



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**EVALUACION EXPERIMENTAL DE
PARAMETROS DE CORTE PARA EL POLIMERO
UHMW-PE DURANTE EL FRESADO**

Autor(es)

Carolina Bedoya Molina

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería
Mecánica

Medellín, Colombia

2020



Evaluación experimental de parámetros de corte para el polímero UHMW-PE durante el
fresado

Carolina Bedoya Molina

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera mecánica

Asesores (a):
Ricardo Moreno Sánchez
PhD. en Mecatrónica. M.Sc. en Ingeniería

Línea de Investigación:
Manufactura y procesos

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica
Medellín, Colombia
2020.

CONTENIDO

CONTENIDO	3
1 RESUMEN.	6
2 INTRODUCCIÓN.	6
3 OBJETIVOS.	7
3.1 Objetivo general:	7
3.2 Objetivos específicos:.....	7
4 EMPAQUETADURAS Y EMPAQUES S.A.	8
4.1 Política de gestión integral.	8
4.2 Gestión de calidad.....	9
4.3 Direccionamiento estratégico.	9
4.3.1 Nuestro sueño.....	9
4.3.2 Nuestra razón de ser.	9
4.3.3 Nuestros valores.	9
4.4 Productos.	9
5 MARCO TEÓRICO.....	10
6 METODOLOGÍA.....	13
6.1 Definición del problema.	13
6.2 Estado del arte.	15
6.2.1 Mecanizado de polímeros.....	15
6.2.2 Geometría de la probeta.	17
6.2.3 Programación.....	18
6.2.4 Herramientas.	20
6.2.5 Tipo de operación de mecanizado.	21
6.3 Diseño experimental.....	22
6.4 Parámetros.....	25
7 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	27
7.1 Procedimiento de montaje y toma de datos.	27
7.1.1 Configuración del software.	28
7.2 Análisis por herramienta.....	30
7.2.1 Herramienta 1/4 in.	30
7.2.2 Herramienta 1/2 in.	37
7.3 Análisis del consumo energético.	44
7.4 Análisis del acabado superficial	46
7.4.1 Análisis de acabado superficial para la herramienta de 1/4in.	47
7.4.2 Análisis de acabado superficial para la herramienta de 1/2 in.	53

7.4.3	Dispositivo para el control calidad del acabado superficial.....	58
8	CONCLUSIONES.....	61
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
10	ANEXOS.....	64
10.1	Anexo 1.....	64
10.1.1	Programa para probeta de 50mm X 50mm.....	64
10.1.2	Programa para probeta de 60mm X 50mm.....	64
10.2	Anexo 2.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Propiedades del polímero UHMW-PE (Quadrant, 2011).....	17
Figura 2.	Geometría general de la probeta.....	18
Figura 3.	Encabezado de un programa en código G.....	19
Figura 4.	Herramientas de dos filos (TMX, 2013).....	20
Figura 5.	Esquema operación de contorno (Groover, 2010).....	22
Figura 6.	Distribución del diseño experimental.....	25
Figura 7.	Placa informativa Milltronics VM15XT.....	25
Figura 8.	Especificaciones Milltronics VM15XT.....	26
Figura 9.	Fundamentos teóricos para la realización de los cálculos. («Ullmann's Polymers and Plastics - Products and Processes», 2016).....	26
Figura 10.	Ecuaciones para calcular la tasa de remoción de material en un proceso de mecanizado. (Oberg et al., 2016).....	27
Figura 11.	Interfaz de configuración del software.....	28
Figura 12.	Esquema general de procedimiento de medición (<i>Draw.io</i> , s. f.).....	29
Figura 13.	Esquema de montaje y conexión del sensor en la máquina (<i>GrabCAD</i> , 2013, Adaptado).....	29
Figura 14.	Especificaciones técnicas microscopio USB digital 8 leds x 1000. (Eneka, 2020).....	47
Figura 15.	Marca del filo inicial de la herramienta de 1/4 in, prueba 12.....	52
Figura 16.	Diferencia en el acabado superficial para la herramienta 1/4 in. (a) Prueba 8, (b) Prueba 12.....	52
Figura 17.	Diferencia en el acabado superficial para la herramienta 1/4 in. (a) Prueba 2, (b) Prueba 6.....	53
Figura 18.	Diferencia en el acabado superficial para la herramienta 1/2 in. (a) Prueba 8, (b) Prueba 12.....	58
Figura 19.	Diferencia en el acabado superficial para la herramienta 1/2 in. (a) Prueba 2, (b) Prueba 6.....	58
Figura 20.	Esquema del dispositivo para control de calidad del acabado superficial.	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los metales mecanizados según su dureza.	14
Tabla 2. Clasificación de los polímeros mecanizados según la densidad.	15
Tabla 3. Herramientas empleadas en el proceso de mecanizado de desbaste.....	21
Tabla 4. Parámetros del área de programación.	23
Tabla 5. Parámetros operarios.	23
Tabla 6. Cálculo de parámetros teórico.	27
Tabla 7. Consolidado de información de entrada e información obtenida en cada prueba para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).	31
Tabla 8. Análisis de Varianza para la ACELERACION RMS- (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).....	32
Tabla 9. Tabla de Medias (Mínimos Cuadrados) para ACELERACION RMS para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).	32
Tabla 10. Análisis de Varianza para ACELERACION RMS – (Suma de Cuadrados). Interacción entre factores para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).	34
Tabla 11. Análisis de Varianza para AMPERAJE – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).	35
Tabla 12. Tabla de Medias (Mínimos Cuadrados) para AMPERAJE para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).....	36
Tabla 13. Análisis de Varianza para AMPERAJE – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).....	37
Tabla 14. Consolidado de información de entrada e información obtenida encada prueba para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).	38
Tabla 15. Análisis de Varianza para ACELERACION RMS – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).....	39
Tabla 16. Tabla de Medias (Mínimos Cuadrados) para ACELERACION RMS para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).....	39
Tabla 17. Análisis de Varianza para ACELERACION RMS – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).....	41
Tabla 18. Análisis de Varianza para AMPERAJE – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).....	41
Tabla 19. Tabla de Medias (Mínimos Cuadrados) para AMPERAJE para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).....	42
Tabla 20. Análisis de Varianza para AMPERAJE – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).....	43
Tabla 21. Relación de costo energético para la herramienta 1/4 in.	45
Tabla 22. Relación de costo energético para la herramienta 1/2 in.	46
Tabla 23. Compilado de fotografías para la herramienta de 1/4 in.	48
Tabla 24. Compilado de fotografías para la herramienta de 1/2 in.	53

EVALUACION EXPERIMENTAL DE PARAMETROS DE CORTE PARA EL POLIMERO UHMW-PE DURANTE EL FRESADO

1 RESUMEN.

En Empaquetaduras y Empaques S. A., se tiene una planta de producción completa que fabrica piezas en polímeros, cauchos, poliuretanos y elastómeros para industrias como: minera, papelera, cementera, alimenticia, automotriz, farmacéutica, metalmecánica, entre otras. Todos los materiales mencionados se deben manejar con las respectivas especificaciones para diseños de ingeniería. Una de las líneas de producción se dedica al mecanizado de los polímeros de ingeniería siendo el UHMW-PE el de mayor rotación, la empresa quiere revisar la selección de los parámetros de corte adecuados, ya que existen distintos criterios en las áreas de diseño y producción, debido a esto, en ocasiones se consume más tiempo de producción por la necesidad de modificar los parámetros de corte o la ubicación de las herramientas en el carrusel; por esta razón se realizó un diseño experimental que permitiera optimizar los parámetros de corte en la operación de contorno y reducir el consumo de tiempo sin bajar los márgenes de calidad en el acabado superficial establecidos teniendo como factores: velocidad de giro del husillo (RPM), avance (mm/min), profundidad de corte (mm); como variables dependientes: valor RMS de velocidad, valor RMS de aceleración, amperaje y como variables de control: tiempo de medición de la vibración, tipo de material, tipo de operación de maquinado, con base en las mediciones de las vibraciones presentes en la máquina durante su operación.

2 INTRODUCCIÓN.

Empaquetaduras y empaques S. A. es una empresa que se destaca en la industria de los sellos, sin embargo, no es la única área del mercado en la que destaca; posee una planta de producción con diferentes procesos de manufactura entre los cuales se destaca el mecanizado, quiere revisar la selección de los parámetros de corte adecuados, ya que existen distintos criterios en las áreas de diseño y producción, por esta razón, se realizó con el material de mayor flujo o rotación, un diseño experimental para la selección de los parámetros adecuados de mecanizado en la operación de fresado por contorno para dicho material. Fue necesario seleccionar un solo material debido a la gran variedad de herramientas y polímeros que la empresa mecaniza y teniendo en cuenta el tiempo disponible, todo esto con el fin de dar comienzo a la estandarización de los parámetros de corte. Además, se analizaron las vibraciones mecánicas que tiene la máquina para observar cómo está funcionando y qué posibles fallas o situaciones tenga que influyan en el resultado del mecanizado, sirviendo, así como un diagnóstico.

La realización de este diseño experimental empleando como factores: velocidad de giro del husillo (RPM), avance (mm/min), profundidad de corte (mm); como variables dependientes: valor RMS de velocidad, valor RMS de aceleración, amperaje y como variables de control: tiempo de medición de la vibración, tipo de material, tipo de operación de maquinado. Todo esto influye directamente en los tiempos de fabricación y productividad e incluso puede influir en el consumo energético de la empresa. La aplicación de los resultados de esta investigación además de comenzar a reducir las modificaciones que debe realizar el operario al código de programación de la máquina de control numérico antes de iniciar la operación, también se tienen en cuenta factores externos como la ubicación de las herramientas empleadas en el programa dentro del carrusel, pues esta ubicación influye en la cantidad de tiempo que requiere el carrusel para ubicar la herramienta requerida y este análisis experimental de un material específico permite dejar el procedimiento para que la evaluación del proceso se pueda seguir realizando en la empresa a otros materiales y herramientas.

3 OBJETIVOS.

3.1 Objetivo general:

Elaborar un diseño experimental para evaluar las variables de corte para el material de mayor flujo o rotación que tiene la empresa, empleando diferentes herramientas teniendo en cuenta los tiempos de fabricación, la vida de las máquinas y herramientas y la calidad del mecanizado.

3.2 Objetivos específicos:

- Probar diferentes combinaciones de parámetros de corte para el material de mayor rotación en Empaquetaduras y Empaques S.A. para establecer rangos adecuados de operación.
- Caracterizar las condiciones adecuadas de trabajo de dos de las herramientas más usadas con el material de mayor rotación.
- Realizar mediciones de vibraciones mecánicas a las máquinas para comparar cuales estados ayudarían a generar mejores acabados en las piezas y menor desgaste en las herramientas.
- Analizar los resultados obtenidos con los rangos de operación sugeridos por la planta de producción y por el departamento de diseño.

4 EMPAQUETADURAS Y EMPAQUES S.A.

Empaquetaduras y Empaques S.A. fundada en el año 1975 tiene 45 años trayectoria en el mercado y se especializa en el sellado de fluidos, obteniendo un notable reconocimiento a nivel nacional y latinoamericano por su seriedad y por su amplia gama de productos. Es un distribuidor directo de marcas como la multinacional 3M, Dupont, MSA, Ansell, Rema Tip Top, Quadrant, Donit, Thermal Ceramics, Colombiana Kimberly, Magnaflux, Globe, entre otras y a nivel nacional somos distribuidores de los productos CRC, Electrowest, WD 40, SEALCO, entre otros. Dentro de su proceso tiene áreas que intervienen en la fabricación del producto las cuales son: diseño, producción y comercialización de piezas en caucho, poliuretano, plásticos de ingeniería y fibras para uso industrial. Comercialización de productos para protección personal, sellado de fluidos y mantenimiento industrial. Adicionalmente, cuenta con instructores especializados bajo Norma NFPA 472 en el manejo de sustancias peligrosas, rescate, trabajos en altura y bomberotecnia. (E&E, 2019)

4.1 Política de gestión integral.

Compañía especializada en soluciones integrales para la industria, comprometida con la calidad, el uso racional de los recursos naturales, el cuidado a la propiedad, protección y bienestar del personal y las partes interesadas.

La organización, a través de la administración de los recursos necesarios para el desarrollo del Sistema de Gestión Integral, se compromete a:

- Satisfacer las expectativas de los clientes y demás partes interesadas.
- Gestionar ambientes de trabajo seguros y saludables, a través de la identificación de peligros, análisis y valoración de los riesgos, priorizando aquellos de mayor impacto en la empresa (mecánico, biomecánico y químico), generando medidas de prevención y control, con el fin de prevenir y disminuir los Accidentes de Trabajo y las Enfermedades Laborales.
- Implementar y mantener las disposiciones necesarias en materia de prevención, preparación y respuesta ante emergencias, incluidas las partes interesadas
- Respetar el desarrollo de la libre personalidad, promoviendo un ambiente de trabajo y vida sana para sus integrantes, desestimulando el consumo de alcohol, sustancias psicoactivas y tabaco, y desarrollando estrategias permanentes hacia la práctica de actividades que mejoren la calidad de vida integral.
- Administrar los aspectos e impactos ambientales de las actividades, productos y servicios, estableciendo mecanismos de medición y seguimiento a las estrategias de control ambiental
- Fomentar la responsabilidad social con las partes interesadas y respetar los derechos humanos rechazando todo hecho de racismo y discriminación a las personas por su raza, religión, sexo, ideología entendiendo la igualdad de derecho para todos.

- Dar cumplimiento a los requisitos legales y de otra índole aplicable a la actividad económica de la organización, y en concordancia a la legislación Colombiana Vigente.
- Mantener una política basada en principios de mejoramiento continuo para lograr la eficiencia de nuestro Sistema de Gestión.

4.2 Gestión de calidad.

Se trabaja bajo los parámetros ISO 9001 versión 2015, para lo cual está actualmente certificada por el ICONTEC. Con esto brindar al cliente confianza en la elaboración de sus productos.

4.3 Direccionamiento estratégico.

Empaquetaduras y Empaques S.A. dentro de su direccionamiento estratégico ha planteado de manera diferente los conceptos de misión y visión dándole un significado más personal e incluyendo los valores que para la empresa son el pilar de su funcionamiento.

4.3.1 Nuestro sueño

Ser el proveedor y mantenernos como aliados estratégicos preferido por los clientes y el comercio Colombiano, por nuestra amplia gama de soluciones de productos y servicios para la industria.

4.3.2 Nuestra razón de ser.

Ser la compañía de mayor preferencia ante nuestros clientes, preferencia sustentada en la calidad de nuestros productos, la seriedad comercial, la confiabilidad y liderazgo de las marcas que representamos al igual por la calidad humana y competencia del personal que tenemos. Contamos con estrategias que inspiran nuestra gestión de seguridad, salud en el trabajo y ambiente, somos una compañía que permanentemente está innovando y mejorando.

4.3.3 Nuestros valores.

- Respeto
- Responsabilidad
- Honestidad
- Solidaridad
- Lealtad

4.4 Productos.

Empaquetaduras y Empaques S.A. cuenta con una unidad de producción ubicada en la ciudad de Medellín, fue creada para brindar soluciones en Plásticos, Elastómeros y Poliuretanos para diversas aplicaciones con más de 2000 referencias incluidas dentro de los catálogos de productos.

Contamos con una capacidad instalada en nuestras plantas y procesos de manufactura, la cual permite fabricar una gran variedad de productos entre los cuales mediante los siguientes procesos:

- **MECANIZADO:** Fabricación de piezas en polímeros de Ingeniería como Poliamida, P.E UHMW, P.P., PTFE, entre otros. Utilizando equipos de control numérico computarizado de alta precisión hasta cuarto eje, desarrollando partes o conjuntos para diferentes industrias.
- **INYECCIÓN:** Fabricación de piezas especiales en caucho y termoplásticos, elaborados a partir de una muestra, plano y/o especificaciones de desempeño, tales como: Empaques en PVC flexible para recipientes plásticos, tornillos y componentes para grifería, repuestos textiles, diafragmas, productos con exigencias de atoxicidad para contacto con alimentos, orings, triclamp, empaques, entre otros.
- **MOLDEADO:** Elaboración de productos elastoméricos especialmente formulados según el desempeño deseado. Productos comerciales y de uso especial, tales como: Acoples, diafragmas, arandelas, bujes, orings, quadorings, retenedores, barredores, empaques triclamp, tipo labio, polipacks, Tipo v, empaques para intercambiadores de calor, válvulas mariposa, entre otros
- **VACIADO:** Formulaciones especiales de diferentes referencias de poliuretanos de colada caliente para desarrollos y fabricaciones con altas exigencias mecánicas. Aplicaciones para recubrimientos de rodillera, bujes, barras, láminas. Acoples flexibles y desarrollos en general.

5 MARCO TEÓRICO.

Un proceso de fabricación es un procedimiento diseñado para dar como resultado un cambio físico y/o químico en el material. Dicho cambio se hace con la intención aumentar su valor. En las operaciones de remoción de material se parte de un material en bruto al cual se le aplican fuerzas para eliminar el material excedente y lograr que la forma resultante sea la geometría deseada. Los procesos más importantes en esta categoría son operaciones de mecanizado como torneado, taladrado y fresado (Groover, 2010).

Los avances en la industria del mecanizado han traído consigo la necesidad de aumentar la eficiencia de los procesos y la optimización de tiempos de producción, por lo que el enfoque de este proyecto es realizar un diseño experimental que permita analizar una parte del proceso de mecanizado para lograr una repercusión positiva dentro de la producción (Morales Villamil (Pontificia Universidad Javeriana), 2009).

Además, las nuevas tecnologías han permitido detectar posibles frecuencias relacionadas con elementos específicos en las máquinas mediante el análisis de fallos por vibraciones mecánicas el cual permite mediante un sistema de sensores ubicados en diferentes posiciones estratégicas de la máquina detectar en un espectro la frecuencia con la cual se presenta un pico; esta información junto con la que se puede obtener de la máquina (frecuencia de trabajo) permite realizar un análisis del funcionamiento de la máquina.

También, la gran variedad de materiales que pueden pasar por un proceso de remoción de material implican un amplio espectro de herramientas y parámetros de trabajo que los fabricantes tabulan según las ecuaciones y características propias de sus herramientas, sin embargo, estos valores no siempre son adecuados puesto que las características de cada máquina influyen en el resultado; tal es el caso de las revoluciones por minuto que establece el fabricante para las herramientas pues no todas las máquinas tienen la capacidad de giro requerida y es necesario escalar los parámetros hasta que estén dentro de los límites.

Las principales variables que influyen en el proceso (Coromant, 2019a):

1. Velocidad de corte, V_c [m/min].

Esta es la velocidad a la cual la arista de corte pasa sobre la superficie de la pieza. Es función tanto del material de pieza de trabajo y como del material de la herramienta. En general, la velocidad de corte se tabula como una función de la dureza del material, además depende de si hay o no lubricación durante la operación, haciendo que sea mayor con lubricación que sin ella, este parámetro influye en la calidad de la viruta y el acabado superficial de la pieza mecanizada.

2. Velocidad de corte efectiva o real, V_e .

Es la velocidad que se ve influenciada por la geometría de la herramienta, es empleada cuando se trabaja con una herramienta de insertos, herramientas con radios de punta más grandes, las que tienen un ángulo de posición inferior a 90 grados y herramientas esféricas puesto que el diámetro efectivo no siempre es el diámetro nominal de la herramienta.

3. Velocidad del husillo, n

Las revoluciones por minuto son la cantidad de giros que da la herramienta en el husillo, este valor depende de la velocidad de corte para ser calculado.

4. Avance por diente, f_z .

Este avance se emplea para calcular el avance de mesa y se calcula de acuerdo con el grosor de viruta máximo recomendado.

5. Avance por revolución, f_n [mm/rev].

El cálculo de este valor permite obtener cuanto se desplaza la herramienta en una revolución y se emplea para determinar la capacidad de acabado que puede tener la herramienta.

6. Avance por minuto, V_f [mm/min].

También denominado velocidad de avance, es el avance de la herramienta en relación con la pieza de trabajo, es decir, movimiento lineal los ejes de la máquina está relacionado con el avance por diente y el número de dientes.

7. Profundidad de corte, P .

Esta profundidad se calcula a partir de la geometría de la herramienta, el tipo de material y la potencia de la máquina.

8. Lubricación.

También denominados fluidos de corte, son aplicados en la zona de formación de la viruta, su función es mantener la pieza y la herramienta a una temperatura moderada, evitar que la viruta se adhiera a la herramienta, prevenir la dilatación del material por exceso de temperatura (mantener las dimensiones) y ayudar a lograr un buen acabado superficial. Sin embargo, existen materiales, operaciones y métodos de sujeción en las que el uso de este puede ser perjudicial y afecta el resultado del mecanizado.

9. Generación de calor durante el proceso.

La generación de calor durante el proceso de mecanizado influye en las características del acabado superficial de la pieza, la temperatura que puede alcanzar la pieza y la herramienta puede incluso fundir el material haciendo que las propiedades mecánicas cambien y que se genere un embotamiento de la viruta, este factor se contrarresta con el uso de lubricación durante el proceso o disminuyendo los parámetros de corte hasta encontrar una combinación que

reduzca la generación de calor hasta un valor aceptable que no comprometa la calidad del proceso.

Otro factor influyente durante el proceso de mecanizado es la maquinabilidad o capacidad de ser mecanizado, existen tres factores principales que ayudan a determinar la maquinabilidad de un material.

- La clasificación del material desde el punto de vista metalúrgico y/o mecánico.
- La geometría del filo de la herramienta que se va a utilizar.
- El material de la herramienta que se va a utilizar (calidad del recubrimiento, inserto, material).

Además de estos tres factores, los datos de corte, la fuerza de corte, el tratamiento térmico de la pieza, las condiciones generales y capacidad de la máquina también pueden generar una variación en la maquinabilidad del material.

La maquinabilidad no tiene una definición específica como la rugosidad que tiene una parte numérica implicada en su definición, es más la capacidad que tiene un material de ser mecanizado de acuerdo con la formación de viruta y el desgaste que pueda generar en el filo de la herramienta. Según esta basta definición, la composición del material puede en gran medida dar bases para saber qué tan maquinable es un material y dentro de esto el concepto de buena maquinabilidad se relaciona con un corte homogéneo que además permita una vida útil de la herramienta aceptable, todo esto basado en pruebas que los fabricantes de herramientas han realizado con el pasar de los años buscando aumentar la vida útil de las herramientas (Coromant, 2019b).

