



**Formulación de mezclas para la producción de mármol sintético en una máquina de
polímero colado en la empresa Firplak S.A.**

Yury Mar Aguas Ruiz

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero de Materiales

Asesores

Franklin Jaramillo Isaza

Sara María Aguilar

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería de Materiales
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita

Aguas Ruiz Yury Mar [1]

Referencia [1] Aguas Ruiz, “Formulación de mezclas para la producción de mármol sintético en una máquina de polímero colado – Firplak S.A.”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.

Estilo IEEE
(2020)



Centro de documentación de ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado con todo mi amor y gratitud a las personas y seres especiales que me han acompañado y apoyado a lo largo de este camino. A mi familia, en especial a mi mamá y a mi papá, quienes, con su amor incondicional, sacrificios y sabiduría me han guiado y motivado a alcanzar mis sueños. Su apoyo constante ha sido el pilar fundamental en mi vida, y sin ustedes, este logro no habría sido posible. Gracias por creer en mí, incluso en los momentos en que yo no lo hacía.

Agradecimientos

A Dios, por darme la fuerza, la salud y la sabiduría necesarias para superar cada obstáculo en este recorrido. A la empresa Firplak S.A., por darme la oportunidad de realizar mis prácticas profesionales, un paso crucial en mi desarrollo y formación. A mi asesora Sara Aguilar, por su tiempo, dedicación y compromiso con mi formación profesional; su orientación y apoyo han sido invaluable para mi aprendizaje. A mi asesor Franklin, por sus valiosos consejos y guía a lo largo de este proceso. Y a mis amigos, por estar siempre para mí, brindándome su apoyo y ánimo incondicional en cada momento.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
3. OBJETIVOS	14
3.1. Objetivo general	14
3.2. Objetivos específicos.....	14
4. MARCO TEÓRICO	15
4.1 Mármol sintético	15
4.2 Fenómenos químicos: punto de gel y curado.....	16
4.3 Máquina para verter polímero colado o hormigón de polímero.....	17
4.4 Proceso de fabricación de una pieza	18
4.4.1 Método de polímero colado	19
5. METODOLOGÍA	21
5.1 Propiedades y características de la materia prima.....	21
5.1.1 Reactividad de la resina: Pruebas de tiempo de gel	22
5.1.2 Viscosidad de la resina.....	22
5.1.3 Distribución granulométrica de los carbonatos.....	22
5.2 Pruebas piloto: pruebas de tiempo de gel en el proceso de vaciado	23
5.3 Propiedades y características de producto final.	23
5.3.1. Propiedades mecánicas.	23
5.3.2. Prueba de calcinación o ignición.	24
5.3.3 Determinación de densidades.	24
6. RESULTADOS	25

6.1 Propiedades y características de la materia primas.	25
6.1.1 Reactividad resina.....	25
6.1.2 Viscosidad resina	26
6.1.3 Distribución granulométrica de carbonatos.	26
6.2 Formulación de la máquina de polímero colado	27
6.3 Propiedades y características de producto final	36
6.3.1 Ensayo de flexión.....	36
6.3.2 Ensayo de impacto en punto.	37
6.3.3 Densidad y porosidad.....	38
6.3.4 Calcinación.	39
7. CONCLUSIONES.....	41
8. FUTURAS INVESTIGACIONES.	42
REFERENCIAS	44

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> Porcentajes de cobalto y peróxido en los ensayos.....	22
<i>Tabla 2.</i> Proporciones de resina/carbonato a las cuales se le hicieron pruebas piloto.....	23
<i>Tabla 3.</i> Resultados de reactividad de la resina	25
<i>Tabla 4.</i> Evaluación de tiempo de gel de la mezcla sacada de la máquina de polímero colado.	28
<i>Tabla 5.</i> Tabla de trabajo entregada a producción.	29
<i>Tabla 6.</i> Seguimiento de piezas en producción.....	30
<i>Tabla 7.</i> Evaluación tiempo de gel con menor porcentaje de resina.....	31
<i>Tabla 8.</i> Tabla de trabajo entregada a producción con menores porcentajes de resina.	31
<i>Tabla 9.</i> Evaluación tiempo de gel con 17-20% de resina.....	32
<i>Tabla 10.</i> Tabla de trabajo entregada a producción con 17-20% de resina.	33
<i>Tabla 11.</i> Tabla de trabajo entregada a producción para 12 min de t gel con 17-20%.....	34
<i>Tabla 12.</i> Tabla de seguimientos de piezas en producción para la formulación 17-20% resina.	35
<i>Tabla 13.</i> Dimensiones de las probetas del ensayo de flexión.....	36
<i>Tabla 14.</i> Resultados ensayo de flexión.....	37
<i>Tabla 15.</i> Densidades y porcentaje de porosidad.....	39
<i>Tabla 16.</i> Resultados de calcinación.	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reacción de curado de la resina de poliéster.	16
Figura 2. Máquina de polímero colado (a) vista general de la máquina. (b) tablero de operaciones (c) zona de mezclado.....	18
Figura 3. Proceso de fabricación de piezas de mármol sintético (a) vaciado de mezcla (b) postura de contra molde(c) retiro de contra molde (d) toma de dureza (e) desmolde de la pieza (f) zona de pulido.....	19
Figura 4. (a) Probetas antes del ensayo de flexión (b) probetas después del ensayo de flexión...37	
Figura 5. Resultados ensayos de impacto en punto.....	38

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Grafica de Análisis granulométrico de carbonato de calcio.....	27
Gráfica 2 Tiempo de gel vs temperatura de masa.	29
Gráfica 3. Cantidad de co y pe en función de la temperatura	35

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

PG	Punto de gel
Pe	Mek Peróxido, iniciador
Co	Octoato de Cobalto, catalizador
Min	Minutos
t gel	Tiempo de gel
T masa	Temperatura de masa/mezcla
T ambiente	Temperatura ambiente
RMC	Retiro de contra molde
HD	Shore D, unidad de dureza

RESUMEN

Este estudio presenta la formulación de mezclas para la producción de mármol sintético mediante una máquina de polímero colado en Firplak S.A., con el objetivo de mantener tiempos adecuados de gel y curado durante el vaciado en molde. Las proporciones de octoato de cobalto y MEK peróxido en una resina de poliéster tereftálica se ajustaron, evaluando su reactividad química, viscosidad y la distribución granulométrica del carbonato de calcio para ser usado como fase dispersa en la mezcla. El ajuste de la formulación se llevó a cabo mediante pruebas piloto que permitieron adaptar las cantidades de aditivos según la temperatura de la mezcla, siendo esta la variable principal que afecta la velocidad de curado, subrayando la importancia de un control preciso de la formulación. La formulación diseñada para el proceso de vaciado actual incluye 17-20% de resina y 83-80% de carbonato de calcio, logrando un tiempo de gel de 12 minutos y un desmolde de 24 minutos. Esta formulación mostró buena resistencia a la flexión y al impacto en punto, cumpliendo con la norma ASTM Z124. Adicionalmente, se estudiaron las variables de densidad, porosidad y prueba de ignición para asegurar una calidad óptima en los productos finales de la empresa. Con una formulación óptima se busca una eficiencia operativa, con tiempos de producción adecuados, asegurando la calidad de los productos finales y facilitando la innovación y el desarrollo continuo en Firplak S.A.

Palabras clave — Mármol sintético, máquina de polímero colado, tiempo de gel, tiempo de curado, formulación de mezclas.

ABSTRACT

This study presents the formulation of mixtures for the production of synthetic marble using a polymer casting machine at Firplak S.A., with the objective of maintaining adequate gel and curing times during mold casting. The proportions of cobalt octoate and MEK peroxide in a terephthalic polyester resin were adjusted, evaluating their chemical reactivity, viscosity, and granulometric distribution of calcium carbonate. The formulation adjustment was carried out through pilot tests that allowed the adaptation of additive quantities according to the mixture temperature, which is the main variable affecting the curing speed, highlighting the importance of precise formulation control. The formulation designed for the current casting process includes 17-20% resin and 83-80% calcium carbonate, achieving a gel time of 12 minutes and a demolding time of 24 minutes. This formulation showed good resistance to flexion and point impact, complying with the ASTM Z124 standard. Additionally, density, porosity, and ignition tests were studied to ensure optimal quality in the company's final products. With an optimal formulation, operational efficiency is sought, with adequate production times, ensuring the quality of the final products and facilitating innovation and continuous development at Firplak S.A.

Keywords — Synthetic marble, polymer casting machine, gel time, curing time, mixture formulation.

1. INTRODUCCIÓN

FIRPLAK S.A, con sede en el municipio de Itagüí, es una empresa colombiana con más de cuatro décadas de experiencia en el mercado de baños y cocinas en Latinoamérica. Actualmente, está buscando innovar en sus procesos de producción mediante la adquisición de un nuevo equipo para la línea de mármol sintético, con el objetivo de optimizar la elaboración de lavamanos y lavaplatos.

El mármol sintético es una alternativa más económica al mármol natural; además, ofrece una combinación de estética, durabilidad y versatilidad que lo convierte en una opción atractiva y práctica en comparación con el mármol natural. Entre los materiales utilizados para la sustitución del mármol natural, se encuentran los compuestos basados en resinas de poliéster y carbonato de calcio, los cuales son utilizados actualmente en diversas aplicaciones como instalaciones sanitarias y decorativas [1]. El uso de estos materiales ha generado grandes expectativas tanto a nivel científico como tecnológico debido a su gran facilidad de producción, bajos costos, baja densidad, alta resistencia química, menor fragilidad, entre otras ventajas. Sus propiedades dependerán del polímero que se use como matriz del material compuesto, del contenido y tipo de carga mineral y de los aditivos. Con el uso de esta tecnología se pueden producir materiales cada vez con mayor aplicabilidad en estructuras [2]. El uso de mármol sintético genera gran impacto industrial, no solo por la apreciable reducción en costos de producción, sino también porque permite el diseño de piezas con formas y tamaños ilimitados.

