



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ESCALAMIENTO A NIVEL SEMI-INDUSTRIAL DEL
PROCESO DE ADECUACIÓN DEL TAMAÑO DE
PARTÍCULA DE RESIDUOS DE CORTE DE VIDRIO
PARA EL ESMALTADO Y DECORACIÓN DE
BALDOSAS CERÁMICAS**

Luisa Fernanda Acevedo Tobón

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería de
Materiales

Medellín, Colombia

2020



**ESCALAMIENTO A NIVEL SEMI-INDUSTRIAL DEL PROCESO DE
ADECUACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE RESIDUOS DE
CORTE DE VIDRIO PARA EL ESMALTADO Y DECORACIÓN DE
BALDOSAS CERÁMICAS**

Luisa Fernanda Acevedo Tobón

Trabajo de semestre de industria presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniera de Materiales

Asesor:

PhD. Fabio Vargas Galvis

Línea de Investigación:

Revestimientos: pisos y paredes

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Materiales.

Medellín, Colombia

2020

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo general	5
2.2 Objetivos específicos	5
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1 Conminución	6
3.2 Esmaltes y materiales para serigrafías	15
3.3 Pruebas realizadas a producto terminado	18
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	19
4.1 Validación resultados obtenidos previamente a escala de laboratorio	19
4.2 Variables críticas de la molienda a nivel semi-industrial	20
4.3. Aseguramiento de la influencia de la incorporación del vidrio molido a nivel semi-industrial en algunas bases serigráficas y esmaltes.	22
4.4 Evaluación del espesamiento de las bases serigráficas y de los esmaltes.	22
4.5 Ensayos a nivel semi-industrial (L1 y L4).....	23
4.6 Propuesta para incorporación de rechazo de vidrio molido en otros procesos.....	23
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	23
5.1 Validación de resultados obtenidos a nivel de laboratorio	23
5.2 Influencia de las variables críticas de molienda a nivel semi-industrial	25
5.3 Influencia de la incorporación de vidrio molido a nivel semi-industrial en las propiedades reológicas algunas bases serigráficas y esmaltes	31
5.4 Incorporación del vidrio obtenido a nivel semi-industrial en algunas bases serigráficas y esmaltes	33
5.5 Ensayos obtenidos a nivel semi-industrial.....	34
5.6 Espesados en fichos de vidrio	38
6. VIABILIDAD ECONOMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO	40
6.1 Beneficio económico que genera la incorporación de vidrio molido en esmaltes y material para serigrafía.	40
7. CONCLUSIONES	41
8. PASOS A SEGUIR Y RECOMENDACIONES	42
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

ESCALAMIENTO A NIVEL SEMI-INDUSTRIAL DEL PROCESO DE ADECUACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE RESIDUOS DE CORTE DE VIDRIO PARA EL ESMALTADO Y DECORACIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS

RESUMEN

En el proceso de elaboración de mosaicos para pared que se realiza en la empresa COLCERAMICA S.A.S, perteneciente al grupo Corona, se generan 25,8 toneladas de residuos de vidrio al año, los cuales no son reincorporados en ningún proceso de la planta. Estudios anteriores han demostrado que estos residuos se pueden incorporar en ciertas materias primas de los procesos que se llevan a cabo en la empresa. Por lo anterior, en este trabajo se estudiaron algunas de las variables del proceso de molienda, que permiten obtener un tamaño de partícula adecuado para incorporarlos en la fabricación de esmaltes y bases serigráficas. Los resultados obtenidos indican que las variables que más influyen en tal propósito son: *i*) etapas de la molienda, *ii*) el tiempo de molienda y *iii*) la distribución de tamaño de cuerpos moledores (CM). Adicionalmente, no se evidenció influencia en las propiedades físicas de los productos obtenidos a partir de la adición del vidrio molido, pero sí en su comportamiento reológico, identificando que la adición de partículas de vidrio aumenta la viscosidad tanto de los esmaltes, como en los materiales para serigrafía. Por último, se propone utilizar en la fabricación de espesados para la decoración de fichos de vidrio aquellas partículas que alcanzaron un alto grado de reducción de tamaño, pero que no son lo suficientemente finas para su uso en esmaltes y material para serigrafías. De esta forma, el 87% en peso del material molido será utilizado en procesos productivos de la planta y solo el 13% restante debe ser realimentado a la molienda, alcanzando una importante disminución en costos asociados a la materia prima que será remplazada con estos materiales.