6 METODOLOGÍA.

6.1 Definición del problema.

Empaquetaduras y Empaques S. A cuenta con una planta de producción que se dedica a trabajar el área de mecanizados, en la parte de control numérico posee dos centros de mecanizado de tres (3) ejes con posibilidad de anexarle un cuarto eje y una ruteadora. En este caso se analizaron factores como tiempos de operación de las máquinas, nivel de independencia (qué tanto tiene que estar el operario involucrado en el proceso), el acabado superficial, nivel de rotación de los diferentes materiales y repetitividad de las operaciones de mecanizado. Bajo los factores anteriores se obtuvo el punto de partida del proyecto.

En primera instancia se planteó un análisis de los dos tipos de materiales mecanizados metales y polímeros según su dureza y su densidad respectivamente, obteniéndose la

información consignada en las Tabla 1 y Tabla 2. Se consideraron los tiempos de prueba y a pesar de distribuir los materiales en grupos cuya propiedad está en rangos similares se tenían demasiadas herramientas y materiales para analizar en dentro del periodo de tiempo que dura la práctica, por esta razón se optó por iniciar el proceso de parametrización empleando el material de mayor flujo o rotación dentro de la empresa. Por otro lado, se planteó el estudio para los dos tipos de máquinas que se tienen ruteadora y fresadora CNC, por las diferencias en los parámetros que tienen entre sí, sin embargo, se escogió trabajar con el centro de mecanizado pues es la máquina en la cual se obtienen los mejores acabados superficiales y es donde se maquinan las piezas con mayor grado de complejidad geométrica.

En un principio se realizó una averiguación acerca de todos los materiales que la empresa mecaniza y se construyeron las Tabla 1 y Tabla 2 en las que se agruparon los materiales que tuvieran propiedades físicas similares, en el caso de los metales se agruparon en 4 grupos según sus rangos de dureza y los polímeros se agruparon en 3 grupos según su similitud en densidad. Con este análisis se decidió encontrar el material más utilizado, puesto que se tenía una gran cantidad de materiales lo que implicaba un mayor número de pruebas y tiempo de disponibilidad de máquina mayor.

Se consultó en la empresa cual era el material más utilizado en los procesos y el que más impacto pudiera tener en los indicadores de productividad en la empresa, lo que mostró que el que el UHMW-PE es el material que más se mecaniza en Empaquetaduras y Empaques S.A.

Tabla 1. Clasificación de los metales mecanizados según su dureza.

MATERIAL	DUREZA [Brinell]	GRUPO
COBRE (Cold Worked)	89	1
DURALUMINIO	95	
INOX	123	2
BRONCE	100-200	
SAE 1020	140-180	
SAE 1045	180-190	
SAE 4140	197	3
P20	300	
ALUMINIO*	-	4

* La dureza del aluminio depende de la composición, y su rango es muy amplio, por esta razón se ubica en un grupo independiente.

Tabla 2. Clasificación de los polímeros mecanizados según la densidad.

MATERIAL	DENSIDAD [g/cm ³]	GRUPO
UHME-PE	0,93	1
GRAFILIT	1	
NYLATRON	1,16	
POLIAMIDA	1,11-1,17	
PVC	1,20-1,52	2
BAQUELITA	1,4	
POM	1,41	
ERTALYTE	1,44	
PTFE	2,3	3

Una vez seleccionado el material de acuerdo con el nivel de rotación o flujo se procedió a realizar la investigación de los parámetros de corte que se emplean, las características del material y de las herramientas y las especificaciones de la máquina en la cual se van a realizar la pruebas.

6.2 Estado del arte.

En el área de la manufactura por remoción de material, las investigaciones se fundamentan en disminuir los tiempos de fabricación sin sacrificar el acabado superficial o la integridad de las máquinas y herramientas, por esto, tanto los fabricantes de las herramientas como lo de las máquinas buscan aumentar la eficiencia. Diversos autores se han puesto la tarea de tomar materiales y máquinas específicos y analizar la combinación de parámetros más eficiente. El limitante de estas investigaciones radica en las características que posee cada máquina, puesto que, por diseño, una herramienta puede tener capacidad de remover más material, pero la máquina no tiene la potencia suficiente para mantener esa profundidad de corte, razón por la cual realizan estas investigaciones específicas.

Otra parte importante a la hora de analizar los parámetros de corte es el uso o no del líquido refrigerante cuya función se explica en el literal 4 del presente trabajo, para este caso, debido al tipo de sujeción empleado (adhesión a la mesa) no es posible usar el lubricante o refrigerante.

6.2.1 Mecanizado de polímeros.

Las características de los polímeros a la hora de ser mecanizados varían mucho según el tipo de polímero que se trabaja, en este caso el UHMW-PE (polietileno de ultra alto peso molecular) tiene las características que se muestran en la Figura 1.

Una de las características principales de este material es su alta maquinabilidad, lo que permite obtener acabados superficiales que cumplen con los requerimientos. Dentro de Empaquetaduras y Empaques S. A. la mayoría de las veces los polímeros se mecanizan con sujeción por adhesión a la mesa puesto que estos se amellan fácilmente con sujeción por bridas o prensa. La sujeción empleada implica que el uso de refrigeración o lubricación no es posible porque causaría que la adhesión se pierda, entonces es necesario que las combinaciones de parámetros de corte ensayados y seleccionados no generen calor suficiente como para fundir el material y generar cambios en la calidad del acabado superficial.

PROPERTIES	Test methods	Units	VALUES
Colour	-	-	atural (white)/green/ black / colours
Average molar mass (average molecular weight) - (1)	-	10 ⁵ g/mol	5
Density	ISO 1183-1	g/cm ³	0.93
Water absorption at saturation in water of 23 °C	-	%	< 0.1
Thermal Properties (2)			
Melting temperature (DSC, 10 °C/min)	ISO 11357-1/-3	°C	135
Thermal conductivity at 23 °C	-	W/(K.m)	0.40
Average coefficient of linear thermal expansion between 23 and 100 °C	-	m/(m.K)	200 x 10 ⁻⁶
Temperature of deflection under load:			
- method A: 1.8 MPa	ISO 75-1/-2	°C	42
Vicat softening temperature - VST/B50	ISO 306	°C	80
Max. allowable service temperature in air:			
- for short periods (3)	-	°C	120
- continuously : for 20,000 h (4)	-	°C	80
Min. service temperature (5)	-	°C	-200 (6)
Flammability (7):			
- "Oxygen Index"	ISO 4589-1/-2	%	< 20
- according to UL 94 (6 mm thickness)	-	-	HB
Mechanical Properties at 23 °C (8)			
Tension test (9):			
- tensile stress at yield (10)	ISO 527-1/-2	MPa	19
- tensile strain at yield (10)	ISO 527-1/-2	%	15
- tensile strain at break (10)	ISO 527-1/-2	%	> 50
- tensile modulus of elasticity (11)	ISO 527-1/-2	MPa	750
Compression test (12):			
- compressive stress at 1 / 2 / 5 % nominal strain (11)	ISO 604	MPa	6.5 / 10.5 / 17
Charpy impact strength - unnotched (13)	ISO 179-1/1eU	kJ/m ²	no break
Charpy impact strength - notched	ISO 179-1/1eA	kJ/m ²	115P
Charpy impact strength - notched (double 14° notch) - (14)	ISO 11542-2	kJ/m ²	170
Ball indentation hardness (15)	ISO 2039-1	N/mm ²	33
Shore hardness D (15)	ISO 868	-	60
Relative volume loss during a wear test in "sand/water-slurry", TIVAR 1000 = 100	ISO 15527	-	100
Electrical Properties at 23 °C			
Electric strength (16)	IEC 60243-1	kV/mm	45
Volume resistivity	IEC 60093	Ohm.cm	> 10 ¹⁴
Surface resistivity	IEC 60093	Ohm	> 10 ¹²
Relative permittivity ε _r : - at 100 Hz			
- at 1 MHz	IEC 60250	-	2.1
- at 1 MHz	IEC 60250	-	3.0
Dielectric dissipation factor tan δ: - at 100 Hz			
- at 1 MHz	IEC 60250	-	0.0004
- at 1 MHz	IEC 60250	-	0.0010
Comparative tracking index (CTI)	IEC 60112	-	600

Note: 1 g/cm³ = 1,000 kg/m³; 1 MPa = 1 N/mm²; 1 kV/mm = 1 MV/m.

Descriptive Properties

Color	Natural	
Machinability	3	1-10, 1=Easier to Machine

Figura 1. Propiedades del polímero UHMW-PE (Quadrant, 2011).

6.2.2 Geometría de la probeta.

La geometría seleccionada se muestra en la Figura 2 se basó en las posibilidades y facilidades que se tienen desde el almacén para realizar la entrega del material, puesto que el UHMW-PE se compra en láminas, perfiles y ejes según la necesidad de la fabricación.

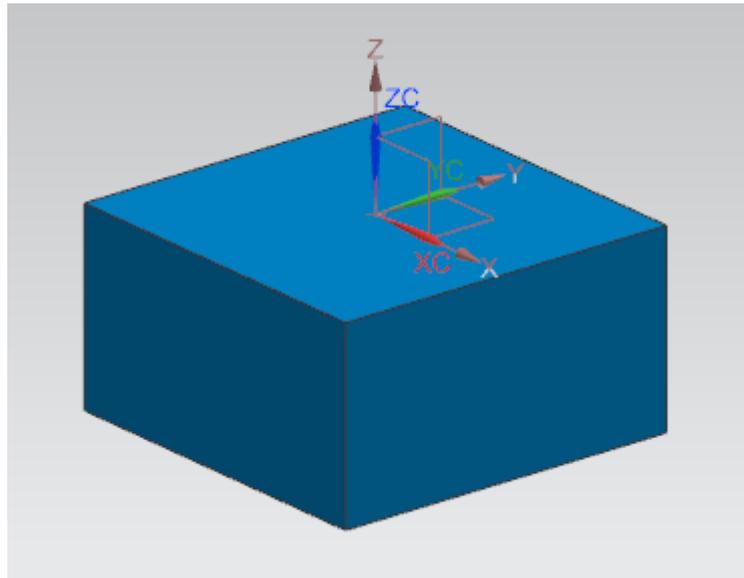


Figura 2. Geometría general de la probeta.

Se emplearon dos dimensiones de probetas diferentes para dos códigos G, una probeta de 50mm x 50mm x 25mm y una de 60mm x 60mm x 38mm; cada probeta se empleó para realizar dos ensayos y los códigos G se encuentran en Anexo 1.

6.2.3 Programación.

La programación nativa de la mayoría de las máquinas de CNC se realiza mediante un lenguaje de bajo nivel llamado G&M. Este lenguaje es vectorial con el que se describen acciones sencillas y entidades geométricas básicas junto con los parámetros de mecanizado necesarios.

La razón del nombre G&M es porque este lenguaje lo constituyen las instrucciones Generales y Misceláneas.

Básicamente el código G es un conjunto de coordenadas en los diferentes ejes que posee la máquina que permite dar la orden de donde debe ubicarse la herramienta respecto a un origen de coordenadas para proceder con el mecanizado, además de entregar la información de necesaria de las velocidades en las que se debe mover para obtener un maquinado adecuado

La simplicidad de este lenguaje de programación ha permitido su permanencia en el tiempo, estas son algunas de las funciones básicas:

- Misceláneas
 - M 00 – Para desplazamientos
 - M 02 – Fin de programa
 - M 03 – Husillo horario

- M 04 – Husillo antihorario
- M 05 – Parar husillo
- M 06 – Referenciar herramienta
- M 08 – Activar refrigerante
- M 09 – Desactivar refrigerante
- M 30 – Fin de programa

- Generales
 - G 00 – Movimiento rápido
 - G 01 – Movimiento con avance específico
 - G 02 – Arco en dirección horaria
 - G 03 – Arco en dirección antihorario
 - G 54 – Tiene el cero de pieza
 - G 90 – Coordenadas absolutas
 - G91 – Coordenadas relativas
 - G43 H0 – Compensación de herramienta

Generalmente existe un encabezado básico de programa como se muestra en la Figura 3 en esta se muestran las funciones misceláneas y generales normalmente utilizadas para encabezar un programa. (Bedoya & (UdeA), 2020)

%	Numeración de las líneas de 10 en 10 para poder anexar líneas de ser necesario
O111	Numero del programa, en paréntesis se puede escribir un título
N10 G54 G90 G17 G80 G49	Todos los programas deben iniciar y terminar con el símbolo de porcentaje %
N20 T01 M06	Cero de pieza que se guarda cuando se hace el sensado de la pieza en bruto
N30 M03 S1000	Coordenadas absolutas
N40 G00 X0. Y0.	Plano de trabajo principal XY
N50 G43 H01 Z10. M08	Anulación de todos los ciclos fijos que puedan estar activos
	Cancela compensación longitudinal del cortador
	El refrigerante se enciende cuando se compensa la herramienta

Figura 3. Encabezado de un programa en código G.

6.2.4 Herramientas.

Una herramienta de corte es el elemento empleado para retirar material de una pieza en un proceso de mecanizado. Existen diferentes tipos de herramientas de corte según el proceso y la máquina empleada. Son denominadas de corte porque al existir una diferencia de velocidades entre la herramienta y la pieza, cuando se da el contacto del área de corte con la pieza se desprende material (viruta).

Las herramientas de corte para los procesos de fresado son denominadas fresas, existen diferentes tipos de estas según la operación, la calidad del acabado superficial o el material que se esté mecanizando.

En este caso se emplearon fresas de punta plana con dos filos de corte, el fabricante de las herramientas empleadas es Toolmex Industrial Solutions ©, la sección de fresas planas de dos filos de corte se muestra en la Figura 4.

2 Filos Longitud Estándar - Diámetros Fraccionales - Punta Recta

Diámetro de Corte	Diámetro del Mango (Zanco)	Longitud de Corte	Longitud Total	Número de Parte Series 1-100 2 Filos Sin Recubrimiento	Número de Parte Series 1-102 2 Filos con recubrimiento TiAIN
1/32"	1/8"	1/8"	1-1/2"	1-100-2003	1-102-2003
3/64"	1/8"	1/8"	1-1/2"	1-100-2004	1-102-2004
1/16"	1/8"	3/16"	1-1/2"	1-100-2006	1-102-2006
5/64"	1/8"	1/4"	1-1/2"	1-100-2007	1-102-2007
3/32"	1/8"	3/8"	1-1/2"	1-100-2009	1-102-2009
7/64"	1/8"	3/8"	1-1/2"	1-100-2010	1-102-2010
1/8"	1/8"	1/2"	1-1/2"	1-100-2012	1-102-2012
9/64"	3/16"	9/16"	2"	1-100-2014	1-102-2014
5/32"	3/16"	9/16"	2"	1-100-2015	1-102-2015
11/64"	3/16"	5/8"	2"	1-100-2017	1-102-2017
3/16"	3/16"	5/8"	2"	1-100-2018	1-102-2018
13/64"	1/4"	5/8"	2-1/2"	1-100-2020	1-102-2020
7/32"	1/4"	5/8"	2-1/2"	1-100-2021	1-102-2021
15/64"	1/4"	3/4"	2-1/2"	1-100-2023	1-102-2023
1/4"	1/4"	3/4"	2-1/2"	1-100-2025	1-102-2025
17/64"	5/16"	3/4"	2-1/2"	1-100-2027	1-102-2027
9/32"	5/16"	3/4"	2-1/2"	1-100-2028	1-102-2028
19/64"	5/16"	13/16"	2-1/2"	1-100-2030	1-102-2030
5/16"	5/16"	13/16"	2-1/2"	1-100-2031	1-102-2031
11/32"	3/8"	1"	2-1/2"	1-100-2034	1-102-2034
3/8"	3/8"	1"	2-1/2"	1-100-2038	1-102-2038
13/32"	7/16"	1"	2-3/4"	1-100-2041	1-102-2041
7/16"	7/16"	1"	2-3/4"	1-100-2044	1-102-2044
1/2"	1/2"	1"	3"	1-100-2050	1-102-2050
9/16"	9/16"	1-1/8"	3-1/2"	1-100-2056	1-102-2056
5/8"	5/8"	1-1/4"	3-1/2"	1-100-2062	1-102-2062
11/16"	3/4"	1-3/8"	4"	1-100-2069	1-102-2069
3/4"	3/4"	1-1/2"	4"	1-100-2075	1-102-2075
7/8"	7/8"	1-1/2"	4"	1-100-2087	1-102-2087
1"	1"	1-1/2"	4"	1-100-2100	1-102-2100

Figura 4. Herramientas de dos filos (TMX, 2013).

Empaquetaduras y Empaques S. A posee un vasto grupo de herramientas, para el caso de esta investigación se realizó prueba con las herramientas mostradas en Tabla 3. Además, las herramientas probadas son las que generalmente se emplean para realizar operaciones de fresado de contorno según la geometría y/o dimensiones de la pieza a mecanizar, esto debido a que la mayoría de las veces la empresa mecaniza piezas de tamaño medio o grande cuya geometría permite que la operación de contorno sea realizada por dichas herramientas.

Las dos herramientas seleccionadas son de diámetro 1/4 in y 1/2 in, según información del Departamento de Producción, estos son los diámetros de herramientas que más se pueden emplear en el proceso pues generalmente permiten realizar más operaciones antes de requerir un cambio de herramienta.

Tabla 3. Herramientas empleadas en el proceso de mecanizado de desbaste.

HERRAMIENTA	DIAMETRO	UNIDADES
Fresa de 2 insertos	16	mm
Fresa carburo P.P 2 filos	4	mm
Fresa carburo P.P 2 filos	6	mm
Fresa carburo P.P 2 filos	12	mm
Fresa carburo P.P 2 filos	1/8	in
Fresa carburo P.P 2 filos	5/32	in
Fresa carburo P.P 2 filos	3/16	in
Fresa carburo P.P 2 filos	1/4	in
Fresa carburo P.P 2 filos	5/16	in
Fresa de 2 insertos	3/8	in
Fresa carburo P.P 2 filos	1/2	in

6.2.5 Tipo de operación de mecanizado.

La operación de contorno, Figura 5 es una de las operaciones que más se deben realizar en cualquier tipo de mecanizado, lo que permite en este caso analizar no solo un conjunto de herramientas usadas en un único material sino también analizar una de las operaciones más comunes. En la mayoría de los casos, el fresado de contorno se emplea en desbaste antes de comenzar a dar las medidas finales a la pieza trabajada, esta operación depende muchas veces de las dimensiones con las que entra el material en bruto y estas dimensiones influyen en el tiempo total de máquina por lo que la obtención de los parámetros adecuados teniendo en cuenta los tiempos de fabricación puede traer beneficios en cuanto a la productividad de la máquina.

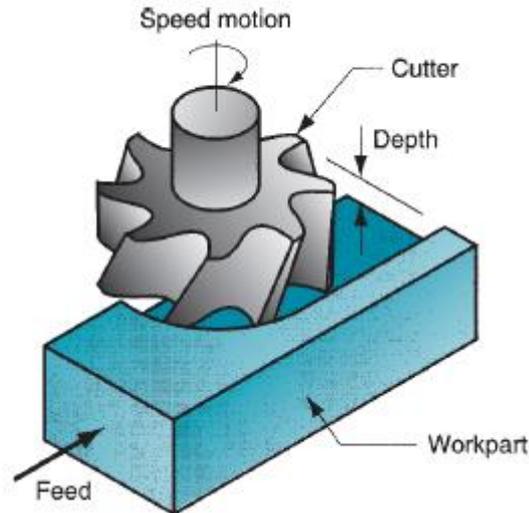


Figura 5. Esquema operación de contorno (Groover, 2010).

6.3 Diseño experimental.

Partiendo de la información brindada en el área de programación y en el área de mecanizado se tabularon los parámetros de corte para cada herramienta como se muestra en las Tabla 4 y Tabla 5 respectivamente, teniendo en cuenta los cálculos realizados con base en la teoría, además se calcula la tasa de remoción del material y la potencia requerida para realizar el corte.

Tabla 4. Parámetros del área de programación.

PARAMETROS PARA EL UHMW-PE SEGÚN PROGRAMACION				
HERRAMIENTA	DIAMETRO	AVANCE [mm/min]	PROF. CORTE [mm]	VELOCIDAD HUSILLO [rpm]
Fresa de 2 insertos	16 mm	1000	0,5-2	2700
Fresa carburo P.P 2 filos	1/8 in	1300-1400	2-3	6000
Fresa carburo P.P 2 filos	5/32 in	1200	3	5800-6000
Fresa carburo P.P 2 filos	3/16 in	1200-1400	3-4	6000
Fresa carburo P.P 2 filos	1/4 in	900-1200	3-4	4800
Fresa carburo P.P 2 filos	5/16 in	1100	4	4800
Fresa carburo P.P 2 filos	3/8 in	1000	4	4600
Fresa carburo P.P 2 filos	1/2 in	1000	2-4	3000
Fresa carburo P.P 2 filos	32 mm	1000	0,5-2	1800

Tabla 5. Parámetros operarios.

UHMW-PE [OPERARIO]				
HERRAMIENTA	DIAMETRO	AVANCE [mm/min]	PROF. CORTE [mm]	VELOCIDAD HUSILLO [rpm]
Fresa de 2 insertos	16mm	2000	4-5	4500-5000
Fresa carburo P.P 2 filos	1/8	2200	2-3	5500-6000
Fresa carburo P.P 2 filos	5/32	1000-1200	2-3	5500-6000
Fresa carburo P.P 2 filos	3/16	1400	3-4	5500
Fresa carburo P.P 2 filos	1/4	1000-1800	3-4	4800
Fresa carburo P.P 2 filos	5/16	2000 máx.	4	4800
Fresa carburo P.P 2 filos	3/8	2000 máx.	4	4000-4500
Fresa carburo P.P 2 filos	1/2	2000 máx.	5	3500

El diseño experimental se realizó empleando tres factores, los cuales se definieron como variables que afectan directamente el proceso de corte, estos factores son: la velocidad

de giro del husillo o revoluciones por minuto a las que gira el husillo (rev/min), el avance, recorrido de la herramienta sobre la pieza en (mm/min), la profundidad de corte, distancia que profundiza la herramienta en la pieza en (mm) y cada nivel se representó con un número (1, 2, 3) respectivamente.

