriamiento de la superficie expuesta, multiplicado por la diferencia de temperatura entre la cavidad del molde y el líquido refrigerante.

Ecuación de la tasa de flujo de calor.

$$Q = U \cdot A \cdot L \cdot (T_C - T_F) \quad (5-6)$$

Donde:

R_e = número de Reynolds

P_r = número de Prandtl

N_u = número de flujo de Nusselt

L = Longitud del canal de enfriamiento (pies)

v = Velocidad del fluido de enfriamiento (pies/s)

D = diámetro del canal de enfriamiento (in)

ρ = densidad del fluido de enfriamiento (lb/ft³)

μ_F = viscosidad del fluido de enfriamiento (lb-s/in²)

μ_C = viscosidad del fluido de enfriamiento a la temperatura de la cavidad (lb-s/in²)

k = Conductividad térmica del fluido de enfriamiento (BTU/h/ft²/°F/in)

c_p = calor específico del fluido de enfriamiento (BTU-lb-°F)

T_C = Temperatura de la cavidad de la superficie (°F)

T_F = temperatura del fluido de enfriamiento (°F)

A = Área de enfriamiento de la superficie expuesta (ft²) = $(\pi \times D)/12$

U = coeficiente de transferencia de calor (BTU/ft²-h-°F)

Q = Caudal de calor (BTU/h)

A partir de la tasa de transferencia de calor Ecuación (6-6) se pueden deducir las condiciones para aumentar la tasa:

- Aumente la diferencia de temperatura entre la superficie de la cavidad del molde y el fluido de enfriamiento medio.
- Mejorar la eficiencia del coeficiente de transferencia de calor.
- Aumente el área de enfriamiento de la superficie expuesta.

Hay dos formas de aumentar la diferencia de temperatura entre la masa fundida termoplástica y el fluido refrigerante. Una forma sería agregar más calor a la masa termoplástica, este enfoque es contraproducente, lo que aumenta el tiempo del ciclo de moldeo. Bajar la temperatura del fluido de enfriamiento del molde puede causar problemas en el moldeo

Aumentar los canales del área de enfriamiento de la superficie expuesta y hacerlos lo más grandes posible, es muy beneficioso. Las limitaciones son que los canales de gran diámetro reducirán la velocidad del fluido de enfriamiento y disminuirán el número de Reynolds. El uso de un mayor número de canales de pequeño diámetro aumentará la caída de presión en el sistema de fluido de enfriamiento o conducirá a una reducción de fluido que puede pasar a través del sistema de enfriamiento. Las propiedades del agua como fluido refrigerante de pueden ver en la Tabla 33 (Campo, 2006, pp.621-622).

Tabla 33.

Propiedades del fluido refrigerante de circulación y limpieza.

	50% EG 50% Water 32 °F	Water 50 °F	Water 85 °F	Water 100 °F	50% EG 50% Water 150 °F	Water 150 °F
Viscosity μ (lb-s/in ²)	0.00554	0.000878	0.000515	0.000456	0.001	0.000287
Density ρ (lb/ft ³)	66.45999	62.3799	62.1677	62.000		
Thermal conductivity K (BTU/h/ft ² /°F/in)	0.240	0.333	0.357	0.363		
Specific heat C_p (BTU/ft ² -h-°F)	0.760	1.0490	0.9980	0.9980		
Prandlt number Pr	63.16	9.97	5.18	4.15		

EG = Inhibited ethylene glycol fluid

Campo, 2006, p.622.

Este cálculo se usa para refrigeraciones directas a la cavidad. Cuando se trata de insertos refrigerados indirectamente, es decir cuando el agua no hace contacto directo con el metal donde está mecanizada la cavidad, deben tenerse las consideraciones necesarias para obtener datos de referencia.

Es de tener en cuenta que estos son análisis acerca de la trasferencia de calor al interior del molde son básicos. En caso de requerirse análisis más precisos y determinar problemas en el proceso, es recomendable usar programas de simulación como los ya mencionados, Moldflow, ProEnginier, Moldex 3d, etc.

Ahora se presentan diferentes posibilidades de diseño y adecuación de sistemas de refrigeración para moldes típicos. Cabe advertir que no siempre podemos realizar la optimización más recomendada para la refrigeración, pues la complejidad y cantidad de variables que pueden presentarse en el diseño del molde hacen que tengamos que sacrificar unas y prestar más atención otras. Pero la combinación e ingenio en el diseño puede generar buenos sistemas de refrigeración.

5.3.6.5 Diferentes tipos de piezas refrigeradas y elementos comerciales de refrigeración.

La refrigeración de los **machos** es de gran importancia y a la que más atención debe prestarse, pues muchos de los problemas del proceso y la estabilidad dimensiona del artículo dependen de esta. Generalmente los artículos se quedan en esta pieza por mayor tiempo durante el proceso de inyección y deben ser retirados de este mediante el sistema de expulsión del molde.

Para refrigerar los machos puede hacerse uso de pines, laminas planas, tubos capilares, laminas en espiral, canales internos, serpentines y muchos otros elementos tanto fabricados por el moldero, como suministrados por proveedores comerciales. Incluso se pueden fabricar piezas especiales por electrodeposición para lograr canales internos a la pieza que sería imposible mediante los métodos convencionales.

Todos estos componentes pueden ser usados no solo en los machos, también se pueden combinar en las placas, patines, hembras y muchos otros elementos del molde como se muestra en las siguientes imágenes (Ver de la Figura 320 a la Figura 325) es importante conocer de las múltiples posibilidades que se tienen para combinarlas de manera eficiente dentro del molde.

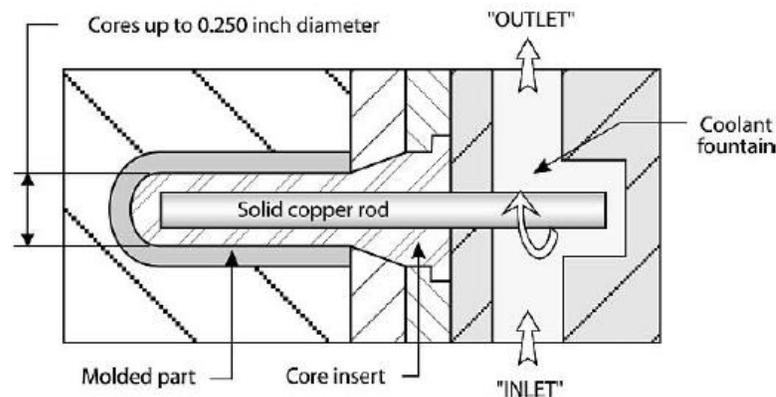


Figura 319. Sistema de enfriamiento de macho con inserto de núcleo de varilla de cobre sólido. (Campo, 2006, p.634).

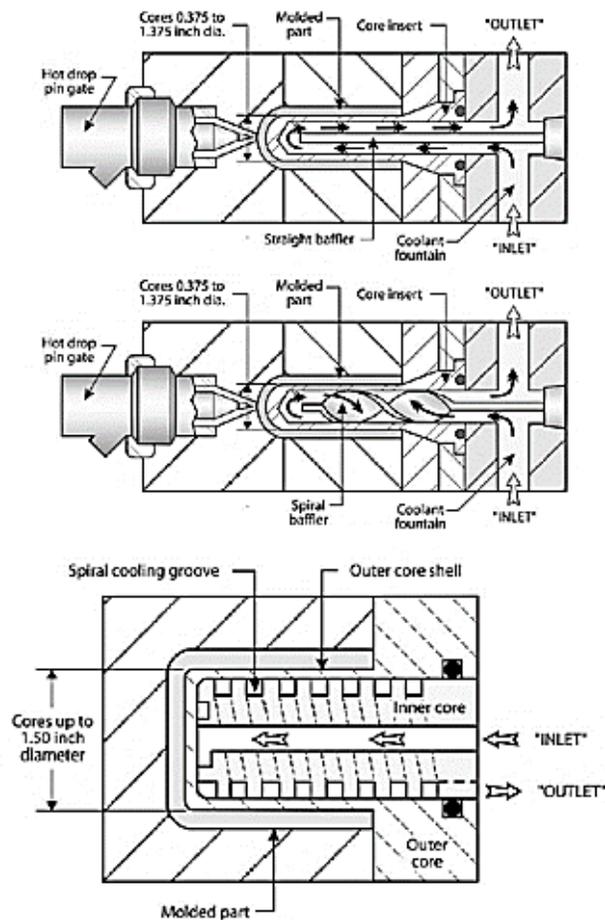


Figura 320. Refrigeración en machos, A) refrigeración por baffle (lamina deflectora). B) refrigeración por baffle (lamina deflectora en espiral). C) refrigeración por inserto entrada central, salida externa en espiral. (Campo, 2006, pp.635-636).

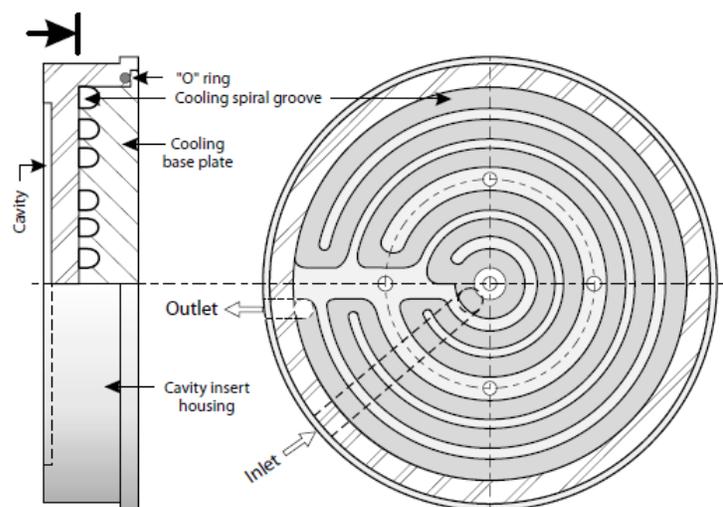


Figura 321. Hembra redonda con refrigeración insertada con placa base de enfriamiento de ranura espiral. (Campo, 2006, p.631).

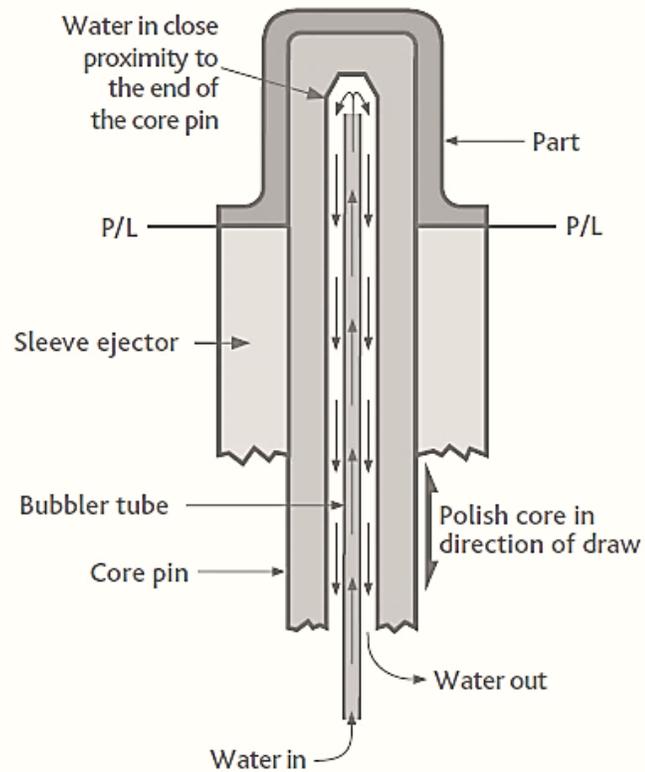


Figura 322. Refrigeración en machos, refrigeración por capilar (tubo central). [Eastman Chemical Company, 2017, p.10](#).

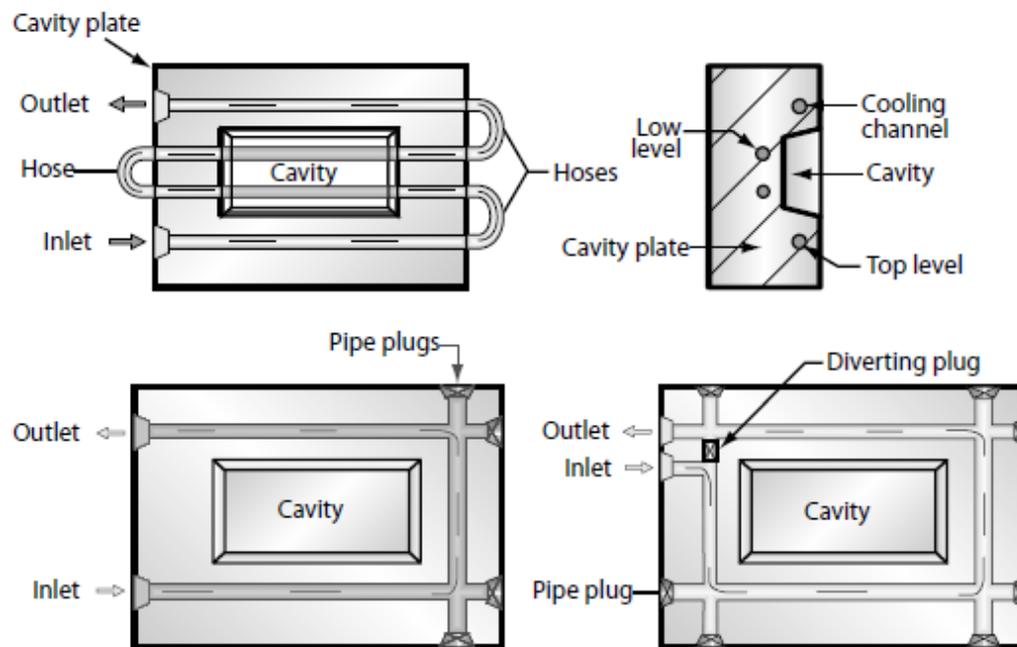


Figura 323. Refrigeración en machos, refrigeración por capilar (tubo central). (Campo, 2006, p.630).

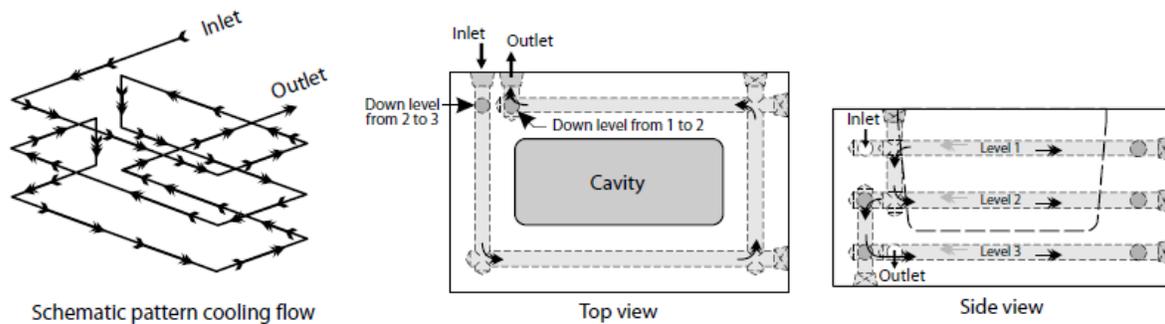


Figura 324. Inserto de cavidad profunda con tres niveles de enfriamiento del canal. (Campo, 2006, p.632).

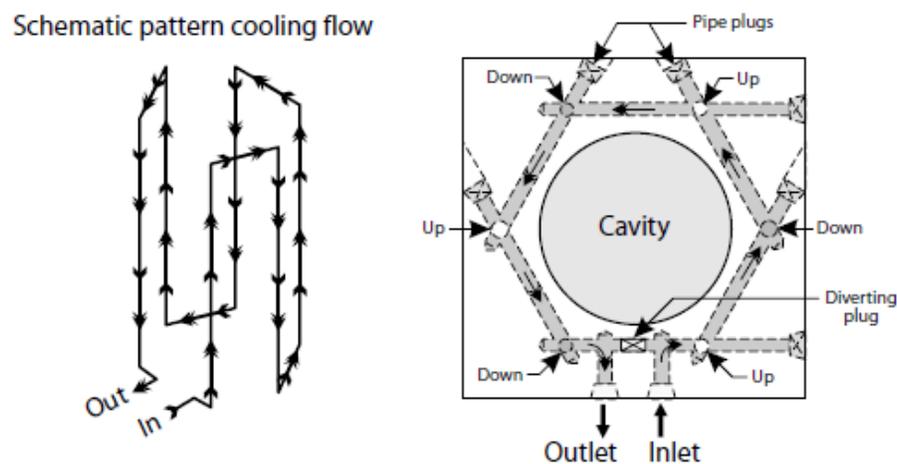
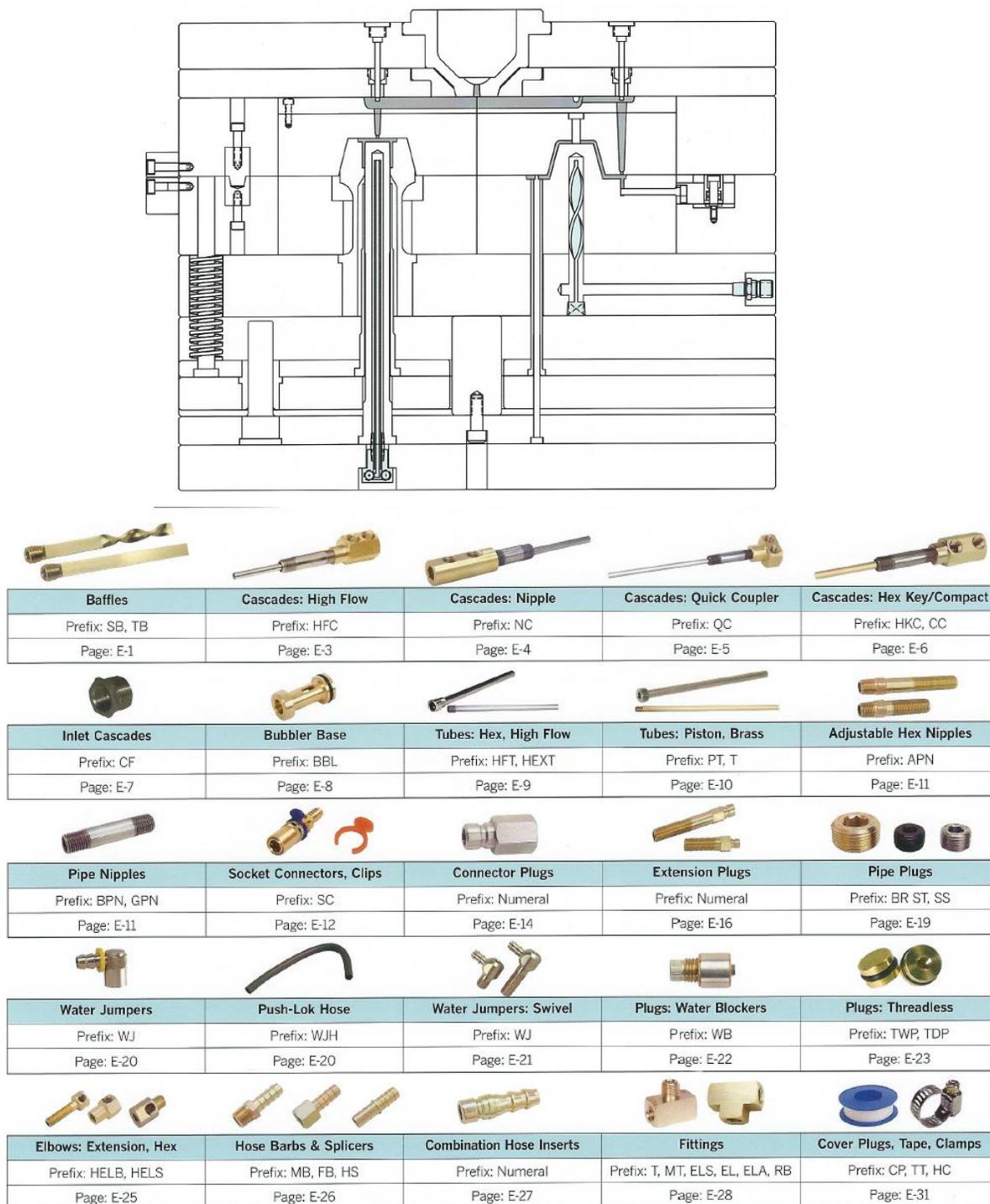


Figura 325. Esquema de recorrido de flujo de Inserto redondo, cavidad profunda sistema de canales de enfriamiento. (Campo, 2006, p.632).

Existen proveedores de elementos comerciales estandarizados para sistemas de refrigeración que pueden darnos ideas de como acondicionar mejor los moldes. Ver ejemplo de la página de un catálogo en línea en la Figura 326.

Por último, con respecto a los moldes con múltiples cavidades estos se refrigeran mediante circuitos en las placas, que pueden ser de uno o varios niveles. Además, se dispone de dos sistemas para comunicar la refrigeración de una cavidad a la otra. El sistema en paralelo y el sistema en serie. El primero tiene el inconveniente de que cuando a una de las cavidades se le tapona la refrigeración, el líquido refrigerante sigue fluyendo por las otras cavidades, lo que hace muy difícil detectar el problema, pues esto solo se lograría teniendo medidores de caudal en el circuito de refrigeración o monitoreando constantemente la temperatura de los elementos por los que esta circula, para detectar el sobrecalentamiento del que está tapado.

Ver en Figura 327 un ejemplo un circuito en placa de refrigeración en serie y en la Figura 328, un comparativo entre serie y paralelo para un sistema de machos con elementos comerciales.



PROGRESSIVE
COMPONENTS

Figura 326. Algunos elementos típicos de Refrigeración. Catalogo típico de proveedor. [Progressive Components International Corporation.](#), 2018, pp. 122-133).

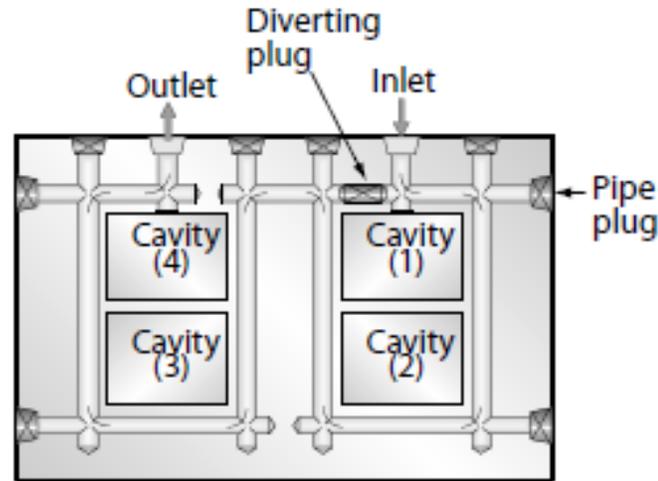


Figura 327. Placa para cuatro cavidades con un circuito con refrigeración en serie. (Campo, 2006, p.630).

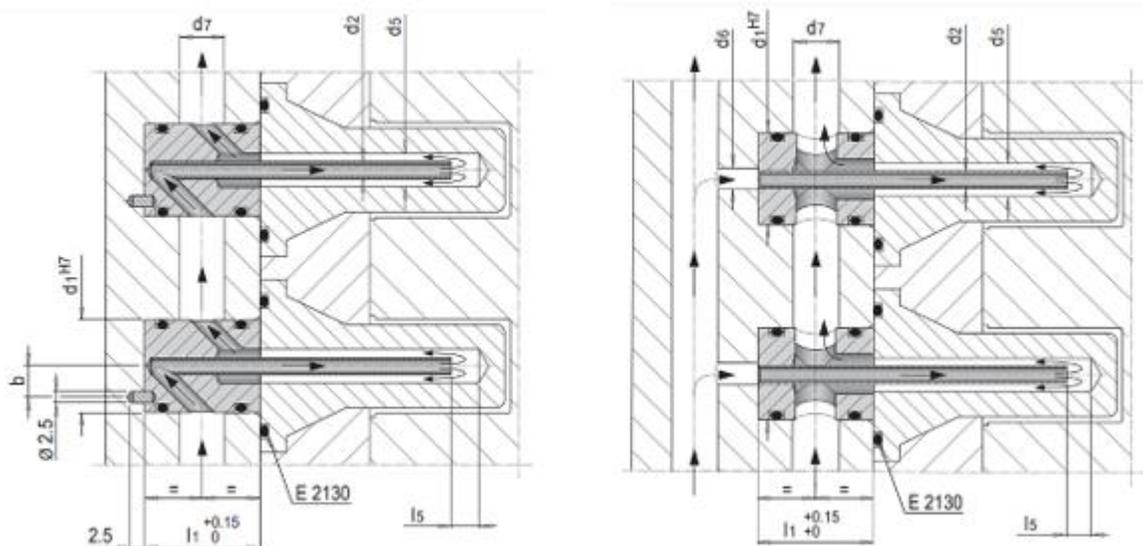


Figura 328. Refrigeración típica de machos con elementos Meusburger. Izq.) Conexión en serie. Der) conexión en paralelo. (Meusburger Georg GmbH & Co KG, s.f.)

En el siguiente Link puede verse un ejemplo ([ver video](#)) de un sistema de refrigeración publicado en la página de Progressive Components (2019), que es un proveedor de estándares para moldes.

5.3.7 Sistema de expulsión y desmoldeo.

El sistema de expulsión y desmoldeo del artículo es la parte fundamental del molde, pues de este depende el éxito del proceso de conformación y obtención de una pieza sin defectos y lo más importante, que pueda ser evacuada del molde.

La primera parte de este proceso se basa tener un buen diseño de la línea de partición de la pieza y por lo tanto de la línea de apertura de molde. Esto incluye la definición de los ángulos de desmoldeo y la corrección o definición de cualquier tipo de contrasalida en la pieza.

Con base en lo anterior, la segunda parte consiste determinar los sistemas que deben usarse para librar las retenciones en el artículo que no se pueden corregir por ser parte funcional o de importancia estética del artículo. Es allí donde comienza el diseño del sistema de extracción del molde, para sacar el artículo de este. En resumen, en caso de no poderse eliminar las contrasalidas en el artículo, debe definirse el sistema de extracción que lo haga posible.

5.3.7.1 Línea de partición de molde.

Las líneas de partición o separación de un molde son las superficies comunes a dos placas o dos elementos de un molde que forman una línea de unión en el artículo. Todas las placas o elementos de molde que tienen superficies que forman líneas de unión en el artículo, se juntan para generar las cavidades formando sello y evitando la pérdida de material termoplástico de las cavidades del molde.

Podemos clasificar la línea de separación como plana o no plana. Los tipos que no son planos incluyen líneas de separación escalonada, perfiladas y en ángulo.

La línea de separación plana es la más sencilla de fabricar y mantener. Puede ser una superficie rectificadas y se puede sellar fácilmente en la superficie de la cavidad del molde.

Sellar un par de placas de molde es el proceso de casar las diferentes superficies de estas que forman la línea de unión correspondiente a la cavidad. Esto se logra marcando con tinta azul las superficies que formarán el sello de una de las placas, juntando momentáneamente las dos placas y eliminando posteriormente los puntos altos que serán evidentes en las superficies de la otra placa. Se dice que las placas sellan cuando una película azul uniforme se transfiere de las superficies de una placa a las superficies de la otra (Campo, 2006, p.607).

5.3.7.1.1 Línea de partición plana.

La línea de separación depende completamente de la forma del componente. La cavidad para la parte moldeada rectangular en la Figura 329 muestra que la cavidad del molde puede ser mecanizada en una placa del molde. Por lo tanto, la posición de la superficie de separación

estará en la parte superior de la parte moldeada, y la línea de separación es una superficie plana. Por su aspecto, esta es la disposición ideal ya que la línea de separación no es perceptible, a menos que se desarrollen problemas de apariencia o funcionalidad en el artículo inyectado o en el proceso de moldeo por inyección.

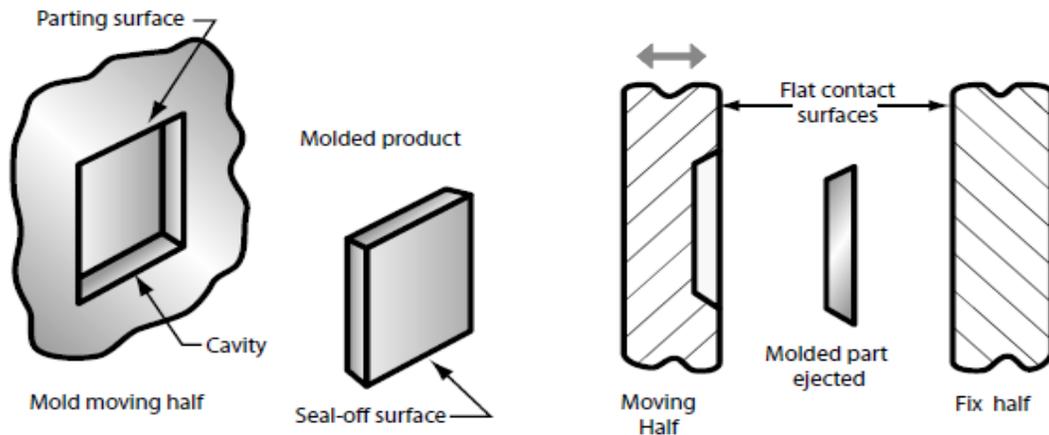


Figura 329. Ejemplo de línea de unión plana y localización de la cavidad. (Campo, 2006, p.607).

La línea de separación plana debe seleccionarse de modo que la parte moldeada pueda retirarse del molde. La Figura 330 muestra una cavidad rectangular plana que incorpora un borde biselado doble. La línea de partición para este componente no puede estar en su superficie superior, porque esto creará una contrasalida o retención en el molde. La única opción adecuada para la línea de separación es en el centro del bisel doble. Esta selección de línea de partición permite que la mitad de la forma requerida se hunda en cada una de las dos mitades del molde (Campo, 2006, pp.607-608).

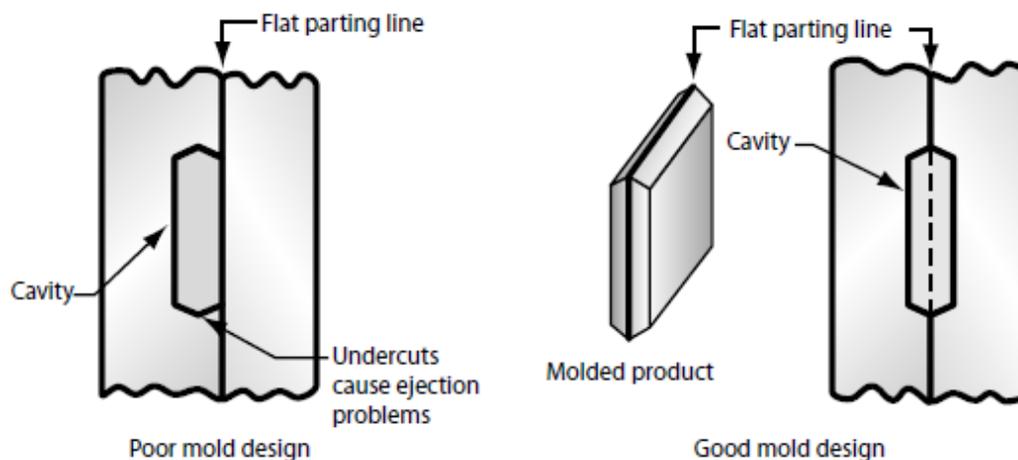


Figura 330. Ejemplo de línea de unión plana y localización de la cavidad. (Campo, 2006, p.607).

En la Figura 331 se muestran varias formas moldeadas que permiten adoptar una superficie de separación plana. Las flechas muestran la línea de separación en las piezas moldeadas.

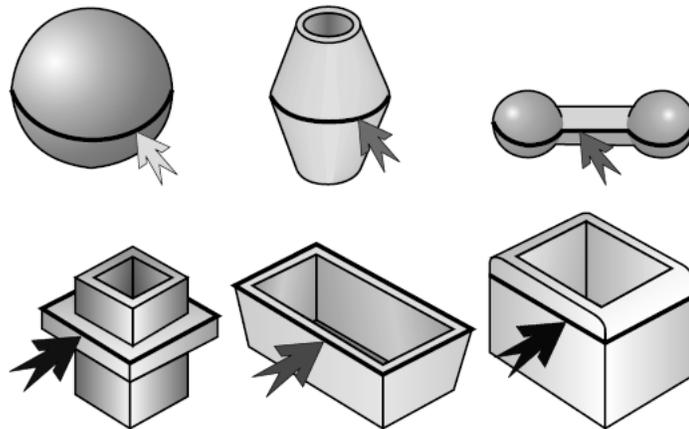


Figura 331. Línea de unión de molde plana típica, para diferentes formas moldeadas. (Campo, 2006, p.608).

5.3.7.1.2 Línea de partición no plana.

Muchas piezas moldeadas requieren una línea de partición que se encuentra en una superficie angular o curva. En estos casos, la línea de separación debe ser escalonada, perfilada o en ángulo.

- **Línea de partición de moldes perfilados:** En la Figura 332 se muestra una ilustración de una línea de partición perfilada. La parte moldeada se muestra en la ilustración izquierda. Cabe señalar que, mientras que en la sección transversal la forma de moldeo es constante, la forma general (vista lateral) incorpora curvas. Como el borde del componente es cuadrado con la cara (aparte del calado de la cavidad), toda la geometría de la cavidad se puede hundir en una placa de la cavidad del molde. Por lo tanto, la forma general de la superficie de separación seguirá la superficie interior de la cavidad del molde.

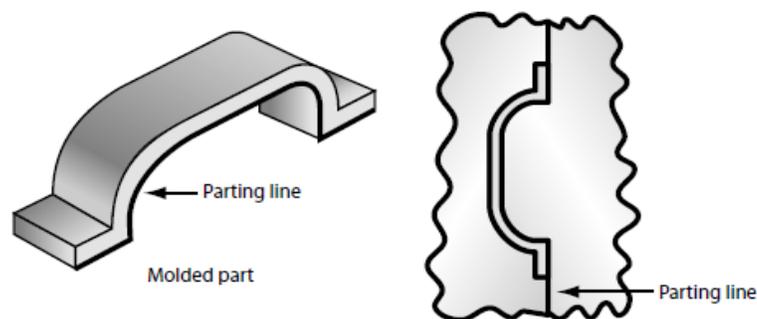


Figura 332. Línea de partición del molde perfilado. (Campo, 2006, p.608).