Palabras claves: *Curva de moliendabilidad, esmaltes, serigrafía, residuos de vidrio.*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha habido un incremento exponencial de la población a nivel mundial, esto hace que la demanda de los recursos naturales aumente de manera significativa sin que se planteen soluciones al respecto [1]. Es por esto, que surge la necesidad de optimizar el consumo de los recursos naturales y al mismo tiempo, evitar la contaminación procedente de la eliminación de los desechos generados por la industria.

En el caso de los residuos de vidrio, en 2018, la industria del vidrio informó que había reciclado alrededor de 27 millones de toneladas en todo el mundo, lo que representaba alrededor del 21%

de la producción total de vidrio en ese año. En Colombia, al año se reciclan 120.000 toneladas de vidrio, en 2010 se logró reducir las emisiones de CO₂ en un 14% siendo el reciclaje del vidrio una vía para dar solución a este tipo de problemas [2-3]. Dentro de los beneficios del reciclaje del vidrio está: *i)* El ahorro energético entre un 25% y 32% en la producción de nuevos envases, *ii)* la disminución en la contaminación atmosférica en un 20%, *iii)* la disminución en la contaminación del agua en un 50% y *iv)* la reducción de costos en materia prima de los procesos industriales.

Dentro de las formas de reciclar vidrio no solo está su uso en el casco como materia prima para nuevos vidrios, sino que también, se ha empleado dentro de las formulaciones de baldosas cerámicas [4]. Antes de poder ser utilizado en la fabricación de baldosas cerámicas, debe presentar ciertas características como: la oferta debe ser abundante y su composición debe ser a la vez homogénea y constante para evitar variaciones en los procesos. La mayoría de los tipos de vidrio están constituidos por óxidos formadores y modificadores de redes, cuyos principales componentes son el óxido de silicio, el óxido de calcio o el óxido de sodio. La naturaleza amorfa del vidrio y también su composición le dan un carácter fundente. Debido a estas propiedades, el vidrio reciclado puede utilizarse tanto en composiciones de cuerpos cerámicos donde actúa como fundente reemplazando los feldespatos, como en composiciones de engobes y esmaltes cerámicos como sustituto de las fritas [5]. A partir de esto es posible fomentar el desarrollo y la fabricación de piezas cerámicas amigables con el medio ambiente que tengan residuos de vidrio dentro de su composición, para lograr esto, es indispensable tener el vidrio en un tamaño de partícula adecuado para su incorporación o sustitución de las fritas. El presente trabajo pretende diseñar una ruta de procesos de conminución a nivel semi-industrial que permita aprovechar los residuos de corte de mosaicos que genera la empresa COLCERAMICA S.A.S para obtener el tamaño de partícula adecuado que garantice la incorporación de vidrio en esmaltes y bases para serigrafía.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Escalar el proceso de adecuación del tamaño de partícula de residuos de corte de vidrio para su uso en la fabricación de esmaltes y material para serigrafías, identificando las variables críticas en cada etapa del proceso que permitan encontrar la viabilidad de su uso a nivel semi-industrial.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar la compatibilidad fisicoquímica de la incorporación de los residuos de vidrio en los esmaltes y material para serigrafías usados en el proceso de fabricación de las baldosas cerámicas.
- Asegurar la reproducibilidad de los resultados obtenidos previamente a escala de laboratorio y a partir de ellos, establecer los parámetros que deben ser tenidos en cuenta para obtener mediante un proceso a escala semi-industrial, la distribución granulométrica requerida para que

el residuo de corte de vidrio pueda ser usado como materia prima en la fabricación de esmaltes y material de serigrafía.