Se realizó una combinatoria de todos los factores (3 x 2 x 2) y se obtuvieron 12 pruebas por herramienta, teniendo en cuenta que el análisis estadístico (análisis de varianza ANOVA) requiere de repetitividad se realizaron 2 pruebas por combinación, la distribución del diseño se muestra en la Figura 6.

El análisis de varianza es una técnica que permite estudiar los efectos posibles que existen sobre la varianza de una variable, en este caso sobre el valor RMS de la aceleración y sobre el amperaje.

- Factor 1: velocidad de giro del husillo (RPM)
- Factor 2: avance (mm/min)
- Factor 3: profundidad de corte (mm)

Además de esto se midieron las siguientes variables dependientes:

- Valor RMS de velocidad
- Valor RMS de aceleración
- Amperaje

Las variables de control usadas durante el desarrollo del diseño fueron:

1. Tiempo de medición de la vibración: 10 segundos.
2. Tipo de material: UHMW-PE.
3. Tipo de operación de maquinado: Contorno de desbaste.
4. Herramientas:
 - Fresa carburo punta plana de 2 filos 1/4 in
 - Fresa carburo punta plana de 2 filos 1/2 in

COMBINATORIA DE FACTORES CON NIVELES

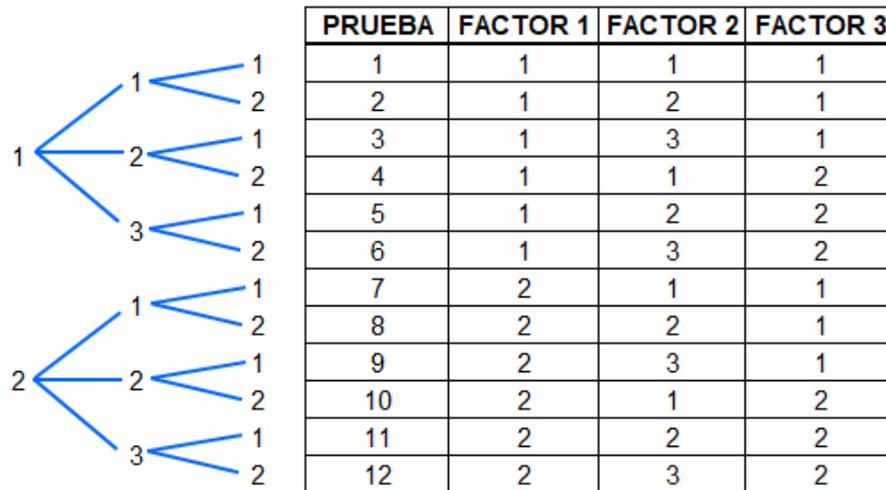


Figura 6. Distribución del diseño experimental.

6.4 Parámetros.

La utilización de los parámetros de corte reales depende de las especificaciones de la máquina en la cual se trabaja, en este caso la máquina es una Milltronics VM15XT, cuya información general se muestra en las Figura 7 y Figura 8. Especificaciones Milltronics VM15XT. (Milltronics, s. f.).

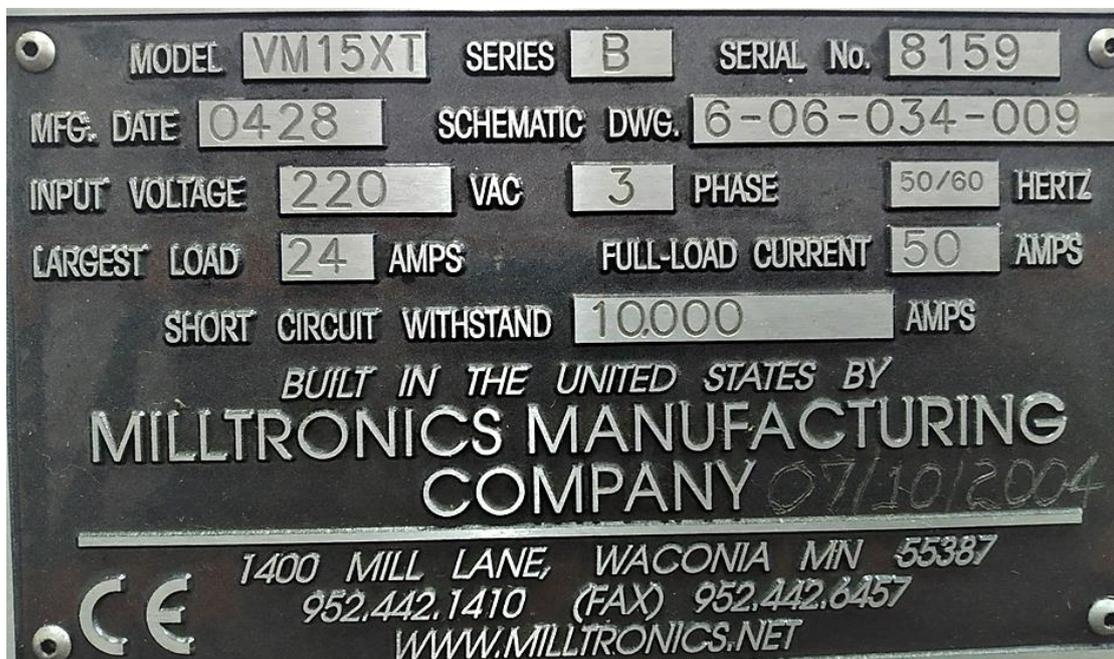


Figura 7. Placa informativa Milltronics VM15XT.

	VM15 & VM15XT		VM16 & VM16XT	
Table Size	40 x 16"	1015 x 405 mm	45 x 16"	1150 x 405 mm
Travel	25 x 16 x 20"	635 x 405 x 510 mm	30 x 16 x 20"	760 x 405 x 510 mm
Optional Travel	30 x 16 x 20"	760 x 405 x 510 mm	30 x 16 x 26"	760 x 405 x 660 mm
Horsepower	12/10 HP	9/7.5 kw	18/12 HP	13/9 kw
Optional HP	18/12 HP	13/9 kw	24/15 HP	18/11 kw
ATC	16 Carousel			
Optional ATC	24 Carousel or 16 or 24 Arm		24 Carousel, 16 or 24 Arm	
Weight	8600 lbs	3900 kg	9000 lbs	4000 kg

Figura 8. Especificaciones Milltronics VM15XT.

Los parámetros teóricos según la información de la Figura 9 tomando en consideración que el UHMW-PE (polietileno de ultra alto peso molecular) es un tipo de polyolefins (poliolefinas), puesto que su proceso de sinterización se realiza partiendo de poliolefinas (Posch, 2011).

Table 2. Guidelines for milling plastics

Material	Depth of cut, mm	Cutting speed		Feed per tooth		Cutting geometry, degrees		Attainable surface quality, μm
		Rough, m/min	Smooth, m/min	Rough, mm	Smooth, mm	Clearance angle γ	Rake angle α	
<i>Thermoplastics</i>								
Polyolefins	1 – 5	250 – 350	300 – 500	0.2 – 0.3	0.05 – 0.2	15 – 20	-5 to 0	6 – 10
Polystyrene	1 – 5	150 – 200	250 – 400	0.3 – 0.5	0.04 – 0.1	20 – 25	10 – 20	6 – 20
PVC, rigid	3 – 8	250 – 350	350 – 550	0.4 – 0.6	0.05 – 0.3	25 – 30	20 – 25	6 – 20
Poly(methyl methacrylate)	1 – 5	130 – 150	180 – 300	0.1 – 0.2	0.03 – 0.1	25 – 30	20 – 25	4 – 8
Polyamides	1 – 5	100 – 140	150 – 180	0.2 – 0.5	0.05 – 0.1	25 – 30	20 – 25	6 – 10
Polyacetals	1 – 4	120 – 160	150 – 200	0.1 – 0.3	0.03 – 0.1	6 – 14	0 – 8	6 – 10
<i>Thermosets</i>								
Phenolics	3 – 7	150 – 250	200 – 300	0.3 – 0.6	0.08 – 0.4	20 – 30	20 – 25	6 – 10
Aminoplastics	3 – 7	150 – 250	200 – 300	0.4 – 0.8	0.08 – 0.3	20 – 30	20 – 25	6 – 10
Paper- and fabric-based laminate	1 – 4	80 – 150	150 – 250	0.2 – 0.4	0.08 – 0.1	20 – 25	20 – 30	6 – 10
UP – GF *	1 – 5	50 – 150	200 – 600	0.1 – 0.2	0.05 – 0.1	10 – 15	5 – 10	10 – 20

* UP – GF = glass-fiber-reinforced unsaturated polyester resin.

Figura 9. Fundamentos teóricos para la realización de los cálculos. («Ullmann's Polymers and Plastics - Products and Processes», 2016)

Además, es importante conocer cuál es la tasa de remoción de material que se tiene según los parámetros de corte teóricos, teniendo en cuenta las ecuaciones mostradas en la Figura 10 y conociendo que:

$Q = \text{Tasa de remocion de material}$

$V = \text{Velocidad de corte } \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$

$f = \text{Avance por revolución } \left[\frac{\text{mm}}{\text{rev}} \right]$

$d = \text{Profundidad de de corte } [\text{mm}]$

La Tabla 6 muestra los valores obtenidos para diferentes profundidades de corte

Metal Removal Rate	
For Inch Units Only $Q = \text{in}^3/\text{min}$	For SI Metric Units Only $Q = \text{cm}^3/\text{s}$
$12Vfd$	$\frac{V}{60}fd$
$f_m wd$	$\frac{f_m wd}{60,000}$
$12Vwn_c d_t$	$\frac{V}{60}un_c d_t$

Figura 10. Ecuaciones para calcular la tasa de remoción de material en un proceso de mecanizado. (Oberg et al., 2016)

Tabla 6. Cálculo de parámetros teórico.

Profundidad de corte [mm]	Velocidad de corte [m/min]	Velocidad de corte [mm/min]	F_n [mm/rev]	RPM*	Q [cm ³ /s]
1	350	350000	50	7000	291,66667
2	325	325000	46,428571	7000	502,97619
3	300	300000	42,857143	7000	642,85714
4	275	275000	39,285714	7000	720,2381
5	250	250000	35,714286	7000	744,04762

* Es un valor asumido de acuerdo con los valores teóricos conocidos de velocidades de giro.

7 RESULTADOS Y ANÁLISIS.

A continuación, se presenta el procedimiento de montaje del sensor, los datos hallados durante las pruebas, el procesamiento de la información y el análisis correspondiente.

7.1 Procedimiento de montaje y toma de datos.

Para la realización de la toma de datos se empleó un acelerómetro CTC AC102-2C y el software VIBROCONTROL, el cual permite recopilar los datos tomados en cada prueba mediante un archivo de texto (.txt).

7.1.1 Configuración del software.

El software se debe configurar según los datos de calibración de cada sensor en específico, en este caso los valores se muestran en la Figura 11 de acuerdo con la información brindada por el asesor. Además, es necesario configurar el puerto para que la conexión se pueda establecer entre el software y el sensor.



Figura 11. Interfaz de configuración del software.

La Figura 12 muestra un esquema ilustrativo a cerca del procedimiento de toma de datos, tanto del sensor como del amperaje medido en cada prueba mediante una pinza amperométrica ubicada en una de las tres líneas que se tienen, por lo que el valor obtenido se debió multiplicar por 3 para obtener el aproximado por prueba. Ambos datos se consolidan en un documento de Excel.

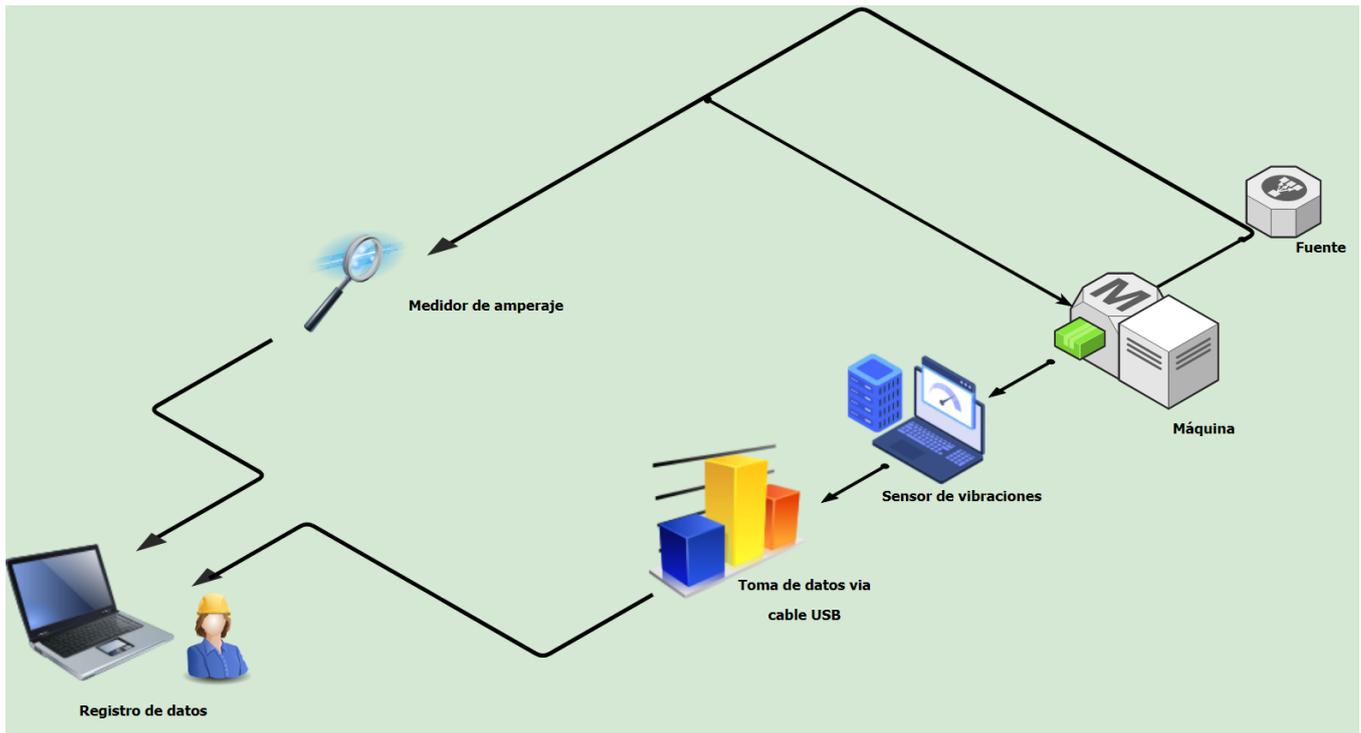


Figura 12. Esquema general de procedimiento de medición (Draw.io, s. f.).

Es importante la posición en la que se ubica el sensor en la máquina, dado que según la sensibilidad que tenga el sensor pueden existir lugares de la máquina en los que este se sature antes de cumplir el tiempo de muestreo establecido y no permita hacer una evaluación válida, por lo que la Figura 13, muestra el lugar en el cual se colocó el sensor en este caso.

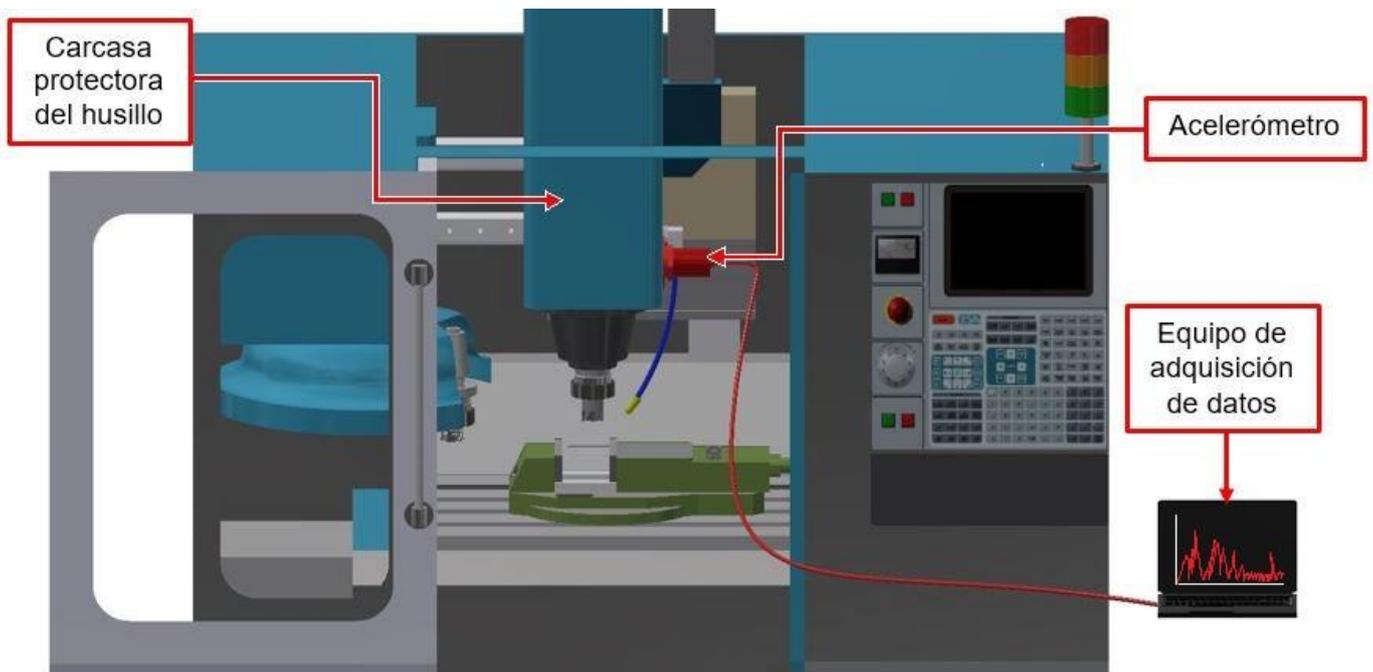


Figura 13. Esquema de montaje y conexión del sensor en la máquina (GrabCAD, 2013, Adaptado).

7.2 Análisis por herramienta.

Para realizar el análisis de varianza multifactorial y conocer los efectos estadísticos significativos que pueden tener los factores que se varían en el valor RMS de la aceleración medida se hicieron diferentes combinaciones de análisis mostrados a continuación.

7.2.1 Herramienta 1/4 in.

La Tabla 7 muestra el consolidado de la información de entrada y la información obtenida por cada prueba para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in), cabe aclarar que el valor RMS de aceleración se obtuvo empleando Matlab® con un código que se encuentra en el Anexo 2, y el valor RMS de velocidad fue un dato obtenido directamente del software. El sensor se configuró para registrar datos durante 10 segundos continuos, sin embargo, debido a los cambios de parámetros realizados y requeridos algunas pruebas presentaron un segundo con reducción de actividad mostrado en las gráficas obtenidas de Matlab® por lo que se decidió tener en cuenta solo los 9 primeros segundos del registro y así no afectar el valor RMS de la aceleración por la interrupción en el mecanizado.

Tabla 7. Consolidado de información de entrada e información obtenida en cada prueba para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).

UHMW-PE (6,35 mm)						
PRUEBA #	VEL. HUSILLO [rpm]	AVANCE [mm/min]	PROF. CORTE [mm]	RMS ACELERACION	RMS VELOCIDAD	AMPERAJE
1	4300	900	3	10,8494	0,01004	4,35
2	4300	900	4	10,8215	0,01058	5,46
3	4300	1200	3	10,885	0,01066	5,55
4	4300	1200	4	10,9659	0,01065	5,61
5	4300	1600	3	10,7335	0,01006	5,55
6	4300	1600	4	10,7098	0,01024	5,64
7	4800	900	3	10,0114	0,01034	5,85
8	4800	900	4	9,7783	0,009742	5,88
9	4800	1200	3	9,7005	0,01072	5,79
10	4800	1200	4	9,6391	0,009458	6,03
11	4800	1600	3	9,749	0,009422	5,73
12	4800	1600	4	9,6827	0,009899	5,88
13	4300	900	3	11,214	0,01089	5,4
14	4300	900	4	10,9577	0,01066	5,52
15	4300	1200	3	10,7793	0,01127	5,31
16	4300	1200	4	10,9167	0,01146	5,61
17	4300	1600	3	10,6309	0,01036	5,49
18	4300	1600	4	10,7903	0,01095	5,46
19	4800	900	3	9,8479	0,01013	5,79
20	4800	900	4	9,594	0,01018	5,91
21	4800	1200	3	9,5841	0,01075	5,82
22	4800	1200	4	9,6463	0,01072	5,85
23	4800	1600	3	9,6451	0,009751	5,79
24	4800	1600	4	9,783	0,01002	5,82

La Tabla 8 muestra el análisis de varianza para el RMS de la aceleración y en esta la columna VALOR-P muestra la significancia estadística de cada uno de los factores seleccionados, en este caso: Velocidad del husillo, Avance y Profundidad de corte. Los valores de color rojo son menores a 0,05 lo cual indica que ambos tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el valor RMS de la aceleración con un intervalo de confianza del 95%.

Tabla 8. Análisis de Varianza para la ACELERACION RMS- (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADO MEDIO	RAZÓN-F	VALOR-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: VEL. HUSILLO [rpm]	7,69828	1	7,69828	502,25	0,0000
B: AVANCE [mm/min]	0,120533	2	0,0602664	3,93	0,0372
C: PROF. CORTE [mm]	0,00495363	1	0,00495363	0,32	0,5764
RESIDUOS	0,291227	19	0,0153277		
TOTAL	8,115	23			

El análisis de varianza permite además encontrar la variación de la media del RMS de la aceleración respecto a los diferentes niveles que tiene cada factor, incluye información del error estándar de cada una de las medias que se traduce en la medida de la variabilidad que existe en el muestreo, esta información se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Tabla de Medias (Mínimos Cuadrados) para ACELERACION RMS para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).