- **Línea de separación de moldes en ángulo:** El diseñador se enfrenta con frecuencia a un componente que, aunque es de forma regular, no puede ser expulsado de la cavidad del molde si se adopta una línea de separación plana.

La Figura 333 muestra la parte moldeada a la izquierda, el problema de expulsión en el medio y la línea de separación en ángulo recomendada en la ilustración derecha.

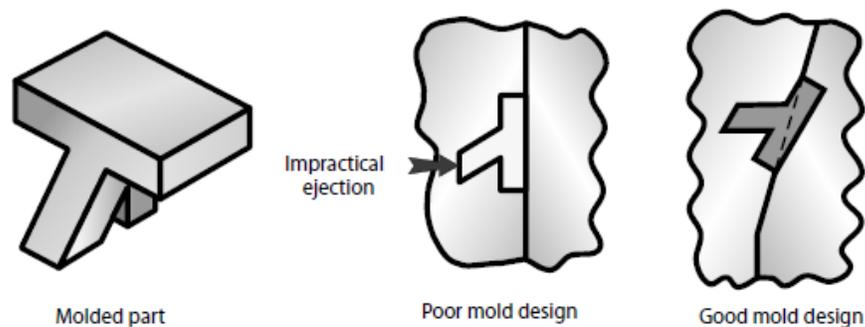


Figura 333. Línea de partición de molde angular. (Campo, 2006, p.608).

- **Línea de separación de moldes complejos:** Las líneas de separación complejas consideran las formas de borde de otros componentes (es decir, cuadradas, con doble biselado o incorporando un radio) donde la forma de borde no es constante. Esto a menudo conduce a superficies de línea de partición bastante complejas. La Figura 334 muestra una geometría de diseño de producto simple utilizando una línea de separación compleja.

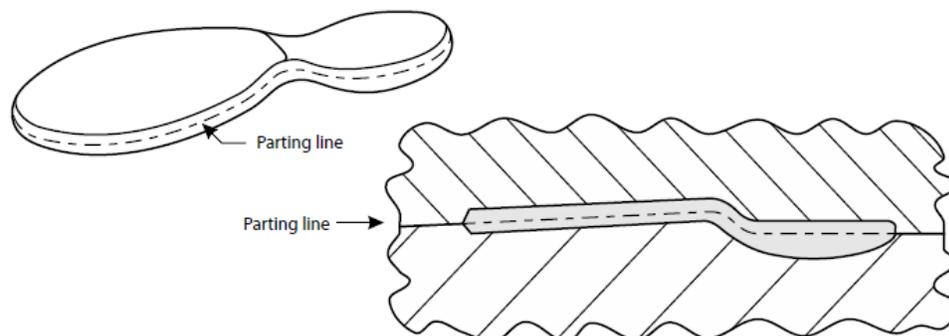


Figura 334. Línea de partición de molde compleja. (Campo, 2006, p.609).

Para determinar la línea de separación, se dibujan varias secciones transversales a través de la parte a moldear y la dimensión máxima de cada una se define cuando se ve en la dirección de apertura. La línea de separación pasará alrededor de todos estos

puntos de dimensión máxima. Una vez que se ha determinado la línea de separación, se puede dibujar la superficie de la línea de separación del molde. Esta superficie de partición no varía en la dirección transversal y, si se desea, puede mecanizarse completamente la superficie de selle a través del molde, aunque es recomendable que esta superficie este confinada en el área próxima a la cavidad para reducir al mínimo el de selle entre las superficies onduladas.

- **Línea de separación local del molde escalonado:** En ciertos componentes se puede encontrar que el cambio de un punto de dimensión máxima a otro es bastante abrupto. En estos casos, la línea de partición está pasando de un plano a otro, preferiblemente en un ángulo. Generalmente es necesario Permitir al fabricante de moldes cierta libertad en la mezcla de la forma de la cavidad en la zona del escalón para garantizar que no se produzcan retenciones locales.

Con frecuencia, es necesario incorporar un escalón o una superficie de separación perfilada para compensar pequeñas irregularidades en una forma regular. Normalmente, esto se logra mejor localizando el cambio en la superficie de separación para permitir que la mayoría de las superficies se mantengan planas.

Considere un ejemplo más complejo, como se muestra en un componente en forma de caja con una saliente en una de las paredes laterales en la Figura 335. Este componente se puede moldear de dos maneras: ya sea escalonando localmente la superficie de la línea de partición o diseñando un molde del tipo de cavidad lateral. El más simple de los dos métodos es escalonar la superficie de separación localmente y debe ser el método de elección cuando corresponda.

La Figura 335 muestra la parte moldeada, la vista superior de la cavidad, la vista inferior del núcleo y la sección transversal de la pieza a través del molde. La saliente está por encima de la superficie de separación general, que requiere una proyección desde el lado del núcleo para elevar el nivel localmente hacia la superficie de separación del núcleo. Se introduce un hueco complementario en la placa de la cavidad para acomodar esta proyección. La proyección se encaja en el hueco en una ligera conicidad. Es adecuado un ángulo (\emptyset) de entre 2° y 5° por lado. Mientras que los lados rectos son más fáciles de producir y de sellar, estos pueden presentar problemas de desgaste abrasivo debido al desgaste que se produce entre los dos a causa del deslizamiento entre estos. Este método es el más usado para los moldes de patines.

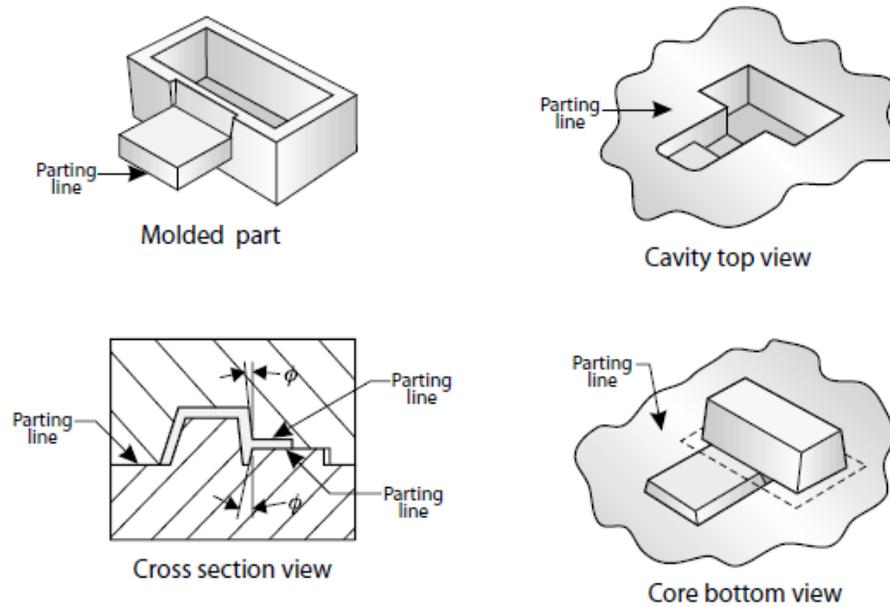


Figura 335. Línea de partición de molde escalonada. (Campo, 2006, p.609).

El rebaje en la placa de la cavidad se profundiza localmente para formar la parte inferior de la cavidad para la saliente. La parte superior está formada por la superficie superior de la línea de separación del núcleo (Campo, 2006, pp.608-609).

5.3.7.1.3 Balance de líneas o superficies de partición de molde.

Cuando la superficie de partición no es plana como en el caso de los patines, existen las fuerzas desequilibradas a considerar en ciertos casos. Esto se muestra mejor en un molde con superficies de línea de partición escalonadas como en la Figura 336. La masa termoplástica, cuando está bajo presión dentro de las cavidades, ejercerá una fuerza que tenderá a abrir el molde en la dirección lateral. Si esto sucede, pueden aparecer rebabas o líneas de unión acentuadas en la cara inclinada.

El movimiento entre las dos mitades del molde será resistido por las placas soporte de la máquina inyectora; pero, aun así, debido a las grandes fuerzas involucradas, es deseable equilibrar el molde para contrarrestar las componentes laterales, invirtiendo el escalón para que la superficie de separación continúe a través del molde como una imagen de espejo de la sección que incluye la cavidad. A menudo es conveniente especificar un número par de cavidades (2, 4, 8, 16, 32 y 64), para poner las cavidades enfrentadas, cuando se considera este tipo de molde. Así las cavidades ubicadas en lados opuestos de la línea central del molde sirven para equilibrar el este.

Cuando el balanceo no es práctico debido al tamaño y forma de las piezas, se deben incorporar contratechos de soporte suficientemente resistentes que soporten las fuerzas laterales en el molde (Campo, 2006, p.610).

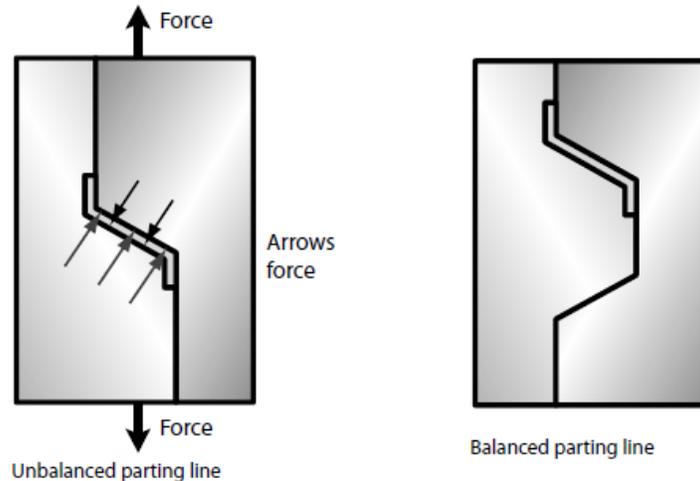


Figura 336. Línea de partición de molde escalonada. (Campo, 2006, p.610).

5.3.7.2 Sistemas típicos de extracción.

Existen múltiples sistemas para la extracción de artículos del molde. Para la extracción de las piezas se utilizan variados tipos de extractores los cuales, frecuentemente, también asumen la función de purgar el aire o gas de la cavidad correspondiente.

Las piezas moldeadas por inyección se someten a reducción de tamaño (contracción) durante el ciclo de enfriamiento, causada por las características de contracción de la pieza y del material termoplástico. Si se necesitan piezas con dimensiones precisas, se deben hacer concesiones para esta contracción al establecer las dimensiones para las cavidades. Las piezas moldeadas se expulsan de las cavidades del molde después de que se hayan enfriado. Se requieren procedimientos especiales de manufactura de moldes para que los sistemas de expulsión eliminen automáticamente el sistema de canales y las piezas moldeadas del molde.

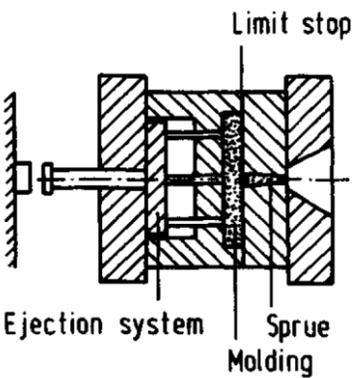
Todas las superficies de los moldes que entren en contacto con la masa termoplástica y las paredes de salida en la dirección del desmoldeo deben pulirse cuidadosamente. No se recomienda la lubricación de las superficies del molde que entran en contacto con la masa termoplástica pues esto contamina el producto. Existe el peligro de que se desarrollen arañazos y grietas cuando se abre el molde o se expulsan las piezas, especialmente al moldear resinas reforzadas con fibra de vidrio.

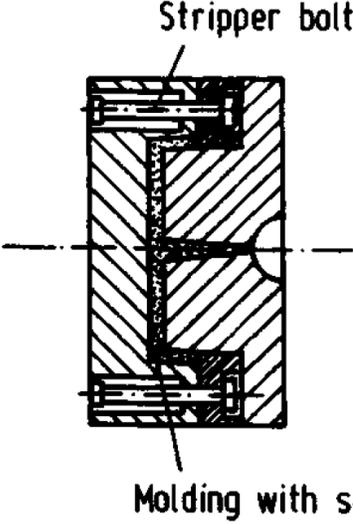
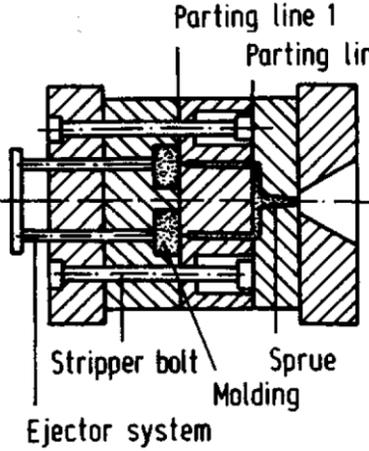
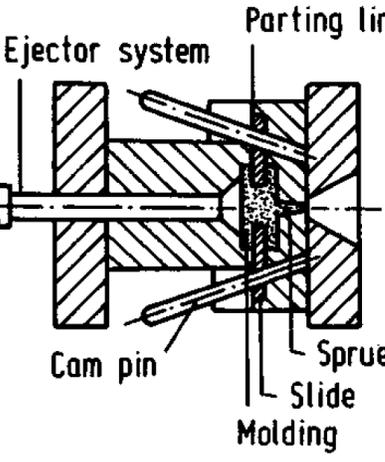
Las cavidades del molde deben tener un acabado de pulido a espejo y pulido en las en la dirección de expulsión o desmoldeo, para eliminar cualquier rasguño e indentación a excepción de aquella que se piden mate, arenados o con acabados de erosión. Siempre que sea posible, la superficie debe ser lapeada, ya que incluso los rasguños e indentaciones microscópicos se rellenan con termoplástico fundido bajo inyección alta Presión, evitando la eyección suave.

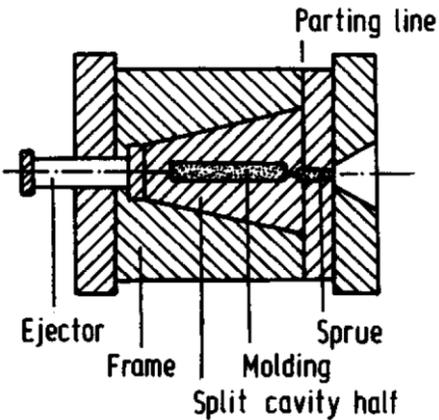
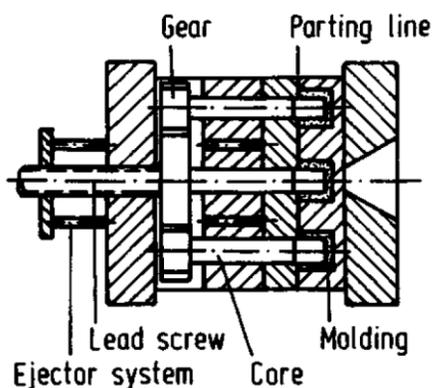
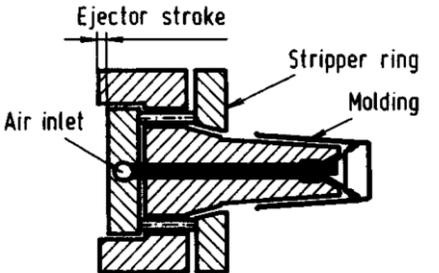
La máquina de inyección detrás de la platina móvil posee un vástago para la activación automática de un sistema de expulsión. Debido a esto, el sistema de expulsión del molde funcionará de manera más efectiva si se coloca en la mitad móvil del molde. Aunque en algunos diseños la expulsión se puede hacer desde el lado de inyección, lo cual es más exigente a nivel de diseño y requiere de sistemas de expulsión más elaborados.

Solo las partes o artículos planos con una pared pronunciada hacia la dirección de expulsión pueden expulsarse sin los pines de expulsión especiales en las piezas plásticas. Sin embargo, esto requiere que los sistemas de correderas, el punto de inyección, el bebedero y la pieza moldeada tengan la fuerza suficiente para expulsar las piezas moldeadas desde sus bordes por medio de placas de expulsión y extractores de rama (Campo, 2006, p.610-615).

A continuación, se muestran ejemplos típicos o comunes de sistemas de expulsión usados para desmoldeos simples. Ver Figura 337.

Presentacion del molde	Método de expulsión	Componentes de operación	Aplicación
<p>A</p>  <p>Limit stop</p> <p>Ejection system</p> <p>Sprue Molding</p>	<p>Durante la apertura de empuje en la dirección de la carrera de desmoldeo. Expulsión con pasadores, mangas o placa separadora.</p>	<p>Mecánica, hidráulica, neumática, manual, parada de la máquina, elevación de cilindro, leva, pivote, plano inclinado, placa de empuje. También dos etapas o eyección mixta.</p>	<p>Molduras de todo tipo sin retenciones.</p>

<p>B</p>  <p>Stripper bolt</p> <p>Molding with sprue</p>	<p>Durante la carrera de apertura, tirando en la dirección de desmoldeo. Expulsión con placa expulsora.</p>	<p>Mecánica, hidráulica, neumática. Perno limitador, cilindro de elevación, cadena.</p>	<p>Molduras en forma de copa con cierre interno.</p>
<p>C</p>  <p>Parting line 1</p> <p>Parting line 2</p> <p>Stripper bolt</p> <p>Sprue Molding</p> <p>Ejector system</p>	<p>Durante la apertura de empuje en la dirección de la carrera de desmoldeo. Expulsión con pasadores, mangas o placa expulsora.</p>	<p>Mecánica, perno limitador.</p>	<p>Molde con separación automática de punto de inyección. (molde de tres placas)</p>
<p>D</p>  <p>Ejector system</p> <p>Parting line</p> <p>Cam pin</p> <p>Slide</p> <p>Sprue Molding</p>	<p>Durante la apertura de empuje en la dirección de la carrera de desmoldeo. Expulsión con pasadores, mangas o placa expulsora después de liberar la contrasalida con la corredera.</p>	<p>Mecánica, guías inclinadas, levantador, mecanismo deslizante o correderas. Igualmente, hidráulica.</p>	<p>Partes planos con retenciones externas. Ejm. Roscas</p>

<p>E</p> 	<p>Durante la apertura de empuje en la dirección de la carrera de desmoldeo. Eyección pines expulsores.</p>	<p>Mecánico: palanca, pestillos, eslabones, pasadores, resortes, levas. Hidráulica como actuadores separados.</p>	<p>Piezas con cortes externos (costillas) o aberturas en las paredes laterales, Ejm. Caja para botellas.</p>
<p>F</p> 	<p>Los componentes del molde que se forman se desenroscan de los machos en un molde cerrado o abierto. Luego expulsa con pines expulsores o bujes dependiendo de la forma de la pieza.</p>	<p>Mecánico: tren de engranajes con transmisión por correa o cadena, bastidores, tornillos de avance grueso con tuercas. Accionamiento eléctrico o hidráulico separado. Raramente manual Ejm. Con machos colapsibles.</p>	<p>Piezas con roscas internas o externas.</p>
<p>G</p> 	<p>El empuje en la dirección del desmoldeo provoca una primera liberación seguida de expulsión con aire comprimido.</p>	<p>Mecánica y neumática por etapas</p>	<p>Vasos, copas, piezas profundas</p>

- A. Sistema estándar para piezas pequeñas.
 B. Dirección de expulsión hacia lado móvil. Se usa decapado, pero generalmente solo para piezas circulares.
 C. Desmoldeo en dos líneas de separación para operación automática, incluida la separación del punto de inyección.
 D. Desmoldeo de piezas con contrasalidas puntuales (molde de correderas).
 E. Desmoldeo de patines grandes de lado completo (molde de cavidad dividida).
 F. Molde de desenroscado para destornillamiento de roscas.
 G. Desmoldeo con apoyo por Inyectores de aire. La rotura se realiza mecánicamente.

Figura 337. Recopilación de sistemas comunes de métodos de expulsión, usados en moldes pequeños. (Menges & Mohren, 2001, pp.401-405).

Para una mejor ilustración [ver video](#) publicado en la página de Progressive Components (2019), que es un proveedor de estándares para moldes, allí se observa un ejemplo de un sistema de expulsión.

Así mismo, dada la importancia del tema, en el [Capítulo 6](#), se expondrán otros tipos de sistemas para profundizar en tema de la expulsión de artículos de los moldes. Incluidos los estándares comerciales.

5.3.8 Sistemas de acople del molde a la máquina inyectora.

La fijación del molde a la máquina determina el buen funcionamiento y la durabilidad del molde, pues este debe garantizar la alineación de todos sus componentes tanto internos como externos. El sistema de alineación es diferente del sistema de guiado del molde, aunque este último es apoyo del primero.

5.3.8.1 *Alineación de moldes.*

Las dos mitades del molde deben alinearse de tal forma que todos los dispositivos, como insertos, corazones o machos, hebras, bujes expulsores, pines de empuje, etc. así como la forma de la pieza, queden geométrica y funcionalmente, en condiciones de diseño. Se debe revisar que exista una auténtica alineación con la máquina y entre las dos mitades del molde. [Ver numeral 5.3.1](#)

5.3.8.2 *Alineación con el eje de la unidad plastificadora.*

Una precisa alineación es necesaria con este eje. De otra forma no existirá un sellado entre la nariz y el molde y el material se escapará. La alineación se consigue por medio de un anillo guía que se máquina en el plato soporte del molde o bien se instala en este. Ver Figura 338

Estos dispositivos de centrado se encuentran disponibles en catálogos de distribuidores y son maquinados en aceros tratados térmicamente.

El anillo guía se ajusta ligeramente en el plato del molde por un lado y por el otro se desliza suavemente en el plato soporte del molde. Debe tenerse en cuenta el espesor de la placa aislante del molde, buscando siempre que la longitud de centrado sea de mínimo 10 mm. Ver Figura 339.

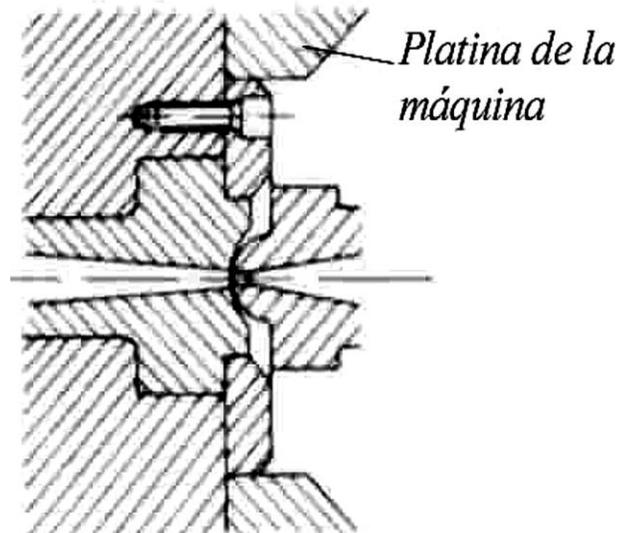


Figura 338. Alineación con la unidad plastificadora. Mediante anillo localizador o disco de centrado. (Menges & Mohren, 2001, p.475).

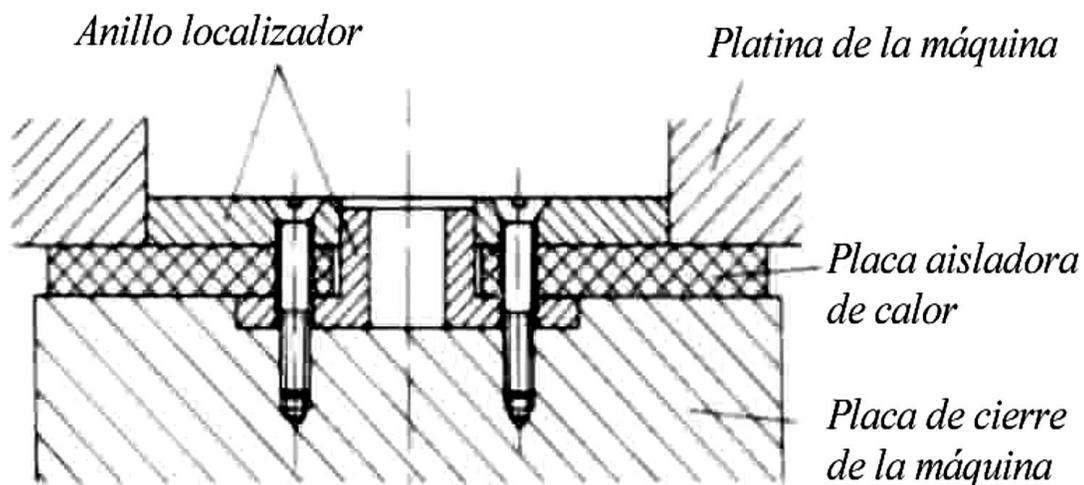


Figura 339. Alineación de la unidad plastificadora (continuación). (Menges & Mohren, 2001, p.475).

La Figura 339 muestra un anillo guía de dos piezas, por tener una capa aislante es muy adecuado para procesar plásticos termofijos o plásticos termoplásticos que necesiten altas temperaturas para piezas muy precisas.

5.3.8.3 Alineación interna.

Las mitades del molde deben alinearse internamente para obtener una buena precisión. En moldes pequeños esto se logra con pernos guías. Estos pernos están sujetos a una mitad del molde y cuando éste se cierra se deslizan en unas camisas insertadas en la otra mitad del molde. La Figura 340 muestra la forma apropiada para montar los pernos y las camisas guías.

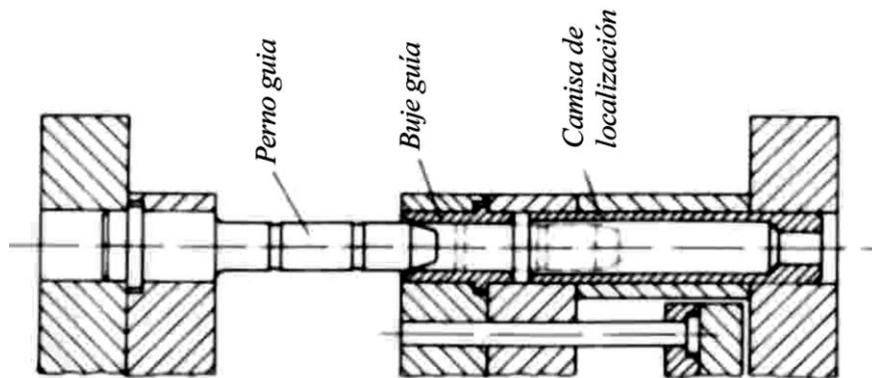


Figura 340. Ensamble de perno y camisa guía. (Menges & Mohren, 2001, p.476).

Se necesitan cuatro juegos de pernos y camisas para lograr una alineación apropiada. Para asegurar que las dos mitades correspondan, se instala un perno más grueso que el resto. Para un ensamble más fácil, dos pernos diagonalmente opuestos uno del otro se instala más largos que el resto. Todos los pernos se instalan lo más cerca posible de las esquinas del molde para tener una mayor superficie libre que facilita la instalación o maquinado de canales de enfriamiento.

La efectividad de la alineación depende de las tolerancias usadas entre los pernos y sus respectivas camisas guías. Como las tolerancias deben ser cerradas se crea desgaste y por esto se emplean materiales tratados térmicamente, generalmente la dureza de las camisas es de unos 60 a 62 Rc. Los juegos de pernos y camisas están disponibles en catálogos de distribuidores especializados. El desgaste se disminuye lubricando con disulfuro de molibdeno.

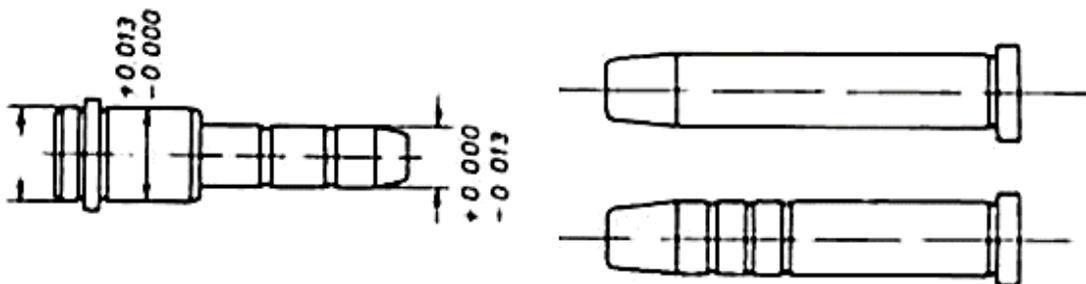


Figura 341. Pernos guía. (Menges & Mohren, 2001, p.476).

La longitud de los pernos depende de la profundidad de la cavidad y la longitud de las camisas depende de su diámetro interior, regularmente de 1.5 a 3 veces el diámetro interior, (Ver Figura 341). Los orificios correspondientes en el molde se barrenan de acuerdo con

instrucciones proporcionadas por el fabricante. Así mismo, la Figura 342 muestra la dimensión de las camisas.

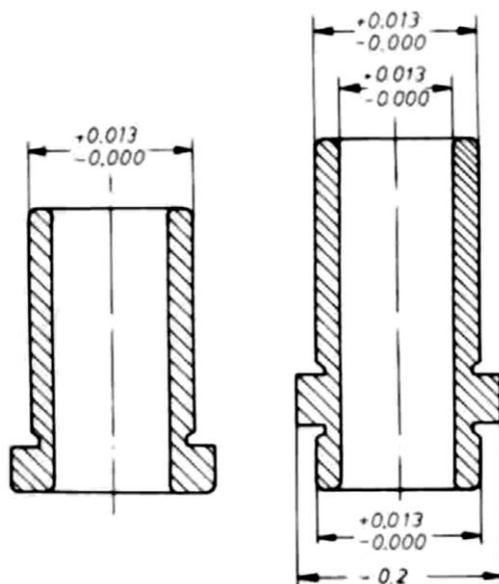


Figura 342. Dimensión de las camisas. (Menges & Mohren, 2001, p.478).

La Figura 343 muestra dos diseños de pernos con sus respectivas camisas ya montados en las dos mitades del molde.

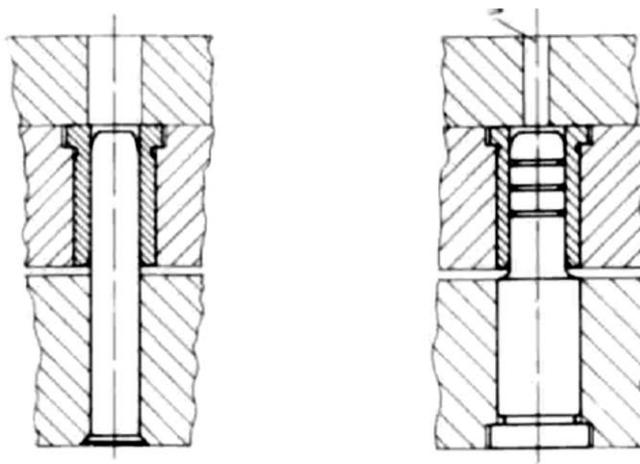


Figura 343. Montaje de guía y buje en el molde. (Menges & Mohren, 2001, p.478).

Es importante mencionar que no debe aplicarse ningún esfuerzo cortante a los pernos por eso hay que tener cuidado al diseñar otros dispositivos en el molde. Si la aplicación de esfuerzos cortantes o fuerzas laterales es ineludible se debe calcular correctamente el área de la sección transversal del perno.

5.3.8.4 Fijación del molde a máquina.

El sistema de fijación de molde a máquina es casi un estándar y se da de dos formas típicas, con tornillos o con bridas. En algunos casos puede ser una combinación de tornillos y bridas, dependiendo del espacio lateral disponible en el molde.

Es importante disponer del catálogo de la máquina donde se montará el molde, para así desde el comienzo del diseño tener claro que sistema se usara, pues en este está plasmada la distribución de las perforaciones de las placas de respaldo de la máquina, para así, dependiendo del tamaño del molde se pueda determinar si se usan tornillos o bridas.

También se debe tener en cuenta si el molde debe montarse con placa aislante o no. Esto depende del material a inyectar y de la necesidad de retener el calor dentro del molde o dejarlo escapar en el contacto del molde con la máquina. Si se usa placa aislante, el espesor de esta se debe tener en cuenta al calcular la longitud de los tornillos o el tamaño de la brida de sujeción.

5.3.8.4.1 Fijación con tornillos.

La fijación con tornillos depende del tipo de máquina, puede ser con tornillos M12 o M16 o dependiendo del tamaño de la máquina este es suministrado por el proveedor de la máquina. La longitud de los tornillos depende del espesor de la pestaña que se deje en el molde para su fijación. Ver Figura 344.

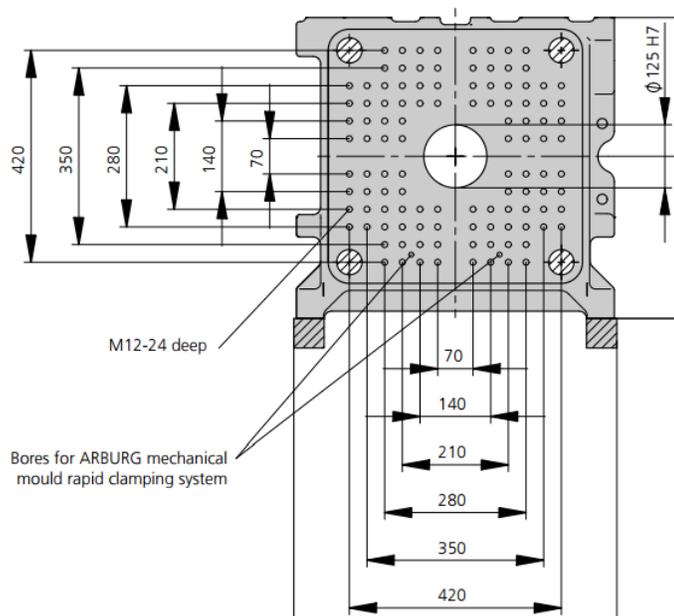


Figura 344. Distribución de perforaciones de placa fija máquina inyectora. (Arburg, s.f.).

5.3.8.4.2 Fijación con bridas.

Existen varios tipos de bridas que pueden usarse para la sujeción del molde. Es la opción más viable en caso de no poder poner tornillos por falta de espacio o si por el tamaño del molde no hay coincidencia de las pestañas de este con los agujeros roscados de la placa de la máquina. Ver Figura 345 y Figura 346.



Figura 345. Diferentes tipos de bridas para fijación de molde a máquina y ejemplo de molde montado en inyectora. (Cemausa, 2008-2019)



Figura 346. Diferentes tipos de bridas para fijación de molde a máquina y ejemplo de molde montado en inyectora. (Continuación). (Focus Technology Co., Ltd , 2019).