- Establecer los valores de las variables críticas de molienda a nivel semi-industrial que permitan la mayor eficiencia de este proceso para la reducción del tamaño de partícula del vidrio.
- Evaluar mediante muestras patrón, la influencia de la incorporación de residuos del proceso de corte de vidrio, tratados a escala semi-industrial, sobre el cambio en las propiedades físicas de esmaltes y materiales para serigrafía, utilizando los diferentes porcentajes ya evaluados a nivel de laboratorio.
- Hacer un diagnóstico para establecer los puntos más críticos del proceso de adecuación del tamaño de partícula y evaluar su viabilidad económica a partir del costo del material procesado por kilogramo, e identificar otras posibles alternativas de materiales y/o procesos donde se puede incorporar los residuos de vidrio procesados a escala semi-industrial.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Conminución

Durante el tratamiento de las materias primas utilizadas en la industria cerámica existen diferentes etapas empleadas para fracturar las partículas mediante procesos de conminución, esto se hace con el fin de facilitar el manejo de los sólidos y producir partículas con una distribución de tamaño y forma deseadas. La conminución generalmente se realiza mediante trituración y molienda y su efectividad suele ser evaluada a partir de la Razón de Reducción (Rr), que describe la disminución lograda en el tamaño de partícula[6-8], para lo cual se determina, mediante análisis granulométrico, el tamaño nominal inicial y el obtenido después de la conminución y se relacionan mediante la ecuación 1:

$$Rr = \frac{\text{Tamaño del alimento}}{\text{Tamaño del producto}} = \frac{d_{80\text{Alimento}}}{d_{80\text{Producto}}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

3.1.1 Mecanismos de fractura de material particulado

Para que se genere una fractura en un material, a este se le debe aplicar un esfuerzo superior a su resistencia mecánica. El tipo de fractura producida va a depender de la naturaleza del material y de la manera en la que le es aplicada la energía. Dentro de los principales mecanismos de fractura que se producen en las partículas se encuentran el de abrasión, crucero (compresión) y estallido (impacto). La fractura por abrasión es producida por esfuerzos localizados en la superficie de las partículas, los cuales generan desprendimiento de pequeños fragmentos obteniéndose una distribución de tamaño muy fina, (ver Figura 1.a). La fractura de tipo crucero, se produce cuando la energía aplicada es distribuida en la totalidad de la partícula y es suficiente para romperla, produciendo una distribución de tamaño cuya razón de reducción (Rr) generalmente es entre 3 y 9, este mecanismo de fractura se da generalmente por la aplicación

de fuerzas de compresión, (ver Figura 1.b). La fractura por estallido, se presenta cuando la energía es aplicada a la partícula a alta velocidad, de tal forma que se producen en su interior, esfuerzos localizados que superan ampliamente la energía necesaria para su fractura, (ver Figura 1.c), generando una distribución granulométrica cuya razón de reducción suele ser entre 3 y 20, (ver Figura 1.d)[9-11].