NIVEL	CASOS	MEDIA	ERROR EST.	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
MEDIA GLOBAL	24	10,2881			
VEL. HUSILLO [rpm]					
4300	12	10,8545	0,0357395	10,7797	10,9293
4800	12	9,72178	0,0357395	9,64698	9,79659
AVANCE [mm/min]					
900	8	10,3843	0,0437717	10,2927	10,4759
1200	8	10,2646	0,0437717	10,173	10,3562
1600	8	10,2155	0,0437717	10,1239	10,3072
PROF. CORTE [mm]					
3	12	10,3025	0,0357395	10,2277	10,3773
4	12	10,2738	0,0357395	10,199	10,3486

Partiendo de la información señalada en rojo en la Tabla 9 se puede obtener el porcentaje de aumento en la media de la aceleración RMS entre los diferentes niveles que tienen los factores que tienen un efecto estadísticamente significativo, en este caso la Velocidad del Husillo y el Avance.

$\%Cambio_{Factor} = \text{Porcentaje de cambio en la media de aceleración RMS}$

$$\%Cambio_{Factor} = \left| \frac{M_{Mayor} - M_{Menor}}{M_{Mayor}} \right| \times 100 \quad [1]$$

- En el caso del cambio de la media de la aceleración RMS respecto a los diferentes niveles de la velocidad del husillo

$$\%Cambio_{vel\ husillo} = \left| \frac{10,8545 - 9,72178}{10,8545} \right| \times 100 = 10,4355\%$$

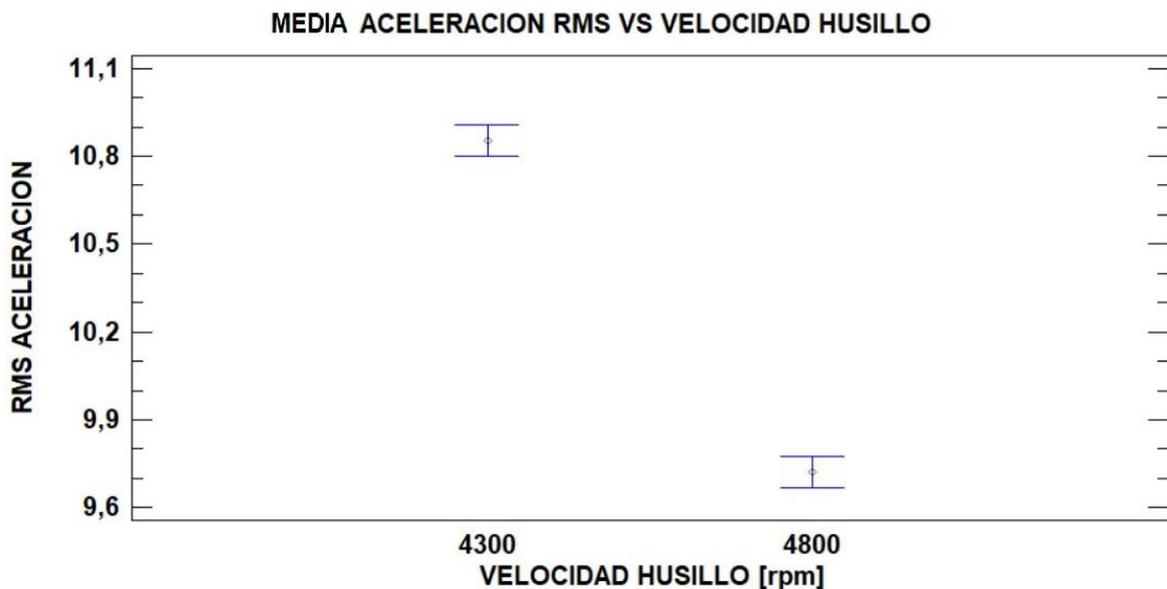
Esto quiere decir que el aumento en la velocidad del husillo de 4300rpm a 4800rpm representa una disminución del *10,4355%* en el RMS de la aceleración de la vibración presente.

- En el caso del aumento de la media de la aceleración RMS respecto a los diferentes niveles de la velocidad de avance

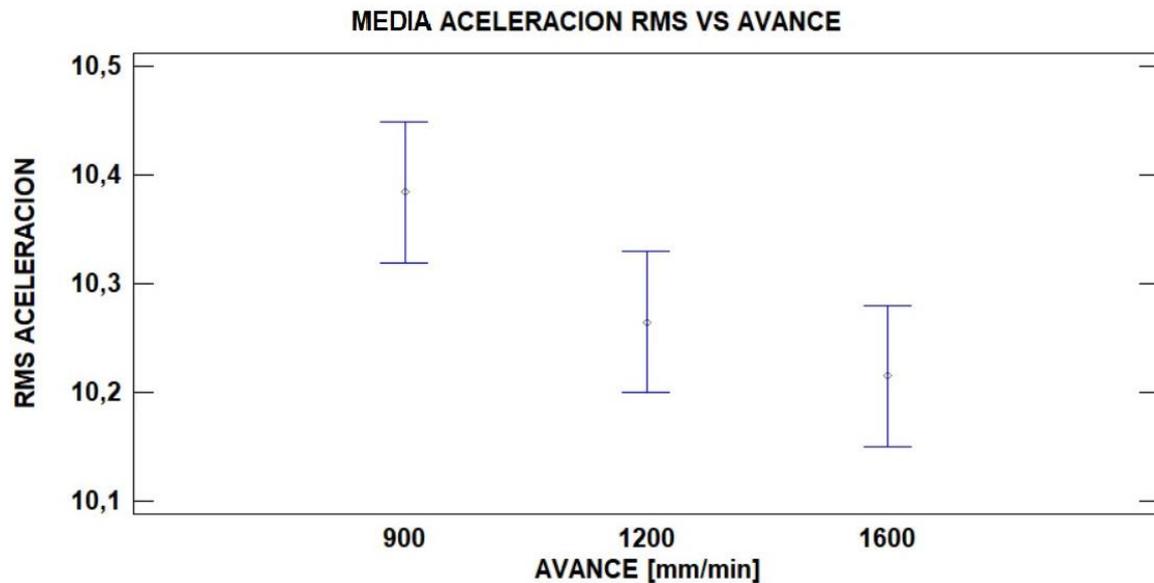
$$\%Cambio_{Avance} = \left| \frac{10,3843 - 10,2155}{10,3843} \right| \times 100 = 1,626\%$$

Lo cual significa que el aumento del avance en general causa una reducción del *1,626%* en el valor RMS de la aceleración de la vibración presente

Además se puede ver la información más relevante en forma de gráficos, como se muestra en las Gráfica 1 y la Gráfica 2 en las que además de mostrar la media de la aceleración para cada nivel de cada factor muestra los límites inferiores y superiores de la variabilidad de dicha media y se puede observar de manera sencilla la correlación de los niveles y el cambio existente entre estos.



Gráfica 1. Medias de la aceleración RMS con la variación de la velocidad del husillo para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in)



Gráfica 2. Medias de la aceleración RMS con la variación del avance para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).

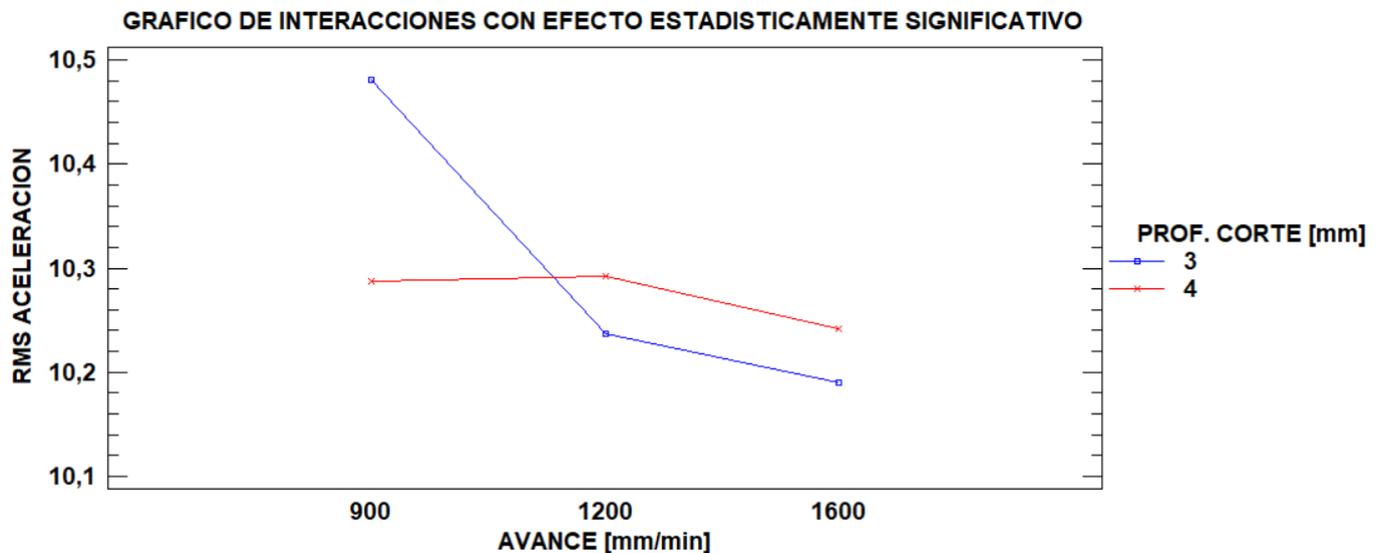
Es importante también tener en cuenta la interacción que existe entre los factores analizados, puesto que puede presentar un efecto estadísticamente significativo, en este caso la comparación muestra una interacción entre los factores B y C como se ve en la Tabla 10 donde el VALOR-P es menor a 0,05.

Tabla 10. Análisis de Varianza para ACELERACION RMS – (Suma de Cuadrados). Interacción entre factores para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	RAZÓN-F	VALOR-P
EFFECTOS PRINCIPALES				
A: VEL. HUSILLO [rpm]	7,69828	7,69828	767,58	0,0000
B: AVANCE [mm/min]	0,120533	0,0602664	6,01	0,0131
C: PROF. CORTE [mm]	0,00495363	0,00495363	0,49	0,4937
INTERACCIONES				
AB	0,0602773	0,0301387	3,01	0,0821
AC	0,00977681	0,00977681	0,97	0,3402
BC	0,0807623	0,0403812	4,03	0,0416
RESIDUOS	0,14041	0,0100293		
TOTAL	8,115			

Con base en la interacción entre los factores B (Avance) y C (Profundidad de corte) se puede analizar el cambio en el RMS de la aceleración como se muestra en la Gráfica 3, permite observar como para ambos factores el menor valor asignado (900 mm/min y 3 mm) tiene un RMS de aceleración mayor, lo que se traducen en mayor nivel de vibración registrado mientras que un aumento tanto en la profundidad de corte como en el avance

muestra una reducción en el RMS y por ende en la vibración durante la operación de mecanizado.



Gráfica 3. Interacción entre los factores con un efecto estadísticamente significativo sobre el RMS de la aceleración para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).

Además, con los valores de amperaje consumido en cada prueba se puede realizar un análisis con los mismos factores para analizar el cambio en el consumo con los diferentes niveles de cada factor. La Tabla 11 muestra el análisis de varianza para el amperaje que al igual que la Tabla 8 presenta el valor de color rojo que es menor a 0,05 lo cual indica que tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el valor del amperaje con un intervalo de confianza del 95%.

Tabla 11. Análisis de Varianza para AMPERAJE – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	RAZÓN-F	VALOR-P
EFFECTOS PRINCIPALES				
A: VEL. HUSILLO [rpm]	1,12234	1,12234	20,54	0,0002
B: AVANCE [mm/min]	0,144675	0,0723375	1,32	0,2895
C: PROF. CORTE [mm]	0,210937	0,210937	3,86	0,0642
RESIDUOS	1,03811	0,0546375		
TOTAL	2,51606			

El análisis de varianza permite además encontrar la variación de la media del Amperaje respecto al factor Velocidad del husillo por su significancia estadística, en la Tabla 12 se muestran los valores incluyendo el error estándar y los límites de la variación.

Tabla 12. Tabla de Medias (Mínimos Cuadrados) para AMPERAJE para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).

NIVEL	CASOS	MEDIA	ERROR	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
MEDIA GLOBAL	24	5,62875			
VEL. HUSILLO [rpm]					
4300	12	5,4125	0,0674768	5,27127	5,55373
4800	12	5,845	0,0674768	5,70377	5,98623
AVANCE [mm/min]					
900	8	5,52	0,0826419	5,34703	5,69297
1200	8	5,69625	0,0826419	5,52328	5,86922
1600	8	5,67	0,0826419	5,49703	5,84297
PROF. CORTE [mm]					
3	12	5,535	0,0674768	5,39377	5,67623
4	12	5,7225	0,0674768	5,58127	5,86373

Partiendo de la información señalada en rojo en la Tabla 12 se puede obtener el porcentaje de aumento en la media del Amperaje entre los diferentes niveles que tiene el factor con un efecto estadísticamente significativo, en este caso la Velocidad del Husillo. Partiendo de la Ecuación

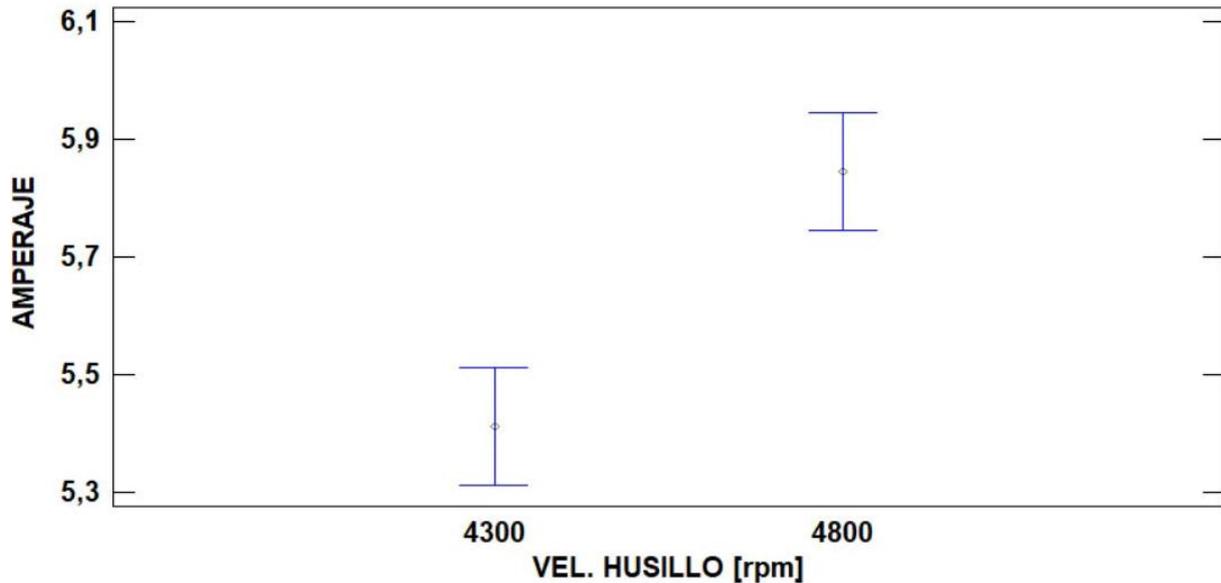
$$\%Cambio_{Factor} = \left| \frac{M_{Mayor} - M_{Menor}}{M_{Mayor}} \right| \times 100 \quad [1]$$

$$\%Cambio_{vel\ husillo} = \left| \frac{5,845 - 5,4125}{5,845} \right| \times 100 = 7,399\%$$

En este caso al aumentar la velocidad del Husillo de 4300rpm a 4800rpm se registra un aumento del 7,399% en el amperaje de la operación de mecanizado, es decir mayor consumo energético.

La Gráfica 4 permite observar la variación en la media del Amperaje respecto a la Velocidad del husillo y representa el cálculo anterior de manera gráfica.

MEDIA AMPERAJE VS VELOCIDAD HUSILLO



Gráfica 4. Medias del AMPERAJE con la variación de la velocidad del husillo para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).

Es igualmente importante conocer si la interacción entre los factores analizados respecto al Amperaje y verificar si existe un efecto estadísticamente significativo, en este caso la Tabla 13 muestra que las interacciones no poseen significación estadística, puesto que el VALOR-P no es menor a 0,05.

Tabla 13. Análisis de Varianza para AMPERAJE – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 6,35 mm (1/4 in).

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	RAZÓN-F	VALOR-P
EFFECTOS PRINCIPALES				
A: VEL. HUSILLO [rpm]	1,12234	1,12234	21,67	0,0004
B: AVANCE [mm/min]	0,144675	0,0723375	1,40	0,2798
C: PROF. CORTE [mm]	0,210938	0,210938	4,07	0,0632
INTERACCIONES				
AB	0,183225	0,0916125	1,77	0,2066
AC	0,0459375	0,0459375	0,89	0,3623
BC	0,083925	0,0419625	0,81	0,4645
RESIDUOS	0,725025	0,0517875		
TOTAL	2,51606			

7.2.2 Herramienta 1/2 in.

La Tabla 14 muestra el consolidado de la información de entrada y la información obtenida por cada prueba para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in), cabe aclarar que el valor RMS de aceleración se obtuvo empleando Matlab® con un código que se

encuentra en el Anexo 2, y el valor RMS de velocidad fue un dato obtenido directamente del software. El sensor se configuró para registrar datos durante 10 segundos continuos, sin embargo, debido a los cambios de parámetros realizados y requeridos algunas pruebas presentaron un segundo con reducción de actividad mostrado en las gráficas obtenidas de Matlab® por lo que se decidió tener en cuenta solo los 9 primeros segundos del registro y así no afectar el valor RMS de la aceleración por la interrupción en el mecanizado.

Tabla 14. Consolidado de información de entrada e información obtenida encada prueba para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).

UHMW-PE (12,7 mm)						
PRUEBA #	VEL. HUSILLO [rpm]	AVANCE [mm/min]	PROF. CORTE [mm]	RMS ACELERACION	RMS VELOCIDAD	AMPERAJE
1	4500	1000	3	9,0091	0,009987	5,43
2	4500	1000	5	9,0457	0,009465	5,52
3	4500	1500	3	8,9833	0,009828	5,61
4	4500	1500	5	9,0556	0,01046	5,61
5	4500	2000	3	9,0377	0,008762	5,43
6	4500	2000	5	8,9558	0,009593	5,7
7	5000	1000	3	10,1842	0,01115	6
8	5000	1000	5	10,0584	0,01008	5,79
9	5000	1500	3	10,1484	0,0103	5,88
10	5000	1500	5	10,1086	0,01071	5,91
11	5000	2000	3	10,1378	0,01014	5,88
12	5000	2000	5	10,0746	0,0106	5,82
13	4500	1000	3	8,9023	0,008942	5,46
14	4500	1000	5	9,2428	0,009437	5,61
15	4500	1500	3	9,0602	0,009853	5,34
16	4500	1500	5	9,0151	0,01024	5,55
17	4500	2000	3	8,9648	0,00883	5,58
18	4500	2000	5	8,9831	0,009463	5,73
19	5000	1000	3	10,3257	0,01051	5,73
20	5000	1000	5	10,1818	0,01124	5,88
21	5000	1500	3	10,128	0,01187	5,88
22	5000	1500	5	10,0803	0,01037	5,91
23	5000	2000	3	10,097	0,01125	4,92
24	5000	2000	5	10,1662	0,0106	6

La Tabla 15 muestra el análisis de varianza para el RMS de la aceleración y en esta la columna VALOR-P muestra la significancia estadística de cada uno de los factores seleccionados, en este caso: Velocidad del husillo, Avance y Profundidad de corte. El valor en color rojo es menor a 0,05 (velocidad del husillo) lo cual indica que tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el valor RMS de la aceleración con un intervalo de confianza del 95%.

Tabla 15. Análisis de Varianza para ACELERACION RMS – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	RAZÓN-F	VALOR-P
EFFECTOS PRINCIPALES				
A: VEL. HUSILLO [rpm]	7,52136	7,52136	1241,53	0,0000
B: AVANCE [mm/min]	0,0186569	0,00932845	1,54	0,2400
C: PROF. CORTE [mm]	0,00000459375	0,00000459375	0,00	0,9783
RESIDUOS	0,115105	0,00605814		
TOTAL	7,65513			

El análisis de varianza permite además encontrar la variación de la media del RMS de la aceleración respecto a los diferentes niveles que tiene cada factor, incluye información del error estándar de cada una de las medias que se traduce en la medida de la variabilidad que existe en el muestreo, esta información se muestra en la Tabla 9

Tabla 16. Tabla de Medias (Mínimos Cuadrados) para ACELERACION RMS para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).