5.4 Selección de Materiales y Tratamientos Térmicos y/o Superficiales

Los materiales utilizados para producir moldes requieren características específicas de acuerdo con el tipo de producto que se quiera inyectar y su funcionalidad, por este motivo, es vital seleccionar adecuadamente el acero.

El diseñador deberá tener en cuenta aspectos importantes como:

- El costo del material, del mantenimiento (en especial los que intervienen en los sistemas de refrigeración) y la repetitividad de las partes del molde
- La facilidad para pulir el acero en las cavidades para dar los acabados requeridos por las partes plásticas y el funcionamiento del molde.
- Propiedades del acero como dureza, conductividad térmica, maquinabilidad, resistencia al desgaste y tenacidad, entre otras.
- En la selección del material también es importante tener en cuenta los tratamientos térmicos que se efectuaran posteriormente. Esto con el fin de no entrar en detrimento de las propiedades iniciales buscando las del tratamiento a realizar.

5.4.1 Materiales recomendados para la fabricación de moldes.

Los distintos tipos de acero recomendados para moldes dependen de la composición y para moldes más utilizados son:

5.4.1.1 *Acero pre-templado para moldes y porta-moldes.*

Este tipo de acero se utiliza principalmente para moldes grandes donde la resistencia al desgaste no se necesita que sea muy elevada y con proyección de producción moderada o baja. Estos aceros usualmente se suministran templados y revenidos sin necesidad de realizar algún tratamiento antes de usar el molde, especiales para placas de porta molde. Algunos ejemplos de estos aceros son:

- Uddeholm Impax Supreme – (AISI P20 bonificado – 1.2738)
- Uddeholm Holdax – (AISI 4140 bonificado – 1.2312)
- Uddeholm Ramax HH – (AISI 420F bonificado)

5.4.1.2 *Acero de temple.*

Este tipo de acero se utiliza para largas producciones, cuando es necesario resistir el desgaste abrasivo de algunos materiales o cuando las presiones de cierre e inyección son muy elevadas. Normalmente estos aceros vienen recocidos y son usados para cavidades o insertos en placas de acero pre-templado, algunos ejemplos de estos aceros son:

- Uddeholm Stavax ESR (AISI 420 modificado – 1.2083) (alta pulibilidad).
- Uddeholm Mirrax ESR (AISI 420 modificado) (alta pulibilidad).

5.4.1.3 Aceros resistentes a la corrosión

Este tipo de acero se usa cuando el molde puede estar expuesto a la corrosión. Un ejemplo de esto es el PVC es cual al pasar por el proceso de inyección genera gases altamente corrosivos.

También se usa para moldes que se usaran para productos plásticos de alta exigencia. Como la industria cosmética y farmacéutica.

Para una caracterización más específica de los materiales, sus aplicaciones y sus propiedades ver [Anexo E](#).

Igualmente, el [Anexo F](#), para ver equivalencias y formas de tratamiento.

5.4.2 Procesos de mecanizado típicos usados para la fabricación de moldes.

En la elaboración de los materiales para moldes se distinguen los siguientes procesos:

- Mecanización con arranque de viruta.
- Elaboración sin arranque material (estampado, troquelado, embutido...)
- Elaboración por erosión eléctrica – electroerosión, corte por hilo

Cerca del 90% del molde de inyección pueden obtenerse por mecanizado con arranque de viruta. En esta modalidad de fabricación intervienen principalmente trabajos de torno, fresa, CNC y pulido. Las máquinas, normalmente máquinas especiales, tienen que dejar el molde prácticamente acabado, de modo que sólo sea necesario un pequeño ajuste manual. Conviene que este trabajo de repaso posterior quede limitado al pulido necesario para conseguir una buena calidad de superficie. Con las máquinas y herramientas pueden elaborarse por mecanizado tanto los aceros de nitruración, temple, bonificados y con resistencias muy altas. Al mecanizar el material, se originan tensiones que pueden producir deformaciones en el molde de inyección, después del desbastado. En el posterior afinado, pueden compensarse todavía una deformación eventualmente producida. Esto mediante tratamientos de normalizado o alivio de tensiones.

Tras el tratamiento térmico, se esmerilan y pulen los moldes para conseguir una buena superficie. La calidad superficial es, un factor decisivo para la calidad de las piezas plásticas. Para obtener piezas correctas, la superficie del molde ha de ser lo más lisa posible y estar

exenta de poros. También ello constituye una condición para que puedan desmoldarse bien las piezas plásticas.

Así, pues, hay que prestar gran atención al tratamiento final de las superficies de los moldes de inyección. Los procesos de fabricación indicados en la Tabla 15 pueden servir como orientación respecto al modo de proceder para conseguir buenas superficies.

Entre las diversas fases de pulido se limpiarán intensamente los moldes con líquido, al objeto de eliminar la totalidad de granos de abrasivo de la etapa precedente, antes de iniciar el trabajo con una muela de grano más fino.

Las cavidades y porta-moldes son fabricados por varios métodos, sin embargo, a la fecha, el mecanizado convencional es el más usado a nivel mundial. El término mecanizado convencional se usa para agrupar las operaciones de fresado, torneado, taladrado, rectificado y pulido.

- **Fresado** Consiste principalmente en el corte del material que se mecaniza gracias a la rotación de una herramienta con una geometría definida.
- **Torneado** Es un proceso de mecanizado utilizado para fabricar piezas cilíndricas en el cual la herramienta de corte se mueve de forma lineal mientras que la pieza de trabajo gira
- **Taladrado** Operación consistente en realizar agujeros circulares en una pieza mediante el uso brocas y en caso de roscas.
- **Pulido** Es la acción de alisar y preparar la rugosidad de la pieza para obtener características específicas luego del mecanizado. Es de importancia para lograr los acabados superficiales en las cavidades de un molde.
- **Electroerosión.** Otro de los procesos de mecanizado más usados a nivel mundial para la fabricación de moldes, pero que no hace parte del mecanizado convencional, consiste en la generación de un arco eléctrico entre un electrodo y el acero el cuál copia la geometría del electrodo.
- **Corte Por Hilo.** Electroerosión (EDM) por corte de hilo. Es un proceso de mecanizado mediante el cual se utiliza un hilo de metal para cortar un contorno

programado en una pieza. El hilo siempre atraviesa la pieza. Antes de empezar a mecanizar, es necesario realizar un agujero en la pieza.

- **Soldadura laser.** *Se usa en procesos de reparación o corrección de piezas del molde. Debe verificarse el tipo de material de aporte y su compatibilidad con el elemento a soldar. Generalmente es necesario preparar las piezas y realizar correcciones posteriores por mecanizado.*
- **Rectificado.** *Se trata de procesos de mecanizado planos o circulares internos y externos. Se realizan mediante piedras altas revoluciones y bajas cargas de corte. Se obtienen superficies de muy buena calidad y precisión geométrica.*

5.4.3 Tratamientos térmicos recomendados.

Los Tratamientos térmicos son todas las operaciones realizadas a un material bajo condiciones de temperatura, velocidad, presión entre otros para modificar su estructura cristalina y por ende mejorar sus propiedades mecánicas como la dureza y la resistencia. Algunos de los tratamientos térmicos más usados en la industria del plástico son:

- **Temple** Consiste en un calentamiento del acero hasta cierta temperatura para posteriormente enfriar rápido y lograr la formación de martensita en la estructura cristalina lo que produce un aumento en la dureza del acero y tensiones elevadas
- **Revenido** Es un tratamiento complementario al temple cuya función es eliminar las tensiones residuales del acero tras el enfriamiento rápido previo. Se debe llevar el acero a una temperatura menor inferior a la del punto crítico y enfriar lentamente
- **Recocido** Calentamiento y posterior enfriamiento lento de la pieza para destruir estados anormales constitucionales y estructurales que endurecen el material permitiendo ablandarlos para poder ser maquinados más fácilmente y recuperar la estructura del acero
- **Normalizado o recocido de normalización** Es una variación del recocido con varios propósitos, generalmente busca mejorar la maquinabilidad, refinar el grano, homogenizar el acero y modificar las tensiones superficiales

- **Alivio de tensiones** Tratamiento térmico especialmente aconsejado para piezas que sometidas a un elevado desgaste. Se realiza con el objetivo de reducir las tensiones internas de las piezas acabadas o de minimizar las variaciones dimensionales que se producirán durante el tratamiento térmico posterior. El tratamiento se realiza sobre moldes y herramientas o sobre componentes que posteriormente se vaya a nitrurar.

Este tratamiento también se aplica sobre estructuras o piezas soldadas, de modo que simultáneamente se reduce el nivel de tensiones internas y las oscilaciones de dureza producidas por el proceso de soldadura. Los tratamientos de alivio de tensiones no producen el ablandamiento de los aceros, pero tienen en cuenta diferentes parámetros relacionados con la composición química de los aceros o de los respectivos estados de suministro.

5.4.4 Tratamientos termoquímicos.

Los tratamientos termoquímicos son tratamientos térmicos que además de modificar la estructura del acero, cambian la composición química de las capas superficiales del mismo, algunos de los más usados en la industria de moldes de inyección son:

- **Cementación** Es un proceso mediante el cual se crea una capa superficial rica en carbono y de una dureza elevada mientras que el núcleo se mantiene dúctil
- **Nitruración por plasma** Es un endurecimiento debido a nitruros de hierro que aumentan considerablemente la dureza y la resistencia al desgaste, no se aconseja nitrurar aceros resistentes a la corrosión ya que disminuye esta propiedad
- **Cromado duro** Es la aportación electrolítica de cromado duro para conseguir superficies duras y resistentes al desgaste ideales para materiales corrosivos como el PVC. Es muy usado en los moldes de envases para PVC.

5.4.5 Tratamientos superficiales.

Los tratamientos superficiales son capas delgadas de material que se agregan al acero base y que no alteran la composición ni la estructura de dichos aceros, los métodos más usados en la industria para aplicarlos son la deposición física de vapor (PVD por sus siglas en inglés) y la deposición química de vapor (CVD). Los tratamientos superficiales más usados en la industria de inyección de plástico son:

- **DLC (Diamond-Like-Carbon)** es una nueva generación de PVD que combina 2 formas alotrópicas del carbono, grafito y diamante lo que genera un recubrimiento con una elevada dureza y un coeficiente de fricción bajo.
- **TiN** es un recubrimiento PVD que deposita nitruro de titanio o Tinita, se usa generalmente en aceros donde se necesita una alta resistencia al desgaste y lubricación.
- **WCC.** Recubrimiento superficial que se usa para aumentar la dureza superficial de guías y bujes. Este es disminuye la fricción y el desgaste abrasivo.
- **TENIFER.** Es un tratamiento en sales de nitruro, que aumenta la resistencia a la oxidación, al desgaste, a la abrasión y a la corrosión. Proporciona propiedades antigripaje y antifatiga. Ayuda a la absorción de lubricante por los poros. Produce un ligero aumento homogéneo de volumen. El Espesor de capa nitrurada es de 5 – 25µm. se obtiene una elevada dureza superficial de 800 – 1500 HV. Es uno de los más usados en el medio.

A continuación, en la Figura 347, se dan pautas para la combinación de los aceros de molde sometidos a desgaste adhesivo en su funcionamiento.

RECOMENDACIÓN DE APAREAMIENTO DE ACEROS SOMETIDOS A DESGASTE ADHESIVO (DESLIZAMIENTO) EN CAVIDADES DE MOLDES DE INYECCION					
	1.2083 (52 HRc)	1.2083 (52 HRc) + TENIFER/NITRURACION	1.2344 (54 HRc)	1.2344 (54 HRc) + TENIFER/NITRURACION	1.2510 (58 HRc)
1.2083 (52 HRc)	MALO	BUENO	BUENO	EXCELENTE	BUENO
1.2083 (52 HRc) + TENIFER/NITRURACION	BUENO	BUENO	BUENO	EXCELENTE	EXCELENTE
1.2344 (54 HRc)	BUENO	BUENO	MALO	BUENO	BUENO
1.2344 (54 HRc) + TENIFER/NITRURACION	EXCELENTE	EXCELENTE	BUENO	EXCELENTE	EXCELENTE
1.2510 (58 HRc)	BUENO	EXCELENTE	BUENO	EXCELENTE	BUENO

Figura 347. Combinaciones de materiales para piezas de moldes con deslizamiento. Elaboración propia.

En el siguiente capítulo se hará un análisis más profundo acerca de los sistemas de expulsión y se darán pautas de diseño que pueden ayudar a la implementación de estos, en los diferentes proyectos que se puedan abordar.

Es de anotar que para llegar a este punto se han recorrido todos los procesos y sistemas o componentes de un molde de inyección. Siempre procurando mostrar la importancia de orientar el diseño del artículo y de todos los sistemas del molde hacia lograr el objetivo de poder expulsar el artículo del molde en condiciones óptimas.

No obstante, es importante aclarar que este objetivo se logra combinando múltiples factores teóricos, prácticos y de ingenio; dado que no existe una receta infalible para solucionar todos los casos que se presenten de una manera típica o estándar. A lo sumo, podremos agrupar los artículos y usar soluciones algo similares, pero siempre con variaciones funcionales y de optimización de la experiencia.

6 Sistemas de Expulsión y Desmoldeo en los Moldes de Inyección

Como ya se ha mencionado, el sistema de expulsión es responsable de retirar las piezas inyectadas en el molde después de abrir este. Aunque esto puede parecer una función simple, la complejidad del sistema de expulsión puede variar ampliamente dependiendo de los requisitos de la aplicación de moldeo. Se deben considerar muchas cuestiones, incluyendo la necesidad de múltiples ejes de actuación, la magnitud y distribución de las fuerzas de eyección, entre otros. Antes de comenzar el análisis y diseño de un sistema de expulsión, se debe tener una visión general de su función y, de ser necesario, recurrir a la observación de sistemas similares a la aplicación requerida.

La Figura 348 proporciona una vista lateral de una abertura de molde para la posterior expulsión de un bisel de ordenador portátil. El conjunto expulsor (que consiste en la placa expulsora, la placa de retención del expulsor, los pines de retorno o devolvedores, los pines de expulsión o expulsores, los pines de parada y otros componentes) se aloja entre la placa de sujeción trasera, la placa de soporte y los rieles de expulsión o paralelas de expulsión.

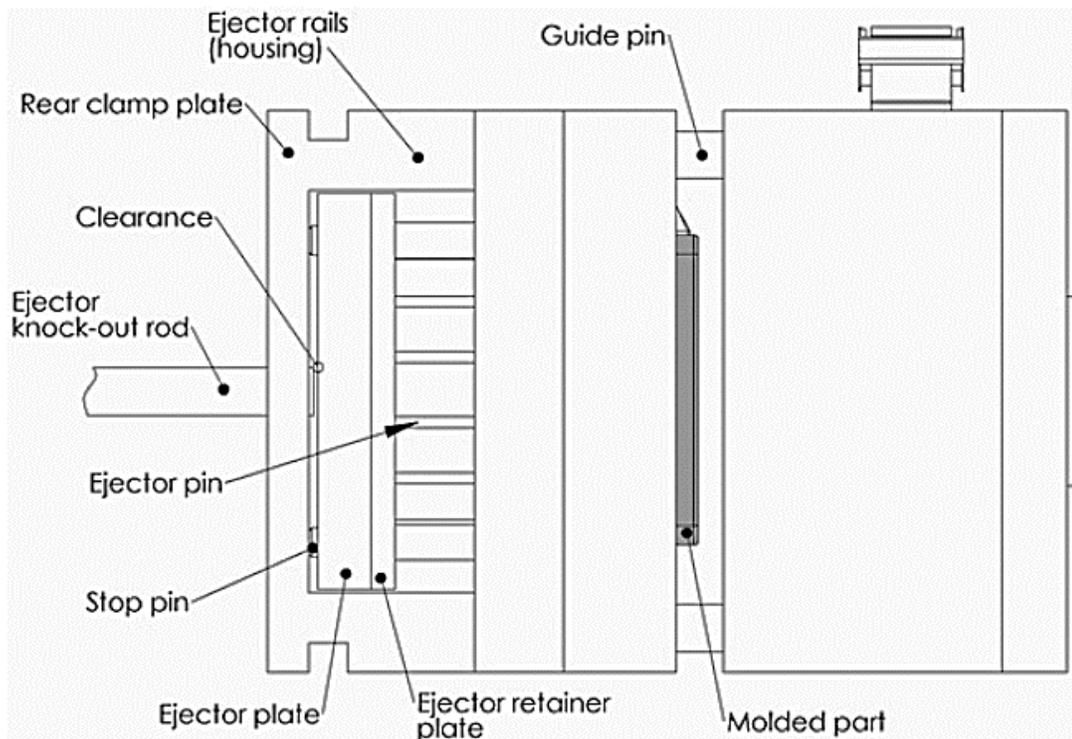


Figura 348. Vista lateral de la abertura del molde. (Kazmer, 2007, p.259).

En este momento del ciclo de moldeo, la parte moldeada se ha contraído sobre el lado del núcleo o macho del molde y ha sido extraída de la cavidad o hembra del mismo, cuando el

lado móvil del molde se retrae del lado estacionario del molde. En algunos momentos, la máquina de moldeo empujará el vástago de expulsión del eyector contra la placa expulsora para accionar el conjunto de eyector y tira las piezas moldeadas del núcleo. Sin embargo, en este momento existe un espacio libre entre la varilla de expulsión del expulsor y la placa expulsora.

La Figura 349 proporciona una vista lateral del molde durante el accionamiento del sistema de expulsión. Antes de la expulsión, la apertura de los platos de la máquina de inyección separa las dos mitades del molde para permitir el espacio libre para la expulsión de la pieza. A continuación, la máquina empuja la varilla expulsora hacia fuera para hacer contacto con la superficie trasera de la placa expulsora. Puesto que la máquina puede proporcionar una fuerza a la varilla knock-out mucho mayor que la fuerza con la que las piezas inyectadas se han contraído sobre el núcleo, todo el conjunto de expulsión es forzado hacia delante. Los pasadores eyectores en contacto con la parte moldeada se desplazan y empujan el artículo del núcleo.

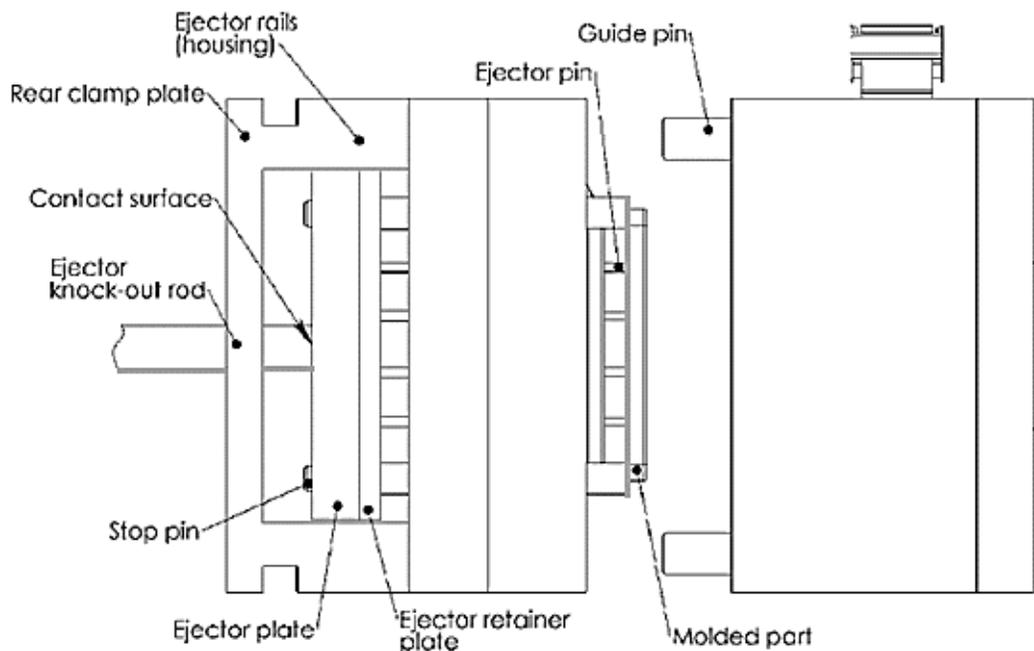


Figura 349. Vista lateral del molde con actuadores accionados. (Kazmer, 2007, p.260).

Después de que los moldes son expulsados, la máquina de moldeo retrae la varilla de expulsión del eyector, tal como se muestra en la Figura 350. Entonces se hace un espacio libre entre la parte frontal de la varilla de expulsión y la parte trasera de la placa de expulsión, lo que permite que el conjunto de eyector sea reajustado a su posición original para el siguiente ciclo de moldeo.

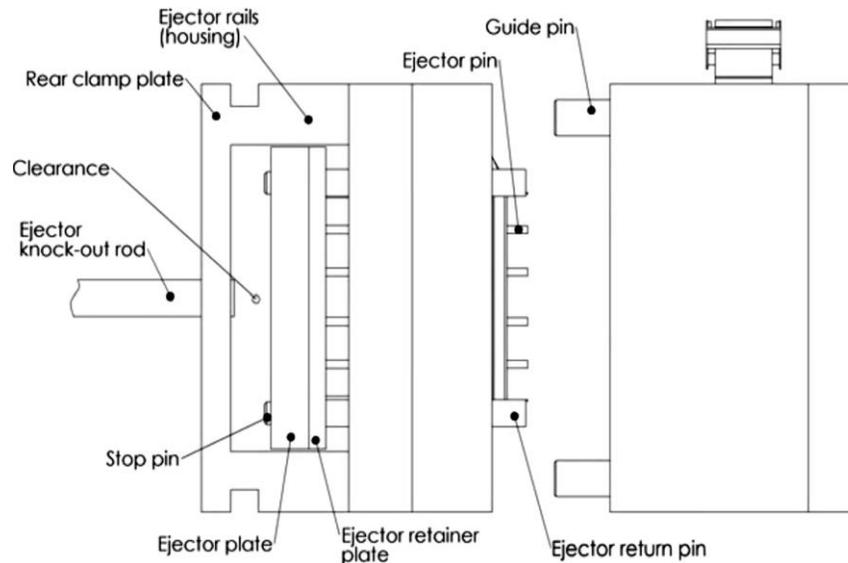


Figura 350. Vista lateral del molde con varilla desmontable de reajuste. (Kazmer, 2007, p.260).

Hay varias maneras de restablecer el sistema expulsor que se discutirá más adelante. Sin embargo, un método común para devolver el conjunto de eyector es simplemente cerrar el molde como se muestra en la Figura 351. La superficie frontal de los pasadores de retorno o devolvedores, se pondrá entonces en contacto con la cara opuesta de la placa A. La superficie trasera de los pasadores de retorno impulsará entonces la placa expulsora y esta irá hacia atrás a medida que el molde se cierra. Otra posibilidad es tener un resorte guiado entre la placa de retención del expulsor y la placa de fija B. ver Figura 352

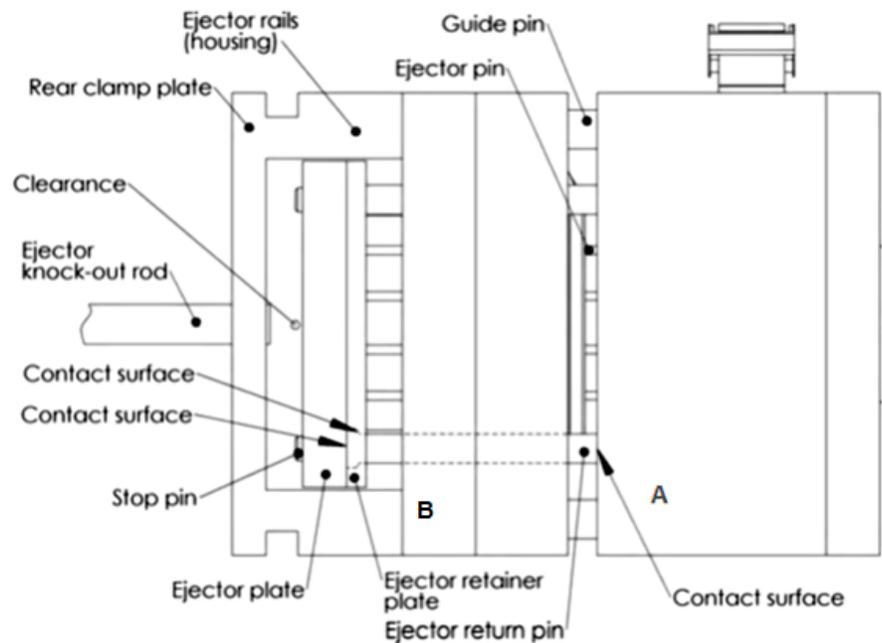


Figura 351. Vista lateral del molde cerrando. (Kazmer, 2007, p.261).

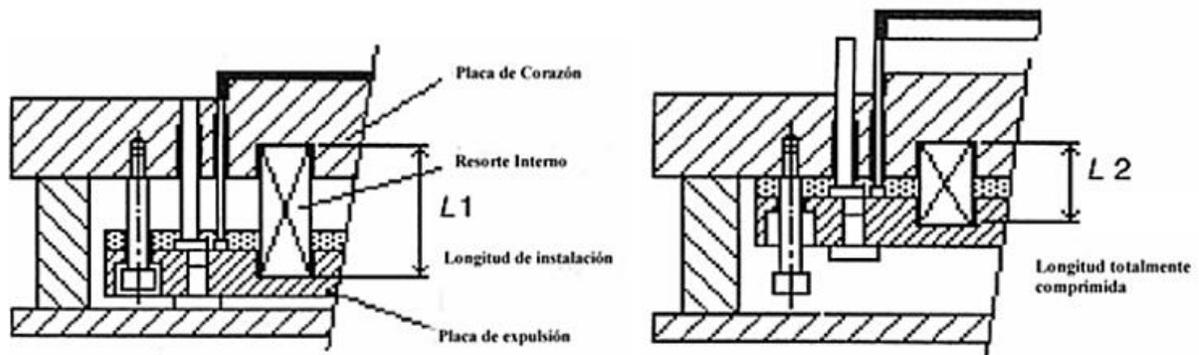


Figura 352. Esquema de instalación de resortes de retorno de placa flotante.

Debe notarse que el espacio que se forma entre la placa fija B y la placa de respaldo del molde (ver Figura 351), puede generar flexiones en la placa B pues esta es sometida a la presión de inyección. Por lo tanto, siempre que se use este tipo de expulsión, con placa flotante dentro de paralelas, deben usarse pilares de soporte con suficiente holgura (min 2 mm por lado) no necesariamente circulares y atravesando las placas móviles. Como los mostrados en la Figura 353

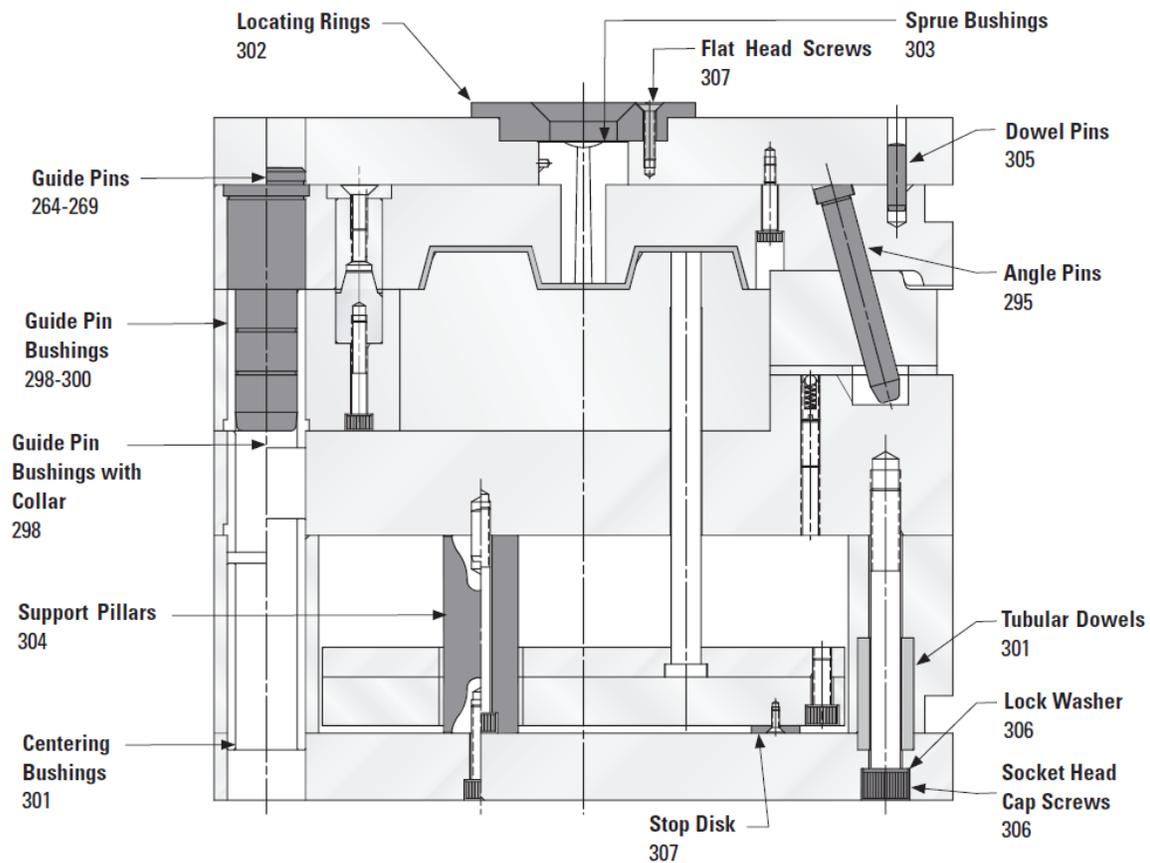


Figura 353. Esquema general de un molde de Expulsión por placa flotante (o paralelas) mediante expulsores. Catálogo online de DME mold components ([DME](#), 2013, p.290).

Este primer sistema de expulsión es el más típico de los que se mostraran a continuación y se denomina “*Expulsión por placa flotante (o paralelas) mediante expulsores*”. Ver Figura 353 (Kazmer, 2007, pp.259-261). En el siguiente enlace se muestra un video de un sistema de pines extractores en funcionamiento ([ver video](#)) (Progressive Components, 2019).

6.1 Consideraciones Generales y Definiciones

Como ya se mencionó (ver [sección 5.3.7](#)) a consecuencia de la contracción durante la inyección, las piezas inyectadas se contraen sobre los machos del molde (esto no es necesariamente valido para materiales termoestables). Para su desmoldeo se aplican diferentes tipos de expulsores:

- Pasadores cilíndricos de expulsión.
- Casquillos de expulsión.
- Placas de extracción, regletas de expulsión, anillos de expulsión.
- Mordazas, correderas.
- Separadores por aire comprimido,
- Extractores de plato o de tipo seta.

El tipo de extractor está en función de la forma de la pieza a inyectar. La presión superficial sobre la pieza a expulsar debe ser la más mínima posible para evitar deformaciones. En el caso de extractores del tipo pasador perfilado o con forma de la cavidad, se ha de evitar que se giren.

Normalmente, los machos y también los dispositivos de extracción están situados en la parte móvil de la máquina de inyección. En algunos casos especiales puede ser conveniente situar los machos en la parte fija de la máquina (en el lado de inyección). En este caso se requieren dispositivos especiales de extracción.

Para el desmoldeo de contrasalidas se requieren por lo general correderas. Las contrasalidas o retenciones interiores se pueden desmoldar por mordazas o correderas interiores o con machos plegables o colapsibles.

En el caso de elementos o artículos roscados o con retenciones profundas, se pueden desmoldar con:

- Mordazas o patines.

- Machos intercambiables.
- Machos plegables o colapsibles.
- Machos roscados. Estos pueden ser con giro libre o desenrosque sincronizado.
- En algunos casos, dependiendo de las especificaciones de la rosca, esta se puede desmoldar de forma forzada.

Las contrasalidas en las que se base el funcionamiento, por ejemplo, de uniones de forma, pueden ser desmoldadas (forzadamente) sin utilizar correderas, mordazas, etc. Pero se ha de tener en cuenta que la temperatura de desmoldeo es muy superior a la temperatura ambiente, y que la rigidez del material es proporcionalmente baja. Ni la aplicación de las fuerzas de desmoldeo debe producir un alargamiento de la pieza ni el expulsor debe marcarla. Los alargamientos tolerados en los desmoldeos forzados dependen de la ejecución funcionalidad de las contrasalidas y de las propiedades mecánicas del plástico a temperatura de desmoldeo. No se puede generalizar la posibilidad de un desmoldeo forzado (para reducir costos). No obstante, el desmoldeo forzado debería plantearse de forma básica en el diseño del molde correspondiente.

Las superficies con texturizado se comportan por lo general como si fueran contrasalidas. Por lo tanto, requieren unos ángulos de desmoldeo que, en caso de no ser suficientes, pueden dañar ostensiblemente la superficie de la pieza. Para evitar tales daños se puede aplicar un valor orientativo: por cada 1/100 mm (0.01 mm \Leftrightarrow 20DVI) de profundidad del texturizado se requiere aproximadamente 1° de ángulo de desmoldeo (Unger, 2006, p.18).

En artículos plásticos las texturas se logran generalmente por electroerosión de las cavidades. Un sistema simple para determinar de antemano la rugosidad a ojo descubierto es la tabla de rugosidades DVI 3400 como la mostrada a continuación (ver Figura 354) y la medición se realiza por comparación visual entre la regla y la superficie mecanizada.



Figura 354. Fotografía de una regla de rugosidades. Elaboración propia.

También se muestra una tabla de equivalencias de rugosidad DVI contra la dimensión en micras, para determinar el ángulo que debe usarse para el buen desmoldeo de la pieza plástica. Ver Tabla 34.

Tabla 34.

Equivalencia de rugosidad DVI.

VDI 3400	Ra		class	VDI 3400	Ra		class
AGIE CHARMILLES	µm	µ inch	ISO 1302	AGIE CHARMILLES	µm	µ inch	ISO 1302
0	0.10	4.0	N3	23	1.40	56	N7
1	0.11	4.4		24	1.62	63	
2	0.12	4.8		25	1.80	72	
3	0.14	5.0		26	2.00	80	
4	0.16	6.4		27	2.20	88	
5	0.18	7.2	N4	28	2.50	100	N8
6	0.20	8.0		29	2.80	112	
7	0.22	8.8		30	3.20	125	
8	0.25	10.0		31	3.50	140	
9	0.28	11.2		32	4.00	160	
10	0.32	12.8	N5	33	4.50	180	N9
11	0.35	14.0		34	5.00	200	
12	0.40	16.0		35	5.60	224	
13	0.45	18.0		36	6.30	250	
14	0.50	20.0		37	7.00	280	
15	0.56	22.4	N6	38	8.00	320	N10
16	0.63	25.2		39	9.00	360	
17	0.70	28.0		40	10.00	400	
18	0.80	32.0		41	11.20	448	
19	0.90	36.0		42	12.60	500	
20	1.00	40.0		43	14.00	560	
21	1.12	44.8		44	16.00	640	
22	1.26	50.4		45	18.00	760	

([Inqianet](#), s.f.).