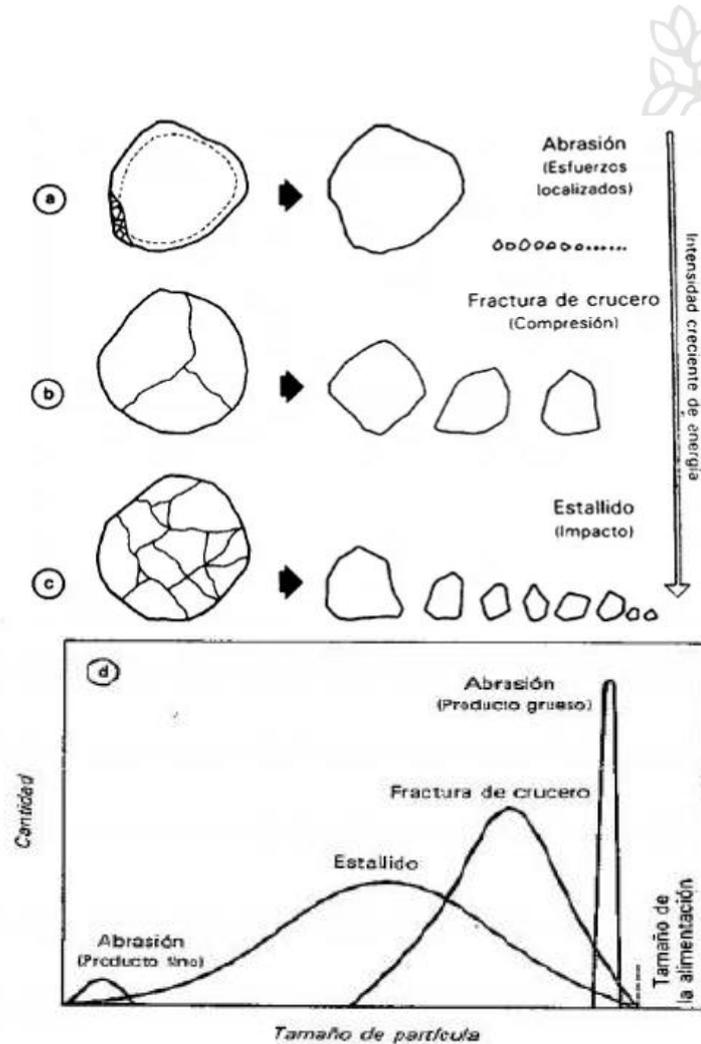


Figura 1. Mecanismos de fractura y distribución granulométrica asociada a dichos mecanismos. a. fractura por abrasión, b. fractura de crucero, c. fractura por estallido, d. distribución granulométrica asociada a cada mecanismo de fractura [12].

3.1.2 Probabilidad y energía de fractura de partículas

La fractura de un material es un proceso aleatorio. Muchos factores contribuyen a la fractura de una sola partícula, esto hace que sea imposible predecir con gran exactitud si una partícula se va a fracturar o no cuando es impactada, sin embargo, se sabe que la probabilidad de que una partícula se fracture está muy relacionada con la cantidad de energía que esta absorbe durante el impacto.

Cuando una partícula está sujeta a un impacto, ésta solo absorbe cierta cantidad de energía antes de su fractura (energía de fractura de la partícula). La magnitud de la energía absorbida depende de: *i*) una propiedad mecánica del material relacionada con su tenacidad a la fractura, *ii*) de su tamaño y forma, y *iii*) la orientación de la partícula respecto al área de contacto a través de la cual se le transmite la tensión que genera el impacto. Este valor, dependerá de la orientación de la partícula en relación con las fuerzas de impacto y en relación con el tamaño de la partícula. En la Figura 2 se muestran dos conjuntos de datos típicos, que muestran la distribución medida de las energías de fractura de las partículas para dos poblaciones de partículas de cuarzo. En esta figura, se puede observar que las partículas más pequeñas necesitan una mayor energía para ser fragmentadas que las grandes.