NIVEL	CASOS	MEDIA	ERROR	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
MEDIA GLOBAL	24	9,5811			
VEL. HUSILLO [rpm]					
4500	12	9,02129	0,0224688	8,97426	9,06832
5000	12	10,1409	0,0224688	10,0939	10,1879
AVANCE [mm/min]					
1000	8	9,61875	0,0275185	9,56115	9,67635
1500	8	9,57244	0,0275185	9,51484	9,63003
2000	8	9,55213	0,0275185	9,49453	9,60972
PROF. CORTE [mm]					
3	12	9,58154	0,0224688	9,53451	9,62857
5	12	9,58067	0,0224688	9,53364	9,62769

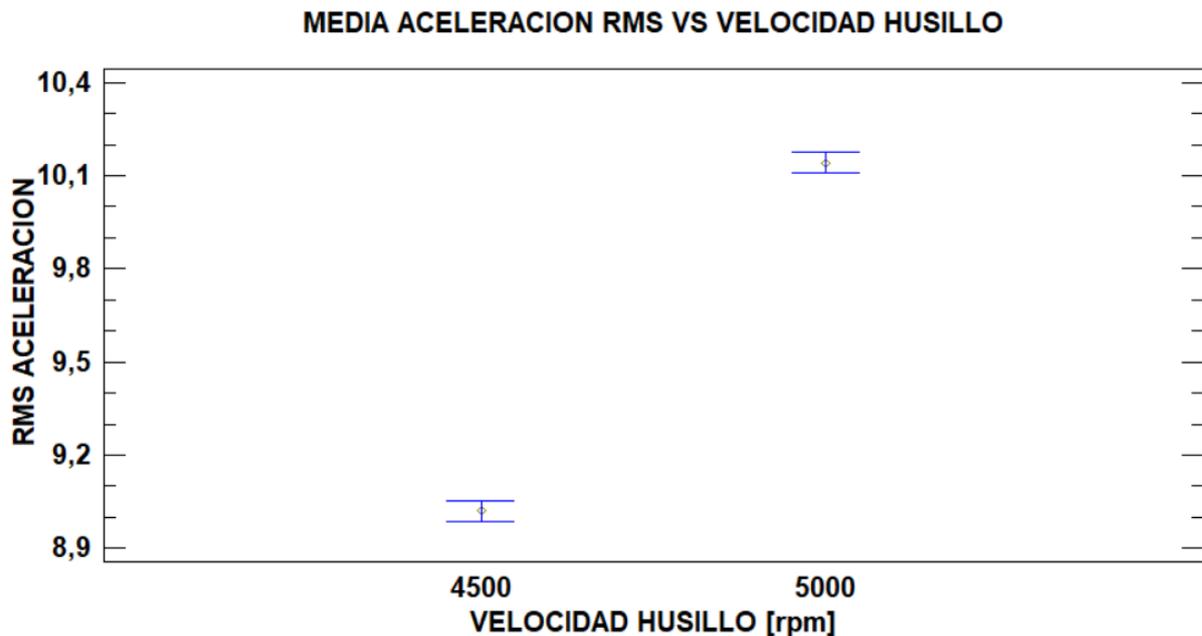
Partiendo de la información señalada en rojo en la Tabla 16 se puede obtener el porcentaje de aumento en la media del Amperaje entre los diferentes niveles que tiene el factor con un efecto estadísticamente significativo, en este caso la Velocidad del Husillo. Partiendo de la Ecuación

$$\%Cambio_{Factor} = \left| \frac{M_{Mayor} - M_{Menor}}{M_{Mayor}} \right| \times 100 \quad [1]$$

$$\%Cambio_{Vel\ husillo} = \left| \frac{10,1409 - 9,02129}{10,1409} \right| \times 100 = 11,041\%$$

En este caso y a diferencia de la herramienta anterior el aumento en la velocidad del husillo generó un aumento del 11,041% en el RMS de la aceleración, traduciéndose en un aumento en las vibraciones.

La Gráfica 5 muestra la media de la aceleración para cada nivel de cada factor muestra los limites inferiores y superiores de la variabilidad de dicha media y se puede observar de manera sencilla la correlación de los niveles y el cambio que tiene el factor con significancia estadística relevante.



Gráfica 5. Medias de la aceleración RMS con la variación de la velocidad del husillo para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).

Es igualmente importante conocer si la interacción entre los factores analizados respecto al RMS de la aceleración tiene un efecto estadísticamente significativo, en este caso la Tabla 17 muestra que las interacciones entre factores no poseen significación estadística, puesto que el VALOR-P no es menor a 0,05.

Tabla 17. Análisis de Varianza para ACELERACION RMS – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	RAZÓN-F	VALOR-P
EFECTOS PRINCIPALES				
A: VEL. HUSILLO [rpm]	7,52136	7,52136	1172,70	0,0000
B: AVANCE [mm/min]	0,0186569	0,00932845	1,45	0,2667
C: PROF. CORTE [mm]	0,00000459375	0,00000459375	0,00	0,9790
INTERACCIONES				
AB	0,00305927	0,00152963	0,24	0,7909
AC	0,0199469	0,0199469	3,11	0,0996
BC	0,00230648	0,00115324	0,18	0,8373
RESIDUOS	0,089792	0,00641372		
TOTAL (CORREGIDO)	7,65513			

También es importante para esta herramienta analizar el amperaje respecto a los factores que se tienen, en este caso la Tabla 18 muestra que la Velocidad del husillo es nuevamente el factor que tiene una significancia estadística pues el VALOR-P es menor a 0,05.

Tabla 18. Análisis de Varianza para AMPERAJE – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	RAZÓN-F	VALOR-P
EFECTOS PRINCIPALES				
A: VEL. HUSILLO [rpm]	0,382537	0,382537	8,22	0,0099
B: AVANCE [mm/min]	0,024975	0,0124875	0,27	0,7675
C: PROF. CORTE [mm]	0,148838	0,148838	3,20	0,0897
RESIDUOS	0,884213	0,0465375		
TOTAL	1,44056			

El análisis de varianza permite además encontrar la variación de la media del Amperaje respecto al factor Velocidad del husillo por su significancia estadística, en la Tabla 19 se muestran los valores incluyendo el error estándar y los límites de la variación.

Tabla 19. Tabla de Medias (Mínimos Cuadrados) para AMPERAJE para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).

NIVEL	CASOS	MEDIA	ERROR	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
MEDIA GLOBAL	24	5,67375			
VEL. HUSILLO [rpm]					
4500	12	5,5475	0,0622746	5,41716	5,67784
5000	12	5,8	0,0622746	5,66966	5,93034
AVANCE [mm/min]					
1000	8	5,6775	0,0762705	5,51786	5,83714
1500	8	5,71125	0,0762705	5,55161	5,87089
2000	8	5,6325	0,0762705	5,47286	5,79214
PROF. CORTE [mm]					
3	12	5,595	0,0622746	5,46466	5,72534
5	12	5,7525	0,0622746	5,62216	5,88284

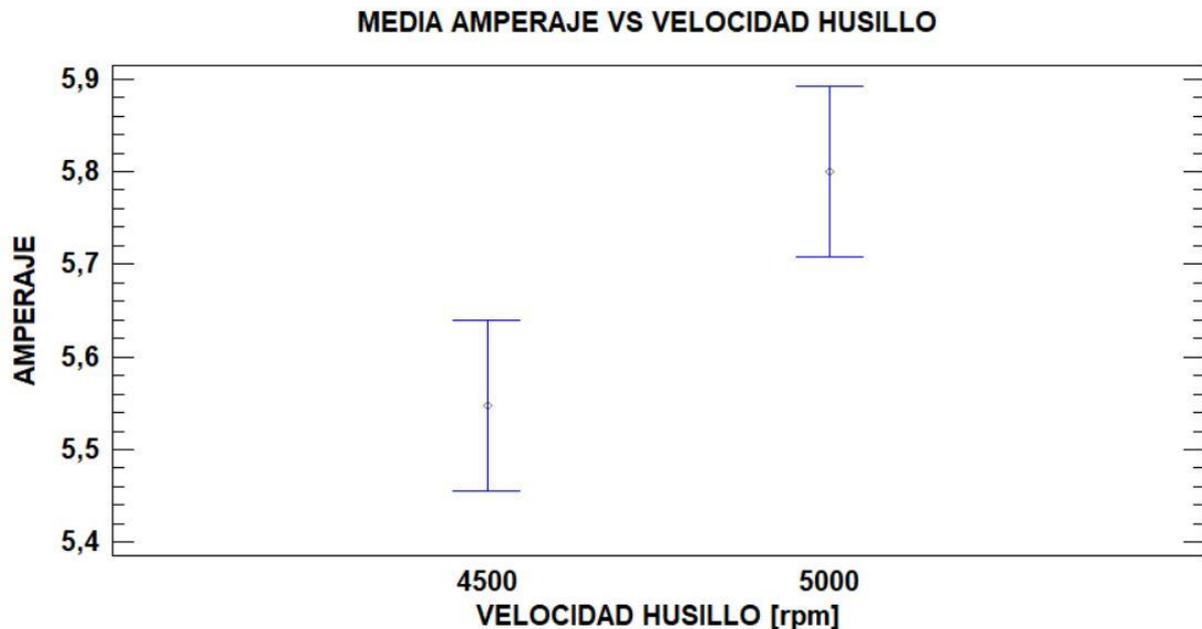
Partiendo de la información señalada en rojo en la Tabla 19 se puede obtener el porcentaje de aumento en la media del Amperaje entre los diferentes niveles que tiene el factor con un efecto estadísticamente significativo, en este caso la Velocidad del Husillo. Partiendo de la Ecuación

$$\%Cambio_{Factor} = \left| \frac{M_{Mayor} - M_{Menor}}{M_{Mayor}} \right| \times 100 \quad [1]$$

$$\%Cambio_{Vel\ husillo} = \left| \frac{5,8 - 5,5475}{5,8} \right| \times 100 = 4,353\%$$

Para el caso del amperaje en la herramienta de 1/2 in hay un aumento del 4,353% en el valor medio del este al aumentar la velocidad del husillo de 4500rpm a 5000rpm.

La Gráfica 6 muestra la media del amperaje para cada nivel del factor con significancia estadística y muestra los límites inferiores y superiores de la variabilidad de dicha media, se puede observar de manera sencilla la correlación de los niveles y el porcentaje de aumento que se analizó.



Gráfica 6. Medias del AMPERAJE con la variación de la velocidad del husillo para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).

Es igualmente importante conocer si la interacción entre los factores analizados respecto al Amperaje tiene un efecto estadísticamente significativo, en este caso la Tabla 13 muestra que las interacciones no poseen significación estadística, puesto que el VALOR-P es mayor a 0,05.

Tabla 20. Análisis de Varianza para AMPERAJE – (Suma de Cuadrados) para la herramienta de diámetro 12,7 mm (1/2 in).

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	RAZÓN-F	VALOR-P
EFECTOS PRINCIPALES				
A: VEL. HUSILLO [rpm]	0,382537	0,382537	8,50	0,0113
B: AVANCE [mm/min]	0,024975	0,0124875	0,28	0,7618
C: PROF. CORTE [mm]	0,148838	0,148838	3,31	0,0904
INTERACCIONES				
AB	0,129675	0,0648375	1,44	0,2698
AC	0,0009375	0,0009375	0,02	0,8873
BC	0,123525	0,0617625	1,37	0,2856
RESIDUOS	0,630075	0,0450054		
TOTAL	1,44056			

7.3 Análisis del consumo energético.

Es importante también conocer el comportamiento del consumo energético entre las pruebas, por eso, basada en el informe mensual de EPM Tarifas y Costo de Energía eléctrica (EPM, 2020) se pudo obtener el costo del consumo de energía eléctrica por hora. Se tomó la tarifa de Julio de 2020 mes en el que se realizaron las pruebas.

$$\text{Costo a julio 2020} = 680,83 \frac{\$COP}{kWh}$$

La máquina trabaja a 220V (Figura 7), y asumiendo un factor de potencia de 0,9 que es uno de los más comunes, teniendo así la información necesaria para calcular el consumo

$$P = \sqrt{3} * V * A * \cos\varphi \quad [2]$$

P: Potencia

V: Voltaje

A: Amperaje

cosφ: Factor de potencia

$$\text{Costo} = P * \text{Costo a julio 2020} \quad [3]$$

Las Tabla 21 y Tabla 22 muestra los consumos de las pruebas realizadas con la herramienta de 1/4 in y de 1/2 in respectivamente, las cuales permiten observar que la velocidad del husillo es el principal factor en el aumento del consumo de energía.

Para la herramienta de 1/4 in la prueba con mayor consumo energético (2,07kW→1407,93 \$COP/h) fue la prueba 10 cuyos parámetros fueron:

- Velocidad de husillo: 4800 rpm
- Velocidad de avance: 1200 mm/min
- Profundidad de corte: 4 mm

Y para la herramienta de 1/2 in la prueba que registró el mayor consumo energético (2,06 kW→1400,93\$COP/h) fue la prueba 24 cuyos parámetros fueron:

- Velocidad de husillo: 5000 rpm
- Velocidad de avance: 2000 mm/min
- Profundidad de corte: 5 mm

Teniendo en cuenta el costo de la energía a julio del 2020 según EPM, se obtiene el costo de cada prueba y permite analizar el comportamiento del consumo energético de acuerdo con los parámetros y permite vincular esto con el acabado superficial obtenido y así definir los parámetros adecuados.

Tabla 21. Relación de costo energético para la herramienta 1/4 in.

HERRAMIENTA 1/4 in				
PRUEBA #	AMPERAJE	POTENCIA [W]	POTENCIA [kW]	CONSUMO [COP/hora]
1	4,35	1491,82	1,49	1015,67
2	5,46	1872,49	1,87	1274,84
3	5,55	1903,35	1,90	1295,86
4	5,61	1923,93	1,92	1309,87
5	5,55	1903,35	1,90	1295,86
6	5,64	1934,22	1,93	1316,87
7	5,85	2006,23	2,01	1365,90
8	5,88	2016,52	2,02	1372,91
9	5,79	1985,66	1,99	1351,90
10	6,03	2067,96	2,07	1407,93
11	5,73	1965,08	1,97	1337,89
12	5,88	2016,52	2,02	1372,91
13	5,4	1851,91	1,85	1260,84
14	5,52	1893,06	1,89	1288,85
15	5,31	1821,04	1,82	1239,82
16	5,61	1923,93	1,92	1309,87
17	5,49	1882,77	1,88	1281,85
18	5,46	1872,49	1,87	1274,84
19	5,79	1985,66	1,99	1351,90
20	5,91	2026,81	2,03	1379,91
21	5,82	1995,95	2,00	1358,90
22	5,85	2006,23	2,01	1365,90
23	5,79	1985,66	1,99	1351,90
24	5,82	1995,95	2,00	1358,90

Tabla 22. Relación de costo energético para la herramienta 1/2 in.

HERRAMIENTA DE 1/2 in				
PRUEBA #	AMPERAJE	POTENCIA [W]	POTENCIA [kW]	CONSUMO [COP/hora]
1	5,43	1862,20	1,86	1267,84
2	5,52	1893,06	1,89	1288,85
3	5,61	1923,93	1,92	1309,87
4	5,61	1923,93	1,92	1309,87
5	5,43	1862,20	1,86	1267,84
6	5,7	1954,79	1,95	1330,88
7	6	2057,68	2,06	1400,93
8	5,79	1985,66	1,99	1351,90
9	5,88	2016,52	2,02	1372,91
10	5,91	2026,81	2,03	1379,91
11	5,88	2016,52	2,02	1372,91
12	5,82	1995,95	2,00	1358,90
13	5,46	1872,49	1,87	1274,84
14	5,61	1923,93	1,92	1309,87
15	5,34	1831,33	1,83	1246,83
16	5,55	1903,35	1,90	1295,86
17	5,58	1913,64	1,91	1302,86
18	5,73	1965,08	1,97	1337,89
19	5,73	1965,08	1,97	1337,89
20	5,88	2016,52	2,02	1372,91
21	5,88	2016,52	2,02	1372,91
22	5,91	2026,81	2,03	1379,91
23	4,92	1687,29	1,69	1148,76
24	6	2057,68	2,06	1400,93

7.4 Análisis del acabado superficial

Para analizar cómo cambia el acabado superficial se emplea un microscopio USB digital (Figura 14) que se conecta al computador y permite tomar fotografías de las probetas y observar el acabado superficial que deja la herramienta en cada prueba.



- Sensor de imagen: 0.3M HD CMOS Sensor
- Resolución fotográfica: 2560x1920.
- Resolución de captura de video: 640x480
- Rango de enfoque: enfoque manual de 15 ~ 44 mm
- Velocidad de fotogramas: Máx. 30f / s
- Rango de ampliación: 50X ~ 500X
- Formato de video: AVI
- Formato de instantánea: JPEG / BMP
- Iluminación ajustable: 8 diodos LED incorporados
- Interfaz de PC: USB 2.0 y USB 1.1
- Fuente de alimentación: Puerto USB (5V DC)
- Sistema de Operación: WIN XP / VISTA / 8 / 10
- Dimensión: aprox. 11x3.3cm

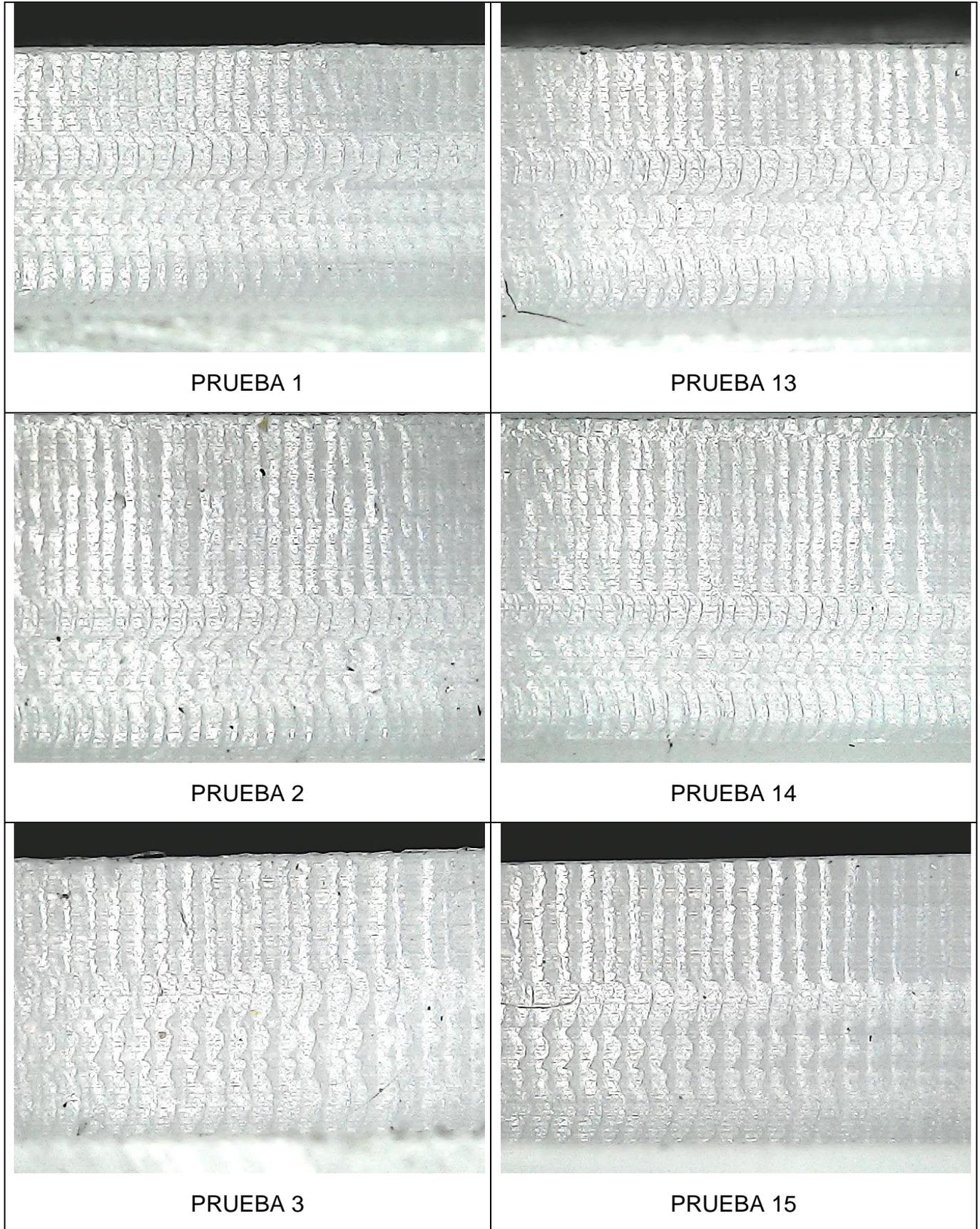
Figura 14. Especificaciones técnicas microscopio USB digital 8 leds x 1000. (Eneka, 2020)

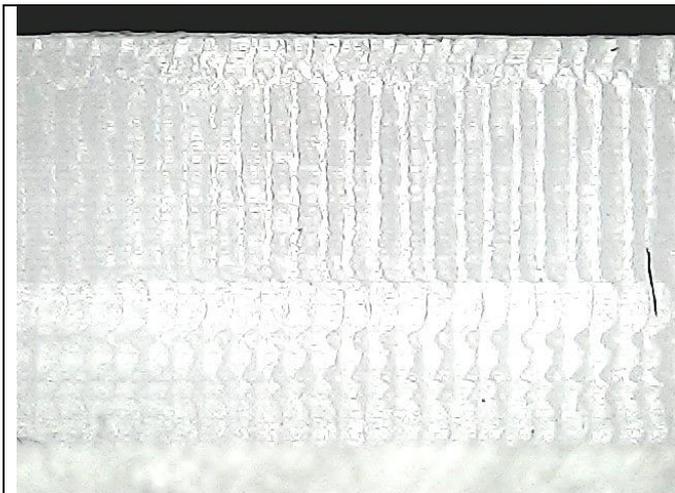
Fue necesario tener un montaje estándar para la toma de las fotografías de manera que se pudiera asegurar la misma distancia entre la probeta y el lente del microscopio por lo que además se analizó y se consideró la fabricación de un dispositivo que permita en caso de usar este elemento realizar la toma de fotografías de manera eficiente dentro del área de gestión de calidad de la empresa.

7.4.1 Análisis de acabado superficial para la herramienta de 1/4in.

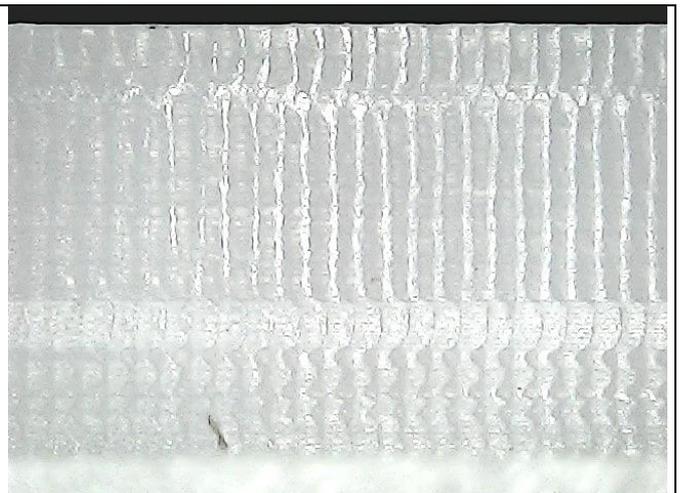
La Tabla 23. muestra las fotografías de las 24 pruebas realizadas con la herramienta de 1/4in para realizar el análisis respectivo, es importante saber que existe una correspondencia entre las pruebas de la 1 a la 12 con la 13 a la 24 por la repetitividad del ensayo, por eso el orden que se tiene en la tabla.

Tabla 23. Compilado de fotografías para la herramienta de 1/4 in.