La implementación de nuevos equipos de manufactura acarrea retos sobre el procesamiento de cualquier material. Con el fin de mejorar la productividad, FIRPLAK S.A adquiere una máquina de polímero colado que permitirá la obtención de piezas de diversas geometrías en menores tiempos de producción. Sin embargo, ajustar el proceso del equipo para que exista sinergia entre la resina de poliéster insaturada, porcentajes del catalizador (octoato de cobalto) y el iniciador (peróxido de metiletilcetona, Mek peróxido), así como la composición química de cada componente, se vuelve crucial debido a las variaciones de la temperatura de la mezcla, al ser esta una reacción exotérmica y que además se ve influenciada por la temperatura ambiente. Este ajuste continuo y formulación precisa constituyen los aspectos centrales a desarrollar durante la actual pasantía.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El nuevo equipo adquirido por FIRPLAK S.A, ofrece la facilidad de obtener una mezcla homogénea por medio de un husillo y con menos imperfecciones por la implementación de una bomba de vacío que reduce la cantidad de aire en el producto final, permitiendo la elaboración de piezas de mármol sintético por el método de casting (especificado en la sección 4.4.1) con tiempos de procesamiento y reducciones considerables en los porcentajes en peso de resina utilizados, en comparación con los procesos actuales de la empresa. Pero, como en todo nuevo proceso, su puesta a punto implica nuevos retos, en este caso en particular, asociados a la influencia de factores del medio ambiente sobre el comportamiento del material, esto en conjunto con los parámetros del equipo y la composición química de la materia prima.

El nuevo proceso de producción deberá ser formulado de forma tal que se logre obtener el mayor número de piezas posibles en el menor tiempo posible con adecuadas propiedades mecánicas. Uno de los factores críticos durante el proceso es la temperatura de la mezcla, ya que puede acelerar o retardar la reacción de curado, afectando tanto los tiempos de gelificación como de curado, incidiendo en los productos finales y en los tiempos de producción. Además, la temperatura influye en características como la viscosidad de la masa, que es crucial para asegurar una distribución uniforme en el molde. Para la fabricación de diversos modelos de lavamanos y lavarropas, es importante establecer un tiempo de gel que permita obtener piezas sin dañar los moldes ni saturar la línea de producción debido a largos tiempos de espera. Asimismo, el tiempo de curado debe ser óptimo para garantizar un desmoldeo exitoso de las piezas, es decir, sin fracturas.

Los tiempos anteriormente mencionados dependen de factores como las condiciones ambientales, siendo los factores más relevantes la temperatura de la masa vaciada y la cantidad de octoato de cobalto y Mek peróxido adicionados. El control del proceso, que también se ve afectado por las condiciones del medio, es una tarea de gran complejidad ya que implica no solo el entendimiento del efecto de las variables relacionadas con el equipo adquirido sobre el material y la composición de este, sino también los requerimientos de calidad y tiempos establecidos por la empresa. Por lo aquí descrito, en el presente trabajo se desea entender la correlación entre la temperatura de la masa y la formulación de la materia prima (cantidad de octoato de cobalto y Mek peróxido adicionados) con miras a mantener un control adecuado del tiempo de gel.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Obtener formulaciones de la materia prima, incluyendo las combinaciones de resina de poliéster insaturado/carbonato de calcio/iniciador y catalizador, que permitan mantener un tiempo de gel adecuado para el proceso de vaciado en molde para mármol sintético en un equipo de polímero colado.

3.2. Objetivos específicos

- Estudiar la influencia de la temperatura de la masa, con las proporciones de cobalto y peróxido medidas, sobre el tiempo de gel y curado del producto final.
- Realizar pruebas piloto de procesamiento a partir de la información obtenida, buscando que alcancen las condiciones adecuadas de trabajo (dureza) y evaluar las propiedades mecánicas finales (flexión e impacto en punto) de los productos obtenidos.
- Evaluar la funcionalidad de las cantidades de aditivos para diversas proporciones de mezcla (resina/carbonatos).

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Mármol sintético

El mármol sintético, también conocido como mármol cultivado, se fabrica mediante la mezcla de rellenos, pigmentos y un agente de curado con una mezcla de monómero/polímero, seguido del proceso de moldeo y curado. El polímero utilizado es una resina sintética termofija de poliéster insaturado que actúa como matriz, mientras que el carbonato de calcio, un mineral abundante en la naturaleza y componente principal de muchas rocas sirve como relleno o en algunos casos como refuerzo. La mezcla también incluye aditivos como el MEK peróxido, que actúa como iniciador de la reacción, y el octoato de cobalto, que acelera la reacción de polimerización al crear centros activos que favorecen el entrecruzamiento de la resina [3]. La resistencia y estabilidad del mármol sintético se pueden mejorar mediante el control de varios parámetros durante su producción, resultando en un material con alta resistencia mecánica y excelente procesabilidad.

El mármol sintético se produce artificialmente para superar las dificultades asociadas con el mármol natural como la heterogeneidad en el color, ofrece numerosas ventajas como una amplia variedad de colores y diseños que pueden adaptarse a diferentes estilos decorativos. Además, es más económico y resistente al desgaste, al deterioro por ácidos, a las manchas, y a los rayones, lo que lo hace ideal cuando se requiere de una superficie duradera. Su mantenimiento es más sencillo, ya que no requiere sellado periódico ni cuidados especiales como el mármol natural. En términos ambientales, algunas variantes de mármol sintético pueden tener un impacto menor que el mármol extraído de canteras. El mármol sintético se puede moldear en diversas formas, como lavaplatos y lavamanos. No obstante, también presenta desventajas, como la susceptibilidad a los arañazos y la necesidad de cuidados especiales para evitar daños. Las superficies de mármol sintético pueden repararse con lijado y pulido, aunque se recomienda que estas reparaciones las realicen personas capacitadas. El contenido de resina en el mármol sintético suele ser del 15 al 25%, actuando como fase continua adhesiva sobre el carbonato de calcio [3].

4.2 Fenómenos químicos: punto de gel y curado.

La reacción química que ocurre en una resina de poliéster insaturado se lleva a cabo por copolimerización de estireno que retícula las cadenas de poliéster, por medio de la adición del iniciador, que se descompone térmicamente para formar radicales libres. Estos radicales libres actúan sobre los enlaces insaturados presentes en la resina de poliéster, como lo son los ésteres insaturados, iniciando la formación de cadenas poliméricas. A medida que los monómeros y oligómeros reaccionan entre sí, se forman cadenas poliméricas más largas y reticuladas, lo que conduce a la creación de una estructura tridimensional sólida, como se muestra en la **Figura 1**.

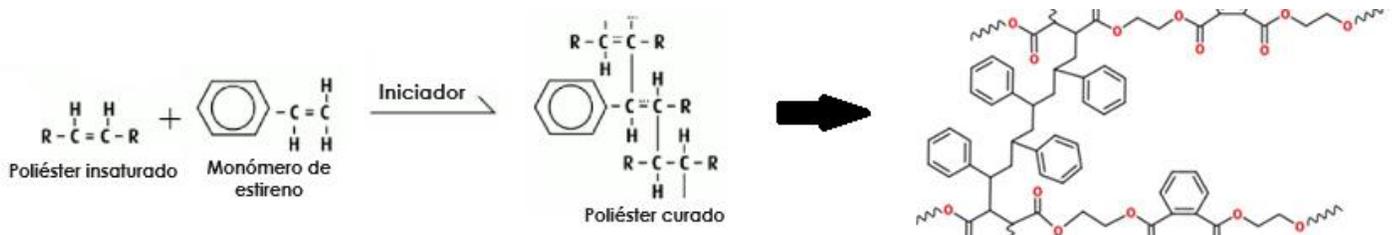


Figura 1. Reacción de curado de la resina de poliéster.

El punto de gel (PG) es una transformación rápida e irreversible en la que un material pasa de un estado líquido viscoso a un gel elástico, marcando el inicio de la formación de un retículo tridimensional. Esta transición es provocada por la reacción entre las estructuras de la resina con el peróxido y el octoato de cobalto, siendo este último el principal determinante del PG [4]. La gelificación es crucial en el procesamiento de materiales, ya que el punto de gel es crítico para la manipulación debido a sus propiedades físicas y químicas únicas. A partir de este estado, el material deja de fluir y no puede ser procesado. Este fenómeno ocurre en una etapa específica del proceso reactivo y depende de la funcionalidad, reactividad y estequiometría de las especies reactivas.

La gelificación de polímeros ocurre en materiales amorfos cuando sus componentes se conectan internamente mediante enlaces químicos o físicos para formar conglomerados macromoleculares. Los geles a menudo se ensamblan a partir de una mezcla de diferentes especies moleculares o particulares. El PG se alcanza cuando el primer conglomerado macromolecular ha crecido hasta alcanzar un tamaño infinito [4].

En el proceso reactivo de entrecruzamiento o curado, las cadenas poliméricas reaccionan entre sí y con un agente entrecruzador o peróxido, formando macromoléculas orientadas en todas direcciones y con numerosos enlaces covalentes entre ellas, como se muestra en la **Figura 1**. El retículo tridimensional resultante confiere al material curado propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia química muy elevadas, haciéndolo apto para múltiples aplicaciones. La reacción de curado es crucial para la utilización del material termoestable, por lo que es importante comprender perfectamente su naturaleza.

El curado de termoestables es un proceso que incluye varias etapas, la química del proceso de curado comienza con la formación y el crecimiento lineal de las cadenas poliméricas, que pronto empiezan a ramificarse y posteriormente a entrecruzarse. A medida que avanza la reacción, el peso molecular aumenta rápidamente y varias cadenas se unen formando un retículo de peso molecular que tiende a infinito [5].

4.3 Máquina para verter polímero colado o hormigón de polímero.

La máquina de polímero colado es un equipo avanzado diseñado para la producción eficiente y precisa de mezclas de resina con cargas. Esta máquina cuenta con tres tolvas para almacenar las cargas, como se muestra en la **Figura 2 (a)**, así como compartimentos específicos para la resina, octoato de cobalto, peróxido y limpiador. También dispone de un dispensador para integrar pigmentos si es necesario. La mezcla se integra mediante un tornillo presentado en la **Figura 2 (c)**, donde se inyecta el peróxido en la punta para iniciar la reacción justo antes de que la mezcla salga de la máquina.