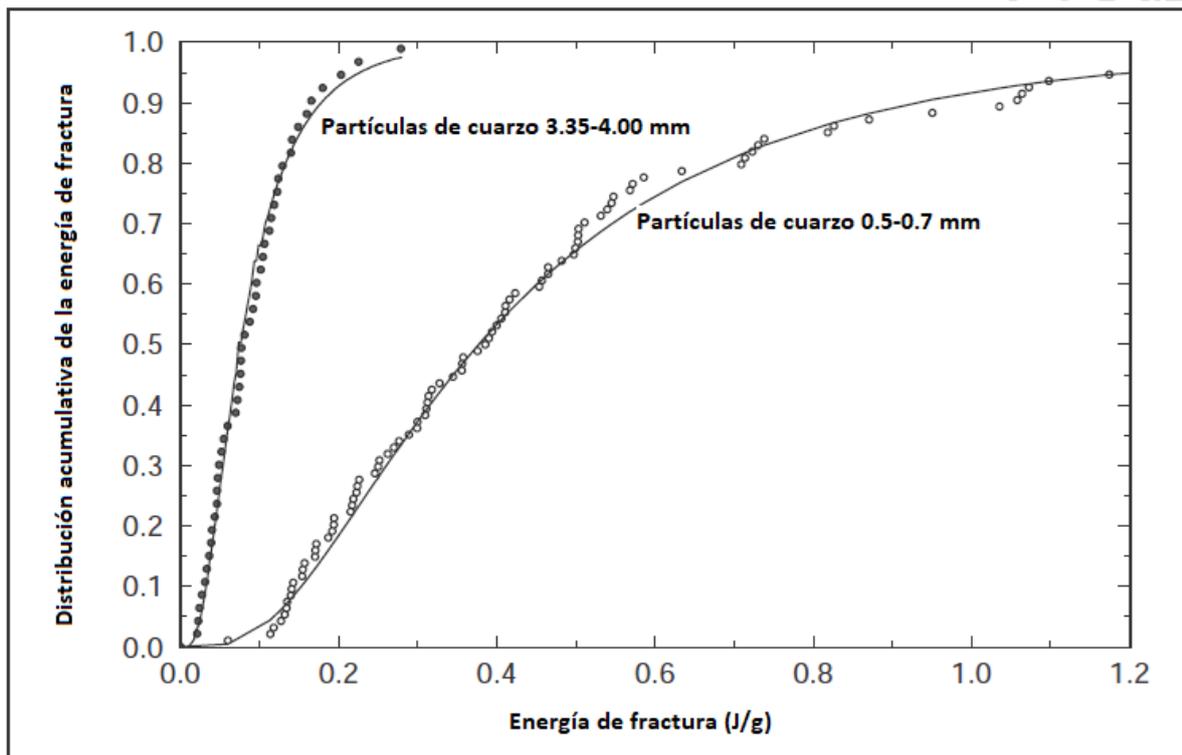


Figura 2. Distribuciones medidas de las energías de fractura de partículas para dos tamaños de partículas de cuarzo. Modificado de [13].

Una de las teorías que soportan la comprensión de la mecánica de fractura de material particulado es la de Griffith, pues las partículas suelen tener defectos que se generan durante su formación y procesos industriales asociados a su explotación y tratamiento, los cuales les confiere un comportamiento similar al de los materiales frágiles. Cuando una partícula es impactada por los cuerpos moledores, recibe una tensión a alta velocidad, sufriendo una deformación elástica casi despreciable, produciendo una acumulación de la energía en su interior, hasta que la intensidad de la tensión excede el criterio de Griffith para el crecimiento inestable de la grieta. Posteriormente, existe un período en el que la grieta crece excesivamente rápido y la punta de ella se desplaza a una velocidad que depende de la energía que contiene la grieta y de la capacidad de la partícula para absorber dicha energía. Cuando la punta de la grieta contiene una energía muy superior a la capacidad que tiene el material para absorberla, la grieta se propaga

a muy alta velocidad y de manera casi lineal y a medida que dicha relación disminuye, la velocidad de propagación de la grieta se reduce y su dirección tiende a cambiar o se ramifica a medida que va encontrando zonas de la partícula que se oponen a dicha propagación. Finalmente, la grieta continúa creciendo hasta que intersecta el borde de la partícula, produciendo su fractura. Cualquier energía elástica almacenada que quede, se disipa como energía cinética teniendo la posibilidad de que la partícula sufra más fracturas como consecuencia de esta liberación de energía. Este modelo de fractura de partículas proporciona una clara explicación de la energía de fractura de partículas y del papel que desempeña en el proceso de fractura. Donde la energía almacenada elásticamente se acumula hasta que supera la energía mínima que debe suministrarse a la partícula antes de que se produzca la fractura [13].

En general, ninguna partícula absorberá toda la energía disponible en un solo evento de impacto, y después de que una partícula se rompe, la energía producida por impactos posteriores de los cuerpos moledores estará disponible para romper las partículas siguientes de la manera descrita anteriormente. A partir de esto se puede decir que la distribución del tamaño de partícula depende de la energía de impacto que se le entregue a las partículas y de la energía de fractura que como ya se indicó depende del material a molturar.

Otro de los aspectos a tener en cuenta es la probabilidad de que una partícula específica se fracture si recibe una cantidad determinada de energía durante un impacto. Esto se desprende del hecho de que una partícula no se romperá si es impactada con menos de su energía de fractura. Esto se puede explicar considerando una muestra representativa de 100 partículas de cuarzo en el rango de tamaño de 0,5-0,7 mm. Si cada una de estas partículas es sometida a un impacto de 0,5 J/g, los datos que se muestran en la Figura 2 indican que alrededor de 35 de las partículas no se romperán porque tienen energías de fractura de partículas superiores a 0,5 J/g. Por lo tanto, la probabilidad de rotura de estas partículas es del 65% con una energía de impacto de 0,5 J/g. Por lo tanto, la curva de la Figura 2 tiene dos interpretaciones igualmente válidas. Por un lado, representa la distribución acumulativa de las energías de fractura de las partículas; por otro lado, representa la probabilidad de rotura de una partícula individual en función de la energía de impacto.

3.1.3 Trituración

Esta es generalmente la primera etapa de la conminución, cuyo principal objetivo es liberar las especies valiosas, el tamaño de partícula que se trabaja en esta etapa se encuentra entre 1,5 m y 5 mm, dependiendo del tamaño de partícula deseado se puede clasificar en trituración primaria, secundaria y terciaria [14].