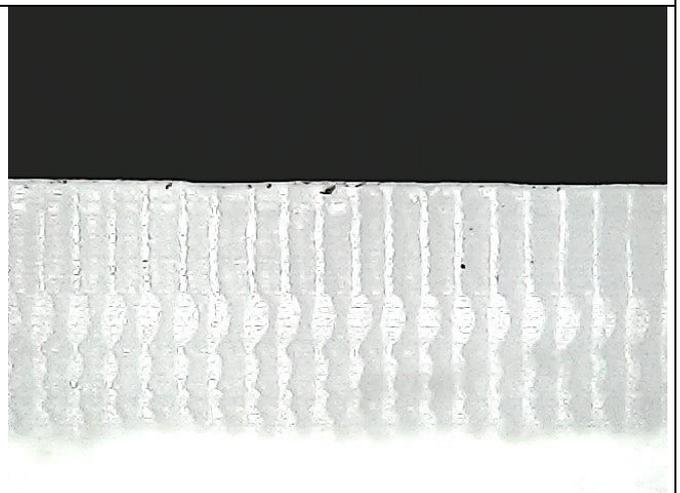
PRUEBA 4



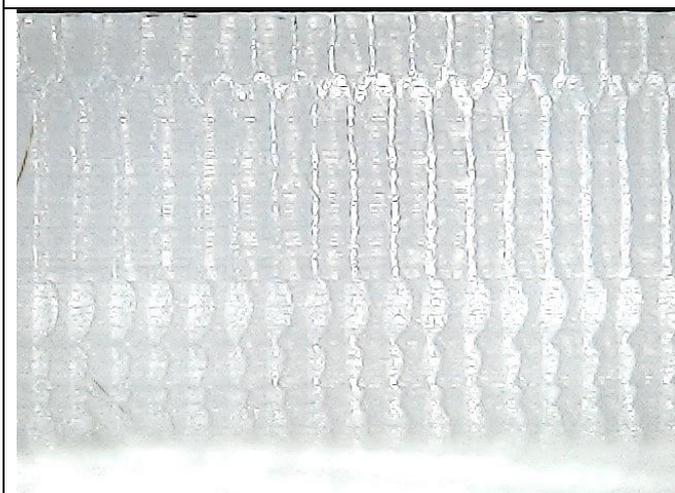
PRUEBA 16



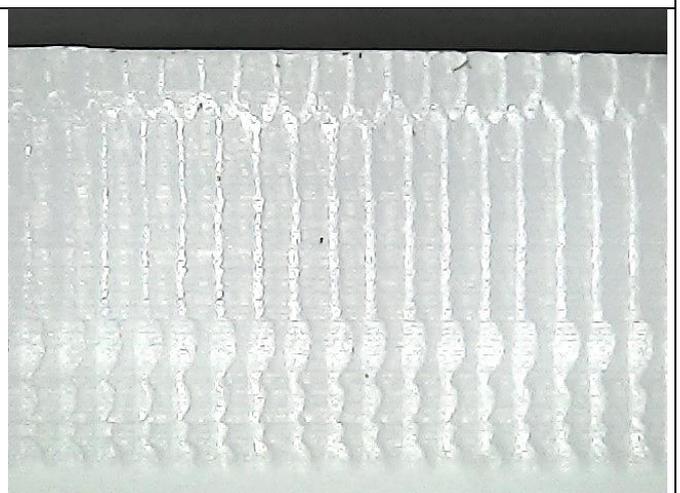
PRUEBA 5



PRUEBA 17



PRUEBA 6



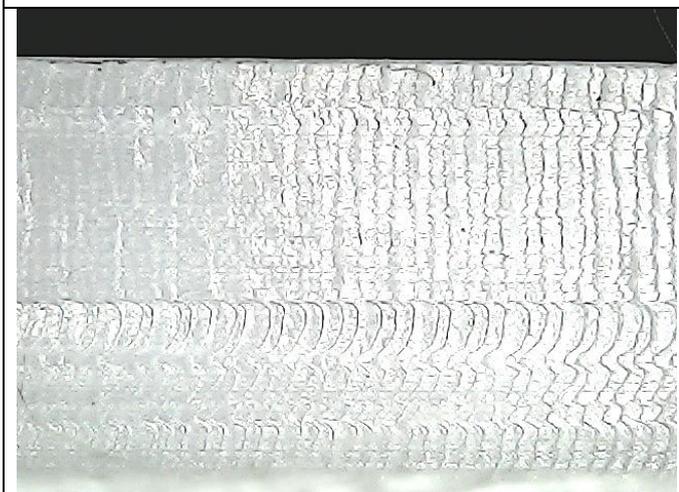
PRUEBA18



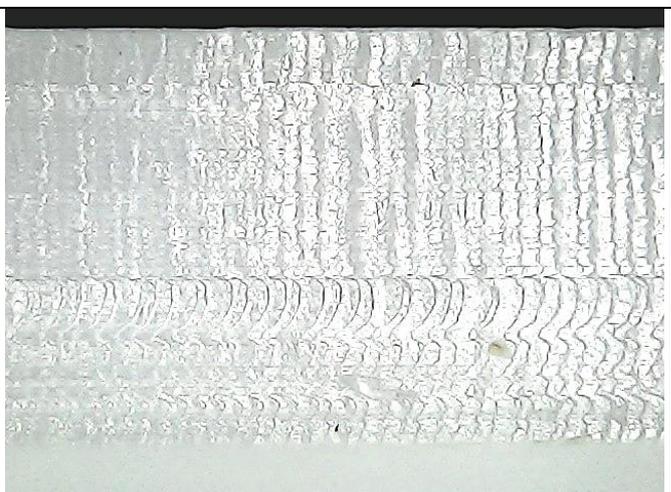
PRUEBA 7



PRUEBA 19



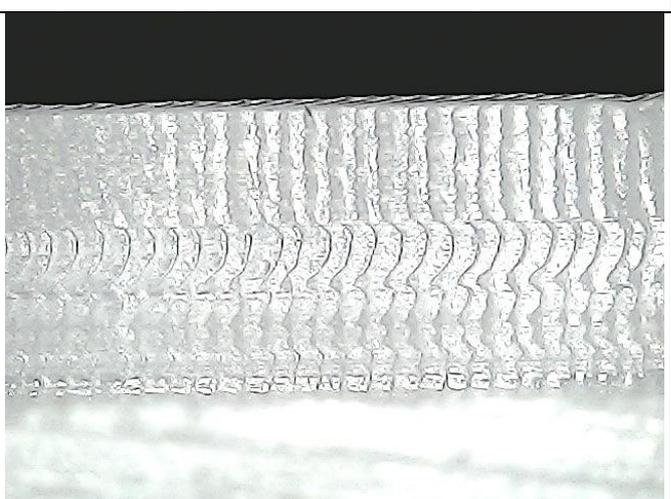
PRUEBA 8



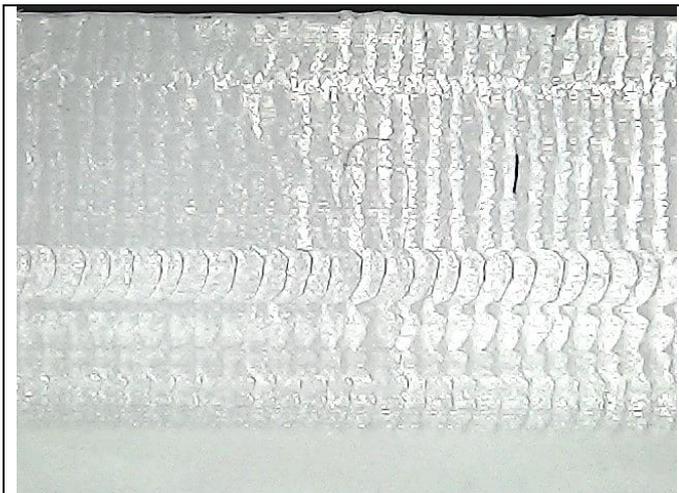
PRUEBA 20



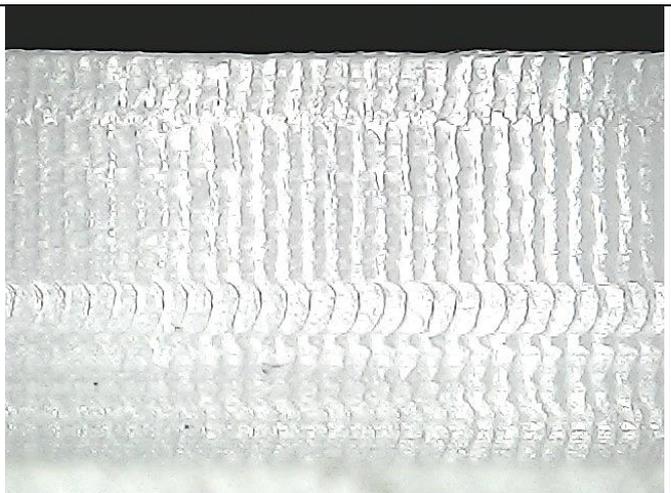
PRUEBA 9



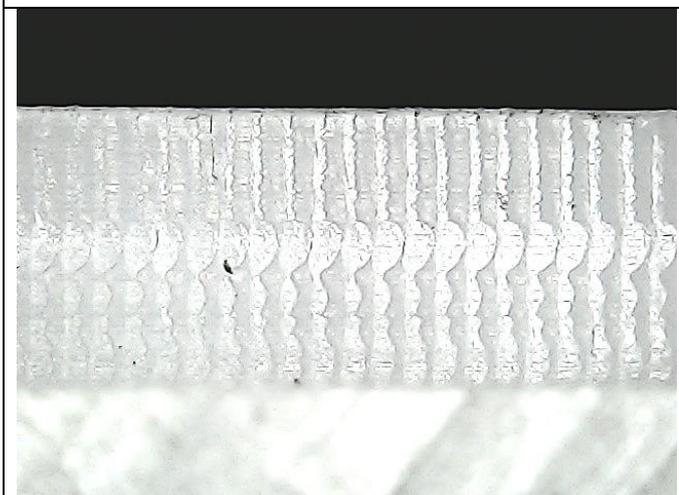
PRUEBA 21



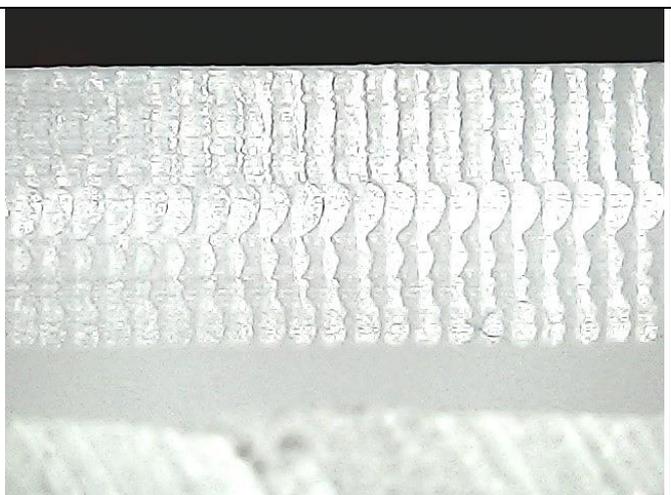
PRUEBA 10



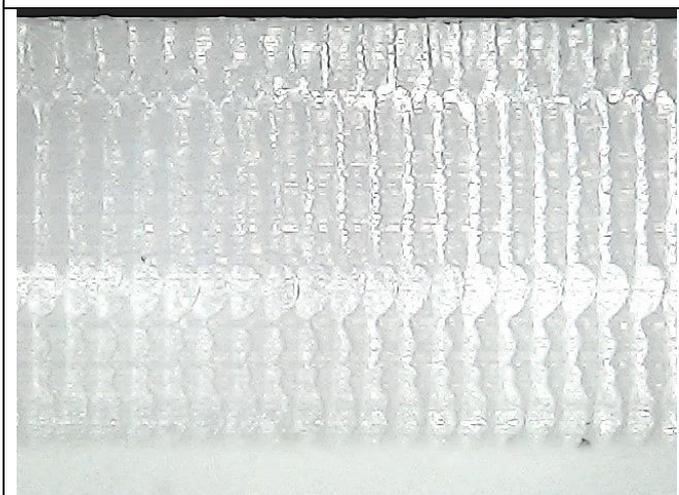
PRUEBA 22



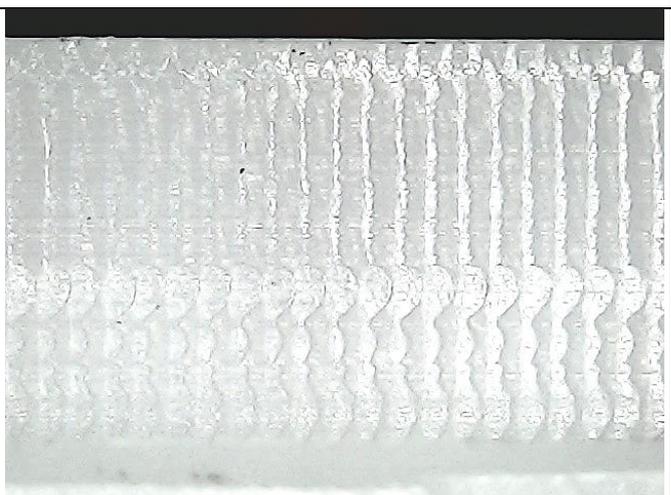
PRUEBA 11



PRUEBA 23



PRUEBA 12



PRUEBA 24

Desde la Tabla 23. se puede ver como el cambio en los parámetros de corte influye en el acabado superficial de la pieza, y es notorio como al aumentar la velocidad de giro del husillo (RPM) el acabado mejora, la profundidad de corte no tiene mayor significancia en este aspecto pero si se observa como la parte inferior del filo de la herramienta deja una marca característica y diferente del resto del filo de la herramienta, esto puede deberse al desgaste normal de la herramienta o al desalineamiento que tiene el eje del husillo de la máquina, como se muestra en la Figura 15.

MARCA PARTE
INFERIOR DEL FILO
DE LA HERRAMIENTA

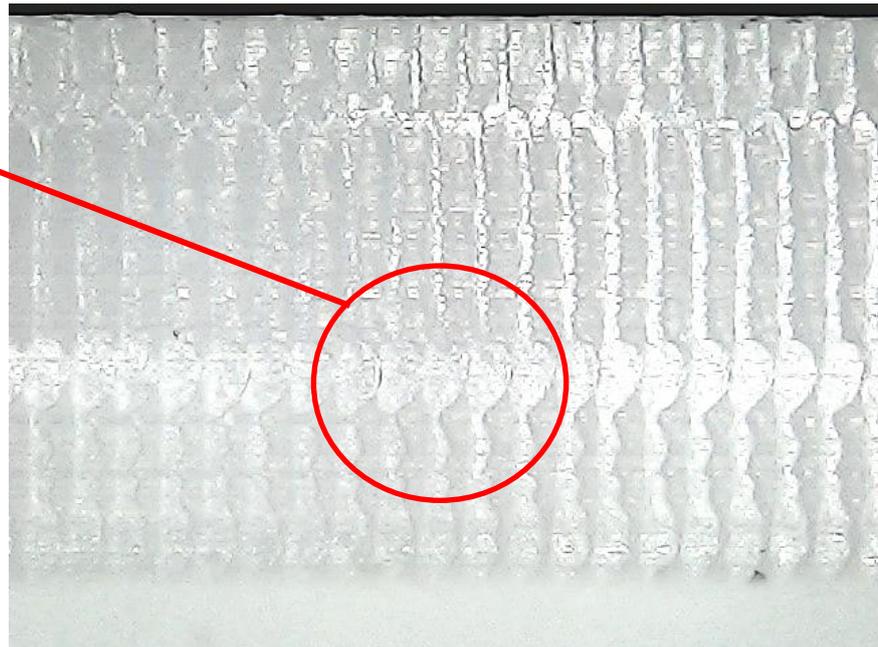


Figura 15. Marca del filo inicial de la herramienta de 1/4 in, prueba 12.

Además, se observa que el avance genera un cambio en el acabado superficial por sí solo, como se observa en la Figura 16 (a) tiene un avance de 900 mm/min, una velocidad de giro de 4800 rpm y una profundidad de 4 mm mientras que la Figura 16 (b) tiene un avance de 1600 mm/min, una velocidad de giro de 4800 rpm y una profundidad de corte de 4 mm.

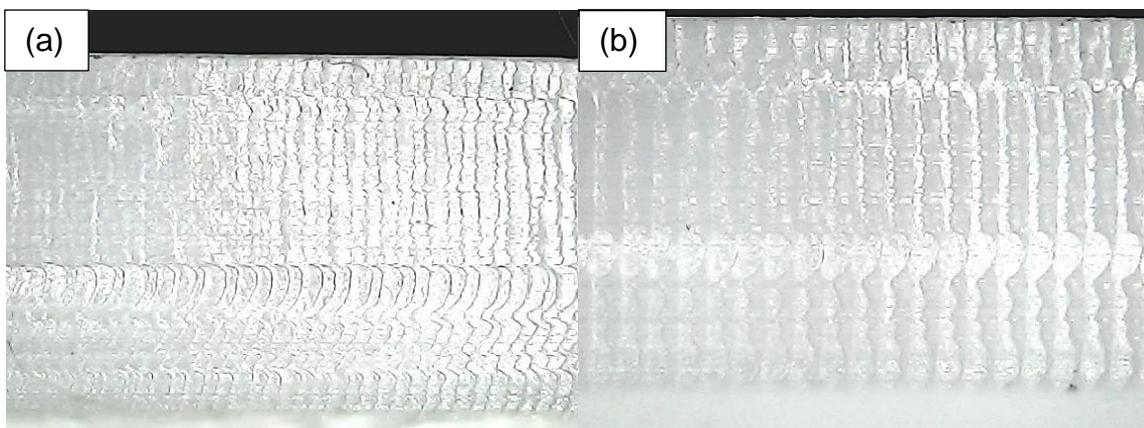


Figura 16. Diferencia en el acabado superficial para la herramienta 1/4 in. (a) Prueba 8, (b) Prueba 12.

Para verificar que el avance es factor que influye de manera significativa en la calidad del acabado superficial se analizaron las pruebas 2 (avance de 900 mm/min) y la prueba 6 (1600 mm/min) que tienen en común la velocidad de giro de 4300 rpm y la profundidad de corte de 4 mm. En este caso la Figura 17 muestra la calidad en el acabado para ambas pruebas y se observa que un avance mayor implica un mejor acabado superficial.

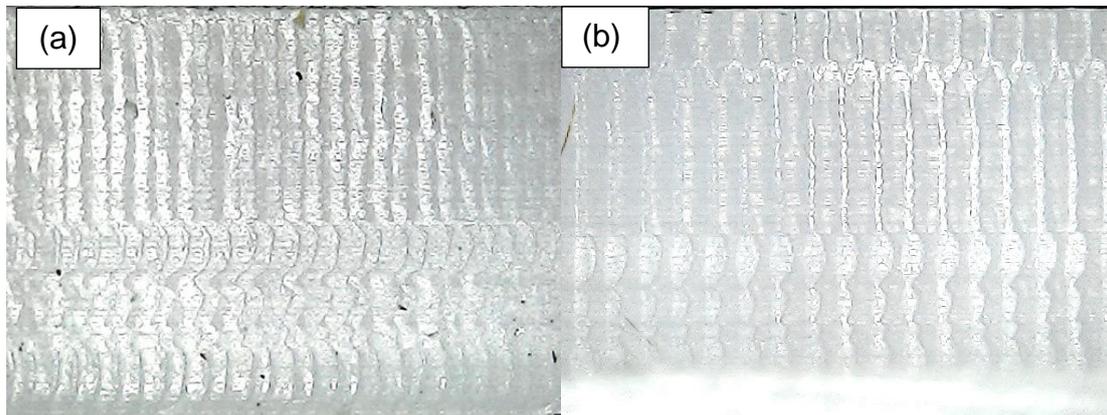
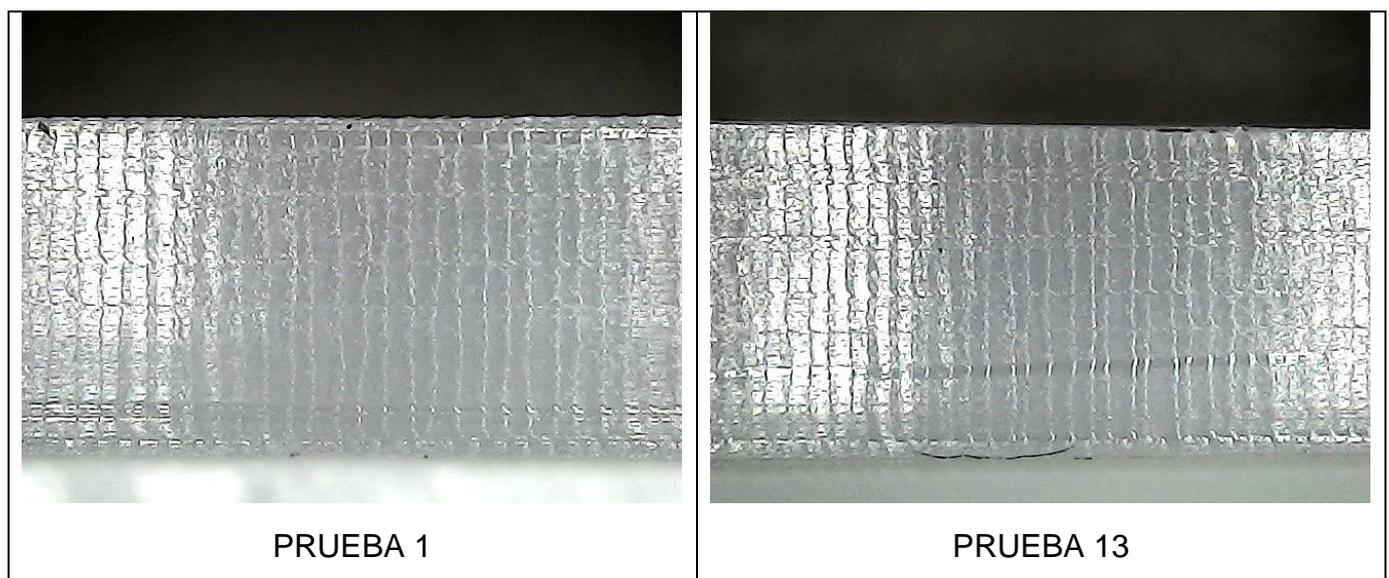


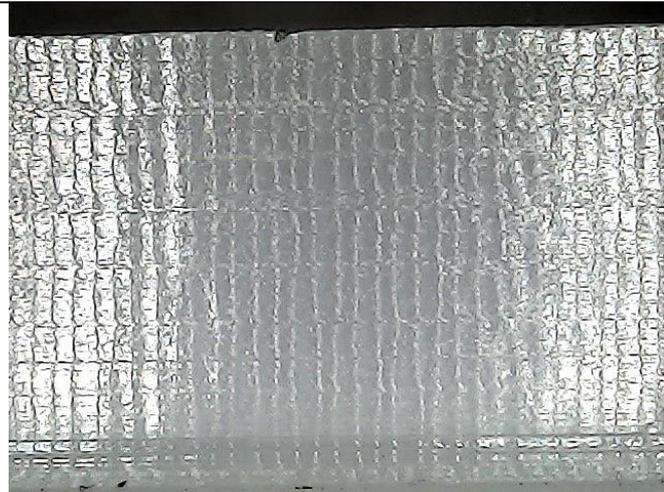
Figura 17. Diferencia en el acabado superficial para la herramienta 1/4 in. (a) Prueba 2, (b) Prueba 6.