Durante el proceso de mezcla, se crea un vacío que elimina el CO₂, el aire y el exceso de estireno asegurando una mezcla de alta calidad. El material mezclado se vacía en un molde a través de una manguera. La máquina, equipada con tecnología patentada de proceso en vacío, permite una producción mínima de 4,0 litros y máxima de 7,5 litros por minuto, y un caudal de 7,5 a 15,0 kg por minuto. El rendimiento en kg/min depende del tipo de relleno, su distribución granulométrica, densidad aparente y formulación de la mezcla.

La máquina presenta una estructura soldada compuesta por un almacén de componentes, instalación de descarga, armario de distribución integrado, cuerpo principal y una interfaz de operador programable cerca de la salida del tornillo mezclador para el control y manejo tanto manual como automático de la máquina. El sistema de control garantiza la transferencia digital de

datos y una dosificación rápida y precisa, ajustable según las necesidades, como se observa en la **Figura 2 (b)**.

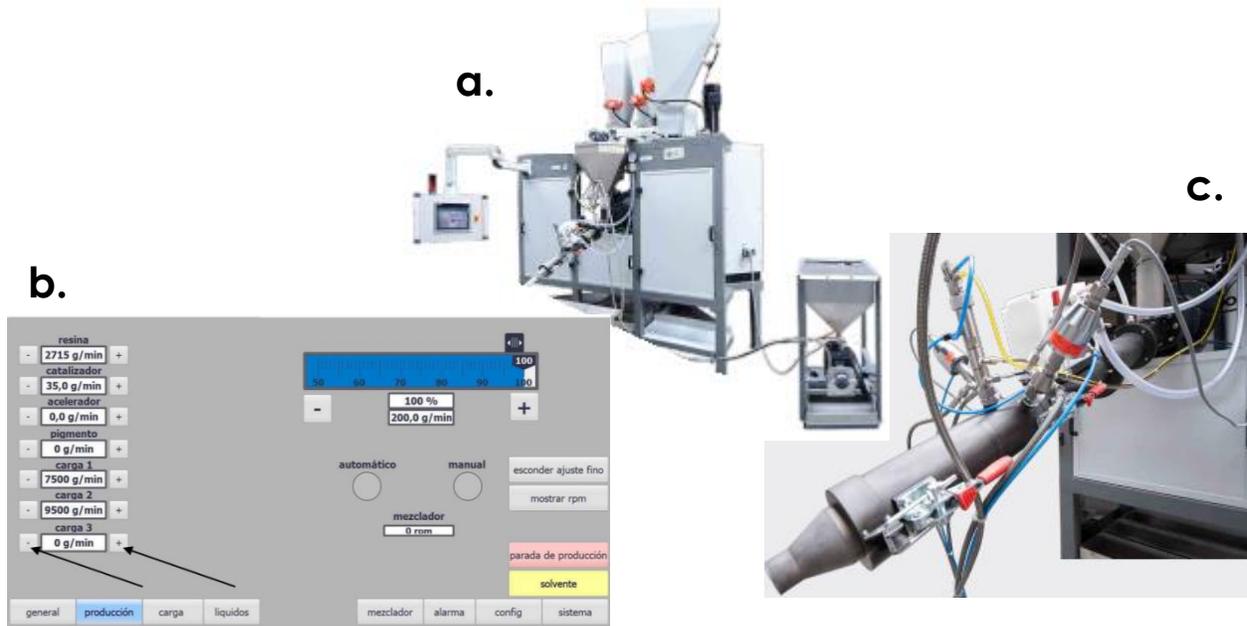


Figura 2. Máquina de polímero colado (a) vista general de la máquina. (b) tablero de operaciones (c) zona de mezclado

4.4 Proceso de fabricación de una pieza

El proceso de fabricación de una pieza de mármol sintético en la línea de producción de Firplak comienza con la colocación de los moldes de las referencias programadas en la zona de pintura de gel coat. Dependiendo del color de la pieza, se aplicará el gel coat correspondiente. Luego, los moldes se trasladan a la zona de vaciado de mármol sintético. Una vez que la capa de gel coat se ha secado, se procede al vaciado de la mezcla de mármol sintético mediante el método de polímero colado, como se muestra en la **Figura 3 (a)**.

Posteriormente, se coloca y prensa el contra molde para dar el espesor deseado a la pieza, como se observa en la **Figura 3 (b)**. A continuación, la pieza se somete a una vibración de 15 segundos para eliminar posibles burbujas atrapadas, que podrían manifestarse en la superficie del gel coat y ser más difíciles de solucionar. Una vez la pieza está sólida, se retira el contra molde tal como lo muestra la **Figura 3 (c)** y se verifica que la dureza sea al menos de 20 HD. La pieza pasa por la zona de reparación de huecos, donde se corrigen posibles faltas de llenado o burbujas en la superficie si ha de ser necesario. Luego, la pieza espera hasta alcanzar la fase de desmolde, donde

se verifica que la dureza sea aproximadamente 55 HD como lo muestra de la *Figura 3 (d)*. En este punto, se desmolda la pieza con presión de aire como lo presenta la *Figura 3 (e)*. Finalmente, la pieza llega a la zona de pulido como se muestra en la *Figura 3 (f)* y reparación, donde es revisada por el personal de calidad.

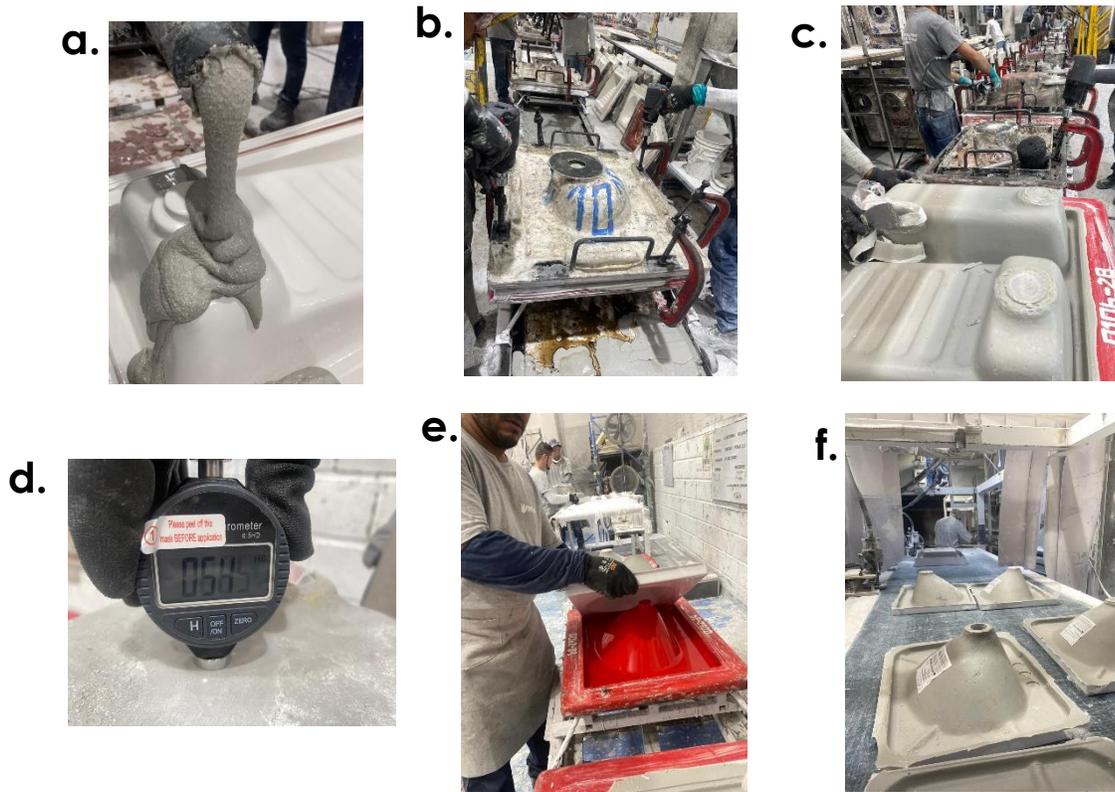


Figura 3. Proceso de fabricación de piezas de mármol sintético (a) vaciado de mezcla (b) postura de contra molde(c) retiro de contra molde (d) toma de dureza (e) desmolde de la pieza (f) zona de pulido.

4.4.1 Método de polímero colado

El método de colada directa consiste en verter una formulación de poliéster de consistencia viscosa en el interior de un molde. Tras la reacción de reticulación, se obtienen piezas sólidas y resistentes. En las resinas, el paso de líquido a sólido se produce mediante una reacción exotérmica que varía según la naturaleza y tipología del material. Una vez solidificado el material, se extrae la pieza y se le pueden aplicar los acabados necesarios para garantizar la calidad del producto. Este método de procesamiento ofrece gran flexibilidad en el diseño de piezas y no es un método de conformado complejo, permite la fácil adición de refuerzos o cargas.

Las resinas utilizadas en la colada deben tener ciertas características baja contracción, baja o media reactividad y baja viscosidad respecto a las resinas convencionales. Estas propiedades

aseguran que la pieza reproducida sea lo más exacta posible al molde, mejorando la fiabilidad de la reproducción y evitando la formación de grietas. Al agregar cargas, todas las resinas pueden utilizarse para la colada, ya que esto reduce la temperatura de la reacción y la contracción, minimizando el riesgo de agrietamiento. Es importante considerar la granulometría de las cargas: no debe ser demasiado fina, ya que podría causar problemas de absorción de resina, ni demasiado gruesa, lo que provocaría la decantación en el fondo del molde [6].