Otro factor a tener en cuenta, son los extractores o botadores, que no solo sirven para el desmoldeo de las piezas plásticas y la transferencia de calor, sino que también se necesitan para la ventilación o evacuación de los gases de la cavidad (ver [sección 5.3.5](#)). Una salida de aire defectuosa de la cavidad puede tener las siguientes consecuencias:

- Llenado parcial de la cavidad.
- Unión defectuosa de frentes flujo del material dentro de la cavidad.

- El denominado efecto Diésel, o sea, daños térmicos de la pieza (quemado).
- Costras o manchas en la cavidad.

Esto último debido a la adherencia de los gases a las superficies metálicas tanto de los canales de salidas de aire como de las cavidades que forman la superficie del artículo, su apariencia es de grasa dura adherida que taponan dichas salidas de aire y ensucian las superficies de las cavidades, cambiando la apariencia del artículo en la zona afectada en la cavidad. Esto provoca interrupciones mucho más frecuentes en la producción del molde, para realizar limpiezas que retiren las costras adheridas y despejen los canales de salida de aire. Los problemas de las salidas de los gases surgen sobre todo a mayor distancia de la colada, aunque la geometría de la pieza puede hacer que esto no siempre sea predecible.

6.2 Requerimientos Básicos para Cualquier Método de Expulsión.

La expulsión uniforme es fundamental para controlar la deformación de la pieza. Pines expulsores, manguitos, anillos, o las placas deben funcionar sin obstrucciones. Un sistema de expulsión guiado permite a los elementos expulsores y a los núcleos o machos que sostienen las piezas a desmoldar, alinearse con precisión y soportar también las placas de manera que los elementos que intervienen en la expulsión no se desgasten ni desalineen, esto previene la aparición de grano temprana entre estos.

Los sistemas de devolución temprana o devolvedores, a la posición inicial antes del desmoldeo, deben estar presentes como una característica de seguridad. Estos deben actuar en caso de que el sistema de expulsión de la máquina o cualquiera implementado en el molde no actué o se retraiga y así proteger los posibles choques de las piezas al cerrar el molde.

Un perno protector o sistema de seguridad debe estar provisto en todos los moldes donde los expulsores se encuentran entre paralelas o que tengan posibilidad de movimiento durante la manipulación y montaje del molde en la máquina inyectora. Este bloquea la placa de expulsión en su posición retraída para evitar las colisiones entre los componentes del sistema expulsor con otros componentes del molde, como correderas o hembras.

Para piezas flexibles o con bisagras, de paredes finas, piezas profundas o con cajas en contrasalida, y retenciones o agujeros en sentido diferentes al de expulsión son difíciles de liberar, siempre tendrán sistemas de expulsión especiales por considerar.

6.2.1 Características de expulsión.

El desmoldeo de piezas con contrasalidas requiere generalmente medidas técnicas constructivas en el molde, como, por ejemplo, una apertura del molde en varios niveles. Las aperturas adicionales se logran con correderas y mordazas. Los moldes con correderas pueden desmoldear contrasalidas exteriores con ayuda de:

- Columnas inclinadas.
- Correderas de curva.
- Accionamientos neumáticos o hidráulicos.

El desmoldeo de contrasalidas interiores se puede realizar con:

- Correderas inclinadas.
- Machos divididos, que son fijados o desbloqueados por el efecto cuña.
- Machos plegables, que en su estado destensado o de relajación elástica tienen medidas inferiores a las que poseen en estado abierto.

Si no es posible un desmoldeo de las roscas por medio de mordazas o correderas, o bien si la rebaba de partición molesta, se utilizan útiles de extracción por tornillo. Se aplican:

- Machos de recambio, que son extraídos del molde.
- machos o casquillos roscados que, por medio de rotación durante el proceso de desmoldeo, dejan libres las roscas en la pieza inyectada. Su accionamiento se realiza por el movimiento de apertura del molde (husillos de rosca, cremalleras) o por medio de unidades de desenroscado especiales.

El desmoldeo de contrasalidas para pequeñas series también puede realizarse por el sistema de «machos perdidos». En caso de roscas de fijación es a menudo más económico no desmoldear roscas, sino inyectar la pieza con el agujero y utilizar tornillos de autorroscado.

La técnica de machos perdidos se utiliza para la fabricación de piezas con interiores o contrasalidas no desmoldeables. Aquí se usan aleaciones de reutilización con un punto muy bajo de fusión basadas en cinc, plomo, bismuto, cadmio, indio y antimonio, que, según su composición, se funden a temperaturas muy diferentes (el punto de fusión más bajo es, aproximadamente, 50 °C). Mediante aplicación de calor (por ejemplo, calentamiento por

inducción), el macho metálico se puede extraer de la pieza inyectada con muy pocos restos de impurezas y residuos de la inyección (Unger, 2006, p.18).

6.2.2 Longitud del expulsor de la máquina.

El sistema de expulsión de la máquina consiste en un vástago del lado de expulsión, conectado a la unidad de inyección y proporciona una fuerza determinada y una longitud de recorrido disponible para usar en el molde.

Con la fuerza podemos determinar si la máquina es capaz, por si sola, de vencer la fuerza que ejerce la pieza a ser expulsada. Esto limita la cantidad de cavidades que se puede tener el molde en proporción a dicha fuerza o en caso de tener un número determinado de cavidades como requerimiento, hacer uso de sistemas adicionales que proporcionen la fuerza de expulsión requerida, tales como cilindros hidráulicos o neumáticos, jaladores o limitadores de recorrido que aprovechen el movimiento de la apertura de la máquina para mover las placas de expulsión del molde.

La longitud nos da la información necesaria para determinar si se dispone del recorrido necesario del sistema de expulsión, para expulsar por completo el artículo o si se necesitan de elementos adicionales para lograr la expulsión completa de este. En algunos casos es necesario realizar la expulsión por etapas y en muchas de las máquinas puede dividirse este recorrido para lograr esto. Ver Figura 355 para ver un parcial de una ficha técnica de una máquina de inyección.

6.2.3 Tipos comunes de vástagos de expulsión en moldes

Aunque pueden implementarse variados sistemas de acople con el expulsor de la máquina en términos generales son dos los más usados. Uno de los sistemas es usar vástago central de expulsión y el otro un puente de expulsión que consta de dos o más vástagos laterales y un puente que los une y en el cual iría el conector para unirlo al vástago de la máquina inyectora.

En ambos casos se acoplan los vástagos del molde a la placa expulsora de este, que es la encargada de extraer los artículos de los núcleos o machos del molde mediante bujes, pines extractores, o aquellos elementos encargados de dicha función.

Comúnmente el conector debe unir el expulsor de la máquina que tiene una rosca M16 (o según el fabricante) y el vástago del molde que dependiendo del tamaño del molde puede ser

rosclas M12 o M16. Es recomendable que en lo posible los vástagos de expulsión de los moldes tengan bujes para evitar roces con las placas y posibilidades de granos entre las piezas.

Technical data			370 A	
Clamping unit			370 A	
with clamping force	max. kN		500	600
Opening force stroke	max. kN mm		--- 300	
Mould height, fixed variable	min.-max. mm		--- 200-400	
Platen daylight fixed variable	max. mm		--- 500-700	
Distance between tie bars (w x h)	mm		370 x 370	
Mould mounting platens (w x h)	max. mm		510 x 510	
Weight of movable mould half	max. kg		360	
Ejector force stroke	max. kN mm		25 100	
Dry cycle time EUROMAP 2	min. s - mm		1,0-259	0,8 - 259

Figura 355. Ficha parcial de una máquina de inyección 370ª. (Arburg, s.f.).

6.2.3.1 Vástago central.

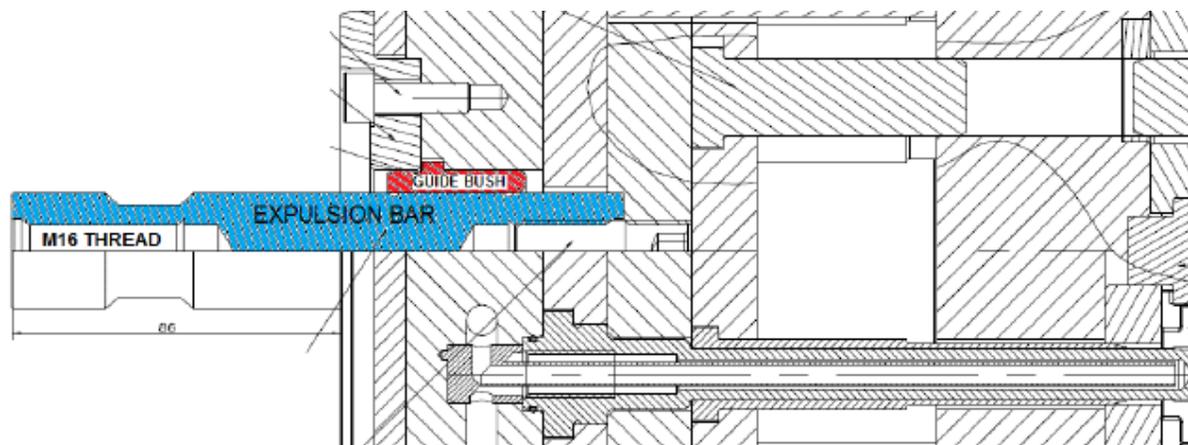


Figura 356. Eexpulsión mediante vástago central. Elaboración propia.

Este es el más común y su único requisito es que exista buena alineación de la máquina y que la fuerza de expulsión, este uniformemente distribuida alrededor del centro del molde. Ver Figura 356. En el siguiente enlace puede verse un [video funcional](#) de Progressive Components (2019) proveedor de estándares.

6.2.3.2 Puente de expulsión.

En general es suficiente con tener dos vástagos de expulsión estos pueden estar dispuestos de manera vertical u horizontal. Pero es más recomendable la primera. Además, debe tenerse cuidado con la dimensión mayor del puente (diagonal del rectángulo) pues este debe pasar por el agujero que tiene la placa trasera de la máquina, de manera estándar se tienen agujeros de $\varnothing 125$ mm para el paso del puente de expulsión. Ver Figura 357.

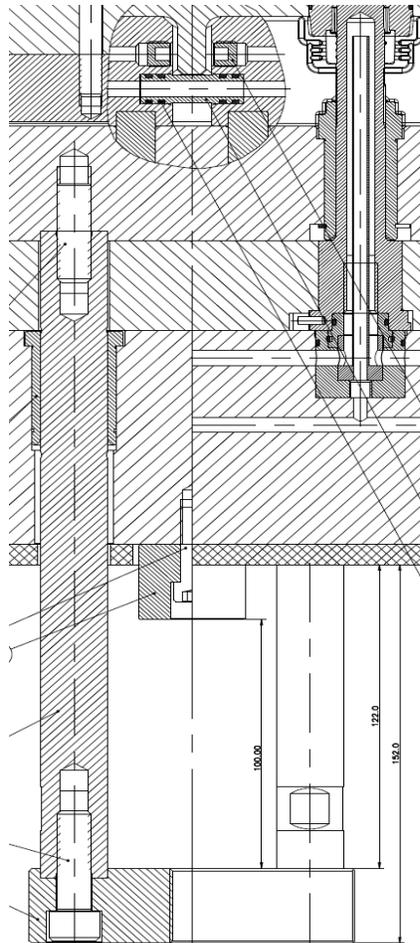


Figura 357. Expulsión mediante puente expulsor de vástago doble. Elaboración propia.

6.3 Tipos comunes de Sistemas de Expulsión y Desmoldeo de Artículos

6.3.1 Sistema de expulsión por pin o expulsor

El sistema de expulsión por pin es el más común porque es generalmente el más sencillo de incorporar al diseño del molde. El artículo plástico es expulsado por la aplicación de una fuerza mediante una varilla circular de acero llamada **pin o expulsor**. En la Figura 358 se muestra el principio de operación.

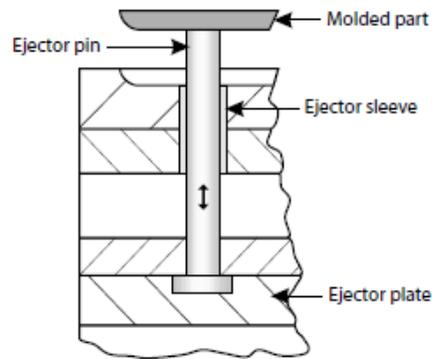


Figura 358. Sistema de expulsión por pin. (Campo, 2006, p.612).

El expulsor está en la parte móvil del molde y es devuelto a su posición por los pines de retorno, en operación el ensamble de la placa de expulsión se mueve relativo a la placa de cavidad mediante el expulsor de la máquina o mediante un movimiento obtenido de un sistema alterno del molde, posiblemente aprovechando el movimiento de apertura de la máquina, lo que genera la expulsión del artículo (Campo, 2006, p.612).

6.3.2 Sistema de expulsión por cuchillas.

El propósito principal de este sistema es expulsar piezas muy delgadas como refuerzos que no pueden expulsarse eficazmente con el sistema por pin. Una cuchilla es básicamente un pin rectangular usualmente insertado en un pin circular para fácil reemplazo en caso de dañarse. Ver Figura 359.

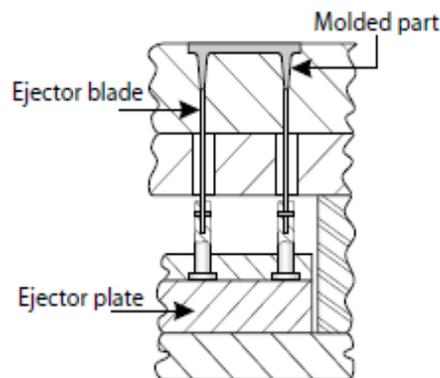


Figura 359. Sistema de expulsión por cuchillas. (Campo, 2006, p.613).

6.3.3 Sistema de expulsión por válvula mecánica

Este método de expulsión es básicamente un sistema de expulsión por pin con un diámetro mayor, se usa en artículos plásticos relativamente grandes donde el uso de pines sería ineficiente.

La válvula de expulsión mecánica aplica la fuerza en la superficie del artículo como muestra la Figura 360, debido a la elevada superficie de contacto de la válvula se reduce la posibilidad de deformar la parte plástica. Cabe anotar que esto seguramente sacrifica la posibilidad de refrigeración interna en el macho (Campo, 2006, p.613).

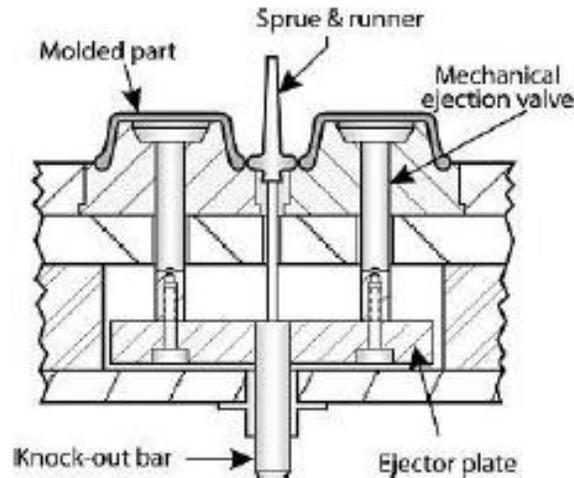


Figura 360. Sistema de expulsión por válvula mecánica. (Campo, 2006, p.613).

6.3.4 Sistema de expulsión por aire.

En este método la fuerza de expulsión es suministrada por aire comprimido, el cuál ingresa a la parte plástica por válvulas de aire. Su eficiencia depende de la presión del aire comprimido y del área sobre la cual actúa, sin embargo, cuando el aire encuentra rutas de escape la fuerza disminuye por lo que este sistema es recomendado usarlo en componentes que son huecos donde las paredes de la cavidad actúan como sello evitando que la fuerza disminuya. Ver Figura 361 (Campo, 2006, p.614).

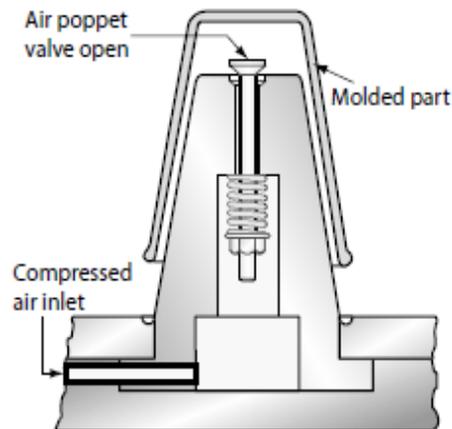


Figura 361. Expulsión por aire comprimido. (Campo, 2006, p.614).

6.3.5 Sistema de expulsión por placa.

En piezas muy profundas, de espesor delgado y huecas que contraen uniformemente en los machos no es recomendado usar expulsión por pines porque probablemente perforen el fondo del contenedor. Estos casos requieren expulsión por placa, la cual cubre toda el área del anillo de la parte plástica y la separa del macho como se muestra en la Figura 362.

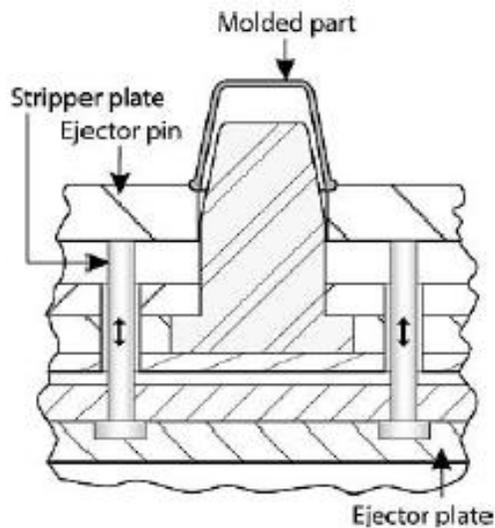


Figura 362. Expulsión por placa. (Campo, 2006, p.615).

El principio de funcionamiento es similar en estos sistemas de expulsión pues se trata de un molde con expulsión por placa dentro de paralelas, como el mostrado en la Figura 362 (Campo, 2006, p.614).

6.4 Expulsión en Dos o Más Etapas

Algunos artículos plásticos que tienen geometrías internas como enganches no es posible expulsarlos en un solo recorrido sin deformarlos o barrer el enganche o la retención interna, es en estos casos cuando el uso de expulsión de dos etapas se hace necesario.

En la Figura 363, se observa como el artículo tiene un enganche interno, si se intentara expulsar en un solo recorrido el enganche interno de la pieza intentaría deformarse y al estar todavía en la cavidad no lograría salir. Para expulsarlo adecuadamente primero en la fase 1 se separa la placa que forma el fondo del artículo y posiblemente se revienta el punto de inyección. En la fase 2 se extrae el artículo de la cavidad moviendo hacia adelante las placas expulsoras juntas, hasta el tope que existe en las paralelas, este tope frena la placa expulsora trasera. Posteriormente en la fase 3 la placa expulsora delantera, continúa su recorrido para

expulsar el artículo, este es expulsado sin problema ya que la parte externa de la tapa está libre para deformarse y permitir que el enganche salga y liberarse del macho.

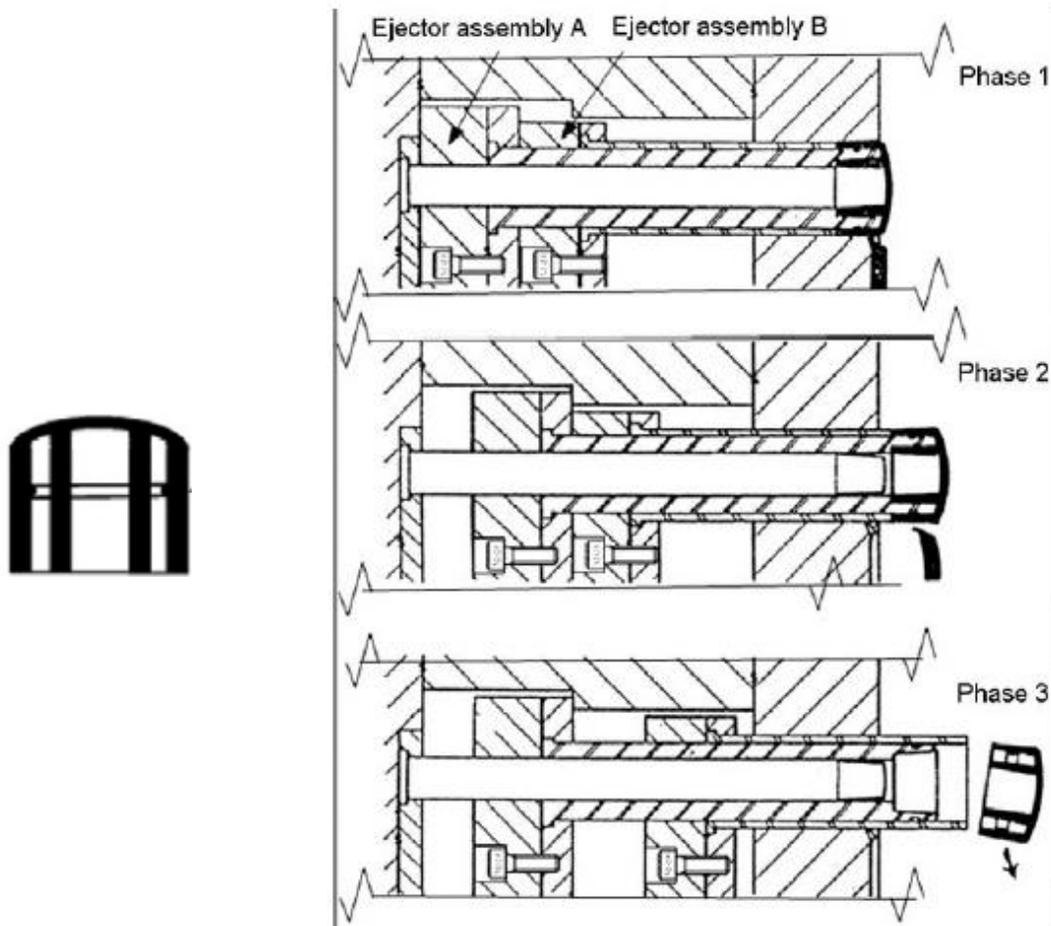


Figura 363. Doble etapa de expulsión hacia adelante.

Estas expulsiones en dos etapas son muy comunes en el diseño de moldes pues muchos artículos presentan este tipo de retenciones internas, que tienen como función hacer enganches para tracción entre elementos, e incluso, dependiendo de la profundidad y la flexibilidad del material, pueden ser desmoldadas roscas. Se denominan “*expulsiones por desmoldeo forzado*”.

Existen comercialmente múltiples sistemas de expulsión por etapas y trabajan de diferentes formas. A continuación, se mostrarán dos de ellos de diferentes tipos y proveedores. Posiblemente por costos no sea viable implementarlos en proyectos de bajo presupuesto, pero son puntos de referencia para desarrollar soluciones para los proyectos que se van a abordar.

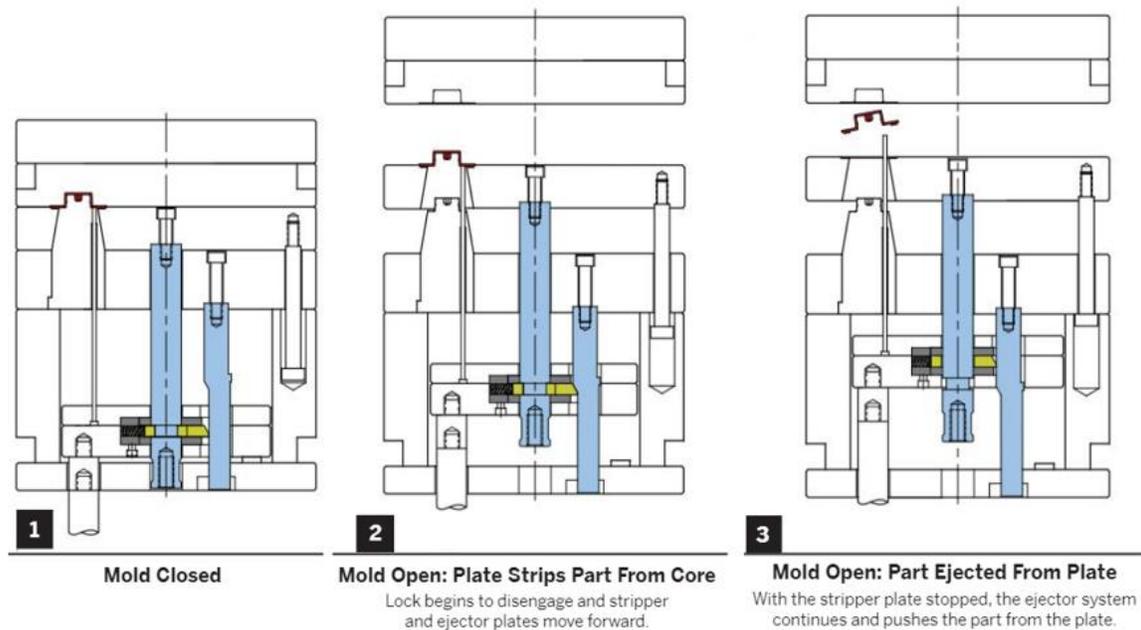


Figura 364. Doble etapa de expulsión por barras. Hacia adelante juntas - freno delantera - sigue trasera. ([Progressive Components International Corporation](#), 2018, pp.215-216).

En el sistema de doble etapa mostrado en la Figura 364, este funciona mediante un mecanismo de barras. Inicialmente se tiene el molde cerrado, en la etapa siguiente (2) primero se separa la placa porta fondo, luego actúa el expulsor de la máquina moviendo hacia adelante la placa de bujes expulsores y las placas de expulsoras entre las paralelas simultáneamente, hasta que el desactivador (en amarillo) se mueve, liberando el vástago central para que se libere el movimiento independiente de las placas. El limitador entre la placa del buje expulsor frena el movimiento de esta. En la última etapa las placas expulsoras entre paralelas continúan su recorrido expulsando el artículo mediante los pines empujadores. ([Ver video](#) Progressive Components, 2019).

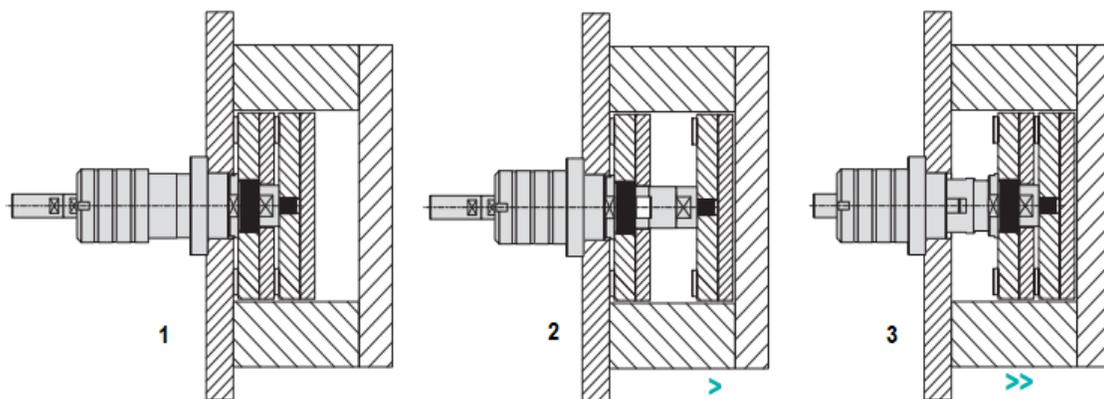


Figura 365. Doble etapa de expulsión por barras. Hacia adelante delantera - freno delantera - sigue trasera. ([Meusburger Georg GmbH & Co KG](#), s.f.)

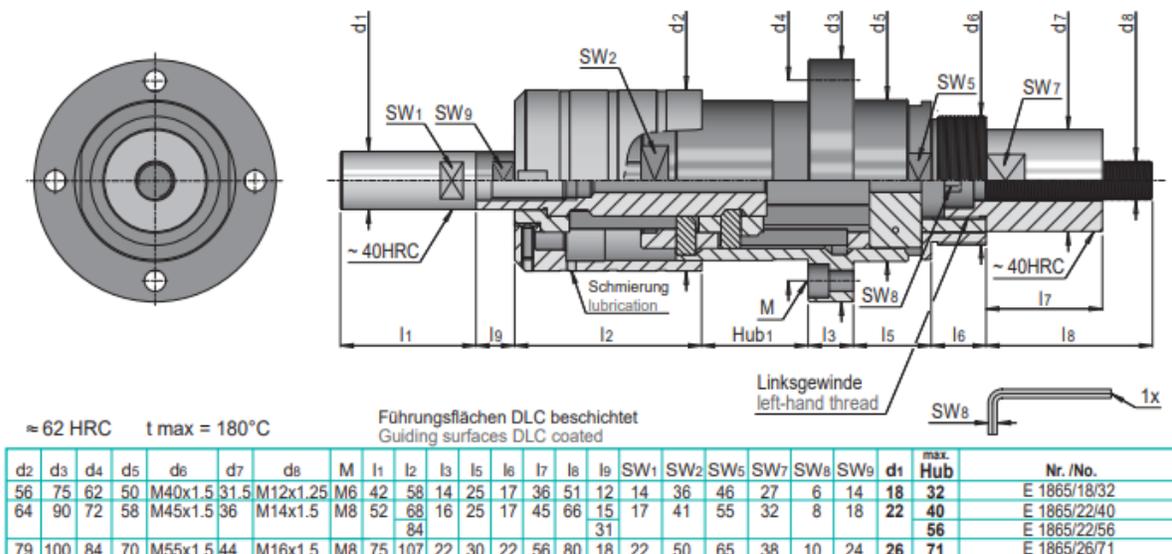


Figura 365. Doble etapa de expulsión por barras. Hacia adelante delantera - freno delantera - sigue trasera. (Continuación). (Meusburger Georg GmbH & Co KG, s.f.).

En la Figura 365 se muestra otro sistema de doble expulsión, pero esta vez su secuencia de movimiento es diferente. Primero avanza la placa expulsora delantera hasta que llega a su tope natural o limitado. En la siguiente etapa, con la placa delantera bloqueada sigue avanzando la placa expulsora trasera, suministrando en movimiento requerido.

6.5 Sistemas de Desenrosque para el Desmoldeo de Artículos

Cuando el artículo plástico tiene roscas externas o internas, el sistema de desenrosque o machos rotantes en el molde es usado, para poder usar estos machos rotantes se deben usar diferentes sistemas que coordinen la expulsión y rotación del macho con el ciclo de apertura del molde.

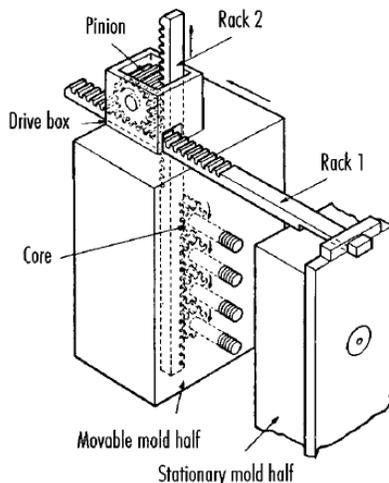


Figura 366. Esquema de molde de desenrosque. (Menges & Mohren, 2001, p. 453).

El sistema más común y tradicional es el “*mecanismo de desenrosque sincronizado*” el cual consiste en un sistema de cremalleras actuadas por el movimiento de apertura de la máquina o por un cilindro hidráulico, el cual acciona el macho roscado que también tiene tallado un piñón, dicho macho está montado en rodamientos que le proporcionan alineación y reducción de la fricción. Ver Figura 366 y Figura 367.

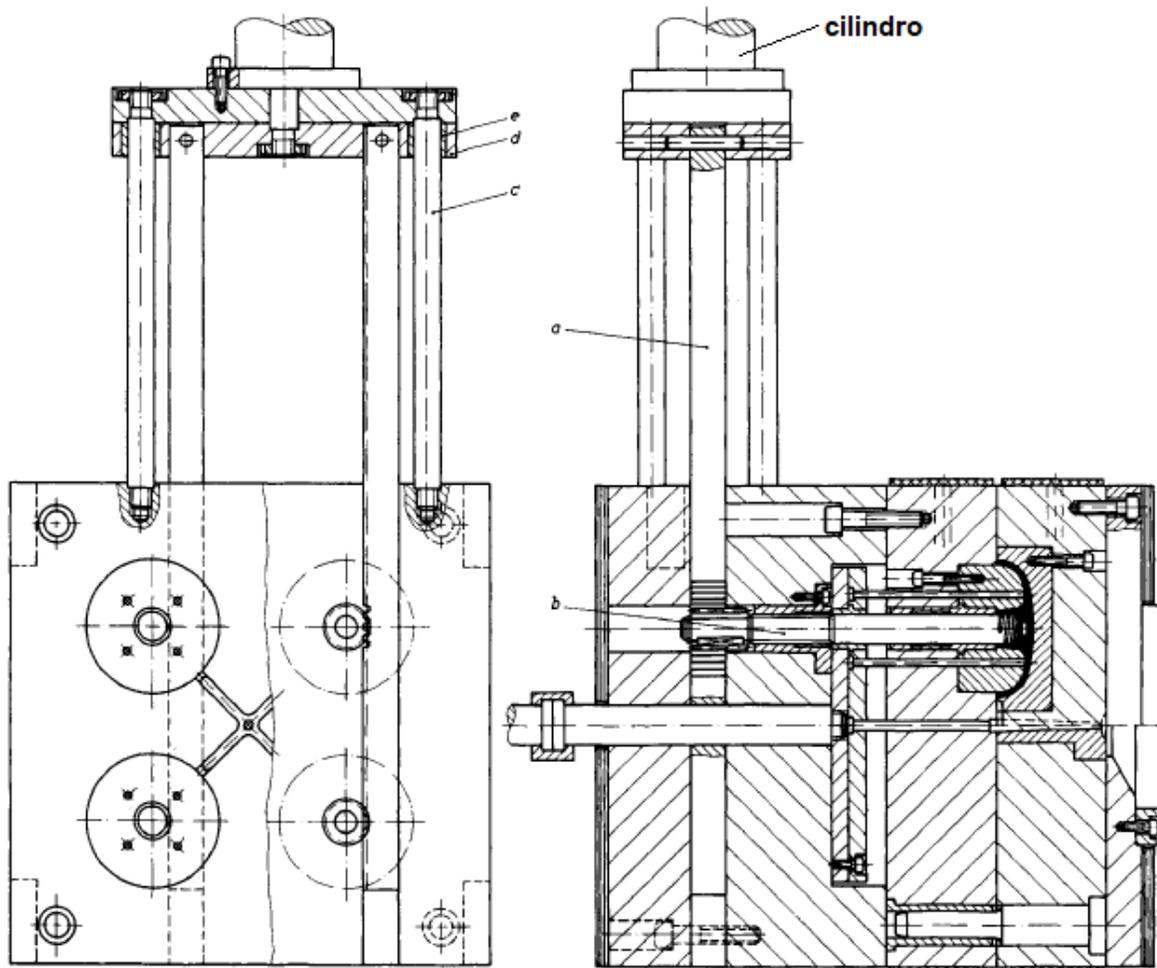


Figura 367. Esquema de molde de desenrosque con cilindro hidráulico. (Menges & Mohren, 2001, p. 454).