7.4.2 Análisis de acabado superficial para la herramienta de 1/2 in.

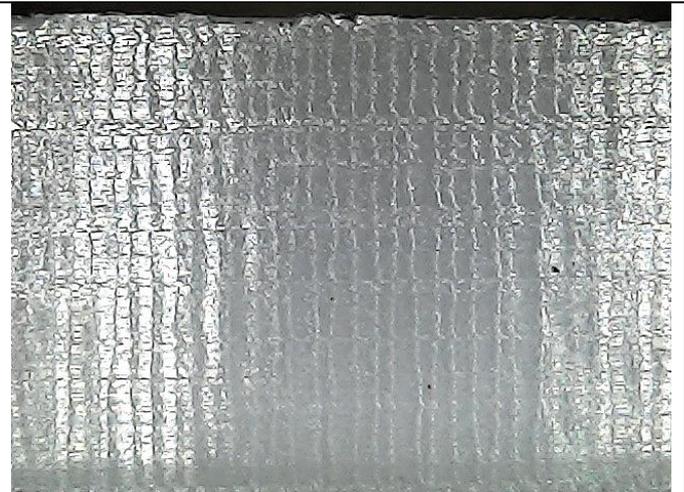
La Tabla 24 muestra las fotografías de las 24 pruebas realizadas con la herramienta de 1/2 in para realizar el análisis respectivo, es importante saber que existe una correspondencia entre las pruebas de la 1 a la 12 con la 13 a la 24 por la repetitividad del ensayo, por eso el orden que se tiene en la tabla.

Tabla 24. Compilado de fotografías para la herramienta de 1/2 in.

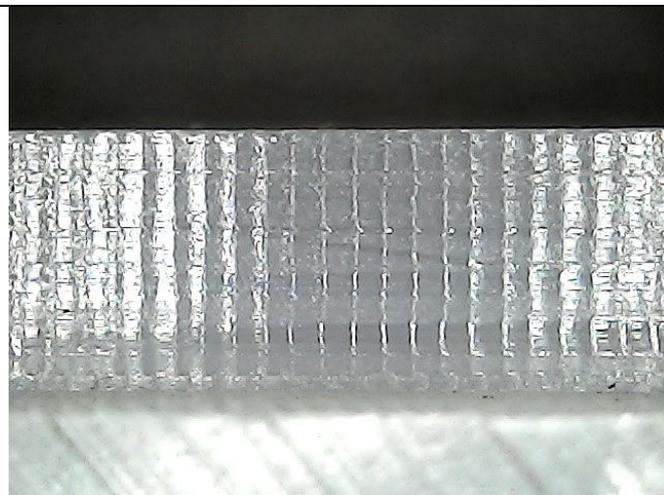




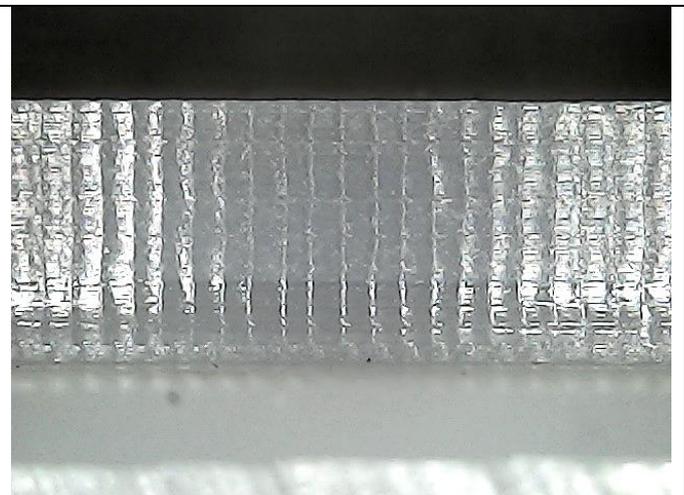
PRUEBA 2



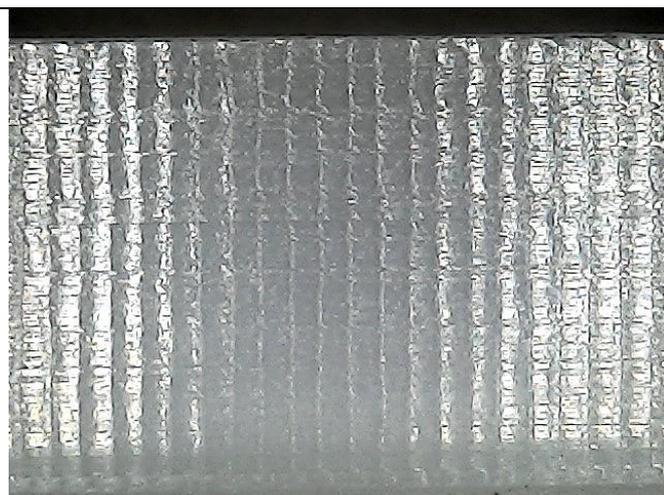
PRUEBA 14



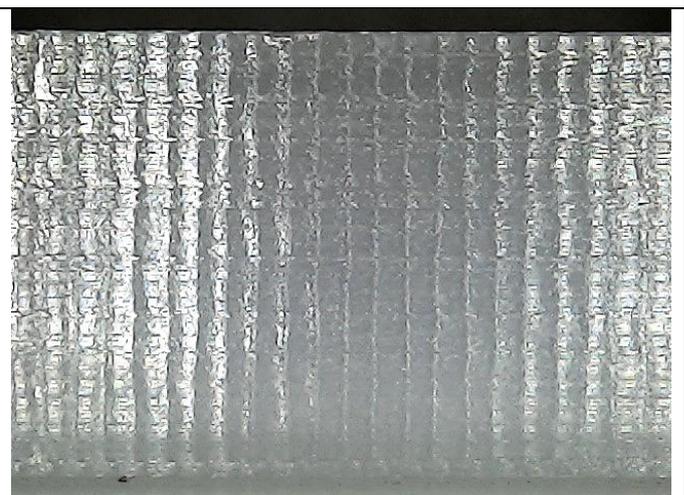
PRUEBA 3



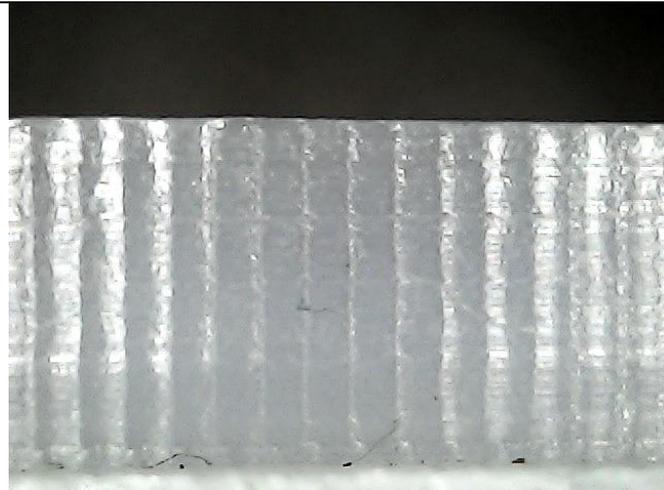
PRUEBA 15



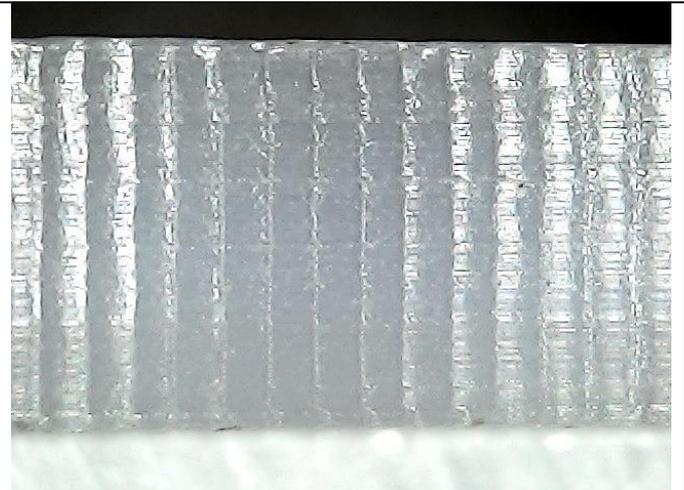
PRUEBA 4



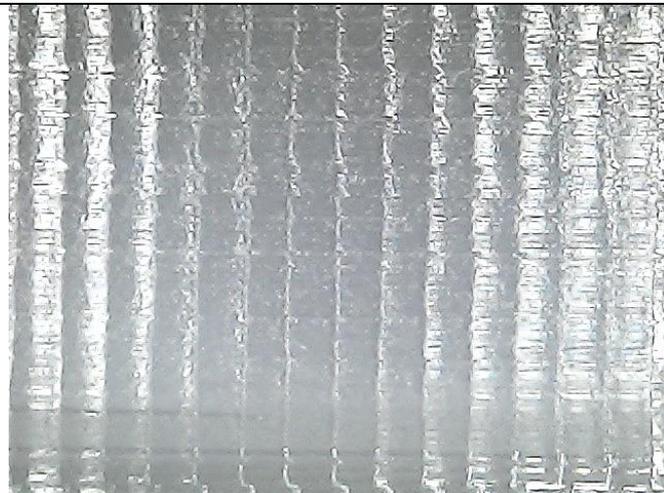
PRUEBA 16



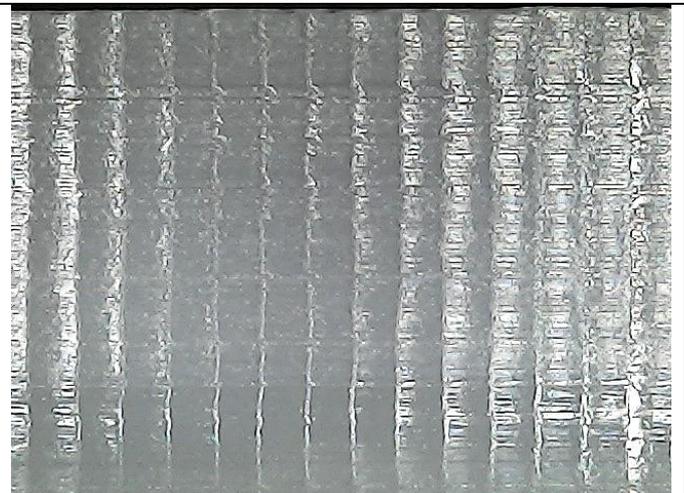
PRUEBA 5



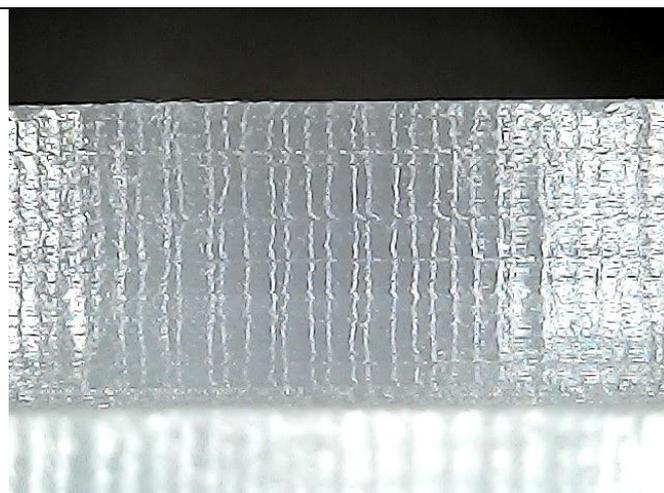
PRUEBA 17



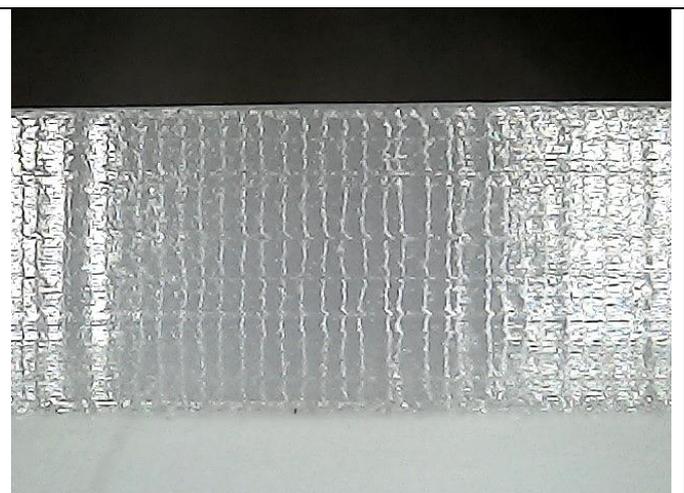
PRUEBA 6



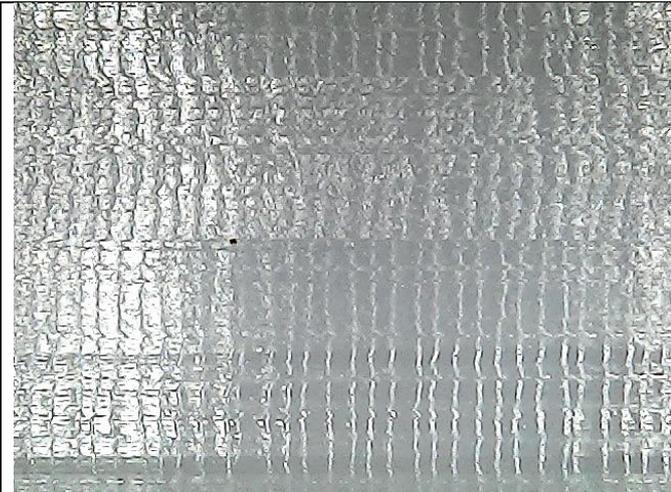
PRUEBA 18



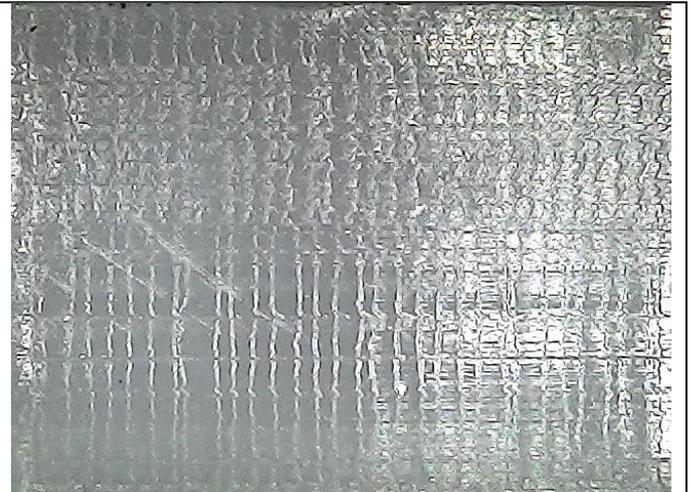
PRUEBA 7



PRUEBA 19



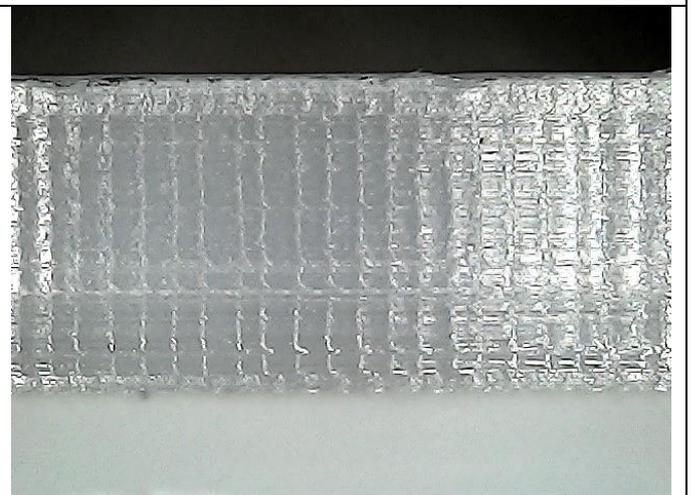
PRUEBA 8



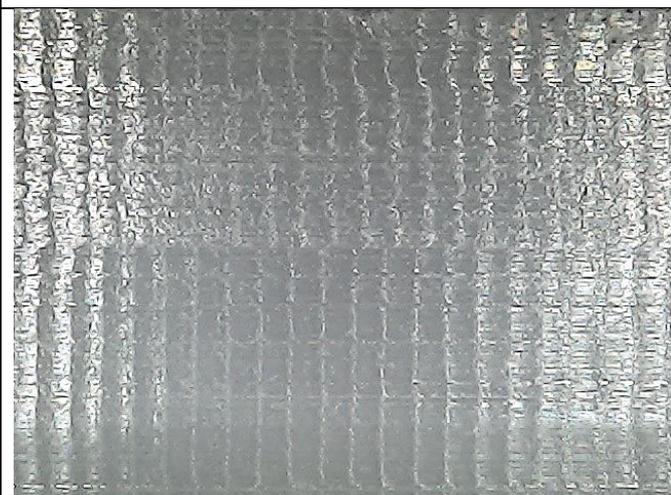
PRUEBA 20



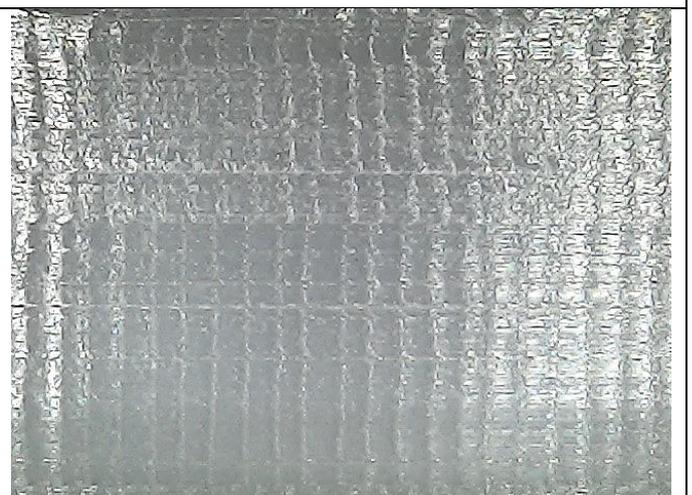
PRUEBA 9



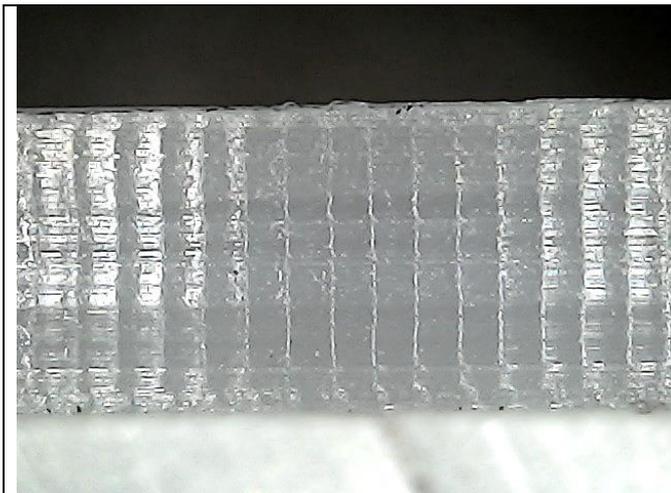
PRUEBA 21



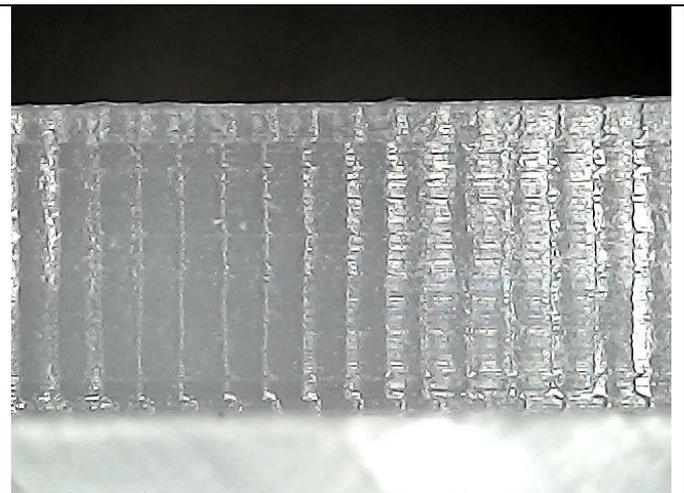
PRUEBA 10



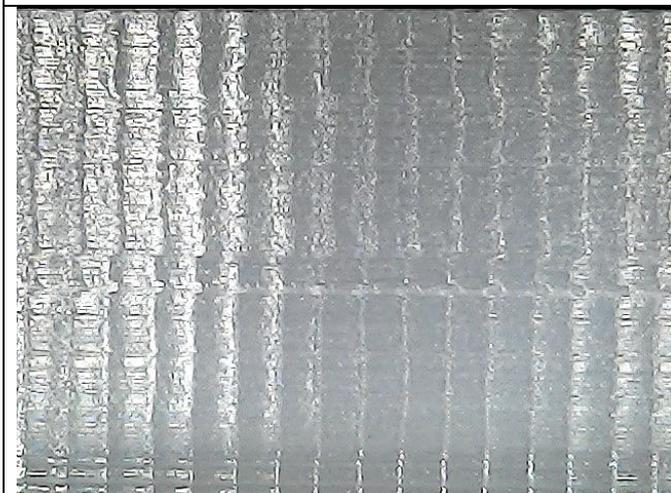
PRUEBA 22



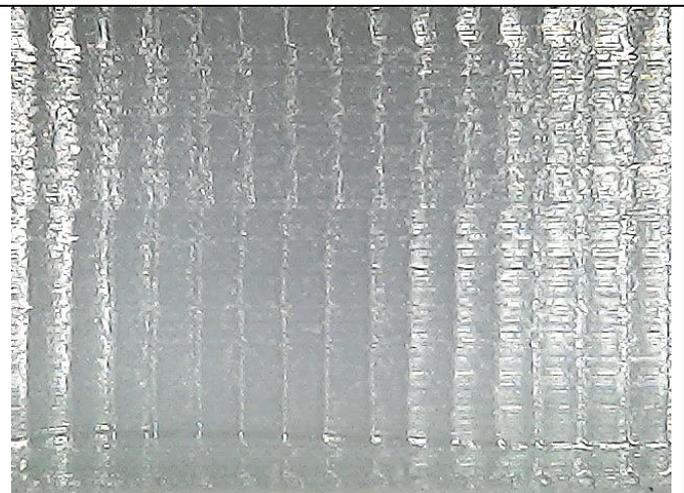
PRUEBA 11



PRUEBA 23



PRUEBA 12



PRUEBA 24

Desde la Tabla 24 se puede ver como el cambio en los parámetros de corte influye en el acabado superficial de la pieza, y es notorio como al aumentar el avance el acabado mejora, la profundidad de corte no tiene mayor significancia en este caso y a diferencia de la herramienta anterior (1/4in) la parte inferior del filo no dejó marca diferente, lo cual sugiere que dicha marca es por el desgaste de la herramienta.