5. METODOLOGÍA

Uno de los factores principales en el proceso de vaciado de la máquina de polímero colado está relacionado con el manejo de un adecuado tiempo de gel, el cual está relacionado a la correcta formulación de la materia prima (cantidad de peróxido y cobalto adicionados a la resina). Sin embargo, la temperatura de la masa durante el proceso modifica los tiempos de gel, por ende, deben realizarse ajustes con base en los cambios de temperatura ambiente. Con esto en mente, se evaluaron diversas proporciones de octoato de cobalto y MEK peróxido a diferentes temperaturas de trabajo, con miras a mantener un tiempo de gel constante. El rango de trabajo para los componentes mencionados se obtuvo a partir de ensayos previos realizados por la empresa (0,9% a 3,4% de cobalto y peróxido). Finalmente, se buscó encontrar la correlación entre la temperatura de la masa con la temperatura ambiente y la formulación de la mezcla de polímero colado, con el fin de mantener el tiempo de gel adecuado para el vaciado de la pieza.

Materiales

Se utilizó una resina de poliéster tereftálica, tixotrópica, no pre-acelerada con composición química conocida, diseñada especialmente para la máquina, la cual es de rápida impregnación en procesos de moldeo por contacto. Es un producto especialmente diseñado y ampliamente usado para sistemas con cargas minerales en general, debido a que presenta una excelente capacidad de aceptación de cargas y baja contracción, además de rápidos ciclos de desmolde. Propiedades que la hacen especial para productos vaciados de mármol sintético. A esta resina se le añadió octoato de cobalto y el MEK peróxido, en diferentes proporciones, con el fin de iniciar y controlar la velocidad de la reacción de polimerización. Además, se incorporó carbonato de calcio en un rango de 80 a 78 % en la mezcla como material de relleno que ayuda a disminuir la contracción en las piezas finales.

5.1 Propiedades y características de la materia prima

Es necesario conocer la reactividad química del peróxido con la materia prima y la viscosidad de la mezcla antes de realizar los ensayos, por ende, se evaluó la viscosidad, además de análisis granulométrico para conocer tamaño de partícula de los carbonatos que se adicionan a la mezcla.

5.1.1 Reactividad de la resina: Pruebas de tiempo de gel

Para tener una base para conocer la reactividad de los aditivos con la resina se realizaron pruebas en vaso con 100 gramos de resina a temperatura controlada entre 34 - 38 grados centígrados en baño maría y con porcentajes de cobalto y peróxido como se muestran en la **tabla 1**. Estos valores se basan de ensayos previos. Se espera obtener un tiempo de gel de solo resina de aproximadamente 6 minutos. Para determinar el momento en que ocurre la gelificación, se realizó una evaluación cualitativa, observando la formación de una textura gelatinosa. Además, se registró el tiempo y la temperatura de exotérmica, que representa la máxima temperatura alcanzada durante la reacción, junto con la evolución de la dureza para evaluar el proceso de curado.

Tabla 1. Porcentajes de cobalto y peróxido en los ensayos.

Temperatura de masa [°C]	Cantidad de cobalto [%]	Cantidad de peróxido [%]
34 - 38	2,4	2,3

Si el resultado no era el esperado, los porcentajes de cobalto y peróxido se ajustarían según sea necesario. Por ejemplo, si la reacción fue demasiado rápida y el tiempo de gel fue mucho menor a 7 minutos, se reducen estas cantidades en la medida necesaria.

5.1.2 Viscosidad de la resina.

La verificación de la viscosidad de la resina se realizó utilizando un viscosímetro DV-1 Digital de Brookfield, el cual permite la detección continua y rápida de la viscosidad, así como la medición simultánea de viscosidad y temperatura. La medición se llevó a cabo según las especificaciones técnicas, utilizando una aguja R2 y una velocidad de ensayo de 20 rpm durante 10 minutos a una temperatura de 25 grados Celsius.

5.1.3 Distribución granulométrica de los carbonatos.

La distribución granulométrica de las partículas de carbonato no esféricas se determinó mediante el método de difracción láser, obteniendo una medición más precisa y rápida. La caracterización del tamaño de partícula se realizó en un Mastersizer 3000, utilizando el módulo para polvos. Se empleó un índice de refracción de la partícula de 1,55 y un índice de absorción de 0,01, dispersando el carbonato en una dispersión en seco.

5.2 Pruebas piloto: pruebas de tiempo de gel en el proceso de vaciado

Las pruebas piloto se realizan con dos diferentes proporciones de resina/carbonatos presentados en la **tabla 2**. Estas pruebas consisten en la extracción de una muestra en una bolsa directamente del equipo. La mezcla incluye resina, carbonato de calcio, con adición peróxido y cobalto para verificar su tiempo de gel y la evolución de la dureza. Este último parámetro ofrece información crucial sobre el proceso de curado de la resina. Cuando se tengan resultados favorables, es decir, un tiempo de gel en bolsa de 5 - 7 minutos, se procede a hacer una prueba en producción, esperando obtener un tiempo de 16 a 17 minutos de retiro del contra molde y 30 minutos aproximadamente de desmolde de la pieza contando el tiempo desde que la masa fue vaciada en el molde. En esta parte se trató con especial cuidado en la temperatura ambiente, ya que afectó en gran medida a la temperatura de la masa y su viscosidad. Finalmente, se realizó un seguimiento de las piezas tomando el tiempo transcurrido entre que se pone el contra molde y este es retirado, registrando la dureza alcanzada en la pieza hasta ese momento, también se tomó el tiempo que transcurre entre el retiro del contra molde y el desmoldado de la pieza, cuando su dureza llegó alrededor de 55 Shore D. Este proceso se realizó con distintos tipos de pieza, para proceder con el análisis de la información, y tomar decisiones pertinentes.

Tabla 2. Proporciones de resina/carbonato a las cuales se le hicieron pruebas piloto.

% Resina	% Carbonato de calcio
18-22	82-78
17-20	83-80

5.3 Propiedades y características de producto final.

5.3.1. Propiedades mecánicas.

Los productos de mármol sintético deben cumplir con requerimientos mecánicos mínimos para poder ser comercializados. Según las normas establecidas, se evaluó la dureza utilizando un durómetro Shore D según la norma ASTM D2240 [7]. La resistencia a la flexión fue evaluada mediante ensayos de flexión en tres puntos, como se estipula en la norma ASTM D790-17 [8]. Las probetas del ensayo de flexión se prepararon vertiendo la mezcla de mármol sintético en moldes con dimensiones y morfologías especificadas por la norma. Para estos ensayos se utilizó una máquina universal Shimadzu AG-100 kN con una celda de carga de 10 kN, a una velocidad de ensayo de 3,027 mm/min.

Además, se realizó una evaluación de la resistencia al impacto mediante un ensayo de impacto en punto. Este ensayo consiste en dejar caer una esfera metálica de 130 gramos, libre de hendiduras, deformaciones u otros defectos superficiales, desde una altura de 80 cm sobre la pieza en estudio. La prueba es cualitativa y clasifica la pieza como 'aprobada' o 'no aprobada' según los resultados obtenidos bajo la norma ANSI Z124 [9].

5.3.2. Prueba de calcinación o ignición.

La determinación de las fracciones en peso de cada componente se realizó mediante la prueba de ignición con base en la norma ASTM D2584 [10]. Esta prueba se llevará a cabo en un horno ubicado en la universidad de Antioquia, laboratorio de materiales compuestos a 550 grados Celsius durante un periodo de 2 horas. Es de su conocimiento que, a esta temperatura, el componente orgánico de la mezcla se volatiliza, dejando únicamente el componente inorgánico.

5.3.3 Determinación de densidades.

Se determinaron 3 tipos de densidades, la densidad aparente relativa con ayuda de un kit de densidad de la Universidad de Antioquia ubicado en el laboratorio de cerámicos, se tomaron los pesos en seco y húmedo con una balanza analítica se calculó con la **ecuación 1**, también se determinó una densidad aparente relativa de una muestra con volumen y masa conocida, haciendo uso de la **ecuación 2**.

Además de la densidad teórica utilizando una regla de mezcla presentada en la ecuación 3, donde $V_1 \cdot \rho_1$ representa la fracción volumétrica y densidad de la resina, y $V_2 \cdot \rho_2$ corresponde a fracción volumétrica y densidad de los carbonatos respectivamente.

$$\rho_c = \frac{P_{seco}}{P_{seco} - P_{humedo}} \times \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 1.}$$

$$\rho_c = \frac{M_c}{V_c} \quad \text{Ecuación 2.}$$

$$\rho_c = V_1 \cdot \rho_1 + V_2 \cdot \rho_2 \quad \text{Ecuación 3.}$$

6. RESULTADOS

Los resultados presentados a continuación están divididos en tres secciones. La primera sección abarca las propiedades y características de la materia prima, mencionando las pruebas realizadas a los componentes de la mezcla de mármol sintético que no han variado, es decir, el mismo lote de resina, peróxido y octoato de cobalto; y es importante mencionar la necesidad de revisar cada ítem si se cambia de lote o proveedor de materias primas, en el caso de los carbonatos especialmente la distribución granulométrica. La segunda sección presenta las pruebas piloto y la formulación de la máquina de polímero colado, destacando la búsqueda de reducción de costos al disminuir el porcentaje de resina sin comprometer la calidad de las piezas. La tercera sección incluye las pruebas realizadas al producto final con la mezcla que actualmente fue aceptada por el área de producción.

6.1 Propiedades y características de la materia primas.

6.1.1 Reactividad resina

Según los ensayos realizados previamente por la empresa, la reactividad de la resina fue evaluada como se muestra en la *tabla 1* de la sección de Metodología. Los resultados están presentados en la *tabla 3*, la prueba mostró un tiempo de gel de 6 minutos, lo cual indica que los porcentajes de cobalto y peróxido en la mezcla funcionan adecuadamente en un rango de temperatura de 34 a 38 grados Celsius. Estos resultados sirven de base para otros rangos de temperatura, considerando que la cantidad de aditivo y la temperatura de la mezcla son inversamente proporcionales.