Cuando se necesita control del inicio de rosca debe usarse una tuerca en el macho, con un sistema dentado que dependiendo del número de dientes dará un rango de control de altura del macho, para así controlar el inicio de rosca. Ver Figura 368.

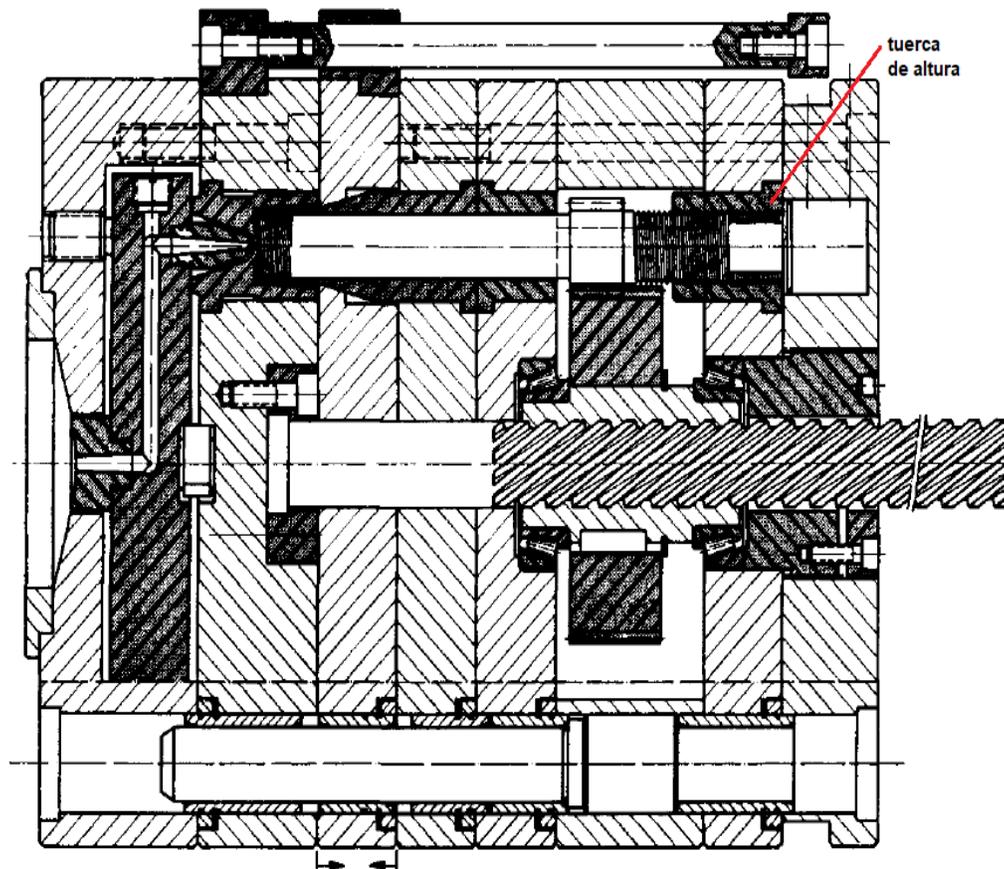


Figura 368. Esquema de molde de desenrosque con tuerca de control de altura. (Menges & Mohren, 2001, p. 457).

Los moldes con sistema para desenrosque están entre los moldes más complejos, exigen una gran capacidad de diseño y de mantenimiento.

El movimiento de rotación puede darse de múltiples formas, el de piñón cremallera es muy útil para cavidades pequeñas y de pocas vueltas de rosca. Pero en el caso de desenrosque largos la cremallera deja de ser útil pues la longitud que se requeriría para el desenrosque podría sobrepasar las dimensiones de la máquina. Es por esta razón que en dichos casos puede contemplarse la posibilidad de usar motores con sistemas de piñones planetarios. Un que esto hace complejo el molde es útil para solucionar roscas de múltiples vueltas, pasos grandes o varias entradas. ([Ver video](#) Motivavence, 2012).

Los proveedores de estándares ofrecen muchos elementos comerciales para este sistema, pero la mejor forma de implementar estos es considerar las posibles soluciones y aplicar el ingenio para adaptarlos y combinarlos de manera que se soluciones el proyecto de la mejor manera (Figura 369).

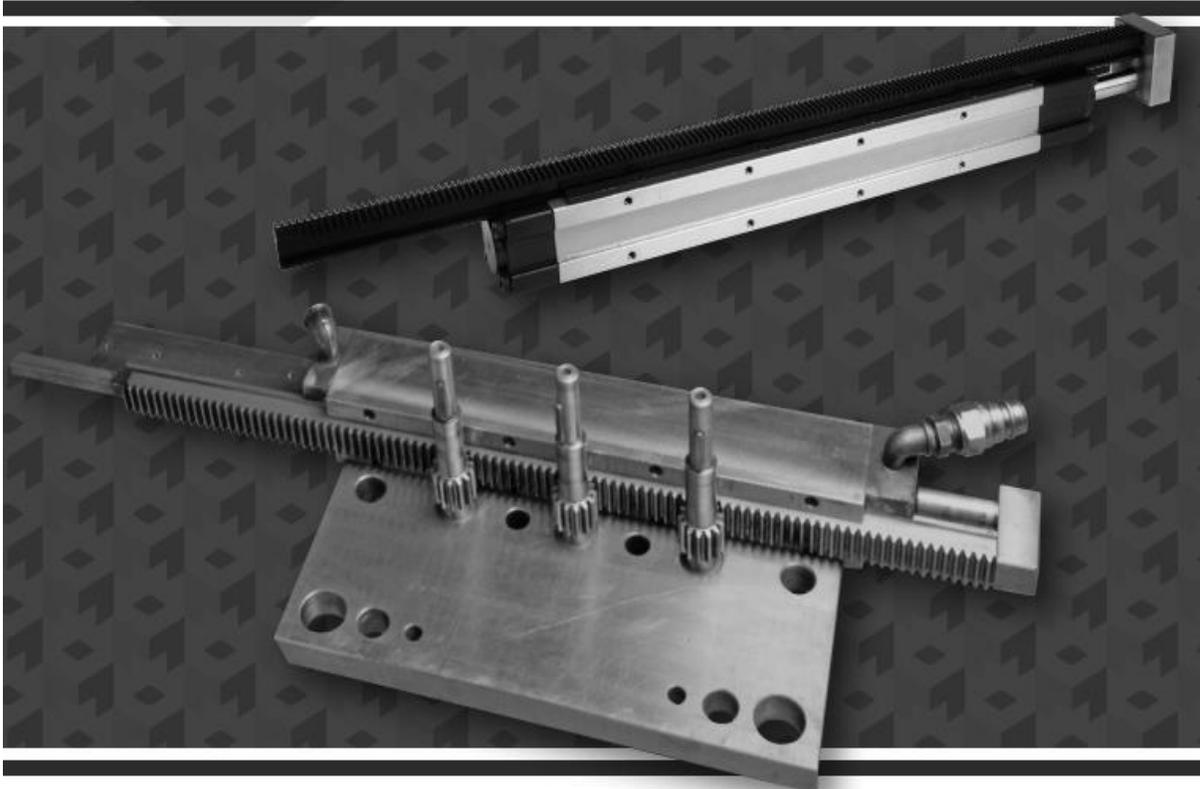


Figura 369. Elementos comerciales para sistemas típicos de desenrosque. Cremallera adaptada a pistón hidráulico y en posición de trabajo con los machos roscados. (Milacron, 2019).

6.6 Desmoldeo de Artículos Mediante Núcleos (Machos) Colapsibles o Expandibles

Otra opción para desmoldear artículos con geometría internas complicadas son los machos colapsibles los cuales se retraen o expanden en dirección radial para permitir la expulsión de la parte plástica. Aunque pueden ser de diferentes formas a la circular y colapsarse o expandirse en diferentes direcciones dependiendo de las características de las piezas.

6.6.1 Machos colapsibles radiales.

Una alternativa a los sistemas de desenrosque son los machos colapsibles, los cuales permiten contraer la geometría interna del artículo que limita la expulsión, así, se libera la pieza lo que permite expulsarla.

Los moldes con machos colapsibles eliminan engranajes complejos resultando en un molde más simple y pequeño como se muestra en la Figura 370. Otra de las ventajas que presentan estos tipos de expulsión es que reducen el tiempo del ciclo, además, los proveedores de machos colapsibles usualmente incorporan un diseño para mantenimiento patentado en sus

machos lo que permite la limpieza de este macho mientras el molde está en la máquina inyectora, ahorrando así tiempo de traslado y desensamble del molde. ([Ver video](#) Kaizer Fotografie, 2016).

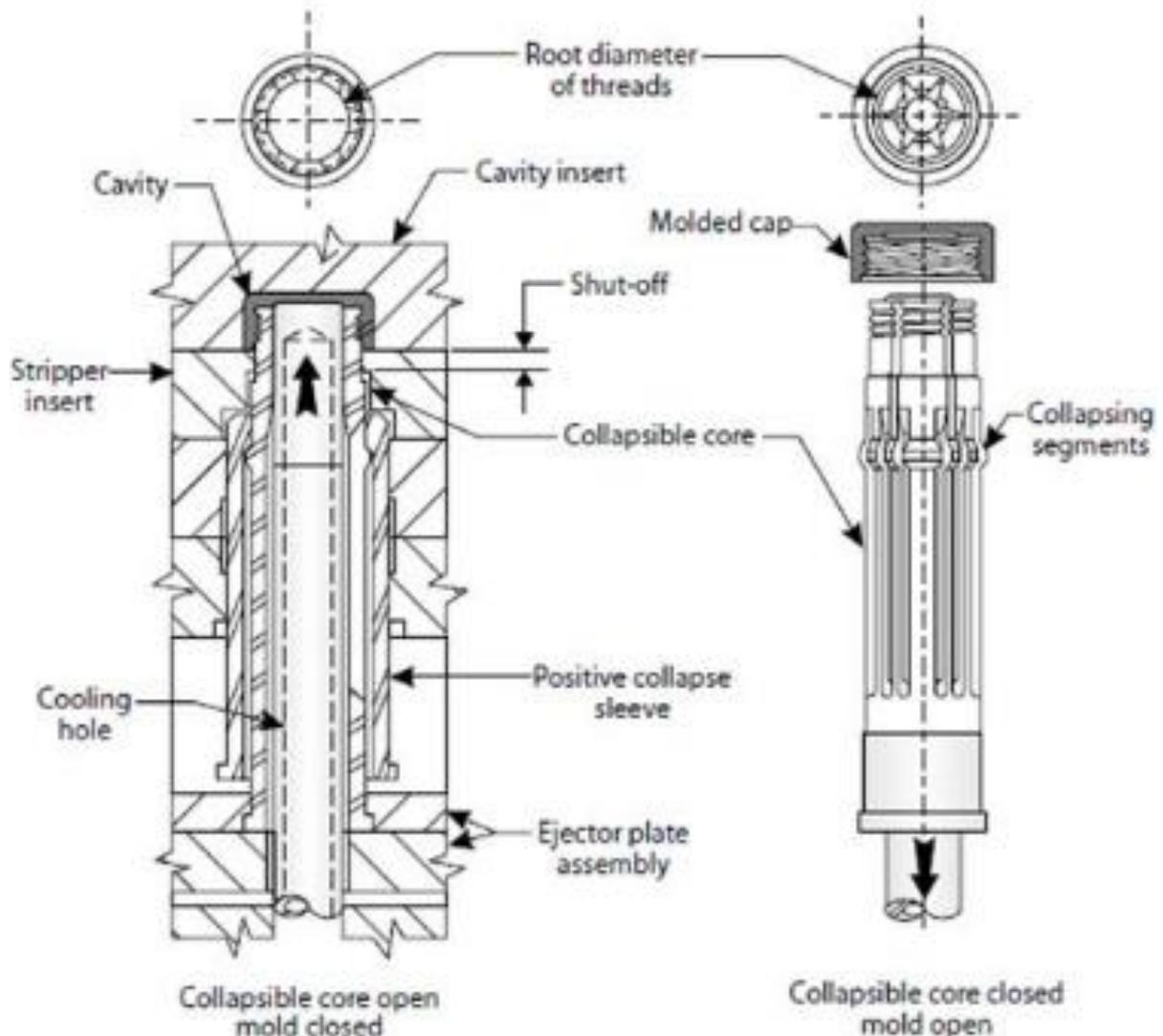


Figura 370. Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna.

En la Figura 371. Se muestra el funcionamiento habitual de un macho colapsible, el recorrido de expulsión se puede dividir en 2 etapas, la primera etapa es el recorrido para que el macho se colapse y así libere la geometría interna del artículo y posteriormente en la segunda etapa se realiza la expulsión de la pieza. ([Ver video 1](#) y [Ver video 2](#) Progressive Components, 2019).

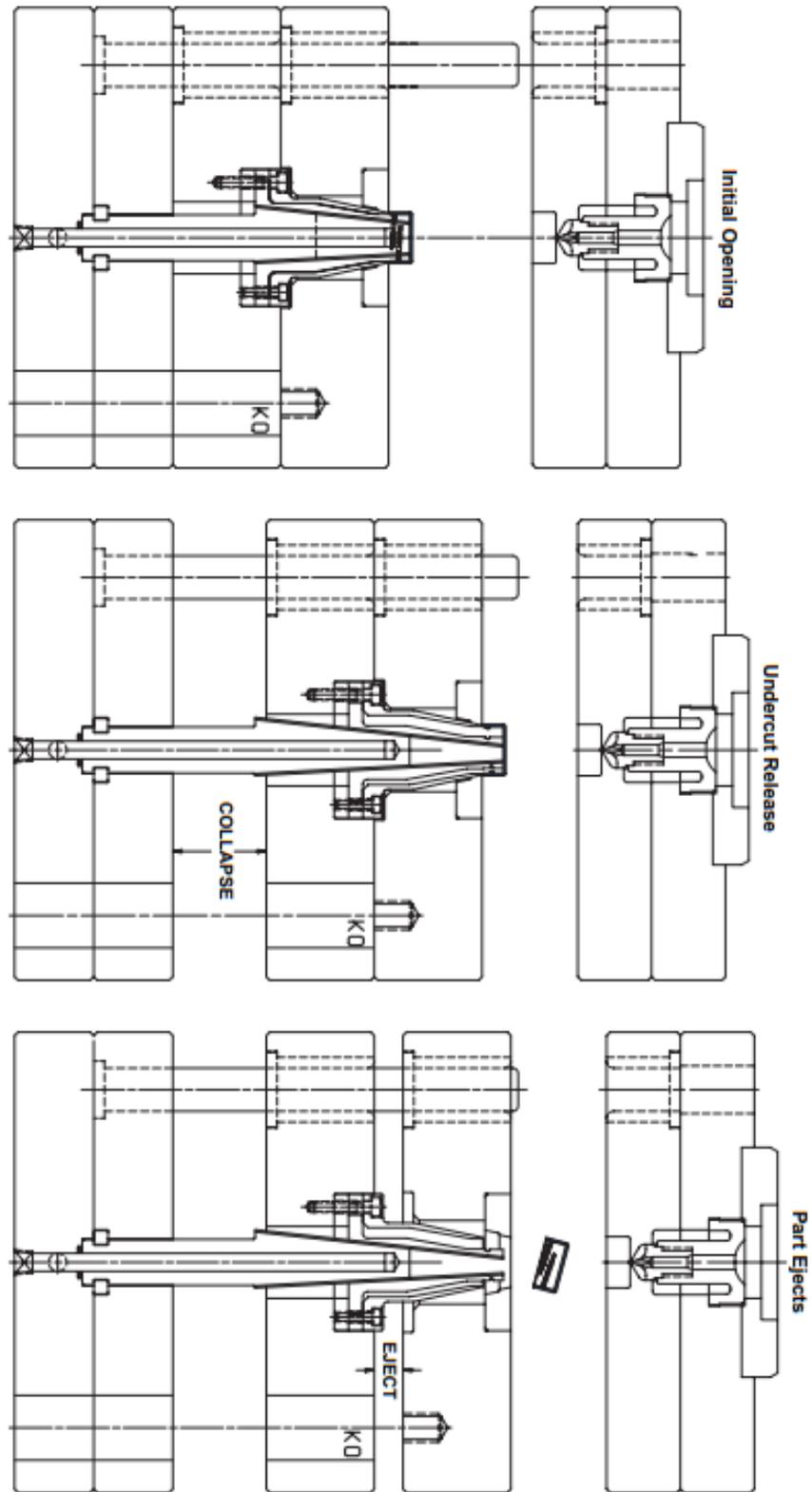


Figura 371. Esquema de funcionamiento usual de un macho colapsible para una rosca interna y su relación con las aperturas de molde. ([Progressive Components International Corporation](#), 2018, p.195/-

Los componentes principales de un macho colapsible se presentan en la Figura 372, el segmento colapsible está diseñado para colapsar mecánicamente cuando el pin central del macho es retirado; es decir, cuando comienza la segunda etapa de expulsión y ya se ha completada la etapa de colapso. El pin central del macho es el encargado de llevar el segmento colapsible a su posición de inyección una vez comienza el cierre del molde, el último elemento principal es la brida la cual se encarga de proporcionar guía al macho y bloquearla para evitar movimientos angulares no deseados. ([Ver video](#) Progressive Components, 2019).

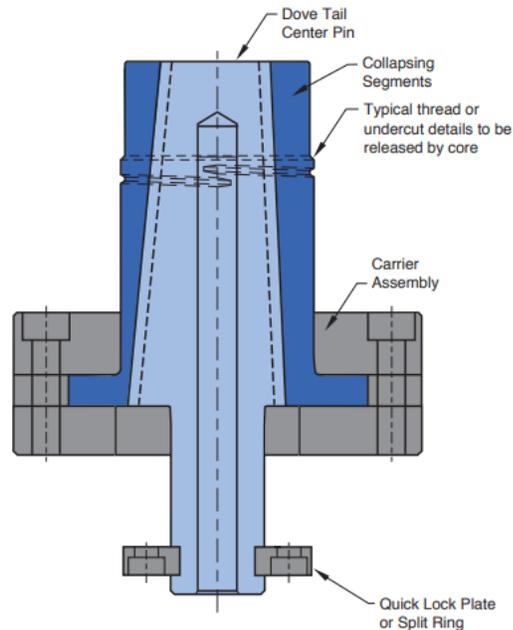


Figura 372. Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. ([Progressive Components International Corporation.](#), 2018, p. 200/I-6).]

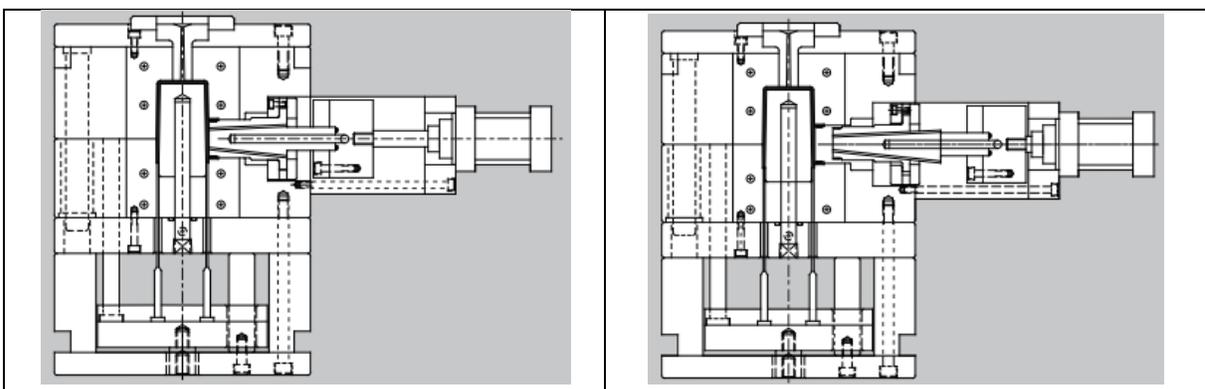


Figura 373. Esquema de desmoldeo de una rosca externa lateral. ([Progressive Components International Corporation.](#), 2018, p.202/I-8).

Aplicaciones comunes de los machos colapsibles se presentan en las siguientes figuras donde se observa una rosca externa lateral en la Figura 373, una rosca interna central en la

Figura 374 y un anillo de sellado Figura 375. En todos estos ejemplos se usa el mismo concepto, un recorrido de expulsión dividido en 2 etapas, etapa de colapso y etapa de expulsión de pieza.

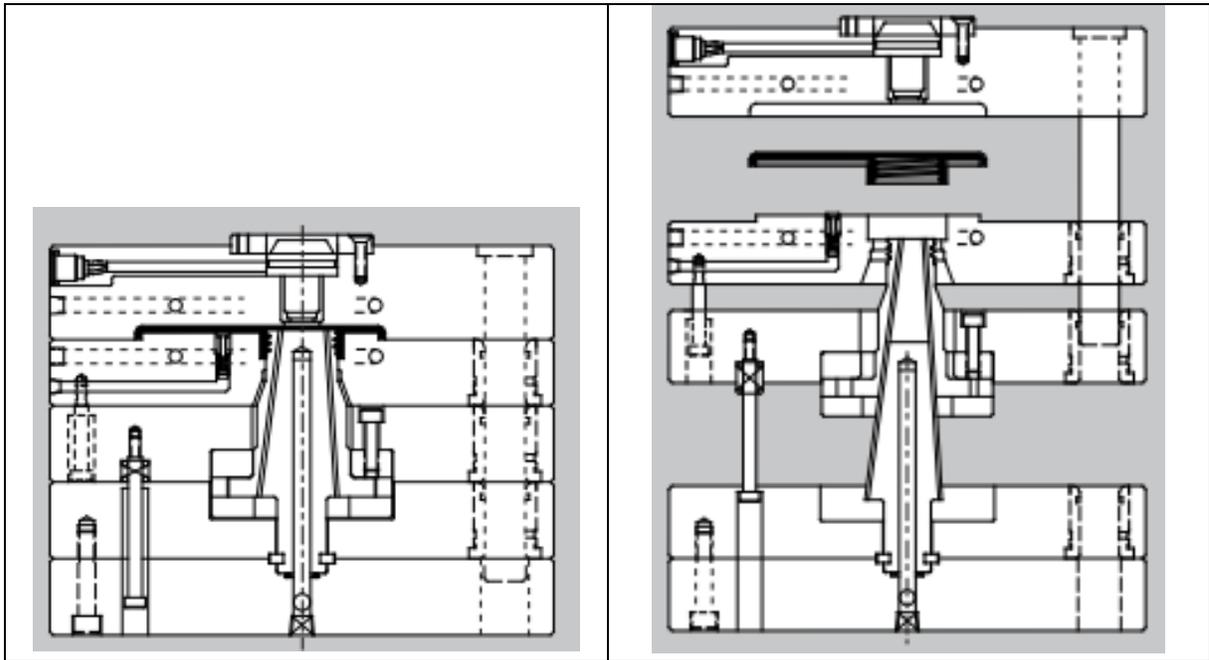


Figura 374. Esquema de desmoldeo de una rosca interna central. ([Progressive Components International Corporation.](#), 2018, p.202/l-8).

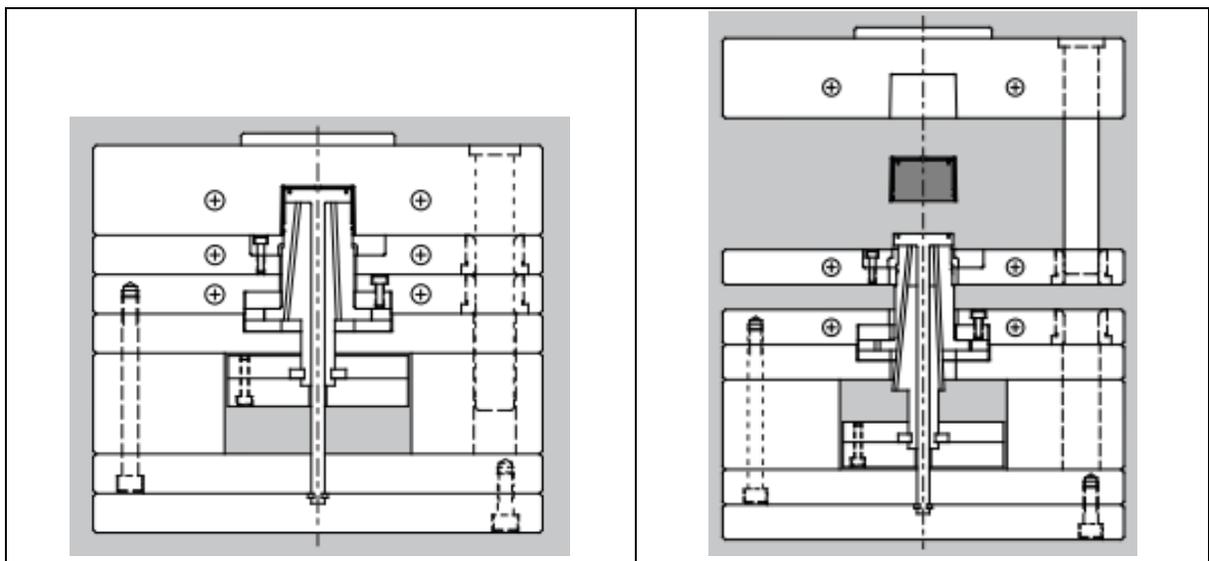


Figura 375. Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. ([Progressive Components International Corporation.](#), 2018, p.202/l-8).

6.6.2 Machos colapsibles axiales.

Existen otro tipo de machos colapsibles que no tienen brida para amarrar la sección que se colapsa y, además, se colapsan en sentido paralelo a la dirección de expulsión, sus partes principales se presentan en la Figura 376. El macho colapsible está diseñado para colapsar una vez el pin central es retirado, además, cuenta con un buje de seguridad diseñado para funcionar cuando el macho colapsible falle, es decir, en operación normal este buje no trabaja. Al igual que en el primer caso, el pin central es el encargado de llevar el macho colapsible a la posición de inyección. (Ver video Progressive Components, 2019).

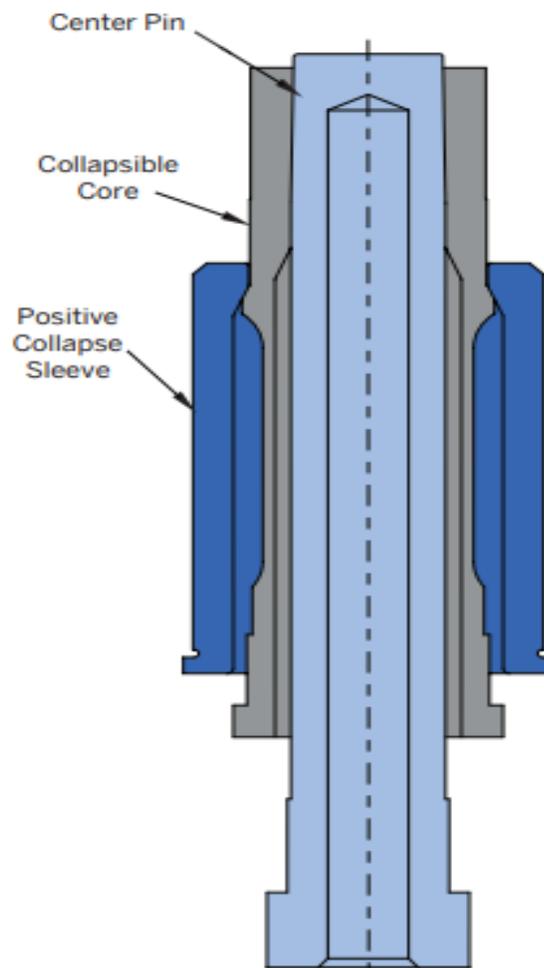


Figura 376. Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. ([Progressive Components International Corporation](#), 2018, p.205/I-11)

En la Figura 377, se presenta un ejemplo de este tipo de expulsión, en la Figura 378 se presenta la etapa de colapso en la cual el macho se desplaza liberando la geometría interna del artículo y permitiendo la expulsión por placa como se muestra en la Figura 379.

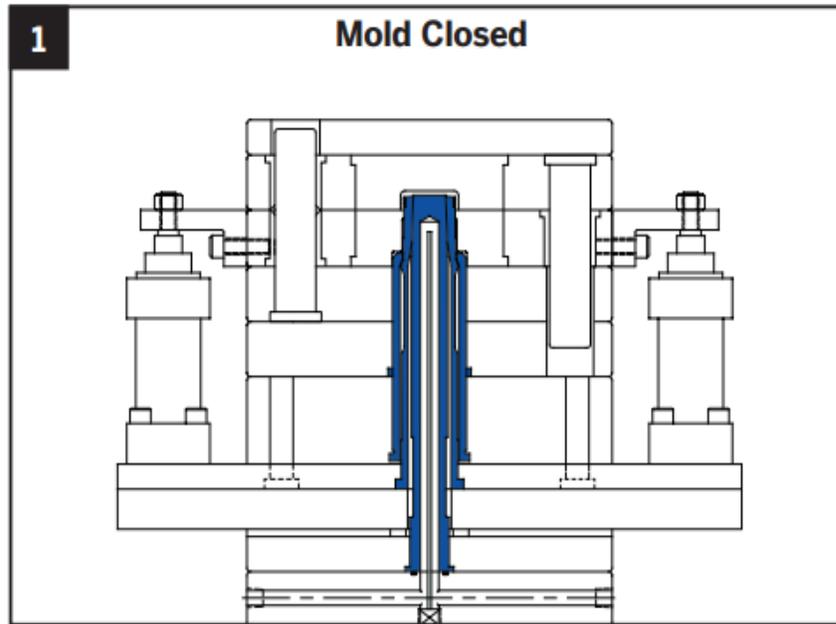


Figura 377. Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. Molde cerrado.
 ([Progressive Components International Corporation.](#), 2018, p.203/1-9).]

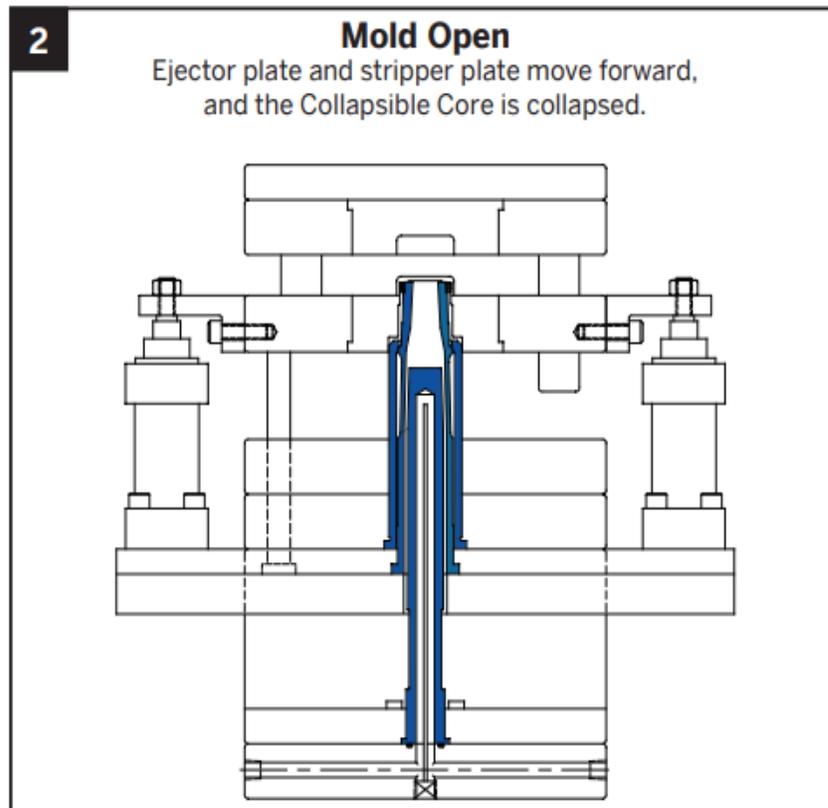


Figura 378. Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. Macho colapsado.
 ([Progressive Components International Corporation.](#), 2018, p.203/1-9).

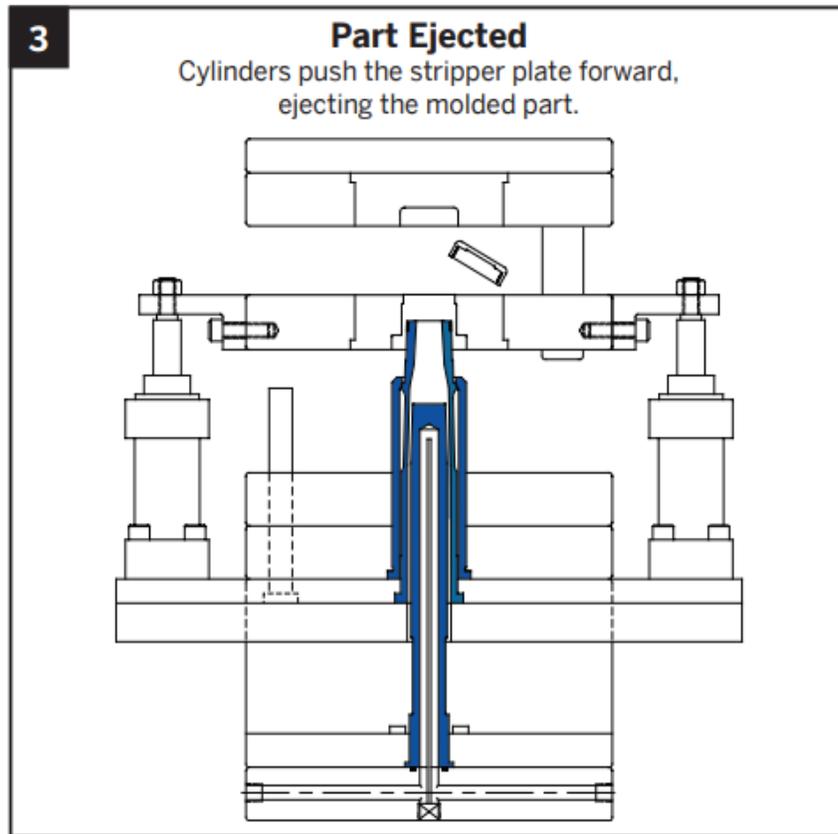


Figura 379. Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. ([Progressive Components International Corporation.](#), 2018, p.203/l-9).