En cuanto al avance, éste genera por sí mismo un cambio en el acabado superficial, como se observa en la Figura 16 (a) tiene un avance de 1000mm/min, una velocidad de giro de 5000rpm y una profundidad de corte de 5mm mientras que la Figura 16 (b) tiene un avance de 2000mm/min, una velocidad de giro de 5000rpm y una profundidad de corte de 5mm.

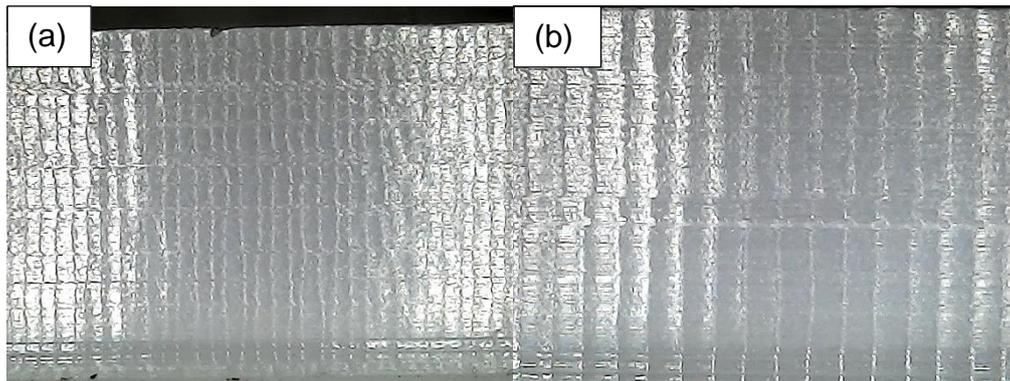


Figura 18. Diferencia en el acabado superficial para la herramienta 1/2 in. (a) Prueba 8, (b) Prueba 12.

Para verificar que el avance es factor que influye de manera significativa en la calidad del acabado superficial se analizaron las pruebas 2 (avance de 1000mm/min) y la prueba 6 (2000mm/min) que tienen en común la velocidad de giro de 4800rpm y la profundidad de corte de 5mm. En este caso la Figura 19 muestra la calidad en el acabado para ambas pruebas y se observa que un avance mayor implica un mejor acabado superficial.

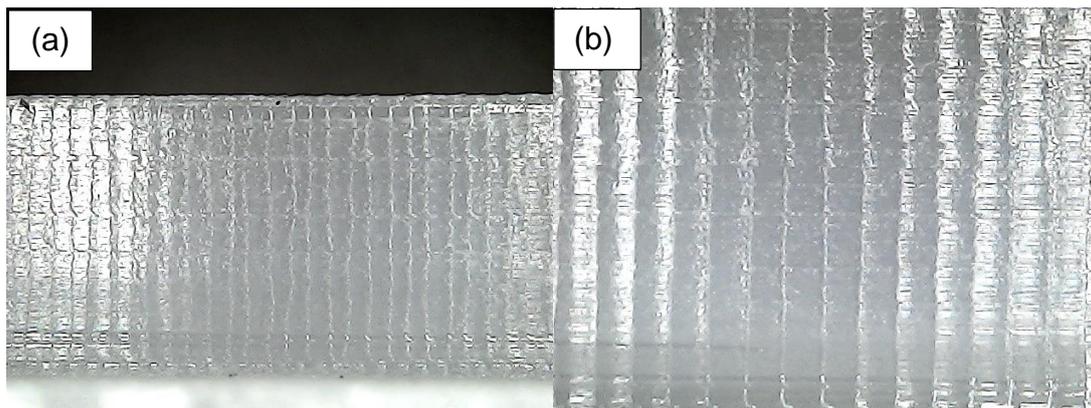


Figura 19. Diferencia en el acabado superficial para la herramienta 1/2 in. (a) Prueba 2, (b) Prueba 6.

7.4.3 Dispositivo para el control calidad del acabado superficial.

El microscopio empleado para la toma de las fotografías al arrojar resultados que pueden ser utilizados para el control calidad permitió plantear la opción de comprar uno de estos y fabricar un dispositivo que permita facilitar el control del acabado superficial por parte de Empaquetaduras y Empaques S.A.S por lo que se pensó el dispositivo mostrado en la Figura 20, es un sistema simple que permitiría mediante la regleta y el microscopio analizar el acabado superficial de las piezas, no solo las producidas en el área de mecanizado sino también en las áreas de prensa, extrusión e inyección.

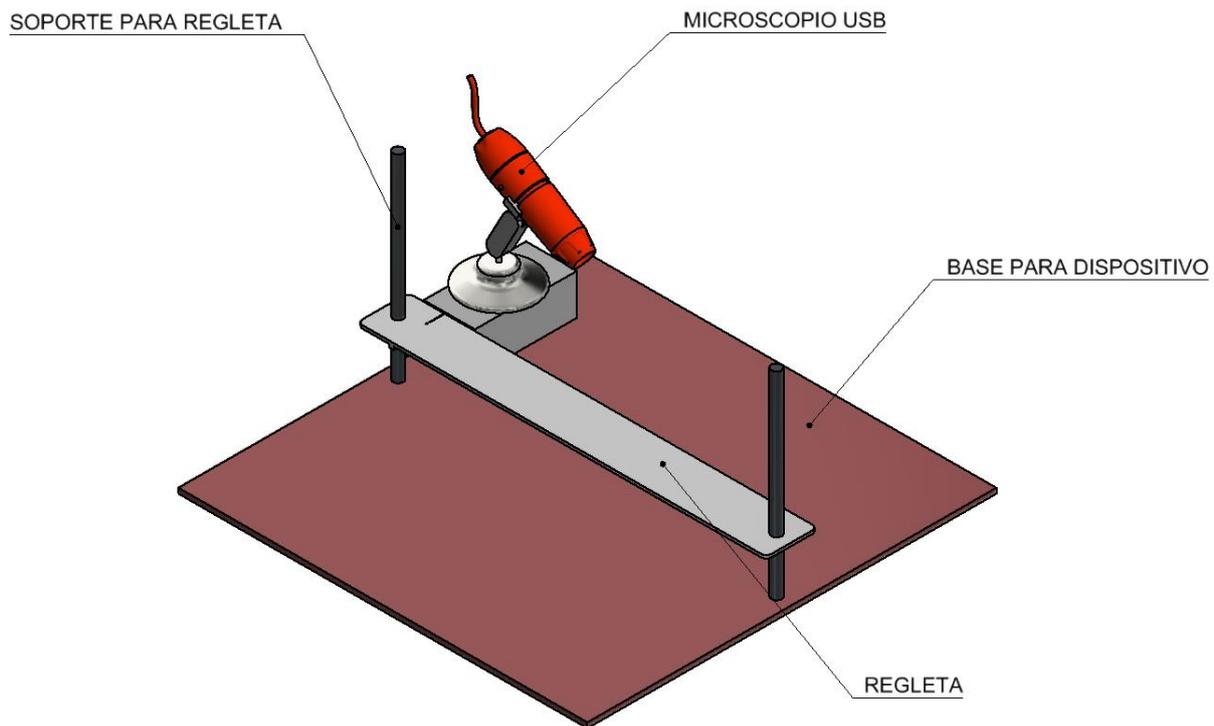


Figura 20. Esquema del dispositivo para control de calidad del acabado superficial.

Después de analizar los diferentes factores y niveles de cada factor para ambas herramientas y el acabado superficial obtenido en cada prueba se llegó a los siguientes resultados:

- Herramienta 1/4 in.

En esta herramienta se presentó una disminución en el valor global de la aceleración de las vibraciones de 10,4355% con el cambio en la velocidad del husillo de 4300 rpm a 4800 rpm, y con el aumento en el avance de 900 mm/min a 1600 mm/min se presentó una disminución en el valor global de la aceleración de las vibraciones de 1,626% por lo que desde el punto de vista lo adecuado será emplear 4800 rpm para esta herramienta sin embargo, analizando el amperaje se obtiene un aumento en este de 7,399% con el cambio de la velocidad del husillo. Es decir, hay una disminución de las vibraciones con el aumento de estos parámetros, pero se aumenta el consumo energético.

Desde el punto de vista del acabado superficial, el avance es el factor que impacta, un mayor avance implica un mejor acabado superficial.

Teniendo en cuenta lo anterior y analizando el consumo energético mostrado en la Tabla 21 los parámetros adecuados para la herramienta de 1/4 in son:

4300 rpm

1600 mm/min

Dado que con este valor de velocidad de husillo se sacrifica un poco la reducción en las vibraciones, pero desde el punto de vista del consumo

energético y el acabado superficial puede traer beneficios para el proceso de mecanizado a gran escala y en cuanto a la profundidad, ambos valores pueden ser utilizados, puesto que, desde la parte estadística, de acabado superficial y de coste energético no son influyentes.

En el consumo energético tomando los costos energéticos de la Tabla 21 de las pruebas analizadas en la Figura 17 podemos sacar el porcentaje de aumento del costo de la energía.

$$\%Aumento_{Costo\ energético} = \left| \frac{1316,87 - 1274,84}{1316,87} \right| \times 100 = 3,19\%$$

Donde *1316,87 \$COP/h* es el costo de la prueba 6 (4300 rpm, 1600 mm/min y 4 mm) y *1274,84 \$COP/h* es el costo de la prueba 2 (4300 rpm, 900 mm/min y 4 mm). Esto respalda el hecho de que un aumento en el avance repercute directamente en el aumento del costo energético en un *3,19%*, pero también en la obtención de un mejor acabado superficial.

- Herramienta 1/2 in.

En esta herramienta se presentó un aumento en el valor global de la aceleración de las vibraciones de *11,041%* con el cambio en la velocidad del husillo de 4500 rpm a 5000 rpm, Es decir, hay un aumento de las vibraciones y aumenta el consumo energético un *4,353%* con el aumento de la velocidad del husillo.

En esta herramienta, la variación del avance no afecta de manera directa el valor global de la aceleración o del amperaje y desde el punto de vista del acabado superficial, el avance es el factor que impacta, un mayor avance implica un mejor acabado superficial.

Teniendo en cuenta lo anterior y analizando el consumo energético mostrado en la Tabla 22 los parámetros adecuados para la herramienta de 1/2 in son:

4500 rpm

2000 mm/min

Dado que con este valor de velocidad de husillo se emplea el valor con menor vibración registrada y desde el punto de vista del consumo energético y el acabado superficial puede traer beneficios para el proceso de mecanizado a gran escala y en cuanto a la profundidad, ambos valores pueden ser utilizados, puesto que, desde la parte estadística, de acabado superficial y de coste energético no son influyentes.

En el consumo energético tomando los costos energéticos de la Tabla 22 de las pruebas analizadas en la Figura 19 podemos sacar el porcentaje de aumento del costo de la energía.

$$\%Aumento_{Costo\ energético} = \left| \frac{1330,88 - 1288,85}{1330,88} \right| \times 100 = 3,16\%$$

Donde 1330,88 \$COP/h es el costo de la prueba 6 (4500 rpm, 2000 mm/min y 5mm) y 1288,85 \$COP/h es el costo de la prueba 2 (4500rpm, 1000 mm/min y 5 mm). Esto respalda el hecho de que un aumento en el avance repercute directamente en el aumento del costo energético en un 3,16%, pero también en la obtención de un mejor acabado superficial, además es necesario tener en cuenta que este aumento en el avance puede significar a largo plazo un tiempo menor de maquinado de una misma cantidad de material lo que podría ser un aumento en la producción.

8 CONCLUSIONES.

- Desde el punto de vista vibracional el diámetro de la herramienta hace que el comportamiento de las vibraciones cambie notoriamente, de tal forma que mientras que para la herramienta de 1/4 in el aumento de la velocidad de husillo de 4300 rpm a 4800 rpm hizo que el valor global de la aceleración se redujera en un 10,4355% para la herramienta de 1/2 in el cambio de la velocidad del husillo de 4500 rpm a 5000 rpm causó un aumento de 11,041% en el valor global de aceleración de las vibraciones.
- El análisis de varianza permite establecer que parámetros o combinación de parámetros es la que más influye, en este caso desde el punto de vista vibracional, esto se puede traducir en la calidad del mecanizado y deja como resultado el conocimiento del rango de parámetros de corte adecuados como lo son:
 - Herramienta 1/4 in: Velocidad de husillo (RPM) 4800, Avance (mm/min) 1600 y profundidad de corte (mm) 4.
 - Herramienta 1/2 in: Velocidad de husillo (RPM) 5000, Avance (mm/min) 2000 y profundidad de corte (mm) 5.
- Desde el punto de vista de acabado superficial en ambas herramientas un el mayor avance fue el que arrojó un mejor acabado superficial a pesar de representar un mayor consumo energético, para la herramienta de 1/4 in el aumento en el costo energético con la variación en el avance fue de 3,19% y para la herramienta de 1/2 in el aumento en el costo energético con la variación en el avance fue de 3,16%, para este caso la variación en la velocidad del husillo no es significativa.
- El microscopio digital USB fue una herramienta de gran ayuda para el desarrollo del proyecto permitiendo ver con más detalle la calidad del mecanizado y abriendo la puerta a un dispositivo que no solo permita analizar el acabado de una pieza mecanizada sino también fabricada en las demás áreas de la empresa, además es un elemento asequible y de fácil uso.
- En cuanto al acelerómetro empleado es fundamental tener en cuenta el grado de sensibilidad de este pues juega un papel importante en el tiempo de toma

de datos, de esta sensibilidad depende la ubicación del sensor para la realización de la toma de datos.

- El tiempo durante el cual se toma los datos y la forma en que se procesen es parte fundamental del resultado, tal es el caso del cambio del tiempo de muestreo realizado, antes eran diez segundos y pasaron a ser nueve segundos, si se hubiese continuado con el tiempo de muestreo inicial los resultados no tendrían certeza total por tener un tiempo muerto (sin mecanizado).
- El conocimiento brindado por las áreas implicadas fue vital a la hora de establecer los rangos entre los que se variaron los parámetros, los resultados obtenidos validan que los rangos se encuentran bien definidos y permitió establecer de manera más específica los valores de dichos parámetros no solo desde el punto de vista de costo energético sino desde el punto de vista del acabado superficial.
- El mecanizado de los polímeros es un tema en el que aún se necesita ahondar, pues desde la bibliografía existente no se halla mucha información respecto a los parámetros para estos y lo que se encuentra está definido para máquinas de mayor capacidad.
- En este caso al mecanizar un polímero la herramienta puede sufrir desgaste por temperatura, esto debido al embotamiento de la viruta, lo que se puede aminorar empleando refrigerante, teniendo en cuenta el método de sujeción a la mesa puesto que en Empaquetaduras y Empaques S.A.S en ocasiones se sujeta por adhesión a la mesa, se sujeta en prensa o con bridas; de estos tres tipos solo el método por adhesión no permite el uso de refrigerante.
- Desde el punto de vista operativo de la máquina se sugiere analizar mejor la ubicación de las herramientas en el carrusel de la máquina puesto que se observó que en múltiples ocasiones según las herramientas que requiera el mecanizado el carrusel debía recorrer casi toda su carrera para hacer el cambio de herramienta porque desde el área de ingeniería programan las herramientas distantes, es decir la herramienta 1 y la herramienta 12 en vez de emplear el espacio 1 y 2 para reducir este tiempo; este cambio también a largo plazo y según el tiempo de maquinado de algunas piezas complejas puede ayudar a reducir tiempos muertos y aumentar la productividad. De esta manera los operarios no tendrían que modificar el programa.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Bedoya, C., & (UdeA). (2020). *Introducción al CNC*.
- Coromant, S. (2019a). *Fórmulas y definiciones de fresado*.
<https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>.
- Coromant, S. (2019b). *Maquinabilidad de los materiales*.
<https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- Draw.io*. (s. f.). Recuperado 7 de agosto de 2020, de <https://app.diagrams.net/>
- E&E. (2019). *Empaquetaduras y Empaques S.A.*
<https://www.empaquetadurasyempaques.com/nosotros.html>
- Eneka. (2020). *Eneka*.
<http://www.eneka.com.uy/equipos/herramientas/magnificacion-y-lupas/microscopio-usb-digital-8-leds-x1000-detail.html>
- EPM. (2020). *Tarifas y Costo de Energía Eléctrica - Mercado Regulado*.
https://www.epm.com.co/site/Portals/2/Documentos/tarifas/energia2020/Publicación_Tarifas_Energia_Julio_16_2020.pdf?ver=2020-07-16-120240-140
- GrabCAD*. (2013). <https://grabcad.com/library/milling-machine-fresadora-cnc-1>
- Groover, M. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems*. En J. Wiley (Ed.), *John Wiley & Sons* (4th Editio).
- Milltronics. (s. f.). *General Catalog* (p. 9).
- Morares Villamil (Pontificia Universidad Javeriana), D. A. (2009). *Determinación de parámetros para la operación de cilindrado de acero SAE12L 14, bronce SAE40 y aluminio SAE1060 en el torno PC TURN 125 por medio de una metodología experimental*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Oberg, E., Jones, F. D., Horton, H. L., & Ryffel, H. H. (2016). 44. Estimating Speeds and Machining Power. En C. J. MCCAULEY (Ed.), *Machinery's Handbook* (30th ed., p. 1123). Industrial Press.
- Posch, W. (2011). 3 - Polyolefins. En M. B. T.-A. P. E. H. Kutz (Ed.), *Plastics Design Library* (pp. 23-48). William Andrew Publishing.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10003-0>
- Quadrant. (2011). *TIVAR 1000*.
- TMX. (2013). *Cutting tool catalog*.
- Ullmann's Polymers and Plastics - Products and Processes. (2016). En *Ullmann's Polymers and Plastics - Products and Processes, 4 Volumen Set* (p. 443).
<https://doi.org/10.1002/14356007>

10 ANEXOS.

10.1 Anexo 1

Los códigos G empleados en la máquina para realizar las pruebas, los espacios representados como (____) son los parámetros que se modificaban dentro de las pruebas para analizar los efectos de estos en el proceso de maquinado.

10.1.1 Programa para probeta de 50mm X 50mm.

%
G21
G0 G17 G40 G49 G80 G90
T1 M6
G0 G90 G54 X20. Y-20. S____ M3
Z3.
G1 Z____ F____
X-20.
Y20.
X20.
G0 Z10.
M30
%

10.1.2 Programa para probeta de 60mm X 50mm.

%
G21
G0 G17 G40 G49 G80 G90
T1 M6
G0 G90 G54 X25. Y-30. S____ M3
Z3.
G1 Z____ F____
X-25.
Y30.
X25.
G0 Z10.
M30
%

10.2 Anexo 2.

El código en Matlab® empleado para realizar el procesamiento de los datos.

```
%PROCESAMIENTO DE DATOS CENTRO DE MECANIZADO MILLTRONICS VM15

%EMPAQUETADURAS Y EMPAQUES S.A

Fs=11628; %Frecuencia de Muestreo

%Variables a utilizar
t=Datos(:,1); %Llama la columna 1 del excel como tiempo
a1=Datos(:,2); %llama a la columna 2 del excel como Aceleracion
RMSa1=std(a1); %Hallar el valor RMS de la aceleracion
peaka1=max(a1); %Pico maximo
cfa1=peaka1/RMSa1; %Factor de cresta

%Grafica temporal
plot(t,a1); %Grafica la aceleracion vs tiempo
title(['RMSa1= ',num2str(RMSa1),', ','MAXa1= ',num2str(peaka1)])
xlabel('Tiempo')
ylabel('Aceleracion')

%Revisar en la ayuda los comandos FFT y nextpow2, linspace

%Espectro de Frecuencias
L=length(a1);
NFFT=2^nextpow2(L); % Largo de la fft
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
frecDom1=fft(a1,NFFT)/L; % fft promediada

%Grafica de frecuencia
plot(f,2*abs(frecDom1(1:NFFT/2+1)), 'r');
title('Comportamiento de frecuencia')
xlabel('f[Hz]')
grid

%Colocar los dos gráficos juntos para hacer el análisis

subplot(2,1,1)
plot(t,a1, 'r')
title(['A RMS[m/s2]= ',num2str(RMSa1)])
xlabel('t[s]')
ylabel('A[m/s2]')
grid
subplot(2,1,2)
plot(f,2*abs(frecDom1(1:NFFT/2+1)), 'r');
title('Comportamiento de frecuencia')
xlabel('f[Hz]')
grid
```