Tabla 3. Resultados de reactividad de la resina

Verificación en vaso - 2.3% Pe y 2.4% Co - T resina 34-38°C									
Hora		Gel		Exotérmica			Curado		
Inicio	Hora	Tiempo	Temperatura	Hora	Tiempo	Temperatura	Hora	Tiempo	Dureza
9:41	9:47	6 min	58,8 °C	7:49	2 min	163,3°C	10:07	26 min	55 HD

El tiempo de gel obtenido es aceptable para los tiempos de producción deseados, demostrando que la formulación es adecuada. Sin embargo, es importante destacar que, durante la

producción, este tiempo puede variar en aproximadamente un minuto debido a que la proporción elevada de carbonato respecto a la resina puede retrasar la velocidad de la reacción de curado. A pesar de esta posible variación, el tiempo de gel sigue estando dentro de los rangos solicitados por el área de producción. El tiempo y la temperatura exotérmica proporcionan información crucial sobre lo que tarda la reacción en llegar a su máxima temperatura, en este caso, la temperatura de exotérmica está como lo indica la ficha técnica, es esencial asegurarse para así evitar un aumento excesivo de temperatura que pueda generar tensiones internas a medida que el material experimenta rápidas expansiones o contracciones debido a los cambios térmicos. Si las piezas no logran disipar el calor de manera uniforme y eficiente, pueden incrementar el riesgo de fisuras.

Otro aspecto importante por validar en esta prueba es el tiempo de curado necesario para asegurar que el desmolde de las piezas no sea demasiado prolongado. Según los resultados obtenidos, se ajusta al tiempo deseado de desmolde para esas condiciones.

6.1.2 Viscosidad resina

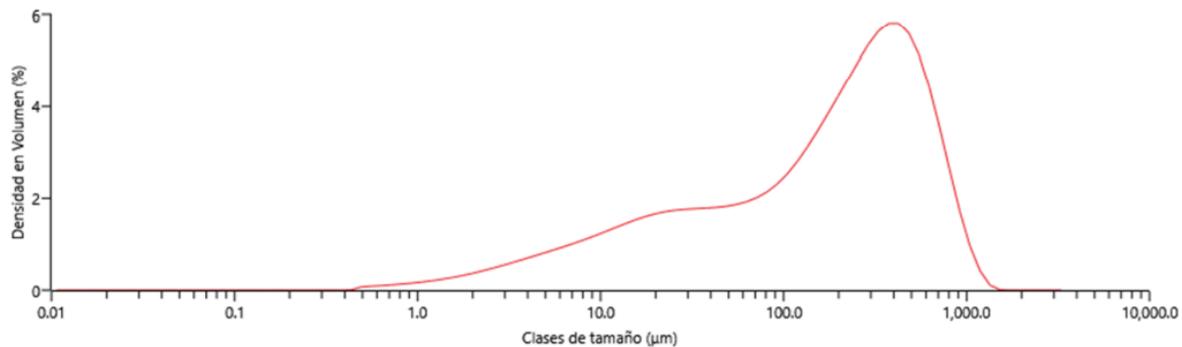
La viscosidad Brookfield de la resina resultó ser de 500,1 mPa·s o centipoises, valor que está dentro del rango establecido por la ficha técnica, que es de 400 a 600 mPa·s. Evaluar la viscosidad de la resina es crucial porque este parámetro influye en la incorporación homogénea de cargas, evitando la sedimentación y permitiendo una reacción uniforme. Esto es esencial para prevenir deformaciones y asegurar propiedades mecánicas y físicas consistentes. Además, es uno de los factores que influye indirectamente en la velocidad de las reacciones químicas durante el curado, ya que si es de muy alta viscosidad cuando la mezcla se integre en el tornillo mezclador la masa se calentará por la fricción proporcionada por este y el incremento en la temperatura de la mezcla, acelerará la reacción de polimerización.

Este resultado de viscosidad es considerablemente bajo, lo que garantiza una resina con buena capacidad de incorporación de cargas. Esto permite obtener una mezcla suficientemente fluida que se adapte fácilmente a la geometría del molde, asegurando piezas con una mezcla homogénea y correctamente distribuida.

6.1.3 Distribución granulométrica de carbonatos.

Según el análisis granulométrico realizado y registrado en la **Grafica 4**, se observa que la moda del tamaño de partícula, que indica el valor que más se repite, es de 400 micras. Además, se ha determinado que los carbonatos empleados tienen un rango de tamaño que va desde 0,4 hasta

1000 micrómetros. Este rango es significativo, ya que la máquina de polímero acepta un tamaño máximo de partícula de 1 milímetro, por lo que se está dentro del límite permitido. Tener un rango tan amplio en el tamaño de partícula es esencial, ya que asegura que las partículas llenen el máximo volumen posible, minimizando vacíos y mejorando la densidad de la mezcla. Además, facilita el flujo, el llenado de moldes y la eliminación de burbujas de aire, resultando en una superficie de alta calidad.



Figura

Gráfica 1. Grafica de Análisis granulométrico de carbonato de calcio

6.2 Formulación de la máquina de polímero colado

Los resultados evaluados en las distintas proporciones de resina/carbonato de calcio presentadas son una recopilación de varios datos en varios meses de la actual pasantía.

Las pruebas de tiempo de gel para una mezcla compuesta por 18-22% de resina y 82-78% de carbonato de calcio, con relación al peso total de 15 kilogramos, se encuentran registrados en la **Tabla 4**. Se presenta el tiempo que tarda la mezcla en presentar comportamiento geloso con cierta cantidad de octoato de cobalto (co) y MEK peróxido (pe), con base en la temperatura de la masa (T masa) del momento y temperatura ambiente (T ambiente) presentada. Es de vital importancia tener en cuenta la temperatura de la masa, debido a que esta puede acelerar o retrasar el proceso de curado y tiempo de gel (t gel).

Durante el proceso de producción, la temperatura de la masa tiene un comportamiento que es directamente proporcional a la temperatura ambiente y a la velocidad del tornillo. A medida que aumentan la temperatura ambiente o la velocidad del tornillo, la temperatura de la masa también incrementa. En la formulación, la temperatura de la masa es inversamente proporcional a la

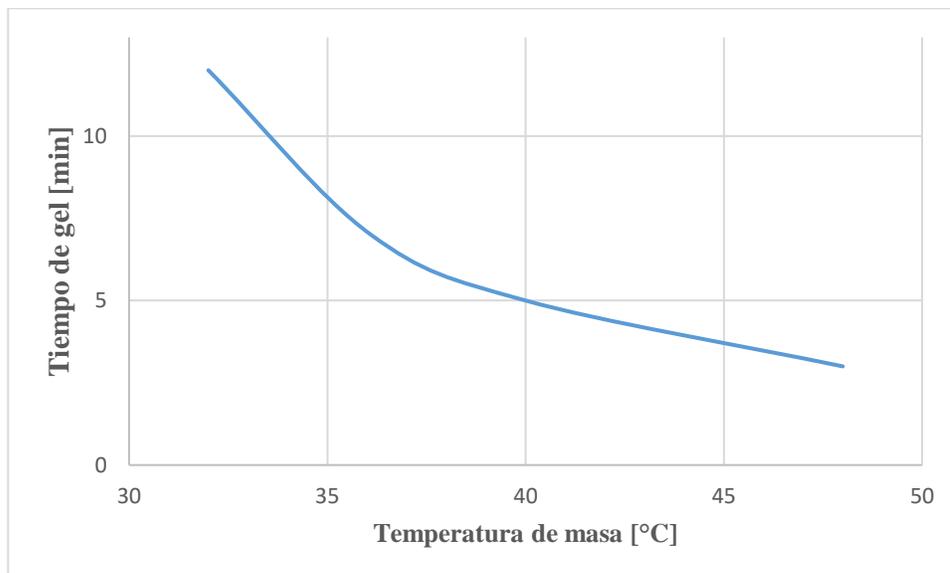
cantidad de catalizador e iniciador añadidos. Es decir, a mayor temperatura de la masa, se requiere una menor cantidad de octoato de cobalto y MEK peróxido, ya que como se había mencionado anteriormente, una mayor temperatura acelera la reacción, y una forma de controlar la velocidad de reacción es ajustando la cantidad de aditivos.

Tabla 4. Evaluación de tiempo de gel de la mezcla sacada de la máquina de polímero colado.

t gel	co [g]	Pe [g]	T ambiente [°C]	T masa [°C]
13 min	56,2	53,3	22,8	34
11 min	61,3	64,2	23,4	37
9 min	58	61	24,7	39,8
10 min	49	52	28,8	41,1
9 min	45,2	51	28,4	43,9
8 min	47	52	28,4	43
4 min	50	53	28,8	46,6
7 min	30	34,8	34,4	52,1
6 min	29,4	32	34,4	56,6

Evaluar el tiempo de gel de la masa de esta manera permite crear una tabla de trabajo que cumpla con las cantidades de cobalto y peróxido necesarias en las condiciones de temperaturas que se presenten durante la jornada laboral. Se buscó que los valores de tiempo de gel presentados en la tabla de evaluación estén entre 7 y 9 minutos, ya que este tiempo, traducido a una pieza en proceso, equivale a 16 a 18 minutos, que es el tiempo establecido por la empresa para tener una pieza en óptimas condiciones y se faciliten los tiempos de obtención de pieza en la línea de producción, Por ejemplo, cuando la temperatura de la masa alcanza los 37 grados, no es adecuado trabajar con 61,3 gramos de cobalto porque la masa se va a demorar en llegar al estado sólido un poco más del tiempo estipulado lo se traduce en un retraso en la línea de producción. Se deben aumentar o disminuir, según sea el caso, al menos dos gramos de cobalto aproximadamente por cada minuto de diferencia que se desee reducir en el tiempo de gelificación. Como se observa en la **Grafica 2**, el tiempo de gel disminuye o se hace más corto cuando la temperatura aumenta, esta grafica fue construida para las mismas cantidades de cobalto y peróxido con diferentes temperaturas de masa, viendo el comportamiento del tiempo de gel en función de la temperatura de masa, esto es importante porque la temperatura de la masa va cambiando a lo largo de la jornada, para luego de estabilizarse en un rango de temperatura; con la variación de cantidad de cobalto y peróxido se logra mantener un contante tiempo de gel durante la producción. En el caso del

peróxido, se comienza con una cantidad estimada basada en su reactividad con la resina, durante la producción, se monitorea para identificar y corregir cualquier problema que surja. Este ajuste se realiza con el seguimiento de las piezas, como se menciona más adelante.



Gráfica 2 Tiempo de gel vs temperatura de masa.