6.6.3 Cavidades expandibles.

Es un método de expulsión para desmoldear geometrías como roscas y sacados en artículos plásticos sin necesidad de usar correderas y patines en el molde, eliminando así altos costos de mantenimiento y reduciendo el tamaño del molde.

Este tipo de expulsión tiene un recorrido mínimo de expulsión en el cual el macho libera la geometría y expulsa como se muestra en la Figura 380. Generalmente vienen fabricados en aceros duros y se recomienda que se desplacen contra aceros templados para evitar desgaste temprano, además, pueden trabajar sin lubricación. ([Ver video](#) Progressive Components, 2019).

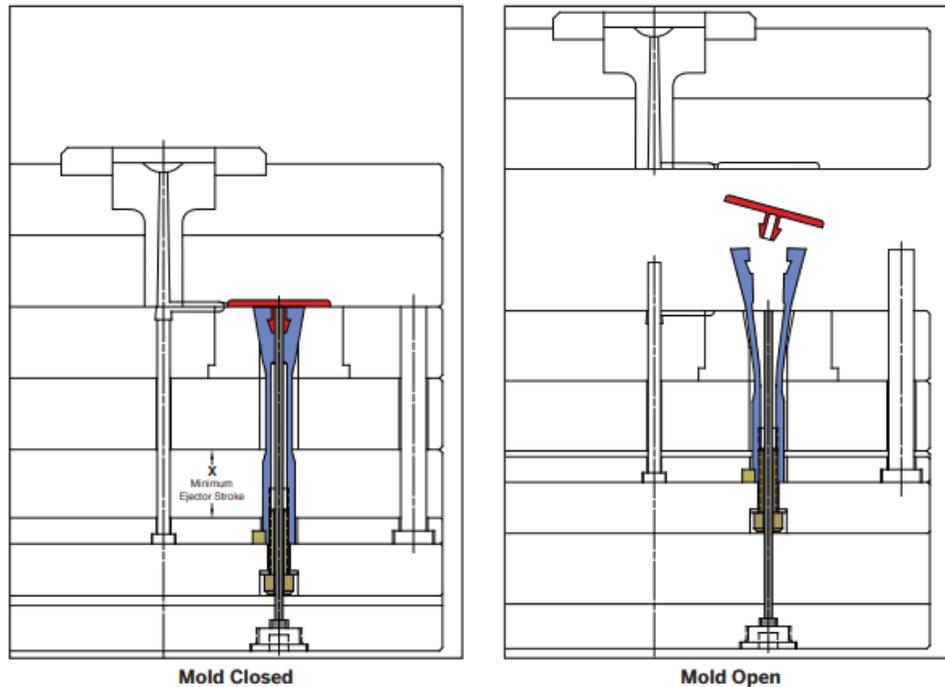


Figura 380. Esquema de funcionamiento de macho expandible para enganche interno. ([Progressive Components International Corporation.](#), 2018, p.206/I-12 – 207/I-208).

Este sistema es muy interesante, aunque costoso, pero reduce muchos los espacios requeridos en el molde para implementar sistemas de expulsión en enganches pequeños y de difícil acceso. Si el costo beneficio es grande debe analizarse y evaluarse este tipo de sistemas.

6.7 Sistemas de Apertura del Molde

Una de las principales funciones del sistema de expulsión, es proporcionar una secuencia de apertura del molde que sea acorde a las necesidades de extracción del artículo sin causar daños ni en el molde ni en la pieza moldeada. Para esto se requieren dos elementos básicos, jaladores o “Klinkens” y limitadores de recorrido que pueden ser internos o externos. Además, podemos requerir de algunos adicionales para realizar ciertas funciones específicas algunos alternativos para secuenciar el molde, como anclajes de rodillo, bujes de fricción, posicionadores de bola, bujes de fricción, trinquetes, etc.

6.7.1 Jaladores o “klinkens” de apertura.

Este dispositivo primero bloquea la placa flotante con un pestillo. Una vez que la carrera de apertura ha avanzado una cierta distancia, la barra de liberación se desbloquea y el molde se abre en la línea de separación 2. La Figura 381 muestra el procedimiento de apertura de un

molde con un cierre. La figura A es la posición cerrada. El pestillo a bloquea la placa flotante g. El pestillo puede girar alrededor del tornillo d. Se mantiene en posición horizontal mediante el resorte e y el tope f, siempre que el molde esté cerrado. Durante la apertura del molde, la barra de liberación b levanta el perno c (Figura B) y libera el pestillo a (Figura C). Con el movimiento continuo, el molde puede, por lo tanto, abrirse en la línea de separación 2. Por lo tanto, el moldeo y el corredor se expulsan por separado. Debido al alto desgaste que se produce, el pin desactivador y la barra de liberación, así como el tope en la placa flotante, tienen que estar hechos de acero endurecido. Dichos moldes pueden emplearse para pesos parciales de hasta 1 kg. Para tamaños más grandes, el bloqueo neumático y la apertura hidráulica son preferibles.

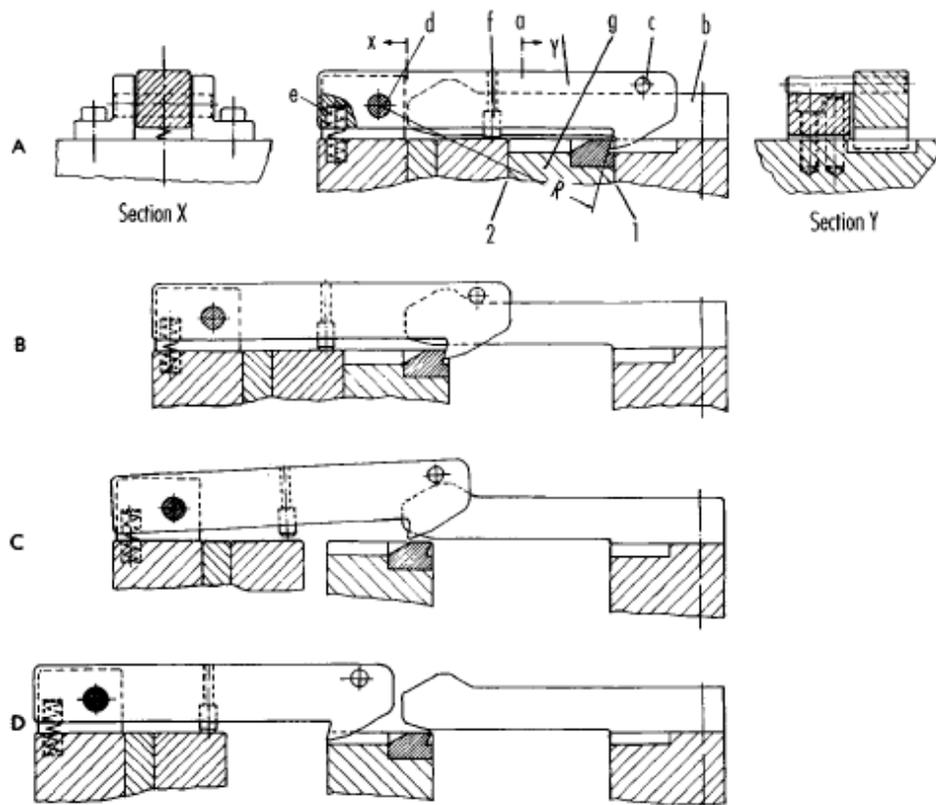


Figura 381. Esquema de funcionamiento de "Klinken" y descripción de componentes. 1, 2 Líneas de apertura del molde, a Barra de pestañas, b Barra de liberación, c pin seguidor, d pin de pivote, e Resorte, f pata de parada o apoyo, g plato flotante. (Menges & Mohren, 2001, p.441).

En todos los moldes que se abren en varios planos, las placas flotantes deben guiarse y alinearse con precisión para que las superficies de la cavidad se enganchen correctamente y no se dañen. El ensamble del pestillo debe montarse de tal manera que no interfiera con el moldeado que cae del molde por gravedad después del desmoldeo (Menges & Mohren, 2001, p.440). Ver Figura 382.

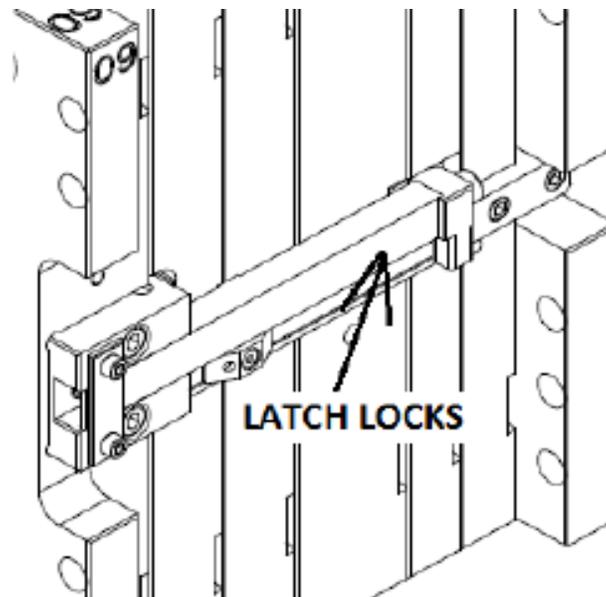


Figura 382. Esquema de funcionamiento de macho colapsible para una rosca interna. Elaboración propia.

Este sistema también puede adquirirse de proveedores de estándares. En variadas versiones y formas de funcionamiento. Con la combinación de estos en la pueden lograrse una gran variedad de movimientos de apertura en el molde objetivo. En la Figura 383 se muestra un klinke del proveedor *Strack® Normalien*.

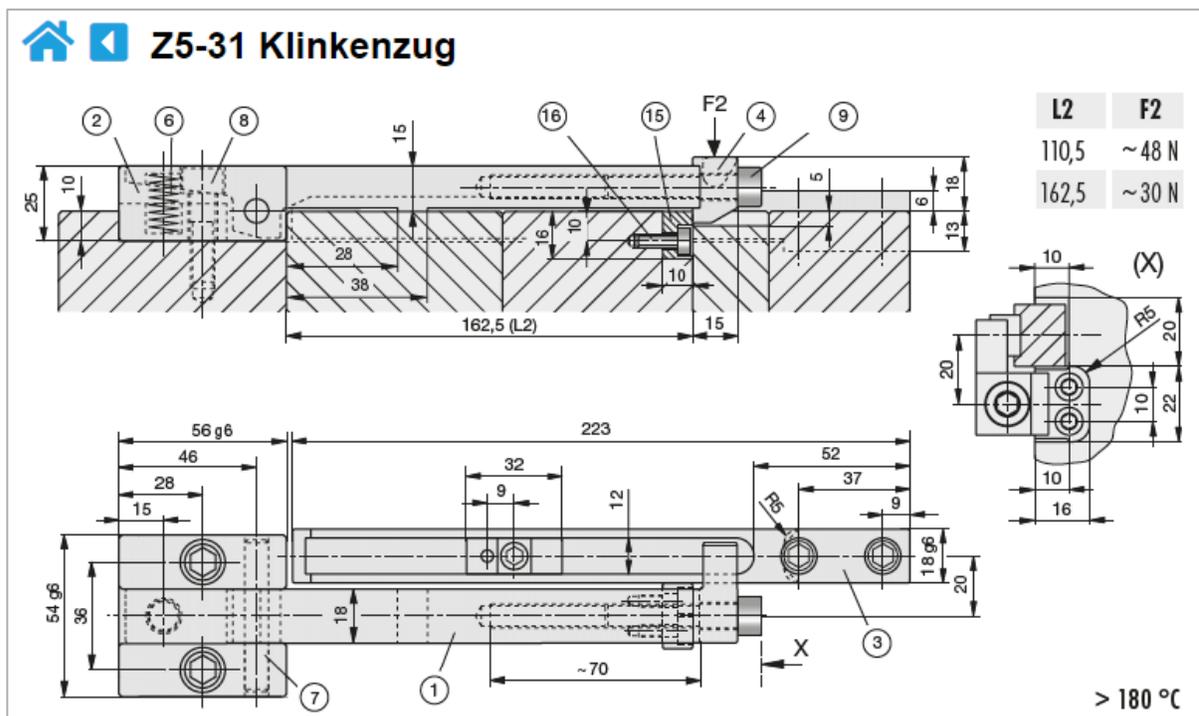


Figura 383. Esquema de Klinken comercial. ([Strack Norma GmbH & Co. KG](#), 2019).

En el enlace puede verse un video de un Klinken usado para activar la expulsión de un molde, publicado por Progressive Components (2019). [Ver video](#).

6.7.2 Limitadores de recorrido que producen fuerzas de expulsión.

La Figura 384 muestra un molde de tres placas en posición abierta (izquierda) y cerrada (derecha). El molde se abre primero en el plano de la línea de partición 1. Uno debe asegurarse de que la pieza permanezca inmóvil en el núcleo. Por lo tanto, se separa de la puerta o puertas.

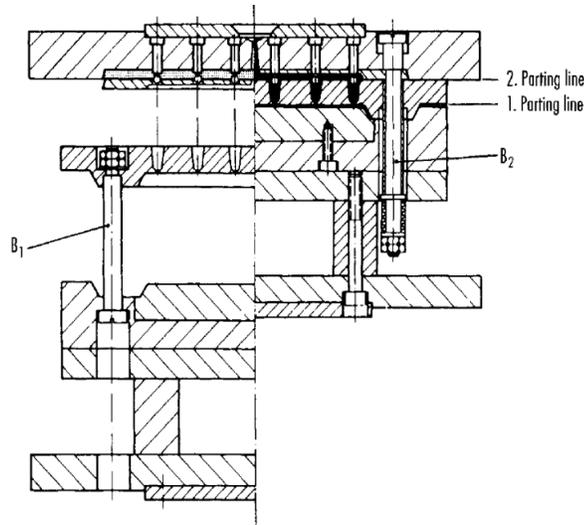


Figura 384. Esquema de posición y funcionamiento de limitadores de recorrido. B_1 y B_2 . (Menges & Mohren, 2001, p.440).

Después de una cierta carrera de apertura, la placa flotante es arrastrada por el perno B_1 y el molde se abre en el plano de la línea de separación 2. El sistema de corredera aún se mantiene por debajo hasta que es expulsado por una barra de expulsión que es accionada por el perno B_2 (Menges & Mohren, 2001, p.440).

6.7.3 Expulsión de la rama usando klinkens y limitadores.

Para la expulsión de rama de un molde de tres placas, por ejemplo, deben combinarse ambos métodos de secuenciadores de apertura. Klinkens y limitadores. Los primeros abren el molde por la apertura principal con lo cual se desmolda la rama y se revientan los puntos de inyección. Con los segundos se limita la placa de rama y se logra mediante los limitadores de recorrido una fuerza que obliga a una apertura de la placa que barre la rama de los pines retenedores expulsando así la rama del molde, para que sea procesada en el molino y reintegrada al proceso o para que sea evacuada por el picker o robot.

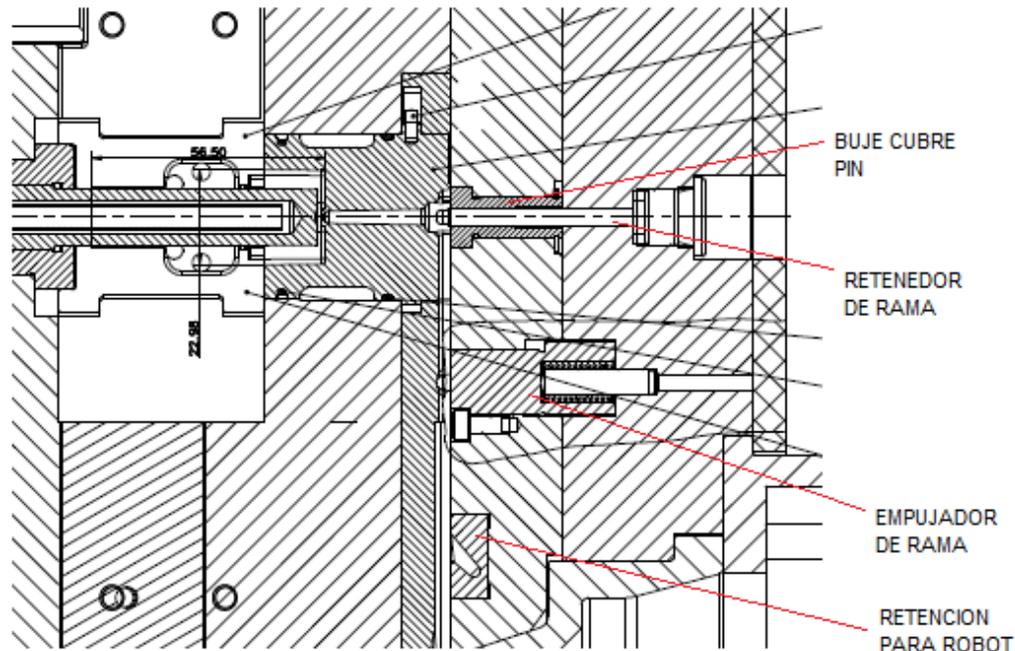


Figura 385. Esquema de del sistema de extracción de rama de un molde de tres placas y sus elementos básicos. (Menges & Mohren, 2001, p.440).

En el siguiente enlace muestra un video con el funcionamiento de la extracción de rama de un molde de dos placas ([Ver video](#) Progressive Components, 2019).

6.8 Patines o Correderas. Características de Diseño

Como ya se ha dicho los patines o correderas de gran tamaño, son unos de los elementos más usadas para formar piezas que tienen ángulos de salida externos negativos o que presentan retenciones con respecto a la dirección de expulsión. Estos pueden tener variadas formas y en algunos casos, movimientos o funciones especiales.

Durante el desmoldeo, los patines o “Slides” se accionan positivamente mediante guías inclinadas, también llamadas pasadores o elevadores, o con menos frecuencia por acción hidráulica directa. Además, hay características especiales de diseño que se explican a continuación.

La Figura 386 y la Figura 387 presentan el diseño e instalación de los pasadores y elevadores principales y datos dimensionales característicos para el montaje. La función de estos dos tipos de moldes se demuestra en la Figura 388. Mientras que una guía inclinada mueve la corredera simultáneamente con la apertura del molde, un elevador permite un inicio retardado del movimiento lateral.

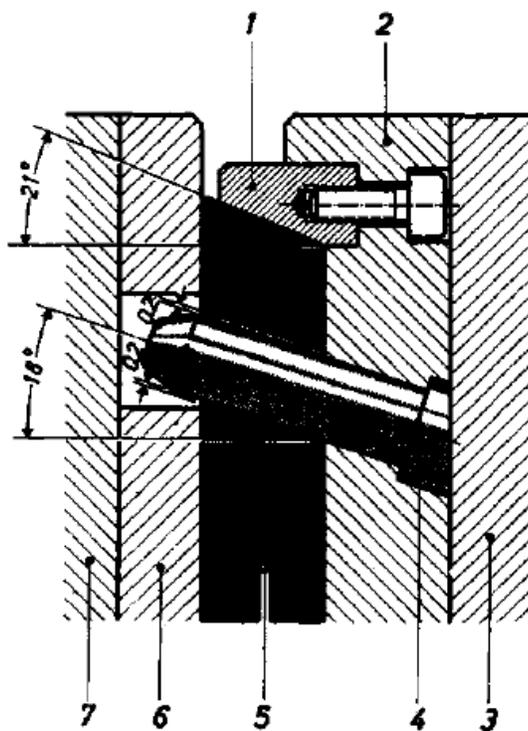


Figura 386. Presentación esquemática de un conjunto de pasador de leva. 1 bloque de techos, 2 placa de molde, 3 placa de sujeción, 4 guías inclinadas, 5 patines, 6 placa de molde, 7 placa de soporte. (Menges & Mohren P., 2001, p.462).

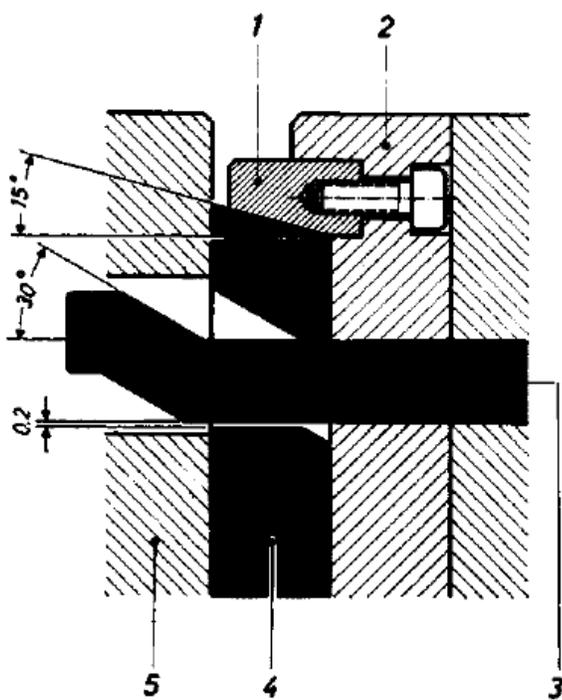
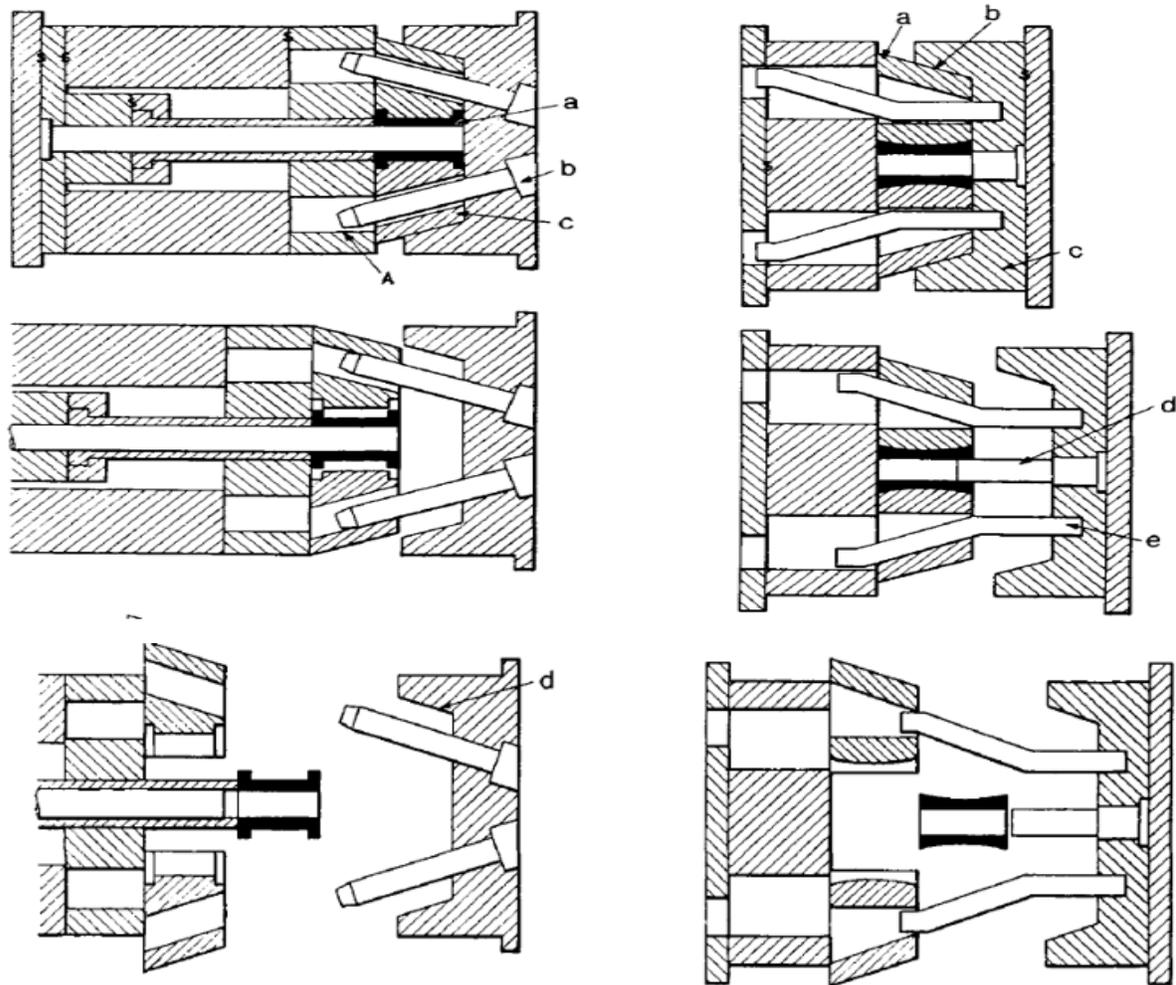


Figura 387. Diseño con elevador. 1 bloque de techo, 2 placa de molde, 3 elevadores, 4 patines, 5 placas de molde. (Menges & Mohren P., 2001, p.462).



b Cam pin, c Slide, d Clamping surface

a slide, b clamping surface, stationary mold half, d Core, e Lifter

Figura 388. Esquema de del sistema de extracción de rama de un molde de tres placas y sus elementos básicos. (Menges & Mohren P., 2001, p.463).

Se pueden usar guías comúnmente disponibles. Sus dimensiones están determinadas por la carga y las fuerzas de liberación, el peso de las guías y la resistencia de la fricción. La Figura 389 muestra una guía inclinada y las fuerzas que actúan sobre él durante un movimiento ascendente de la corredera. La fuerza que actúa sobre el pasador guía puede calcularse a partir del movimiento de un cuerpo en un plano oblicuo.

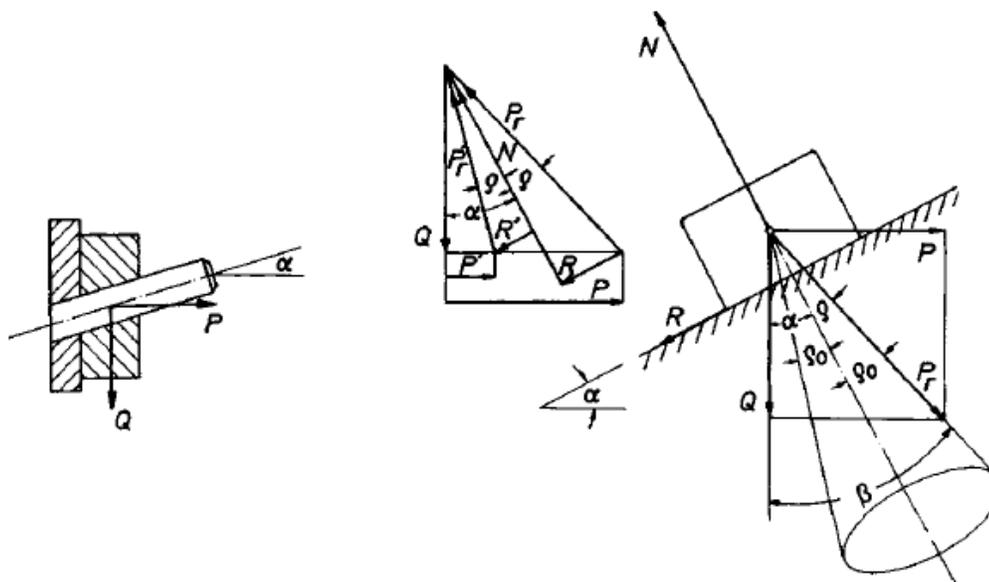


Figura 389. Esquema de del sistema de extracción de rama de un molde de tres placas y sus elementos básicos. (Menges & Mohren P., 2001, p.463).

Lo resultante de las fuerzas individuales P_R sale de:

$$P_R = \sqrt{Q^2 + P^2} \quad (6-1)$$

Sustituyendo P

$$P = Q \cdot \tan(\alpha + \rho) \quad (6-2)$$

Sustituir el resultado en

$$P_R = \sqrt{Q^2 + Q^2 \cdot \tan^2(\alpha + \rho)} \quad (6-3)$$

O

$$P_R = Q \sqrt{1 + \tan^2(\alpha + \rho)} \quad (6-4)$$

Donde

$$\tan \beta = \tan(\alpha + \rho) \quad (6-5)$$

$\tan \beta$ generalmente no debe exceder el valor de 0.5 del diagrama de fuerzas con $R = f \cdot N$

$$\tan \rho = \frac{R}{N} = f \cdot \frac{N}{N} \quad (6-6)$$

El coeficiente de fricción f es 0.1 para el acero que se mueve contra el acero. Esto permite calcular el ángulo de inclinación de los pines.

La fuerza resultante perpendicular al pin determina la sección transversal del pin y se calcula con:

$$A = \frac{Q}{\tau} \quad (6-7)$$

O en este caso

$$A = \frac{Q\sqrt{1+\tan^2 \beta}}{\tau} \cos \alpha \quad (6-8)$$

En la Figura 390, la fuerza de apertura que actúa sobre la guía inclinada se representa en función del tiempo. La fuerza completa actúa sobre la guía solo en el momento de desmoldar la parte plástica.

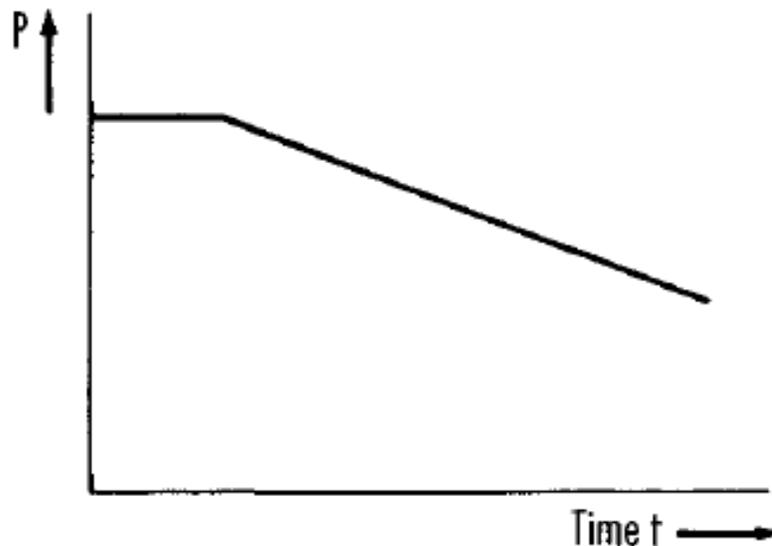


Figura 390. Fuerza de apertura en función del tiempo sobre una guía inclinada. (Menges & Mohren P., 2001, p.464).

Es importante tener en cuenta que, si la guía inclinada abandona el patín en la apertura del molde, este debe ser bloqueado con un pin posicionador. Esto para garantizar que al cierre del molde la guía encuentre a este en la misma posición, para que no se estrellé al volver a ingresar para cerrarlo y comenzar el siguiente ciclo de inyección. Para este fin se dispone de muchos elementos como posicionadores de bola, pines de fricción, etc. Ver Figura 391 y [Ver video](#) (Progressive Components, 2019).

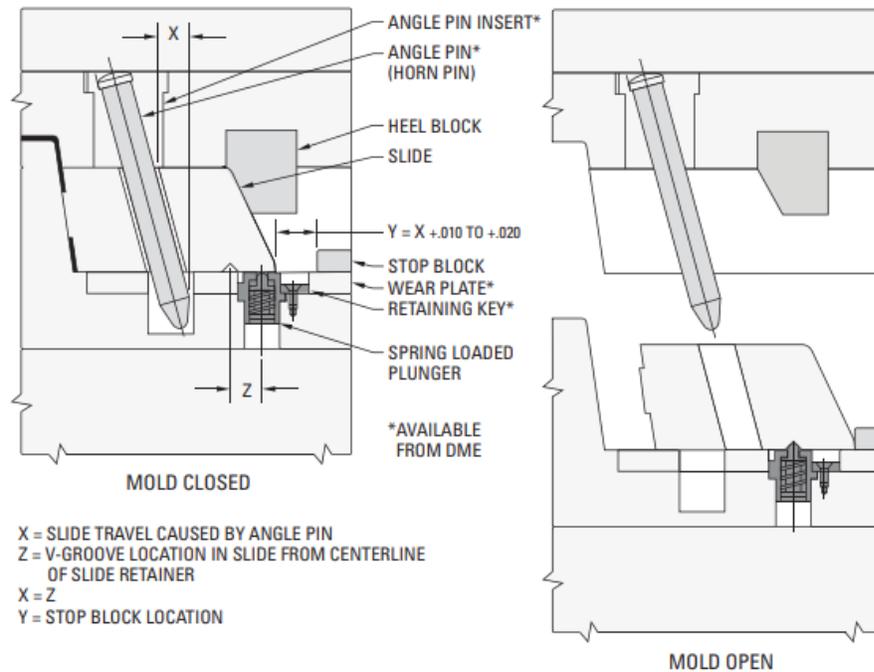


Figura 391. Esquema de ensamble y funcionamiento de un sistema de patines. Paquete suministrado por el proveedor externo DME®. (DME, 2019, p.369).

La longitud del pasador de leva depende de la carrera de apertura requerida. La Figura 392 muestra un pin corto. Una carrera larga requiere un pin apropiadamente largo. Luego, como se muestra en la Figura 393, el pasador debe penetrar profundamente en la mitad móvil del molde y se debe proporcionar una abertura en consecuencia (Menges & Mohren P., 2001, p.462-467).