Con estos resultados se intenta construir una nueva tabla que sí cumpla con los parámetros que se ajusten a los tiempos de la planta suministrados por el jefe de producción. En la **Tabla 5** se presenta la tabla de trabajo ya ajustada a un rango de temperatura con base en los resultados anteriores.

Tabla 5. Tabla de trabajo entregada a producción.

Co [g]	Pe[g]	Temperatura masa [°C]		
68,2	65,3	34	-	38
62,2	59,3	38,1	-	40
55	58	40,1	-	42
49,3	52,2	42,1	-	44
42,3	40,2	44,1	-	46
40	40	46,1	-	47
39	40,4	47,1	-	49
30,4	37,8	51,1	-	52,5
28	34	52,6	-	54
28,4	29	54,1	-	57

Para evaluar la tabla de trabajo y asegurar que el proceso vaya bien, o si se debe ajustar, se realiza un seguimiento a las piezas durante la producción como se muestra en la **Tabla 6**, en la cual se registra la cantidad de PE y CO en muestras aleatorias, junto con la temperatura de la masa y la temperatura ambiente en el momento de la toma de datos. Además, se documenta la hora exacta de colocación del contramolde para proceder con la evaluación del tiempo necesario para retirar la pieza del contramolde (RCM) y verificar su dureza, la cual debe estar dentro del rango objetivo de 15 a 25 HD. Asimismo, se analiza el tiempo requerido para el desmolde y se verifica si la pieza alcanza la dureza deseada, entre 50 y 55 HD. Este proceso meticuloso garantiza el cumplimiento de los tiempos establecidos para las piezas, asegurando así un flujo de producción continuo y eficiente.

Tabla 6. Seguimiento de piezas en producción

Pieza	Pe [g]	Co [g]	T. ambiente [°C]	T. masa [°C]	Hora inicio	Tiempo RCM [min]	Dureza RCM [HD]	Tiempo de desmolde [min]	Dureza desmolde [HD]
1	65,3	68,2	26,6	34	9:26	17	18	33	53
2	65,3	68,2	26,6	37	9:27	16	20	32	55
3	59,3	62,2	26,6	38,4	9:29	17	20	31	50
4	58,2	55,2	26,6	41	9:31	17	18	29	50
5	58,2	55,3	26,7	42	9:33	17	22	28	52
6	52,2	49,3	26,8	42,8	9:35	18	25	29	50
7	40,2	42,3	27,0	44,1	9:37	16	15	28	51
8	40,2	42,3	27,0	44,2	9:39	16	20	28	52

Los resultados presentados anteriormente en la **Tabla 6** muestran que se ajustan bien a los tiempos solicitados y estos resultados son reciclados os para una nueva formulación con menos porcentaje de resina. Los resultados de la **Tabla 7** presentada a continuación muestran los nuevos cambios por la cantidad de cobalto y peróxido ajustada a la nueva cantidad de resina.

Tabla 7. Evaluación tiempo de gel con menor porcentaje de resina.

t gel	co [g]	pe [g]	T ambiente [°C]	T masa [°C]
9 min	59	62	24,5	35
9 min	59,3	62,2	27,5	38
4 min	62	59	27,2	39,6
9 min	49	52	28	43
8 min	47	45	27,3	42,8
8 min	40	42	27	44,3
8 min	41	39	29,3	45,3

Con los valores registrados en la **Tabla 7** se siguió mejorando el proceso con el mismo procedimiento utilizado para la mezcla inicial. De manera que, se entregó al área de producción una nueva tabla de trabajo presentado en la **Tabla 8**, la cual presenta una formulación con menor cantidad de datos, porque con esta formulación se obtuvieron tiempos de producción de piezas relativamente cortos. Lo anterior, debido a que con las estas mezclas mencionadas la masa estaba muy fluida, es decir que, podía aceptar más carga de sólidos, lo que a su vez, genera un mayor ahorro para la empresa.

Tabla 8. Tabla de trabajo entregada a producción con menores porcentajes de resina.

Co [g]	Pe[g]	Temperatura masa [°C]		
66,4	63,6	34	-	38
60,6	57,7	38,1	-	40
53,6	56,5	40,1	-	42
48	50,8	42,1	-	44
41,2	39,1	44,1	-	46
38,9	38,9	46,1	-	47
38	39,3	47,1	-	49
29,6	37,8	49,1	-	51
29,6	36,8	51,1	-	52,5
27,3	33,1	52,6	-	54
27,7	28,2	54,1	-	57

Se procede con la formulación de 17-20% de resina y 83-80% de carbonatos, teniendo en cuenta los porcentajes de octoato de cobalto y peróxidos trabajados para la nueva formulación, se presenta los resultados de las pruebas de t gel para esta formulación en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Evaluación tiempo de gel con 17-20% de resina.

t gel	co [g]	pe [g]	T ambiente [°C]	T masa [°C]
7 min	82	72	21,9	32,6
7 min	82	74	22,4	33,3
5 min	75	76	23	34,5
5 min	74	70	23,5	35,7
4 min	73	70	30	34,6
6 min	79	71	26,7	36,7
9 min	64	50	28,9	38,8
8 min	60	52	30,5	39
7 min	63	57	30,7	39,8
8 min	58	60	31,1	40,9
7 min	56	57	32,7	41,1
8 min	52	53	34	42,3

Con las pruebas de tiempo de gel, se observó que la temperatura ambiente tenía un efecto mucho más notorio sobre la temperatura de la masa en esta formulación. El cambio de temperatura en la tarde era considerablemente más rápido. Por ello, se decidió crear dos tablas, una para la mañana y una para la tarde creando un rango de temperatura ambiente de trabajo mostradas en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Tabla de trabajo entregada a producción con 17-20% de resina.

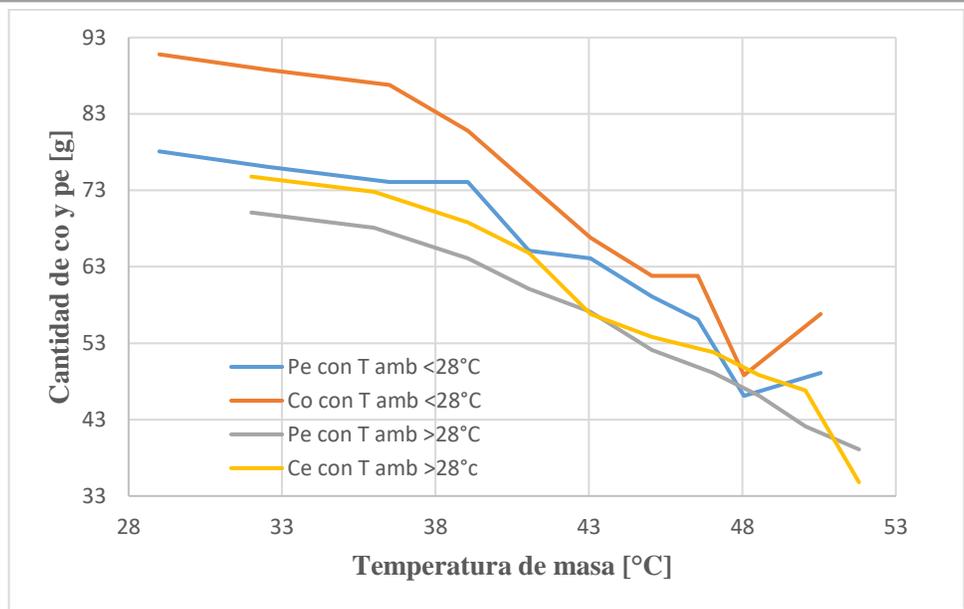
Tabla para trabajar con temperatura ambiente entre 18 - 28° C				Tabla para trabajar con temperatura ambiente mayor a 28°C			
Pe [g]	Co [g]	Temperatura masa [° C]		Pe [g]	Co [g]	Temperatura masa [°C]	
75,1	86,8	28	- 30	68,1	72,8	30	- 34
74,1	82,8	30	- 34	64,1	68,8	34	- 38
71,1	78,8	34	- 38	58,1	63,8	38,1	- 40
65,1	73,8	38,1	- 40	57,1	56,8	40,1	- 42
64,1	66,8	40,1	- 42	52,1	51,8	42,1	- 44
59,1	61,8	42,1	- 44	49,1	51,8	44,1	- 46
56,1	61,8	44,1	- 46	46,1	48,8	46,1	- 47
46,1	48,8	46,1	- 47	42,1	46,8	47,1	- 49
49,1	56,8	47,1	- 49	39,1	34,8	49,1	- 51
46,1	44,8	49,1	- 52	38,1	34,8	51,1	- 52

Con la proporción de 17-20% resina y 83-80% de carbonatos el área de producción decidió ajustar los tiempos, reduciendo los tiempos de gel y tiempo de desmolde para acelerar la producción de las piezas, por lo tanto, los tiempos revisados en las pruebas de tiempo de gel se reducen a 4 o 5 min, para que la pieza se demore unos 12 min en tiempo de gel y 12 min en tiempo de desmolde. En la **Tabla 11** se presentan las nuevas cantidades de cobalto y peróxido ajustados a los nuevos tiempos solicitados por producción, siendo estos los parámetros con los que actualmente trabaja el área de producción.

Tabla 11. Tabla de trabajo entregada a producción para 12 min de t gel con 17-20%.

Tabla para trabajar con temperatura ambiente entre 18 - 28°C					Tabla para trabajar con temperatura ambiente mayor a 28°C				
Pe [g]	Co [g]	Temperatura masa [° C]			Pe [g]	Co [g]	Temperatura masa [° C]		
78,1	90,8	28	-	30	70,1	74,8	30	-	34
76,1	88,8	30	-	35	68,1	72,8	34	-	38
74,1	86,8	35	-	38	64,1	68,8	38,1	-	40
74,1	80,8	38,1	-	40	60,1	64,8	40,1	-	42
65,1	73,8	40,1	-	42	57,1	56,8	42,1	-	44
64,1	66,8	42,1	-	44	52,1	53,8	44,1	-	46
59,1	61,8	44,1	-	46	49,1	51,8	46,1	-	48
56,1	61,8	46,1	-	47	46,1	48,8	48,1	-	49
46,1	48,8	47,1	-	49	42,1	46,8	49,1	-	51
49,1	56,8	49,1	-	52	39,1	34,8	51,1	-	52,5

La **Gráfica 3** representa las tablas de trabajo para la formulación con 17-20% de resina y 83-80% de carbonatos bajo los parámetros actuales. Ilustra cómo las cantidades de co y pe disminuyen a medida que aumenta la temperatura de la masa, con diferentes condiciones de temperatura ambiente (superior a 28°C y inferior a 28°C). En ambos casos, se observa una reducción en las cantidades a medida que aumenta la temperatura ambiente. Sin embargo, para temperaturas superiores a 28°C, esta reducción de pe y co es más pronunciada. Esto se debe a que, con temperaturas ambiente altas, la temperatura de la masa tiende a aumentar considerablemente, lo que hace que la reacción sea más reactiva. Para controlar la velocidad de la reacción, se reduce la cantidad de co y pe.



Gráfica 3. Cantidad de co y pe en función de la temperatura

En la **Tabla 12** se presenta el seguimiento de las piezas para analizar la funcionalidad de la nueva fórmula en el proceso.

Tabla 12. Tabla de seguimientos de piezas en producción para la formulación 17-20% resina.

Pieza	Peróxido [g]	Co [g]	T. ambiente [°C]	T. masa [°C]	Hora inicio	Tiempo RCM [min]	Dureza RCM [HD]	Tiempo de desmolde	Dureza desmolde [HD]
1	60,1	64,8	29,1	41,1	11:52	12	9	11	53
2	60,1	64,8	29,1	41	11:54	12	12	14	59
3	68,1	72,8	24,8	35,7	8:17	11	20	10	52
4	64,1	68,8	27,8	38,5	9:32	12	10	11	53
5	60,1	64,8	31,9	40,7	11:34	11	10	11	50
6	57,1	56,8	34	42,3	12:43	12	16	11	50
7	74,1	80,8	26,7	39,2	11:09	13	16	11	50
8	74,1	80,8	26,7	39,2	11:10	13	15	11	51

La tabla de trabajo ha estado funcionando bien y ajustándose correctamente a los cambios de la temperatura de la masa durante el proceso de producción.

6.3 Propiedades y características de producto final

6.3.1 Ensayo de flexión

Las probetas presentadas de mármol sintético con 17-20 % de resina y 83-80% de carbonatos de calcio, tienen una geometría plana rectangular y características isotrópicas presentadas en la **Figura 4 (a)**. Las dimensiones de las probetas se muestran en la **Tabla 13**, donde se especifican los valores promedios de longitud, espesor y ancho en milímetros.

Tabla 13. Dimensiones de las probetas del ensayo de flexión.

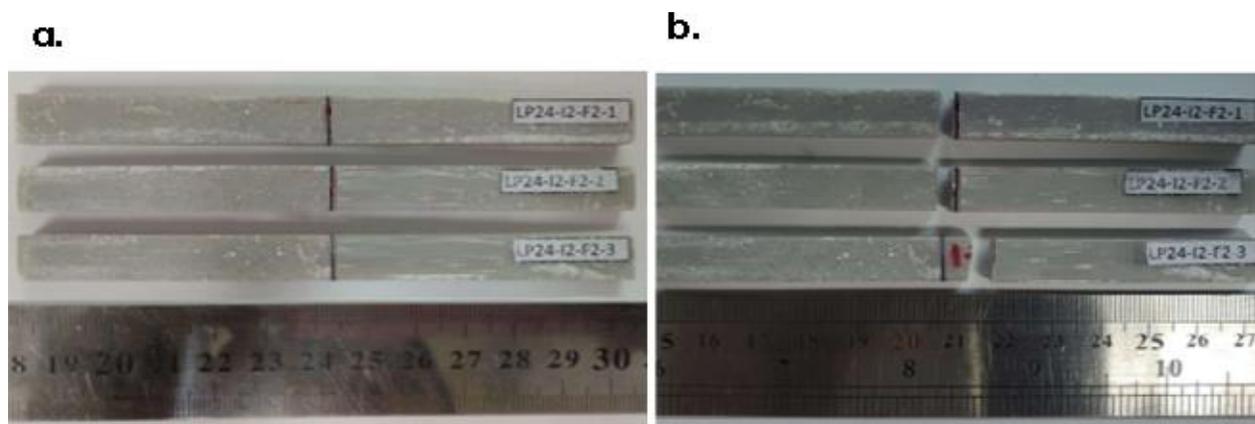
Referencia	Promedio ancho [mm]	Promedio espesor[mm]	Promedio longitud [mm]
LP24-I2-F2-1	10,05	6,46	119,5
LP24-I2-F2-2	10,02	6,44	119,3
LP24-I2-F2-3	10,03	5,96	119,3

Los resultados del ensayo de flexión están reportados en la **Tabla 14**, presentando un alto módulos de flexión y poca deformación, esto último se relaciona por ser un material bastante rígido de naturaleza cerámica, la propiedad de módulo de elasticidad o flexión se calcula con los resultados reportados por el deflectometro. En la **Figura 4 (b)** Se presentan probetas después del ensayo, es importante destacar que la fractura durante el ensayo de flexión ocurrió dentro de la zona delimitada, lo que garantiza la representatividad del ensayo. La ubicación dentro de esta zona específica asegura que los resultados obtenidos sean fielmente indicativos del comportamiento esperado bajo condiciones reales de uso.

Los resultados presentados son aceptados por la empresa debido a que corresponden a valores previamente trabajados con éxito. Específicamente, los valores de esfuerzo de flexión máxima superan nuestros estándares internos para esta propiedad. Sin embargo, debido a restricciones de secreto industrial, no podemos divulgar estos valores específicos. Esta limitación impide un análisis más detallado de los resultados, lo cual afecta las conclusiones del estudio.

Tabla 14. Resultados ensayo de flexión.

Referencia	Esfuerzo de flexión máximo [GPa]	Deformación de flexión máxima [%]	Módulo de flexión [MPa]
LP24-I2-F2-1	0,104	0,238	15947
LP24-I2-F2-2	0,093	0,194	18684
LP24-I2-F2-3	0,088	0,24	20219
Promedio	0,095	0,224	182883
Des. Estándar	0,008	0,026	2164

**Figura 4.** (a) Probetas antes del ensayo de flexión (b) probetas después del ensayo de flexión.

6.3.2 Ensayo de impacto en punto.

El ensayo de impacto en punto es una prueba cualitativa que se realiza en varias ubicaciones dentro de áreas planas, en el fondo de la muestra, así como en ubicaciones diferentes en el borde. Este ensayo determina si la pieza cumple con los estándares requeridos, cuyos resultados se muestran en la **Figura 5**, se resaltan el lugar donde impactó la bola metálica para mejorar la observación de la posible generación de grietas con el impacto. Según se observa en la figura, el producto no presenta marcas, grietas ni astillas en su superficie, lo que indica que cumple con la norma ASTM Z124 y se considera aprobado.

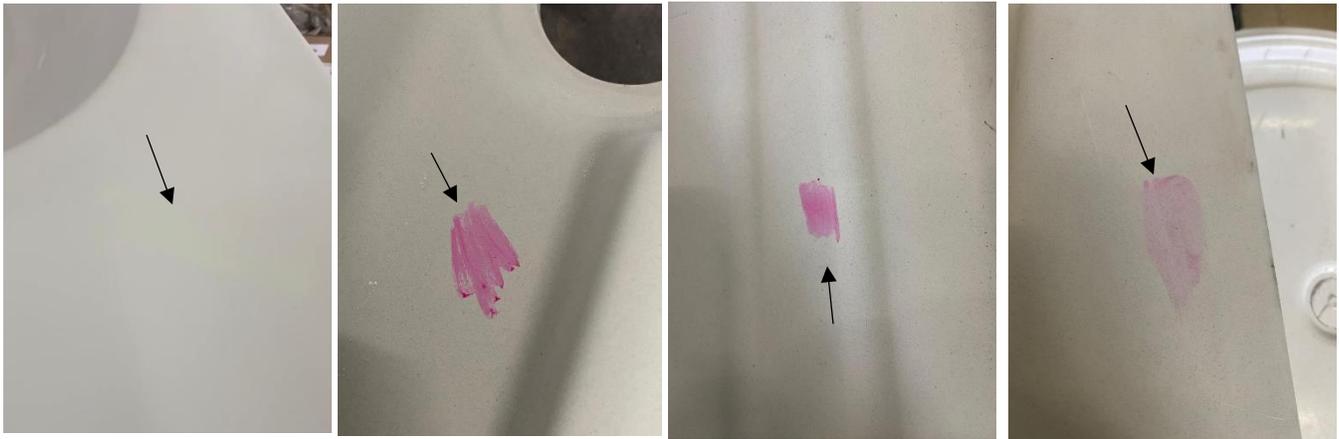


Figura 5. Resultados ensayos de impacto en punto.

Este ensayo es de mucha importancia en los productos, ya que no solo evalúa la capacidad del material para resistir impactos moderados, sino que también detecta las posibles áreas de debilidad que podrían comprometer la durabilidad de las piezas en condiciones de uso habitual. Esta prueba es esencial para asegurar que los productos cumplen con los estándares necesarios de resistencia, garantizando así su seguridad y calidad. Además, juegan un papel clave en la mejora continua de la producción al permitir ajustes en el diseño y en los procesos de fabricación si han de ser necesarios, con el objetivo de garantizar tanto la resistencia como el rendimiento del lavamanos de mármol sintético.

6.3.3 Densidad y porosidad

La densidad teórica de la mezcla, calculada con la regla de mezcla según la **ecuación 3** arrojó un resultado de $2,43 \text{ g/cm}^3$. Con base en esta densidad teórica, junto con las densidades aparente y relativa, se calcularon los porcentajes de poros, divididos en abiertos y poros cerrados, datos detallados en la **Tabla 15**, los poros abiertos se calcularon restando los poros cerrados de los poros totales. Los poros cerrados se determinaron en función de la densidad aparente relativa, la cual permite presentar una densidad con menos defectos, considerando los poros cerrados debido a la inmersión en agua que experimenta la muestra, estos resultados nos permiten dar una idea de la cantidad de defectos asociados a mayor o menor porosidad en el interior de una porción de masa, mostrando que hay mayor porcentaje de poros cerrados que de poros abiertos.