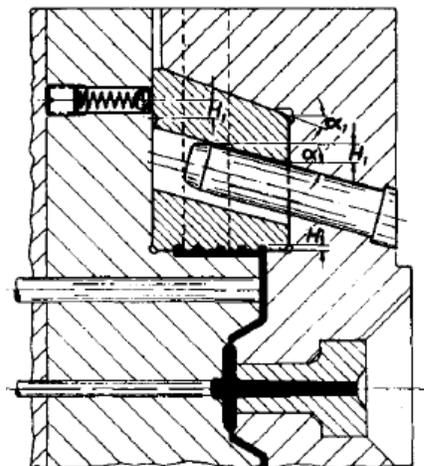


Figura 392. Fuerza de apertura en función del tiempo sobre una guía inclinada. (Menges & Mohren P., 2001, p.465).

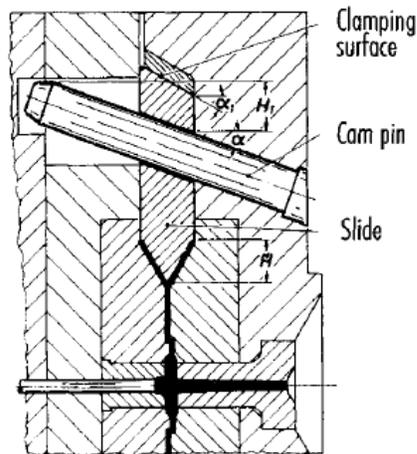


Figura 393. Fuerza de apertura en función del tiempo sobre una guía inclinada. (Menges & Mohren P., 2001, p.465).

En el siguiente enlace se ve un sistema similar al mostrado en la Figura 391. ([Ver video](#) Progressive Components, 2017).

6.9 Métodos de Expulsión Especiales

Por último, se mostrará un poco más a fondo los sistemas de molde especial, del cual se hizo referencia en la sección [5.2.5](#) y de algunos sistemas especiales de desmoldeo.

6.9.1 Sistemas para moldes de pisos (Stack Molds).

Este tipo de molde es usado para gran cantidad de cavidades de molde, producciones en masa y alto rendimiento. Su principio básico es tener dos superficies de partición sin aumentar la fuerza de cierre de la máquina, produciendo el doble de las piezas de un molde convencional.

Algunos moldes apilados tienen cavidades diferentes en cada superficie de separación del molde y producen una familia de piezas por disparo, cada una de forma y tamaño diferente, solo debe tenerse en cuenta un balance aproximado de las áreas proyectadas del artículo.

Ventajas:

1. **Salida de pieza doble**

En lugar de aumentar el tamaño del molde agregando más cavidades, un molde apilado mantiene el tamaño del molde y el tamaño de la máquina agregando una segunda capa de cavidades paralela a la primera capa. El tiempo de llenado,

empaquete y enfriamiento sigue siendo el mismo para un molde de pila y solo el tiempo de apertura y cierre del molde se sumará ligeramente al tiempo de ciclo

2. Precio reducido de la pieza.

El precio de la pieza está determinado por el índice de horas de la máquina, que está directamente relacionado con el tonelaje de la pinza de la máquina. Un molde apilado requiere solo aproximadamente la mitad del tonelaje de la pinza que un molde de una sola cara con el mismo número de cavidades

3. Eficiencia y automatización mejorada.

Los moldes apilados pueden producir ensamblajes de múltiples componentes en una sola toma y en una máquina usando los mismos parámetros. En comparación, los moldes de una sola cara requerirían la sincronización de producción entre varias máquinas, lo que complica las operaciones posteriores al moldeo.

Se presentan videos y figuras ilustrativas del sistema (ver Figura 394 a Figura 397). En caso de querer profundiza en el tema ver el siguiente [enlace](#). También se recomiendan los siguientes vídeos [Molde con apertura de manivelas](#) (Progressive Components, 2019) y [Molde de pisos con desenrosque](#) (Husky, 2017).

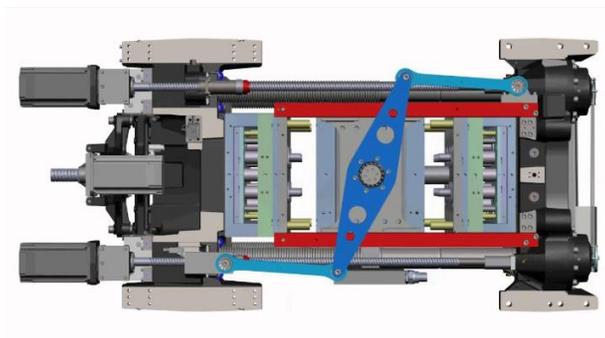


Figura 394. Representación de molde de pisos. Manivelas de apertura. (Niigon Machines, 2015).

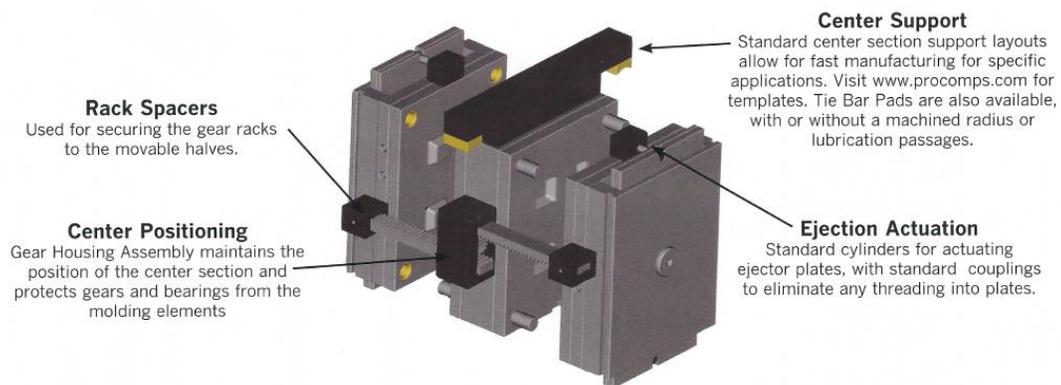


Figura 395. Stack Mold con sistema de posicionamiento central por cremalleras y piñones. (DME, 2019, p.C42).

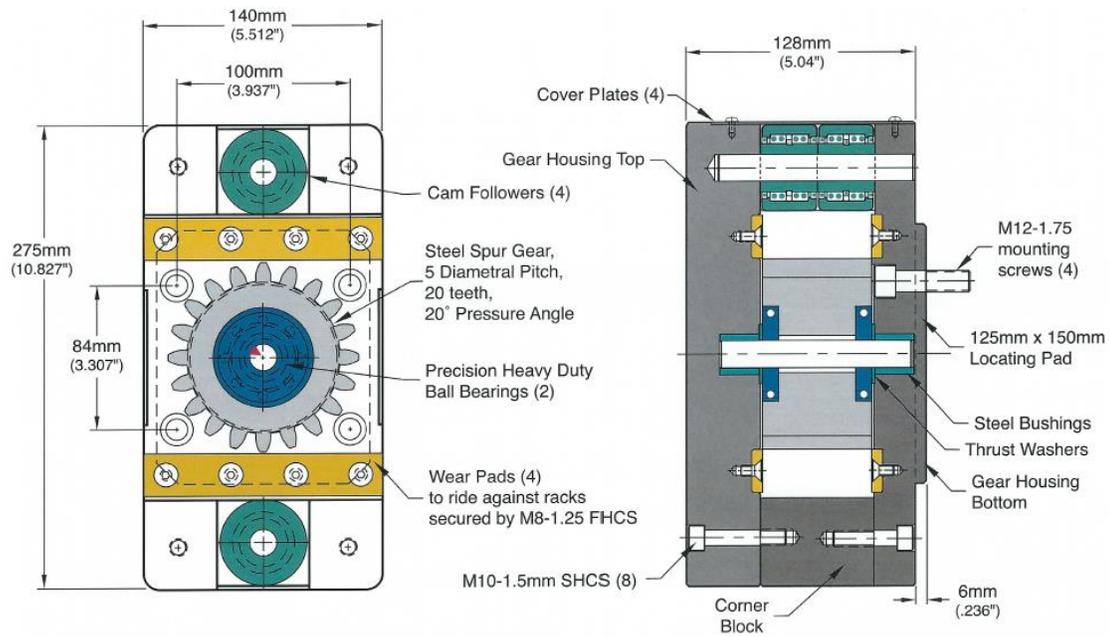


Figura 396. Detalle del Sistema de posicionamiento central con piñon y cremallera, de un Stack Molds. (DME, 2019, p.C42).

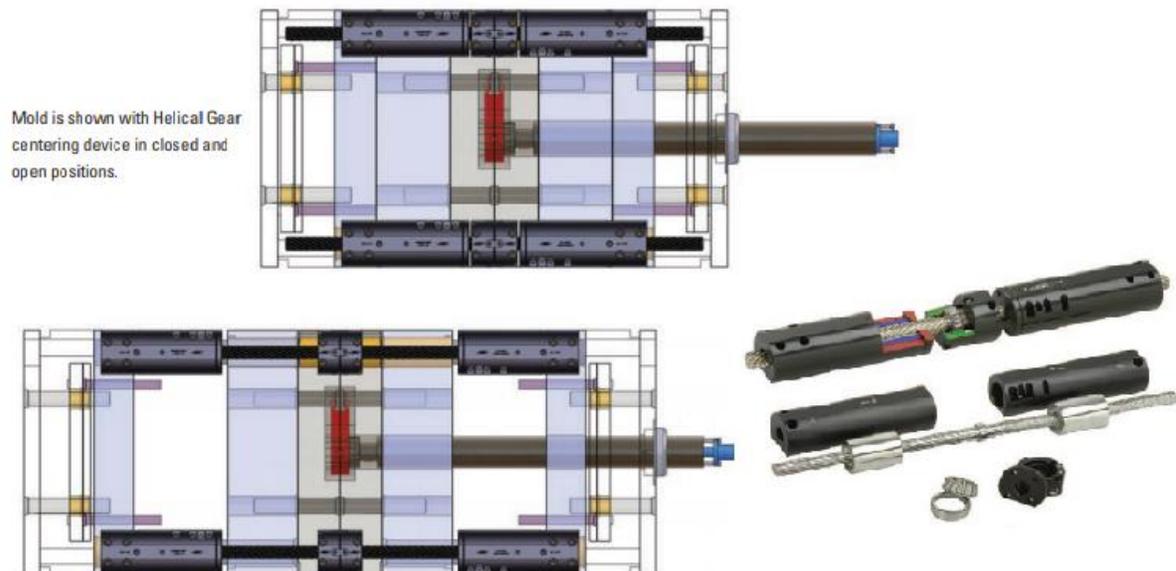


Figura 397. Stack Mold con sistema de posicionamiento central por tornillo sin fin y tuerca helicoidal. (DME, 2019, p.112-113).

6.9.2 Correderas especiales.

Este tipo de correderas es muy útil para ahorrar espacio en los moldes y usarlos para enganches de gran profundidad. Ver Figura 398 y Figura 399; además, los siguientes videos: [video 1](#) y [video 2](#) (Progressive Components, 2019).

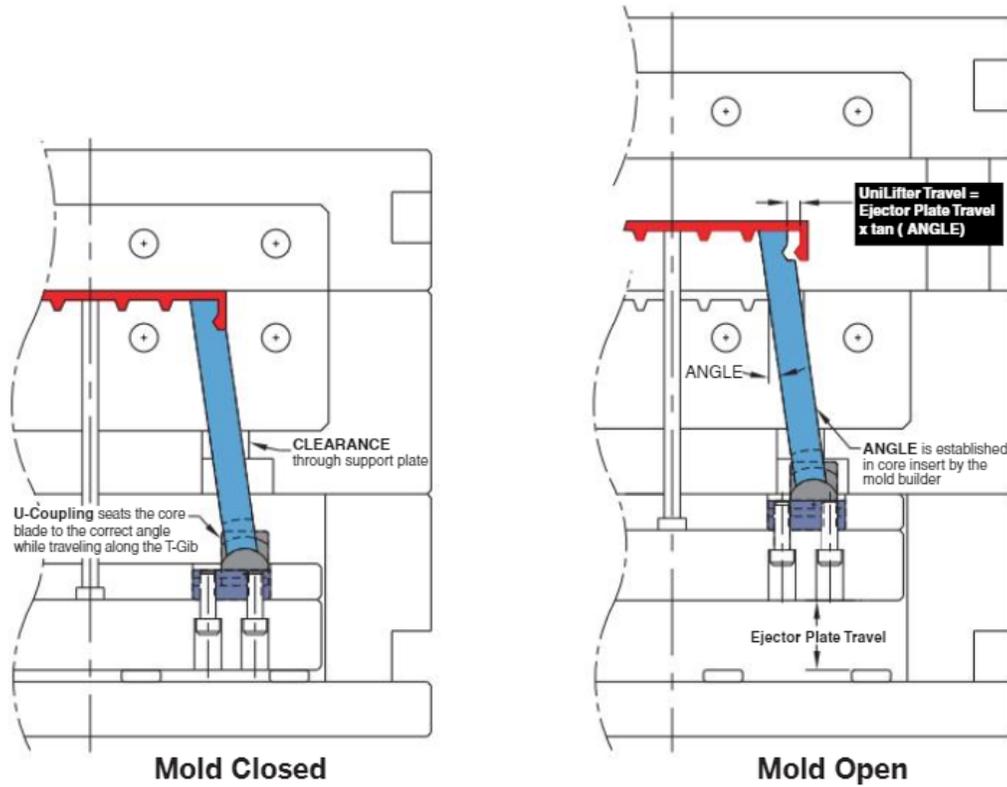


Figura 398. Corredera rectangular con pivote circular para giro angular. ([Progressive Components International Corporation.](#), 2018, p.53/D-1).

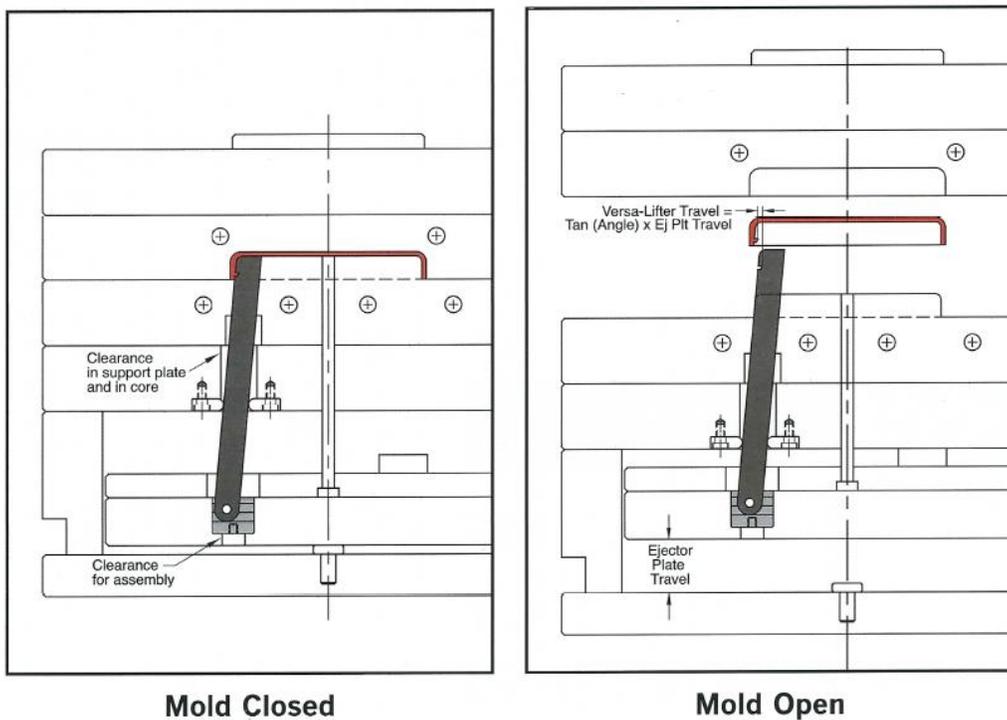


Figura 399. Corredera rectangular con deslizamiento para movimiento angular paralelo. ([Progressive Components International Corporation.](#), 2018, p.178/H-10).

Como se ha planteado a lo largo de este texto es de vital importancia referenciarse de múltiples sistemas ya probados y apoyarse en los diseños exitosos que se hayan desarrollado tanto a nivel personal por parte del diseñador como a nivel de industria, esto con el fin combinarlos o desarrollar nuevos sistemas para lograr el objetivo y los retos que se planteen en el ramo del diseño de moldes.

Conclusiones

- La industria del diseño de molde en nuestro medio es un gremio bastante cerrado y el conocimiento, o “know-how”, es ganado por experiencias prácticas de prueba y error. Pese a que la información teórica es bastante amplia, se nota que la mayor parte de esta, en nuestra industria colombiana, es producto de la experimentación y pruebas de ensayo – error; no obstante, esto no quiere decir que no tengamos empresas con bastante conocimiento de esta ciencia de la transformación de plásticos y el diseño de moldes.
- Se hace evidente que la industria del diseño de moldes de inyección no solo se puede centrar en el sistema mecánico del molde; por tanto, es necesario un conocimiento de los plásticos a transformar, su reología y su comportamiento dentro del molde.
- Con respecto al diseño de artículo, se hace de vital importancia que tanto el diseñador de este, como el diseñador del molde, tengan un conocimiento de ambos campos para lograr así un complemento práctico y una toma de decisiones que converjan al mismo objetivo, a saber, un diseño óptimo tanto del artículo como del molde.
- También es importante que se conozca el proceso de inyección para que el equipo de diseño del producto y del molde, consigan prever soluciones a los posibles problemas que puedan presentarse durante la transformación del plástico y en la obtención del producto final.
- Dada la complejidad del proceso de implementación de un sistema de producción de artículos plásticos, es importante que toda la información que se produzca en cada proyecto sea documentada con un sistema que sea de fácil acceso para futuros proyectos y así evitar que se cometan errores del pasado y poder dedicar el tiempo desperdiciado en correcciones en mejoras que se vean reflejadas en una mejor eficiencia, tanto en ganancias económicas como en el “know-how” de la empresa.
- El desarrollo de una metodología para el desarrollo de los diferentes proyectos muestra que el rendimiento y la eficiencia se incrementa y, por consiguiente, también las ganancias.

- Con respecto a los costos de la fabricación de moldes, dada la complejidad y multiplicidad de soluciones que pueden encontrarse para el desarrollo de estos, solo es posible lograr una buena proyección de costos implementando una categorización por tipos de molde y similitud de los procesos de fabricación; por tanto, deben generarse bases de datos y centros de costos de referencia para poder pre-costear un proyecto.
- Con respecto a los artículos y moldes, los sistemas de simulación por elementos finitos, para llenados de molde y artículo y refrigeración del molde, nos dan luces acerca del desempeño que podemos esperar de nuestros diseños y evitar sorpresas en los procesos. Esto hace que el proceso de diseño sea más eficiente.

Se espera que el presente documento sea de utilidad para lograr los objetivos de los proyectos que se aborden y se invita a profundizar en los temas tratados para lograr una formación ideal en estos.

Se reitera que el diseño de moldes es un mundo muy amplio y de multiplicidad de variables que se deben tener en cuenta y que solo la combinación de todos los sistemas disponibles lleva a la consecución de nuevas ideas para implementar soluciones o mejorar.

Referencias

Arburg. (s.f.). [Figura]. Recuperado de: <http://www.arburg.com>

ASTM, 8.01, Plastics (I). (1994). Philadelphia: ASTM.

Axxecol S.A. (s.f.). *Tabla de materiales en línea de Uddeholm-Assab, Inc.* [Figura].

Recuperado de:

http://axxecol.com/documents/axxecol/AXXECOL%20TABLA_2018.pdf

Bagley, E. (1957). Appl. Phys (Vol. 28).

Beaumont, J. P. (2004). *Runner and Gating Design Handbook [Manual de Diseño de Corredores y Portales]*. Munich: Hanser Gardner Publications.

Beltran, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de Polímeros*. Alicante: Universidad de Alicante.

Bohler. (2000). *Aceros para moldes de plástico*. [Figura]. Recuperado de: http://aceros-tobal.com/catalogos_pdf/moldes_plastico.pdf

Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. (2010). *Product Design for Manufacture and Assembly [Diseño de Producto para Fabricación y Montaje]*. New York, USA: CRC Press.

Campo, E. A. (2006). [Figura]. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, Inc.

Campo, E. A. (2006). *The Complete Part Design Handbook, For Injection Molding of Thermoplastics [Manual Completo de Diseño de Piezas, para Moldeo por Inyección de Termoplásticos]*. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, Inc.

Castrejón Zamarripa, J. (2019). Procesos de Fundición de Metales. [Figura]. En U. –F. Tecnología, Ingeniería Mecánica. Tecnología Mecánica II. (pág. 114). Bolivia: Universidad Mayor de San Simón .

Cemasa, S. (2008-2019). *Bridas para molde 106x41 mm*. [Figura]. Recuperado de:
https://www.cemasa.com/asp/listado_prod.asp?CAT=801

Chávez Palma, J. Á. (2019). *Tema 11: Moldeo por Inyección*. Recuperado de: docplayer.es:
<https://docplayer.es/2933410-Tema-11-moldeo-por-inyeccion.html>

CUMSA. (2011). [Figura]. Recuperado de: <https://www.cumsa.com/>

Dealy, J. (1982). *Rheometers for Molten Plastics*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.

DME. (2013). *Catalogo online de DME mold components*. [Figura]. Recuperado de:
<http://online.flipbuilder.com/zmgi/iinf/mobile/index.html#p=276>

DME. (2019). *Catálogo de moldes*. [Figura]. Recuperado de:
<http://online.flipbuilder.com/zmgi/iinf/files/downloads/Mold%20Components-2019.pdf>

Eastman Chemical Company. (2017). *Eastman polymers, processing and mold design guidelines*. [Figura]. Recuperado de:
https://www.eastman.com/Literature_Center/S/SPTRS5344.pdf

Fernandez Barroso, J. (2014). *Trabajo de grado, Diseño de un Molde de Inyección de una Pieza Plástica*. Bilbao: Escuela de ingeniería de Técnica Industrial de Bilbao.

Flores, A. (2009). [Figura]. Azcapotzalco, México D.F.: Instituto Politécnico Nacional.

Flores, A. (2009). implementación del método de diseño para la manufactura y ensamble (DFMA) en la manufactura de moldes para inyección en colada fría de

termoplásticos. (*Tesis de maestría*). Azcapotzalco, México D.F.: Instituto Politécnico Nacional.

Focus Technology Co., Ltd . (2019). *Máquina de moldeo por inyección*. [Figura]. Recuperado de: https://es.made-in-china.com/co_cnhaijiang/product_Plastic-Injection-Molding-Machine-for-Nylon-Cable-Tie-Mould-Making_rnniieisg.html

Gómez González, M. (2010). [Figura]. Recuperado de:

<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/10682>

Gómez González, M. (2010). *Diseño, validación y fabricación de un aro protector para envases metálicos mediante el empleo de las tecnologías CAD/CAM/CAE y Rapid Prototyping*. Recuperado de: Repositorio Institucional Universidad Politécnica de Cataluña: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/10682>

González de Cabañes, A. (s.f.). [Figura]. Recuperado de:

<https://www.raco.cat/index.php/Temes/article/viewFile/29785/83039>

González de Cabañes, A. (s.f.). *RACO (Revistes Catalanes amb Accés Obert)*. Recuperado de:

Repositorio cooperativo:

<https://www.raco.cat/index.php/Temes/article/viewFile/29785/83039>

Guarin, A., & Paramo, G. (2002, octubre-noviembre). Estudio del Estado del Arte de Moldes de Inyección en Colombia. *Revista Universidad EFIT*(128)

Guth, E., & R., S. (1936). *Kolloid - Zeitschrift*.

Hagen, G. (1839). *Annalen der Physik* (Vol. 46).

Hasenauer, J. K. (s.f.). [Figura].

Hasenauer, J., Kuper, D., Laumeyer, J., & Beltran, J. M. (s.f.). Los diez principales consejos de diseño.

Husky. (1993). *Catálogo de sistemas de colada caliente*. Recuperado de:

<http://www.husky.co/ES-ES/About-us.aspx>

Husky. (1993). *Catálogo de sistemas de colada caliente*. [Figura]. Recuperado de:

<http://www.husky.co/ES-ES/About-us.aspx>

Husky Injection Molding Systems, LTD. (2017, 3 9). *Schöttli Medical Stack Mold - Animation*.

[Archivo de video]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=zJlftuadKJM>

Hurst, K. (1999). *Engineering Design Principles*. Elsevier Science & Technology Books.

Kaizer Fotografie. (2016, 12 2). *Molde de inyección Moldeo por inyección Plástico Impacto*

Función de núcleo Animación 3D Ingeniería mecánica [Archivo de video]. Recuperado

de: https://www.youtube.com/watch?v=R5_GLC70Wt4

Kazmer, D. (2007). [Figura]. Germany: Hanser Verlag.

Kazmer, D. (2007). *Injection Mold Design Engineering* [Ingeniería de Diseño de Moldes de Inyección]. Germany: Hanser Verlag.

Lidomar. (2012). *plástico em desenvolvimento*. [Figura]. Obtenido de

<http://injeaodetermoplastico.blogspot.com/2012/07/molde-de-tres-placas.html>

Marquez Sevillano, J. d. (s.f.). *Introduccion a los Moldes de Inyeccion. Fases de diseño de un*

molde. [Figura]. Recuperado de: <https://docplayer.es/23980020-Introduccion-n-a->

[los-moldes-de-inyeccion.html](https://docplayer.es/23980020-Introduccion-n-a-los-moldes-de-inyeccion.html)

Mayer, R., & Decker, L. (1991). ISyCL Technical Report. Ohio: . Ohio: AFHRL Wright-Patterson Air Force Base.

Menges, G., & Mohren P., M. (2001). *[Figura]*. Munich: Hanser Publishers.

Menges, G., & Mohren P., M. (2001). *How to make Injection Molds [Cómo Hacer Moldes de Inyección]* (3rd ed.). Munich: Hanser Publishers.

Menges, G., & Osswald, T. (2012). *[Figura]*. Cincinnati: Hanser.

Menges, G., & Osswald, T. (2012). *Material Science of Polymers for Engineers [Ciencia de los Materiales de Polímeros para Ingenieros]* (3th ed.). Cincinnati: Hanser.

Meusburger Georg GmbH & Co KG. (s.f.). *[Figura]*. Recuperado de:

<https://ecom.meusburger.com/index/index.asp?rnd=>

Milacron. (2019). *Elementos comerciales para sistemas típicos de desenrosque. [Figura]*.

Recuperado de: https://www.milacron.com/wp-content/uploads/2017/05/Pre-Engineered-Hydraulic-Unscrewing-Device_EN.pdf

Mold Hotrunner Solutions Inc. (2018). *Referencia para un molde de pisos. [Figura]*.

Recuperado de: <http://www.mhs-hotrunners.com/stack.html>

Motivavence. (2012, 4 9). *Automatic Unscrew 16 CAV./ Desenrosque Automático Molde 16 Cavidades [Archivo de video]*. Recuperado de:

<https://www.youtube.com/watch?v=rGwqvXOVD-0>

Niigon Machines. (2015). *Niigon Stack Mold Carrier. [Figura]*. Recuperado de:

<https://www.youtube.com/watch?v=LsELvWfkVkA>

Norton, R. (1999). *Desing of machinery*. USA: McGraw Hill, Series in mechanical Engineering.

Ojeda, M. (2012). *Tecnología de los Plásticos. [Figura]*. Recuperado de:

<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/03/extrusion-soplado.html>

Osswald, T. (2010). *Understanding Polymer Processing [Entender el procesamiento de polímeros]*. Munich: Hanser Publishers.

Osswald, T. A., & Giménez, E. (2008). *[Figura]*. Cucuta-Colombia: Guaduales.

Osswald, T. A., & Giménez, E. (2008). *Procesado de Polimeros - Fundamentos*. Cucuta-Colombia: Guaduales.

Osswald, T. A., & Rudolph, N. (2015). *Polymer Rheology, Fundamentals and Applications [Reología de Polímeros, Fundamentos y Aplicaciones]*. Munich: Hanser Publications.

Ostwald, W. (1925). Kolloid-Z.

Poiseuille, I. (1840). Comptes Rendus 11.

Progressive Components. (2017, 2 14). *SRT Series Slide Retainers*. [Archivo de video].

Recuperado de: <https://www.procomps.com/Animations/SRT.aspx>

Progressive Components. (2019, 4 30). *CamActions*. [Archivo de video]. Recuperado de:

<https://www.procomps.com/Animations/Cam.aspx>

Progressive Components. (2019, 2 12). *Collapsible Cores - C-Cores* [Archivo de video].

Recuperado de: <https://www.procomps.com/Animations/CC.aspx>

Progressive Components. (2019, 2 12). *Collapsible Cores - C-Cores* [Archivo de video].

Recuperado de: <https://www.procomps.com/Animations/CC.aspx>

Progressive Components. (2019, 4 19). *Expandable Cavities* [Archivo de video]. Recuperado

de: <https://www.procomps.com/Animations/EXC.aspx>

Progressive Components. (2019, 4 23). *External Plate Locks*. [Archivo de video]. Recuperado

de: <https://www.procomps.com/Animations/PLC.aspx>

Progressive Components. (2019, 5 3). *FlexiCores [Archivo de video]*. Recuperado de:

<https://www.procomps.com/Animations/FCA.aspx>

Progressive Components. (2019, 5 3). *Internal Plate Locks. [Archivo de video]*. Recuperado

de: <https://www.procomps.com/Animations/PLN.aspx>

Progressive Components. (2019, 4 22). *PKO Extensions [Archivo de video]*. Recuperado de:

<https://www.procomps.com/Animations/PKO.aspx>

Progressive Components. (2019, 04 30). *Procomps. [Archivo de Vídeo]*. Recuperado de:

<https://www.procomps.com/Animations/Cam.aspx>

Progressive Components. (2019, 4 25). *Puller Pins & Bushings. [Archivo de video]*.

Recuperado de: <https://www.procomps.com/Animations/PPB.aspx>

Progressive Components. (2019, 2 11). *StackIt - Stack Mold System. [Archivo de video]*.

Recuperado de: <https://www.procomps.com/Animations/SK.aspx>

Progressive Components. (2019, 4 13). *UniLifter - Undercut Release System. [Archivo de*

video]. Recuperado de: <https://www.procomps.com/Animations/UL.aspx>

Progressive Components. (2019, 4 28). *Versa-Lifter. [Archivo de video]*. Recuperado de:

<https://www.procomps.com/Animations/VL.aspx>

Progressive Components International Corporation. (2018). *[Figura]*. Recuperado de:

<http://www.procomps.com/z-series/>

Rabinowitsch, B. (1929). Z. Phys. Chem (Vol. 145).

Rave, R. (2003). *[Figura]*. Medellín: Universidad Eafit.

Rave, R. (2003). Materiales Plásticos. *Diplomado en Diseño de Moldes, Universidad Eafit.*

Medellin.

Schümmer, P., & Worthoff, R. (1978). Chem. Eng. Sci (Vol. 38).

S.N. (2009, mayo-julio). Fabricación de moldes, hacia el Mecanizado de Alta Velocidad. *Metal*

Actual. El magazin del Sector Industrial (12).(12), 32-38. Recuperado de:

https://issuu.com/mataj23/docs/metal_12

Sánchez Valdés, S. Y. (2003). [Figura]. Mexico: Limusa, Noriega Editores.

Sánchez Valdés, S., Yañez Flores, I. G., & Rodríguez Fernández, O. S. (2003). *Moldeo por*

Inyeccion de Termoplasticos. Mexico: Limusa, Noriega Editores.

Shi, L., & Gupta, M. (1999). Approximate prediction of sink mark depth in rib-reinforced plastic parts by empirical equations [Predicción aproximada de la profundidad de la marca de hundimiento en piezas de plástico reforzadas con costillas mediante ecuaciones empíricas]. *Journal of Injection Molding Technology*, 3 (1), 1-10.

SoloStocks. (2000-2019). *Moldes plásticos*. [Figura]. Obtenido de

<https://www.solostocks.com.mx/venta-productos/maquinaria-procesar-plasticos/otra-maquinaria-procesar-plastico/moldes-plasticos-908001>

Strack Norma GmbH & Co. KG. . (2019). *Esquema de Klinken comercial*. [Figura]. Recuperado de:

<https://www.strack.de/de/shop/?idm=1900&d=1&idmp=56&spb=MTA7NTY7MTkwMDs=>

Tadmor, Z., & R. B, B. (1974). Polym Eng Sci.

Tres, P. A. (2014). [Figura]. Munich: Hanser Verlag Publications.

Tres, P. A. (2014). *Designing Plastic Parts for Assembly [Diseño de Piezas Plásticas para Montaje]*. Munich: Hanser Verlag Publications.

Tucker III, C. (1989). *Fundamentals of Computer Modeling for Polymer Processing*. Munich: Hanser Publishers.

Uddeholm. (2009). *Catálogo en línea de Uddeholm-Assab, Inc., pp. 28-34. [Figura]*.

Recuperado de:

https://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Faxxecol.com%2F_Axxecol%2FDwPortal%2FDocuments%2FManual%2520Bolsillo.pdf

Unger Gastrow, P. (1998). *[Figura]*. Hanser Publications.

Unger Gastrow, P. (1998). *Moldes de Inyección para Plásticos 2E 109 casos prácticos*. Hanser Publications.

Unger, P. (2006). *Gastrow Injection Molds [Moldes de Inyección de Gastrow]*. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

Waale de, A. (1923). *Oil and Color Chem*, 6, 33.

Wikipedia. (2019). *Elastómero*. Recuperado de: Wikipedia Enciclopedia Libre:

<https://es.wikipedia.org/wiki/Elast%C3%B3mero>

Wikipedia. (2019). *Wikipedia Enciclopedia Libre*. Recuperado de:

https://es.wikipedia.org/wiki/Pl%C3%A1stico#Propiedades_y_caracter.C3.ADsticas

Xiamen DTG Tech co. Ltda. (2019). *¿Qué es el canal caliente o el molde sin corredor?*.

[Figura]. Recuperado de: DTG Molding: <https://dtg-molding.com/what-is-hot-runner-or-runnerless-mold/>

Bibliografía

Agassant, J.-F., P, A., J. Ph, S., & P.J, C. (1991). Polymer Processing: Principles and Modeling.

Munich: Hanser Publishers.

Castro, J., & Makosko, C. (1982). AIChE J.

Denn, M. (1990). Annu. Rev. Fluid Mech.

Hatzikiriakos, S. G., & J.M., D. (1991, 23 11). 37.

Vinogradov, G., A.Y., M., & Y.G., Y. (1972). Polym. Sci. Part A-2.