Los resultados indican que los poros cerrados constituyen un porcentaje mayoritario en la muestra respecto a los poros abiertos, en promedio componen un 8,4%. Esta distribución de poros

proporciona información sobre que la pieza es medianamente compacta internamente. Por otro lado, los poros abiertos, que establecen canales directos de comunicación con el entorno externo, representan en promedio un 3,2% de la pieza. Esta proporción de poros abiertos no es crítica, ya que las piezas están protegidas externamente por una capa de gel coat.

Tabla 15. Densidades y porcentaje de porosidad.

Densidad aparente [g/cm 3]	Densidad aparente relativa [g/cm 3]	Poros cerrados [%]	Poros abiertos [%]
2,12	2,23	8,1	4,7
2,16	2,26	6,8	4,1
2,16	2,18	10,3	0,8

La muestra presentó un promedio de poros totales del 11,8%, lo cual es un porcentaje considerable en relación con el total de la muestra. Sin embargo, en este caso se busca mantener esta cantidad de poros sin comprometer las propiedades mecánicas del producto final, maximizando el volumen ocupado por los poros sin afectar la integridad de la pieza. Específicamente, se busca introducir la mayor cantidad posible de poros sin perjudicar significativamente la calidad del producto. Cabe destacar que la inclusión de aire en la matriz, sin comprometer sus propiedades finales, es una estrategia económica y efectiva, ya que este recurso es gratuito.

6.3.4 Calcinación.

Los resultados de la prueba de calcinación de una muestra de mármol sintético curado se encuentran en la *Tabla 16*. Esta prueba permite verificar los porcentajes de composición real asociados a las formulaciones. La muestra inicialmente contenía un 18,6% de componente orgánico y un 81,6% de componente inorgánico. Durante la calcinación, se aseguró la eliminación completa del componente orgánico, dejando únicamente el componente inorgánico, en este caso carbonato de calcio. El porcentaje de carbonato de calcio recuperado fue del 81,45%, esta pequeña diferencia podría atribuirse a residuos en el crisol que no pudieron ser recuperados o pérdida de masa durante el proceso, errores humanos asociados al procedimiento. No obstante, el valor obtenido tiene un muy pequeño de tan solo el 0,18% de error con respecto a la cantidad de carbonato que se esperaba recuperar, es decir, 81,6 %, lo que indica que las fracciones de peso se cumplen adecuadamente.

Tabla 16. Resultados de calcinación.

Peso inicial [g]	Peso final [g]
12,871	10,484
%	81,45

Es fundamental asegurar proporciones precisas entre la resina y el carbonato de calcio en la mezcla de mármol sintético debido a que estas determinan las propiedades físicas y estéticas del material final. Mantener estas proporciones adecuadas asegura consistencia y uniformidad en cada lote producido, optimizando el rendimiento del material y cumpliendo con estándares de calidad específicos. Esto no solo garantiza la durabilidad, sino también sus las propiedades mecánicas finales que cumplan con especificaciones requeridas.

7. CONCLUSIONES

Utilizar la formulación adecuada en la máquina de polímero colado para la producción de productos de mármol sintético es crucial para garantizar la calidad consistente y las propiedades deseables en los productos finales. Una formulación precisa optimiza la eficiencia operativa al reducir desperdicios y tiempos de producción, cumpliendo con las normativas y regulaciones del sector, lo cual facilita la innovación y el desarrollo continuo de nuevos productos. Actualmente se trabaja con una formulación que está en función de la temperatura de la masa para una constante producción de piezas con 12 minutos de tiempo de gel y 24 min de desmolde de piezas con una proporción de 17-20% de resina de poliéster y 83-80% de carbonato de calcio.

La temperatura de la masa es la variable principal en este proceso, desempeñando un papel crucial en la velocidad de la reacción de curado. Un aumento en la temperatura acelera la reacción de curado de la resina, reduciendo los tiempos de trabajo y por consiguiente la consolidación correcta del producto final. Es fundamental manejar de manera óptima la formulación del polímero según la temperatura para garantizar la seguridad y el manejo eficiente de los materiales, asegurando condiciones óptimas de producción y minimizando riesgos asociados con variaciones de temperaturas no controladas.

Los ajustes necesarios para una formulación exitosa, con un control de la velocidad de reacción que garantice la correcta conformación de la pieza, se realizaron mediante pruebas piloto. Estas pruebas permitieron la correcta adaptación de las formulaciones para las diferentes proporciones de resina/carbonato de calcio y variaciones de temperatura de masa, según los requisitos establecidos por el área de producción, además de obtener productos con propiedades mecánicas aceptadas por el estándar de calidad de la empresa Firplak.

8. FUTURAS INVESTIGACIONES.

Los próximos pasos que desarrollar con la máquina de polímero colado que quedaron en la primera fase, fue una mezcla para línea Eco, que consiste en tener una mezcla con adición de aserrín debido a su bajo costo de producción, ligereza y abundancia de este residuo de otras plantas de producción que pertenecen a la empresa Firplak, la proporción del aserrín es muy baja para no afectar demasiados las propiedades finales del producto. En la literatura, se estableció que mediante un análisis DSC que el aserrín interactúa intensamente con la resina durante el proceso de entrecruzamiento, lo cual provoca una notable alteración en el cambio de entalpía y la energía de activación durante el curado. Se sugiere que la lignina, componente del aserrín, es responsable de este comportamiento modificado [11].

Se analizó la reactividad de la mezcla de manera similar a como se evalúa la reactividad de la resina, pero incluyendo todos los componentes de la mezcla. Con esta evaluación se observó que esta mezcla muestra una ligera inhibición en comparación con las mezclas descritas anteriormente, por lo que se aumentó la cantidad de aditivos para la elaboración de un prototipo de un lavamanos fabricado en un mixer, para el cual se trabajó con 2,8 % de cobalto y el 2,9% de peróxido con una temperatura de masa de 29,8 °C, el proceso de gelificación de la pieza tardó demoro 29 min en tener una dureza de 8 HD y 47 min para tener una dureza de 55 HD, fue sometido a pruebas de impacto en punto descrito en la sección 4.3.1 que aprobó de forma satisfactoria, también se evaluó la resistencia la flexión con un módulo de Young de 17970 MPa siendo este también un valor con el que la empresa ha trabajado por lo tanto también fue aceptado, lo que resta del proceso es realizar pruebas pilotos en la máquina para estudiar si la viscosidad de la masa es la adecuada (de forma cualitativa) y que no cree demasiada fricción en la zona de mezclado del tornillo, puesto que, se puede calentar en exceso la mezcla entorpeciendo el proceso de producción.

Se evaluó otra mezcla para la línea Eco, con incorporación de un pigmento polimérico al mármol sintético con el objetivo de eliminar la capa de gel coat y reducir costos del proceso. Se realizaron nuevamente las pruebas de reactividad de la mezcla, observando que la adición de estos aditivos debe considerar la proporción entre resina y pigmento, no solo la resina como en las mezclas discutidas anteriormente. Se fabricó un prototipo de lavamanos con esta mezcla, utilizando una formulación que incluía 2,9% de octoato de cobalto y 2,8% de peróxido, con una temperatura de masa entre 38 y 40 grados Celsius. El tiempo de gel en el proceso fue de 8 minutos, siendo muy

rápida dicha reacción, con dureza de 6 HD al retirar el contra molde; se necesitó 20 minutos para el desmolde, alcanzando una dureza de 60 HD. Sin embargo, el prototipo fue sometido a una prueba de impacto que resultó en la fractura de la pieza, es decir, no fue aprobado.

La prueba de flexión mostró un resultado de 15133 MPa, ligeramente por debajo de los estándares habitualmente aprobados por la empresa. Debido a esto, se consideró pigmentar la mezcla con dióxido de titanio. Con esta nueva propuesta, se fabricaron probetas de flexión que mostraron un módulo de Young de 18109 MPa, valor que sí fue aceptado por la empresa, basado en resultados obtenidos a lo largo de su historia. Para completar la evaluación, falta realizar pruebas de impacto con la adición de titanio, revisar la viscosidad en producción y llevar a cabo pruebas piloto para ajustar la formulación a los tiempos deseados, además de estudiar la influencia del dióxido de titanio en la reacción de curado y por consiguiente en las propiedades del producto final.

REFERENCIAS

- [1] P. Bera, N. Guptha, K. P. Dasan, and R. Natarajan, “Recent developments in synthetic marble processing,” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 32, no. 2, pp. 94–105, 2012.
- [2] J. Posada, J. Herrera, R. Trujillo, M. Lopez, and L. Perez, “Evaluación del desempeño mecánico del mármol sintético basado en materiales compuestos de poliéster - Carbonato de Calcio,” *Rev. Colomb. Mater.*, vol. 2, pp. 1–12, 2012.
- [3] Blanco Vásquez, Y. G., & Perez Chahua, M. C. (2021). Elaboración de mármol sintético a partir de la cáscara de huevo.
- [4] Winter, H. H. (2002). Gel point. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, 1-15.
- [5] (S/f). Característica de termoestables. (Universitat de Barcelona, 2013)
- [6] Diez, S. G. (2006). Metodología de la colada directa aplicada a la escultura. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 7(4), 270-276.
- [7] Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness. (s. f.). <https://www.astm.org/d2240-15r21.html>
- [8] Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. (s. f.). <https://www.astm.org/d0790-15.html>
- [9] ANSI Z124.3-2005 - Plastic lavatories. (s. f.). <https://webstore.ansi.org/standards/iapmo/ansiz1242005-1159210>
- [10] Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins. (s. f.). <https://www.astm.org/d2584-18.html>
- [11] Paauw, M., & Pizzi, A. (1993). Some filler effects on cross-linking of unsaturated polyesters. *Journal of applied polymer science*, 50(7), 1287-1293.