Anexos

Anexo A: Siglas de Polímeros

SIGLA	NOMBRE
ABR	Caucho de acrilato-butadieno
ABS	Caucho de acrilonitrilo-butadieno-estireno
ACM	Caucho de acrilato
AES	Copolímero de acrilonitrilo-etileno-propileno-estireno
AMMA	Copolímero de acrilonitrilo-metacrilato de metilo
ANM	Caucho de acrilonitrilo-acrilato
APP	Polipropileno atáctico
ASA	Terpolímero de acrilonitrilo-estireno-acrilato
BIIR	Caucho de isobuteno - isopreno (butílico) bromado
BR	Caucho de cis-1,4-butadieno (cis-1,4-polibutadieno)
BS	Copolímero de polibutadieno-estireno
CA	Acetato de celulosa
CAB	Acetato-butirato de celulosa
CAP	Acetato-propionato de celulosa
CF	Resina de cresol-formaldehído
CHC	Caucho de epiclorhidrina-óxido de etileno
CHR	Caucho de epiclorhidrina
CMC	Carboximetil celulosa
CN	Nitrato de celulosa
CNR	Caucho carboxinitroso (terpolímero de tetrafluoretileno-trifluornitroso metano-monómero insaturado)
CO	Poli[(clorometil)oxirano]; caucho de epiclorhidrina
CP	Propionato de celulosa
CPE	Polietileno clorado
CR	Caucho de cloropreno
CS	Caseína
CSM	Polietileno clorosulfonado
CTA	Triacetato de celulosa
CTFE	Poli(clorotrifluoretileno)
EAA	Copolímero de etileno-ácido acrílico
EAM	Copolímero de etileno-acetato de vinilo
EC	Etilcelulosa
ECB	Mezclas de copolímero de etileno con betunes
ECTFE	Copolímeros de etileno-clorotrifluoretileno
EEA	Copolímero de etileno-acrilato de etilo
EMA	Copolímero de etileno-ácido metacrílico o copolímero de etileno- anhídrido maleico

EP	Resina epoxi
E/P	Copolímero de etileno-propileno
EPDM	Terpolímero de etileno-propileno-dieno no conjugado
EPE	Éster de resina epoxi
EPM	Caucho de etileno-propileno
EPR	Caucho de etileno-propileno
EPS	Poliestireno expandido; espuma de poliestireno
EPT	Terpolímero de etileno-propileno-dieno
ETFE	Copolímero de etileno-tetrafluoretileno
EVA, E/VAC	Copolímero de etileno-acetato de vinilo
EVE	Copolímero de etileno-viniléter
FE	Elastómero que contiene flúor
FEP	Caucho de tetrafluoretileno-hexafluorpropileno
FF	Resinas de furano-formaldehído
FPM	Caucho de fluoruro de vinilideno-hexafluorpropileno
FSI	Caucho de silicona fluorada
GR-I	Caucho butílico
GR-N	Caucho nitrílico
GR-S	Caucho de estireno-butadieno
HDPE	Poliétileno de alta densidad
HCE	Hidroxietilcelulosa
HIPS	Poliestireno de alto impacto (antichoque)
HMWPE	Poliétileno de elevado peso molecular
IIR	Caucho de isobuteno-isopreno; caucho butílico
IPN	Red de polímero interpenetrado
IR	Cis-1,4-poliisopreno sintético
LDPE	Poliétileno de baja densidad
LLDPE	Poliétileno lineal de baja densidad
MABS	Metacrilato de metilo-acrilonitrilo-butadieno-estireno
MBS	Terpolímero de metacrilato de metilo-butadieno-estireno
MC	Metilcelulosa
MDPE	Poliétileno de densidad media (0,93-0,94 g/cm ³)
MF	Resina de melamina-formaldehído
MPF	Resina de melamina-fenol-formaldehído
NBR	Caucho de acrilonitrilo-butadieno; caucho nitrílico
NC	Nitrocelulosa; nitrato de celulosa
NCR	Caucho de acrilonitrilo-cloropreno
NIR	Caucho de acrilonitrilo-isopreno
NR	Caucho natural (cis-1,4-poliisopreno)
OER	Caucho extendido con aceite
OPR	Caucho de óxido de propileno
PA	Poliamida (PA 6.6 = poliamida 6.6 = nylon 6.6)
PAI	Poliamida-imida

PAMS	Poli(α -metilestireno)
PAN	Poliacrilonitrilo (fibra)
PARA	Poli(arilamida)
PB	Poli(1-buteno)
PBI	Poli(benzimidazoles)
PBMA	Poli(n-butilmetacrilato)
PBR	Copolímero de butadieno-vinilpiridina
PBS	Copolímero de butadieno-estireno
PBT/PBTP	Poli(butilen-terftalato)
PC/PCO	Policarbonato
PCD	Poli(carbodiimida)
PCTFE	Poli(clorotrifluoretileno)
PDAP	Poli(dialil-ftalato)
PDMS	Poli(dimetilsiloxano)
PE	Polietileno
PEA	Poli(acrilato de etilo)
PEC	Polietileno clorado
PEEK	Poli(ariléter cetona)
PEI	Poli(éterimida)
PEO/PEOX	Poli(óxido de etileno)
PEP	Polímero de etileno-propileno
PEPA	Copolímero de bloque poliéter-poliamida
PES	Poliétersulfona
PET/PETP	Poli(etilentereftalato)
PF	Resina de fenol-formaldehído
PFA	Resinas perflúor-alcoxi
PFEP	Copolímero de tetrafluoretileno-hexafluorpropileno; FEP
PI	Poliimida
PIB	Poliisobutileno
PIBI	Copolímero de isobuteno-isopreno; caucho butílico
PIBO	Poli(óxido de isobutileno)
PIP	Cis-1,4-poliisopreno sintético
PIR	Poliisocianurato
PMA	Poli(acrilato de metilo)
PMMA	Poli(metacrilato de metilo)
PMMI	Polipirometilimida
PMP	Poli(4-met il-1 -penteno)
PO	Poli(óxido de propileno)/poliolefinas/resinas fenoxi
POM	Polióxido de metileno/poliformaldehido
POP	Poli(óxido de fenileno)
PP	Polipropileno
PPA	Poliácido acrílico
PPC	Polipropileno clorado

PPE	Poli(éter de fenileno)
PPMS	Poli(parametilestireno)
PPO	Poli(óxido de fenileno)
PPOX	Poli(óxido de propileno)
PPS	Poli(sulfuro de fenileno)
PPSU	Poli(fenilensulfona)
PPT	Poli(propilenterftalato)
PS	Poliestireno
PSB	Caucho de estireno-butadieno
PSF/PSO	Polisulfona
PSU	Poli(fenilensulfona)
PTFE	Poli(tetrafluoretileno) (teflón)
P3FE	Poli(trifluor etileno)
PTNT	Poli(tetrametilen-terftalato) = poli(butilen-terftalato)
PUR	Poliuretano
PVA/PVAC	Poli(acetato de vinilo)
PVAL	Poli(alcohol vinílico = PVOH)
PVB	Poli(vinil-butiral)
PVC	Poli(cloruro de vinilo)
PVCA	Copolímero de cloruro de vinilo-acetato de vinilo= PVCAC
PVCC	Poli(cloruro de vinilo) clorado
PVDC	Poli(cloruro de vinilideno)
PVDF	Poli(fluoruro de vinilideno)
PVF	Poli(fluoruro de vinilo)
PVFM	Poli(vinilformal) = PVFO
PVI	Poli(vinil-isobutil-éter)
PVK	Poli(N-vinil-carbazol)
PVP	Poli(N-vinil-pirrolidona)
PRF	Resina de resorcinol-formaldehído
SAN	Copolímero de estireno-acrilonitrilo
SB	Copolímero de estireno-butadieno
SBR	Caucho de estireno-butadieno
SCR	Caucho de estireno-cloropreno
S-EPDM	Terpolímeros de etileno-propileno-dieno sulfonados
SHIPS	Poliestireno de impacto súper elevado
SI	Resinas de silicona; poli(dimetil-siloxano)
SIR	Caucho de estireno-isopreno
SMA	Copolímero de estireno-anhídrido maleico
SMS	Copolímero de estireno-n-metilestireno
TPE	Elastómero termoplástico
TPR	1,5-trans-poli(pentámero)
TPU	Poliuretano termoplástico
TPX	Poli(metilpenteno)

UF	Resinas de urea-formaldehído
UHMW-PE	Poliétileno de peso molecular ultra elevado/UHMPE (masa molecular por encima de 3×10^6 g/mol)
UP	Poliéster insaturado
VC/E	Copolímero de cloruro de vinilo-etileno
VC/E/VA	Copolímero de cloruro de vinilo-etileno-acetato de vinilo
VC/MA	Copolímero de cloruro de vinilo-acrilato de metilo
VC/MMA	Copolímero de cloruro de vinilo-metacrilato de metilo
VC/OA	Cloruro de vinilo-acrilato de octilo
VC/VAC	Copolímero de cloruro de vinilo-acetato de vinilo
VC/VDC	Cloruro de vinilo-cloruro de vinilideno
VF	Fibra vulcanizada
XLPE	Poliétileno entrecruzado
XPS	Poliestireno expandido

Anexo B: Comparación de Propiedades para Algunos Plásticos de Uso Común

Tabla 35.

Comparación de Propiedades para Algunos Plásticos de Uso Común.

Types of Polymers	Specific Gravity	Tensile Modulus @ 73 °F (Mpsi)	Tensile Strength @ Yield (Kpsi)	Notch Izod Impact @ 73 °F (ft-lb/in)	Continue Expose Temperature (°F)	Processing Temperature (°F)	Flammability UL-94	Dielectric Strength (Vol/Mil)	Dissipation Factor @ 1.0 × 10 ⁶ Hz
ABS Unreinforced	1.05	0.30	5.00	2.50 12.00	167 185	410 518	HB	350 500	0.03 0.04
Acrylic Unreinforced	1.17	0.38	7.50	0.03 0.50	150 190	410 575	HB	450 530	0.09
Acetal Unreinforced	1.42	0.100	10.00	1.30	195 230	375 450	HB	560	0.005
HDPE Polyethylene Unreinforced	0.94	0.20	3.50	No Break	158 176	400 535	HB V2	450 500	0.0005
PP Polypropylene Homo Unfilled	0.90	0.17	4.00	0.50 20.00	212	390 525	HB V2	450 600	0.002
PS Polystyrene Unfilled	1.05	0.45	6.00	0.25 0.60	122 158	390 480	HB V2	300 600	0.004 0.0020
PVC Polyvinyl Chloride Rigid	1.38	0.35	5.90	0.40 20.00	150 185	365 400	HB V1	600 800	0.115
PC – 30% Fiber Glass	1.40	1.25	19.00	1.70 3.00	220 265	430 620	V1 V2	450	0.001
PPO – 30% Fiber Glass	1.25	1.10	14.50	1.70 2.30	200 240	520 600	HB V0	550 630	...
PBT – 30% Fiber Glass	1.53	1.35	17.50	0.90	200 250	470 530	HB V0	750	0.004
PET – 30% Fiber Glass	1.67	1.50	22.0	1.60	392	510 565	V0 5V	430	0.002
LCP – 30% Fiber Glass	1.62	2.25	23.00	1.30	430 465	660 680	V0 5V	640 1,000	0.0019
HTN – 30% Fiber Glass @ 73 °F – 50% RH	1.44	1.50	32.00	1.80	315	580 620	V2 V0	500	0.004
Nylon 6/6 – 33% GR @ 73 °F & 50% RH	1.38	0.90	18.00	2.50	265	530 580	HB V2	400	0.006
PEI – 30% Fiber Glass	1.50	1.30	24.50	1.90	356 390	640 800	V0	495 630	0.0025
PPS - 30% Fiber Glass	1.38	1.70	22.0	1.10	390 450	600 750	V0 5V	450	0.0014
PSU – 30% Fiber Glass	1.46	1.35	14.50	1.10	350 375	600 715	V0 5V	450	0.002
DAP – (TS) Fiber Glass	1.94	1.40	7.50	1.00	390 430	290 350	V1 V0	400 450	0.011 0.017
(EP) Epoxy – (TS) Fiber Glass	1.84	3.00	18.00	0.50	350 4450	300 430	HB V0	380 400	0.02 0.05
(PF) Phenolic – (TS) Fiber Glass	1.74 1.88	1.90 2.28	6.50 10.00	0.75 0.90	350 450	330 390	V1 V0	300	0.03
(UP) Polyester – (TS) Fiber Glass	1.75 1.90	1.90 2.00	10.50 15.00	0.50 18.00	200 250	170 320	V0 5V	450 530	0.01 0.04
(PI) Polyimide – (TS) Graphite Fiber	1.65	0.70	7.50	0.70	600 740	690	V0 5V	500 560	0.010 0.003

Anexo C: Stacks Molds.

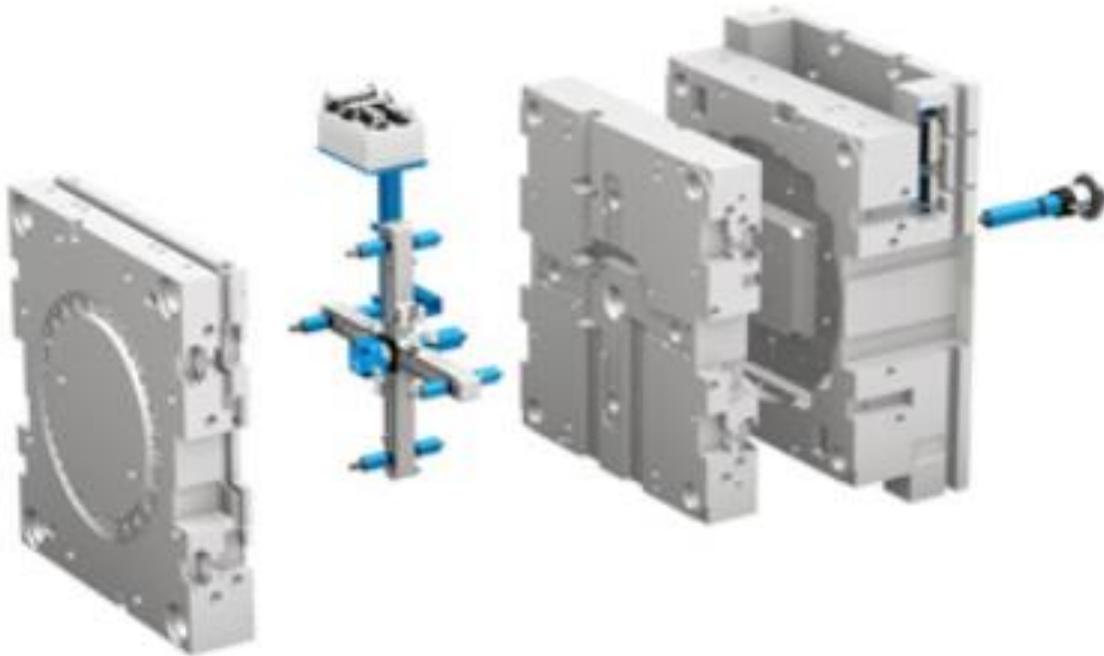


Figura 400. Imagen de referencia para un molde de pisos. ([Mold Hotrunner Solutions Inc.](#), 2018).

Se presentan videos y figuras ilustrativas del sistema (ver Figura 394 a Figura 397). En caso de querer profundiza en el tema ver el siguiente [enlace](#). También se recomiendan los siguientes vídeos [Molde con apertura de manivelas](#) (Progressive Components, 2019) y [Molde de pisos con desenrosque](#) (Husky, 2017).

Anexo D: Profundidad de Ventilación H al Borde de Cavidad para Tipos Comunes de Resinas

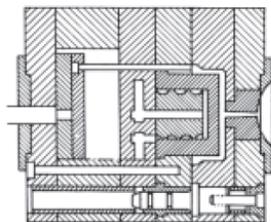
Tabla 36.*Profundidad de Ventilación H al Borde de Cavidad para Tipos Comunes de Resinas.*

Resin	Depth "H" (in)
Acetal	0.001–0.002
ABS	0.002–0.003
Acrylic	0.002–0.003
Nylon unfilled	0.0005–0.001
Nylon glass reinforced	0.0007–0.0015
Nylon mineral reinforced	0.001–0.002
LCP glass reinforced	0.0003–0.0007
PC	0.0015–0.003
PE	0.001–0.002
PP	0.001–0.002
PS	0.001–0.002
PPO	0.001–0.003
PSU	0.001–0.002
PET glass reinforced	0.001–0.0015
PVC rigid	0.001–0.003
PVC flexible	0.001–0.002
PVC flexible	0.001–0.002
Surlyn	0.001–0.002

Campo, 2006, p.678.

Anexo E: **Materiales Recomendados para Moldes Marca Uddeholm®-Assab®**. [Ver en línea](#)

ACERO PARA MOLDES DE PLASTICO



Calidad Uddeholm	Descripción/Aplicaciones
IMPAX SUPREME	Acero al Ni-Cr-Mo pretemplado, suministrado a 290–330 HB con excelentes características de pulido y de foto-grabado. Apropiado para una amplia gama de moldes de inyección, moldes de soplado y troqueles extrusores.
NIMAX	Acero de bajo carbono suministrado a 360–400 HB. Excelente maquinabilidad y aptitud para trabajos de soldadura. Buena tenacidad, pulibilidad y aptitud para el grabado de texturas.
STAVAX ESR	Acero inoxidable para moldes con buena templabilidad y pulibilidad, resistencia a la corrosión y al desgaste excelentes. Recomendado par moldes pequeños y medianos.
MIRRAX ESR	Acero de temple resistente a la corrosión con muy buena pulibilidad. Recomendado para moldes medianos y grandes.
POLMAX	Acero inoxidable para moldes resistente a la corrosión que cuenta con una aptitud de pulido excelente.

28

ALUMEC	Aleación de aluminio de alta resistencia suministrado a 160 HB. Recomendado para moldes prototipo y para cortas series de fabricación con bajos requisitos en resistencia y resistencia al desgaste.
MOLDMAX HH	Aleación de cobre berilio de alta resistencia para moldes, suministrado a 40 HRC.
MOLDMAX XL	Aleación de Níquel-Estaño-Cobre de alta resistencia suministrada a aprox 30 HRC. Las diversas aleaciones de Moldmax son materiales adecuados para distintas situaciones en moldes donde se requiera una combinación de alta conductividad térmica, resistencia a la corrosión y buena capacidad de pulido.

Para más información ver la publicación de Uddeholm «Acero para Moldes de Plástico».

Guía comparativa de propiedades de aceros para moldes de plástico

Calidad Uddeholm	Mecanibilidad*	Resistencia al desgaste	Pulibilidad	Resistencia a la corrosión
IMPAX SUPREME	██████████	██████████	██████████	██████████
NIMAX	██████████	██████████	██████████	██████████
STAVAX ESR	██████████	██████████	██████████	██████████
MIRRAX ESR	██████████	██████████	██████████	██████████
UNIMAX	██████████	██████████	██████████	██████████
POLMAX	██████████	██████████	██████████	██████████
CORRAX	██████████	██████████	██████████	██████████
ORVAR SUPREME	██████████	██████████	██████████	██████████
RIGOR	██████████	██████████	██████████	██████████
ELMAX	██████████	██████████	██████████	██████████
VANADIS 4 EXTRA	██████████	██████████	██████████	██████████
VANADIS 6	██████████	██████████	██████████	██████████
VANADIS 10	██████████	██████████	██████████	██████████
VANCRON 40	██████████	██████████	██████████	██████████
HOLDAX	██████████	██████████	██████████	██████████
RAMAX HH	██████████	██████████	██████████	██████████

* Impax Supreme, Nimax, Holdax y Ramax HH probados en estado bonificado. Corrax se ha probado en solución tratada.

30

UNIMAX	Acero con muy buena templabilidad adecuado para el recubrimiento de superficies. Excelente combinación de resistencia al desgaste y tenacidad. Recomendado para largas series de producción y para moldeado de plásticos reforzados.
CORRAX	Acero de temple por precipitación que cuenta con una resistencia a la corrosión extremadamente buena.
ORVAR SUPREME	Acero para moldes y matrices, al (5% Cr). Buena templabilidad, dotado de gran estabilidad, buena pulibilidad y resistencia al desgaste.
RIGOR	Acero de gran templabilidad, recomendado para series de producción prolongadas de piezas moldeadas complicadas y de reducidas proporciones, p. ej. piezas electrónicas.
ELMAX VANADIS 4 EXTRA VANADIS 6 VANADIS 10	Aceros para moldes fabricados pulvimetalúrgicamente que se caracterizan por su buena estabilidad dimensional buena pulibilidad y resistencia al desgaste. Uddeholm Elmax es resistente a la corrosión, Uddeholm Vanadis 4 Extra cuenta con la más alta tenacidad, mecanibilidad y conductividad térmica y Uddeholm Vanadis 10 la mejor resistencia al desgaste. Recomendados para piezas complicadas y/o plásticos abrasivos.
VANCRON40	Uddeholm Vancron 40 es una buena alternativa al recubrimiento de superficie para reducir los problemas de adherencias, el desgaste adhesivo y reducir la fricción. Cuenta también con una alta capacidad de pulido.
HOLDAX	Acero pretemplado (bonificado) con excelente mecanibilidad y elevada resistencia a la tracción (~1000 N/mm ²). 340 HB.
RAMAX HH	Acero para portamoldes resistente a la corrosión con buena capacidad de mecanizado y alta resistencia. Suministrado a ~340 HB.

Cont.

29

SELECCION DE MATERIAL PARA MOLDES DE PLASTICO

Recomendaciones generales

Proceso	Material	Recomendaciones Calidad Uddeholm	Dureza HRC (HB)
Moldeado por inyección	Plásticos termoestables – acero pretemplado para moldes	ALUMEC IMPAX SUPREME NIMAX	(~160) 33(~310) ~380
	– acero de temple en profundidad	CORRAX ORVAR SUPREME STAVAX ESR MIRRAX ESR UNIMAX POLMAX ELMAX VANADIS 4 EXTRA VANADIS 6	36–50 45–52 45–52 45–50 50–58 45–52 58–60 58–62 60–64
	Plásticos termoestables	UNIMAX RIGOR, ELMAX VANADIS 4 EXTRA VANADIS 6	52–58 58–60 58–62 60–64
Moldeado por compresión/transferecia	Plásticos termoestables	UNIMAX STAVAX ESR MIRRAX ESR ORVAR SUPREME ELMAX VANADIS 4 EXTRA VANADIS 6	52–58 45–52 45–50 45–52 58–60 58–62 60–64
Moldeado-por soplado	General	ALUMEC IMPAX SUPREME NIMAX	(~160) 33(~310) ~380
	PVC	STAVAX ESR MIRRAX ESR RAMAX HH CORRAX	45–52 45–50 37(~340) 36–50

Cont.

31

Recomendaciones generales

Proceso	Material	Recomendaciones	
		Calidad Uddeholm	Dureza HRC (HB)
Extrusión	General	IMPAX SUPREME NIMAX	33(~310) ~380
	PVC	STAVAX ESR MIRRAX ESR RAMAX HH CORRAX	45-52 45-50 37(~340) 36-50

Recomendaciones especiales

Requisito o exigencia especiales	Ejemplo	Recomendaciones	
		Calidad Uddeholm	Dureza HRC (HB)
Moldes de gran tamaño	Componentes automovilísticos incluyendo paneles, parachoques, tableros de instrumentos, etc.	ALUMEC IMPAX SUPREME NIMAX CORRAX ORVAR SUPREME MIRRAX ESR	(~160) 33(~310) ~380 36-46 36-50 36-50
	Como anterior, pero con escasas exigencias de acabado superficial	HOLDAX RAMAXHH	33(~310) 37(~340)
Acabado superficial elevado	Moldes de piezas ópticas/médicas, cubiertas transparentes/paneles	STAVAX ESR MIRRAX ESR UNIMAX POLMAX ELMAX VANADIS 4 EXTRA ORVAR SUPREME	45-52 45-50 50-58 45-52 58-60 58-62 45-52
Diseños complicados	1. Para componentes grandes sector doméstico/automoción	IMPAX SUPREME NIMAX CORRAX MIRRAX ESR	33(~310) ~380 34-46 36-50
	2. Piezas pequeñas con bajas exigencias de desgaste	IMPAX SUPREME NIMAX CORRAX	33(~310) ~380 34-46

32

Requisito o exigencia especiales	Ejemplo	Recomendaciones	
		Calidad Uddeholm	Dureza HRC (HB)
Diseños complicados	3. Para piezas pequeñas con altos requisitos en resistencia, piezas moldeadas, eléctricas/electrónicas	RIGOR ORVAR SUPREME STAVAX ESR MIRRAX ESR UNIMAX ELMAX VANADIS 4 EXTRA VANADIS 6	60-62 50-52 50-52 50-50 56-58 58-60 58-62 60-64
Materiales de moldeo abrasivos	Materiales de moldeo reforzados/con carga abrasiva	RIGOR ORVAR SUPREME STAVAX ESR MIRRAX ESR UNIMAX ELMAX VANADIS 4 EXTRA VANADIS 6	58-62 50-52 50-52 50-50 56-58 58-60 58-62 60-64
Largas series de producción	Piezas termoplásticas, incluyendo cubiertos, contenedores y envases de un sólo uso	STAVAX ESR MIRRAX ESR UNIMAX ORVAR SUPREME ELMAX VANADIS 4 EXTRA VANADIS 6	45-52 45-50 52-58 45-52 58-60 58-62 60-64
Resistencia a la corrosión	1. Materiales corrosivos de moldeo, incluyendo el cloruro polivinílico 2. Condiciones húmedas de producción/almacenaje del molde 3. Resistencia general a la descoloración/oxidación 4. Resistencia a la corrosión de los canales de refrigeración	ELMAX STAVAX ESR MIRRAX ESR RAMAX HH (holders) CORRAX	58-60 45-52 45-50 37(~340) 34-50

Cont.

33

Recomendaciones especiales

Requisito o exigencia especiales	Ejemplo	Recomendaciones	
		Calidad Uddeholm	Dureza HRC (HB)
Fotograbado	1. Acero pretemplado (bonificado)	IMPAX SUPREME NIMAX	33(~310) ~380
	2. Acero de gran templabilidad	ORVAR SUPREME STAVAX ESR MIRRAX ESR UNIMAX ELMAX VANADIS 4 EXTRA VANADIS 6	45-52 45-52 45-50 50-58 58-60 58-62 60-64
Alta conductividad térmica	Para moldes de soplado e inyección núcleos e insertos. Piezas para sistemas de transferencia de calor.	MOLDMAX XL MOLDMAX HH	~30 ~40

MOLDMAX y PROTHERM son marcas registradas de Brush Wellman Inc. Cleveland, Ohio.

Figura 401. Materiales Recomendados para Moldes Marca Uddeholm®-Assab®. (Uddeholm, 2009).

Anexo G: Propiedades de Procesamiento de Algunos Materiales Plásticos

Tabla 37.*Propiedades de Procesamiento de Algunos Materiales Plásticos.*

				Propiedades de materiales								
Familia	Densidad Temperatura. Inyeccion [g/cm3]	Densidad Temperatura ambiente [g/cm3]	T° DE SECADO [°C]	Tiempo de secado [h]	T° de servicio [°C]	T° de servicio máxima [°C]	T° de inyección [°C]	T° de molde [°C]	T° de expulsión [°C]	T° Máxima de inyección [°C]	Contracción estimada [%]	
Semi cristalinos	PEAD	0,74	0,95	N/A	N/A	70/80	90/100	180/250	20/60	55	280	1,0/2,0
	PEBD	0,76	0,91	N/A	N/A	60	80	180/220	20/60	45	280	2,0/3,0
	PP	0,76	0,90	N/A	N/A	85	71/115	180/240	10/60	80	300	1,2/1,7
	PA6	0,96	1,11	75/85	2/8	80/100	140/180	230/280	80/90	80	320	0,08/1,5
	PA66	0,96	1,11	60/80	2/8	80/120	170/200	260/300	60/80	80	360	1,0/2,0
	PBT	1,05	1,31	110/140	2/8	80	180	240/260	40/80	75	290	1,5/2,0
	POM	1,15	1,41	80/120	4	90/110	110/150	190/210	50/100	90	240	2,0/3,5
Amorfos	HIPS	0,95	1,04	N/A	N/A	50/70	60/90	200/260	20/60	40	280	0,4/0,7
	PS	0,95	1,04	60/80	1/3	50/80	60/100	180/260	20/70	40	275	0,4/0,7
	ABS	0,93	1,05	80/100	2/6	75/85	85/100	220/260	40/80	85	280	0,4/0,8
	SAN	0,97	1,08	80	1/4	90	105	220/260	40/80	60	280	0,3/0,7
	PC	1,22	1,33	120	2/12	120	100/138	280/320	80/120	90	320	0,2/0,8

Elaboración propia.

Anexo H: Ejemplo de Descripción de Aperturas de un Sistema Simple de Expulsión de Molde

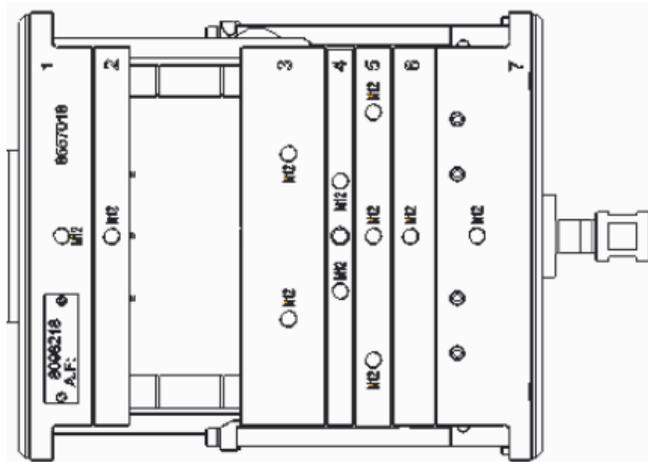
ETAPAS DURANTE LA APERTURA DE UN MOLDE:

TIPO DE MOLDE:

COLADA FRÍA
 8 CAVIDADES
 EXPULSIÓN POR BUJES
 SISTEMA DE EXPULSIÓN SIMPLE

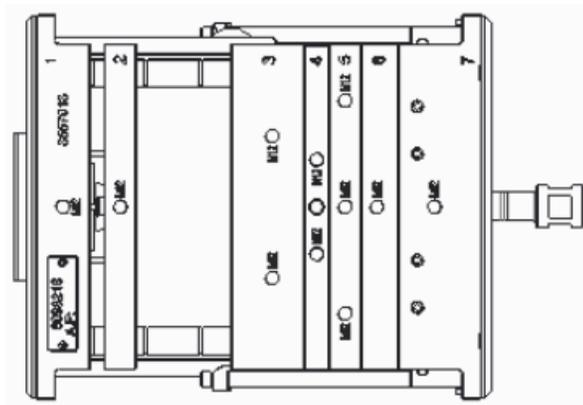
ETAPA 1:

Se separan las placas 2 y 3 por acción de los klinken, desprendiendo el punto de inyección del artículo y desmoldeando la rama.



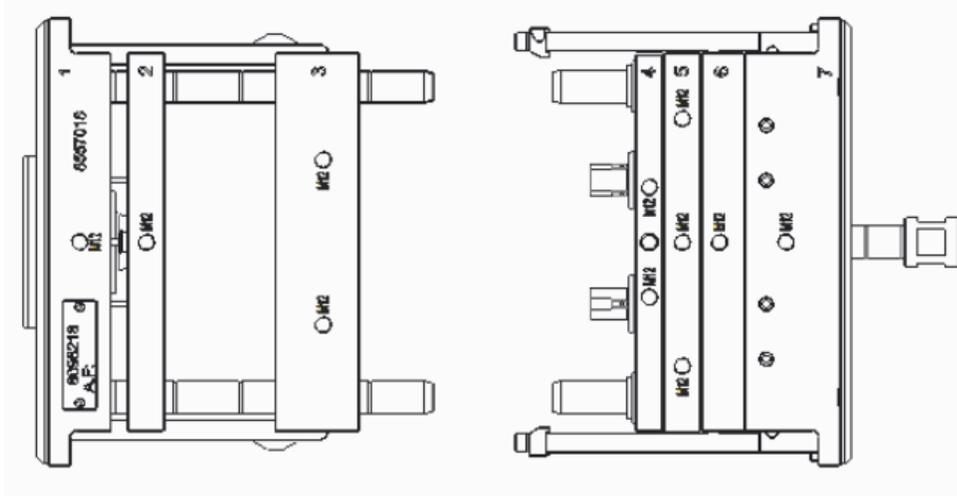
ETAPA 2:

Se separan las placas 1 y 2 para sacar la rama de los pines retenedores, la rama debe caer en esta apertura. Se desactivan los klinken principales.

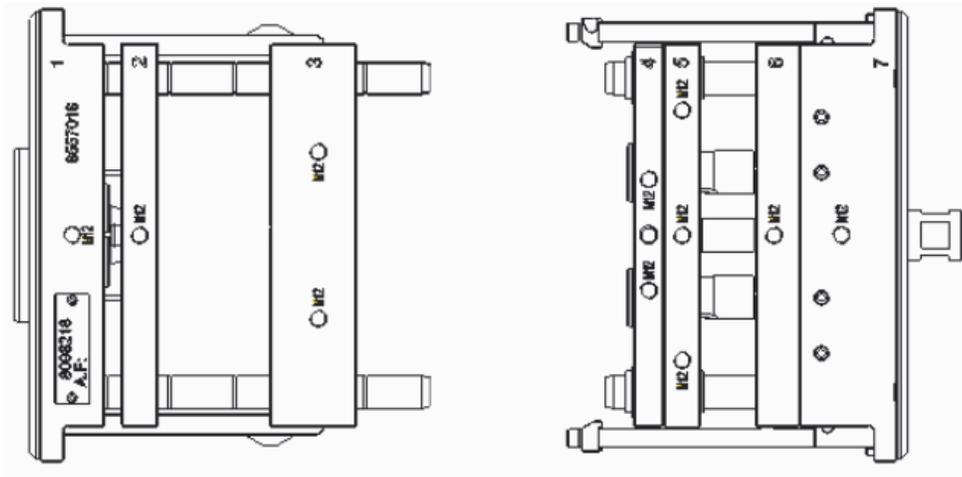


ETAPA 3:

Se separan las placas 3 y 4 para desmoldear los artículos de las hembras.

**ETAPA 4:**

Se activa el sistema de expulsión de la máquina y separa las placas 5 y 6. El artículo cae entre las placas 3 y 4.



Elaboración propia.