En esta etapa, la conminución suele realizarse en seco, debido a que las fuerzas de compresión actuantes sobre las partículas generan aglomerados reduciendo con esto la capacidad del equipo [15].

3.1.4 Molienda

Este proceso suele ser la última etapa del circuito de conminución, obteniéndose una mayor razón de reducción con respecto al proceso de trituración. El mecanismo de fractura se da principalmente por impacto y en menor medida por abrasión y compresión lo que produce fracturas por impacto, abrasión y compresión ya sea en medio seco o húmedo. Durante esta etapa, las partículas se fracturan como resultado de impactos que se repiten aleatoriamente. Los

principales objetivos de la molienda son liberar especies, reducir su tamaño de partícula y generar productos de alta superficie específica.

La molienda puede realizarse por vía seca o húmeda. La molienda en seco, se emplea generalmente cuando se trata de materias primas muy homogéneas desde el punto de vista morfológico y de dureza, mientras que la molienda en húmedo, se emplea para conseguir una mayor razón de reducción de los materiales que conforman la mezcla y a la vez una mayor homogenización de estos. La molienda se realiza en recipientes cilíndricos rotatorios de acero o de un material con alta resistencia al desgaste, en su interior, estos son cargados con cuerpos moledores que pueden ser en forma de bolas o barras y están hechos generalmente de alúmina, carburo de silicio o dióxido de circonio. Los factores que afectan el resultado de la molienda son el volumen de la carga, la naturaleza de los cuerpos de molienda, la velocidad de giro del molino y la cantidad de espacios vacíos en su interior. El volumen de la carga está compuesto por el volumen de cuerpos moledores, el volumen del material que se quiere moler y en el caso de la molienda en húmedo por el volumen de líquido. El volumen de la carga generalmente oscila entre 30% y 50% del volumen total del interior del molino y la velocidad de rotación del molino, debe estar entre el 60 y el 80% de la velocidad crítica, para favorecer el mecanismo de fractura por estallido [16].

3.1.4.1 Etapas de la molienda

Molienda primaria

En ocasiones una sola etapa de molienda puede no ser suficiente para lograr la razón de reducción requerida, por lo que suelen emplearse moliendas gruesas y posteriormente finas o también denominadas molienda primaria y secundaria. En la molienda primaria, se suelen emplear molinos de barras, donde los medios de molienda son barras de acero que imparten las fuerzas necesarias para la reducción de tamaño. Al girar un molino cargado con las partículas a reducir y con los medios de molienda, toda la carga se eleva siguiendo la dirección del movimiento. Cuando estos alcanzan cierta altura, parte de la carga cae en cascada al fondo del molino, la otra parte tiende a deslizarse hacia abajo pero pronto viaja nuevamente en la dirección del movimiento del molino. Durante este proceso, la carga cae rápidamente sobre el material de interés impartiendo una energía que hace que este se fragmente. Adicionalmente, se presentan fuerzas de fricción que ayudan a la disminución del tamaño de partícula. Como resultado de la acción combinada de impactos y fricción repetida a lo largo del tiempo, se produce una reducción de tamaño.

Molienda secundaria

En este tipo de molienda se suele emplear de alimento el producto que queda de la molienda primaria, donde se manejan tamaños nominales de partícula de 0,5 mm aproximadamente, llegándose a obtener productos entre 20- 100 μm . Se suelen emplear molinos cilíndricos, donde su medio de molienda son generalmente bolas, varillas o medios cilíndricos llamados "cylpebs". Se utilizan tanto bolas de acero como de cerámica dependiendo de la dureza y de la resistencia a la fractura del material a moler. En el caso de los minerales blandos, se añaden piedras o simplemente se muelen de forma autógena con cuerpos moledores del mismo material a moler. Es común tanto la molienda húmeda como la seca. En el caso de los molinos de bolas de molienda secundaria, generalmente trabajan en un circuito cerrado con clasificadores

mecánicos como hidrociclones que permiten maximizar su rendimiento y evitar la sobre molienda.

3.1.4.2 Variables críticas de la molienda.

-Carga del molino

Dentro de los factores más importantes durante la molienda, sin duda la carga del molino es uno de estos. Es importante que el molino no se llene demasiado, ni con menos de lo recomendado. Cuando se obtiene una carga y una relación producto a moler/cuerpos moledores adecuadas, la carga tiende a acumular finos en la base del molino, lo que resulta en un efecto de absorción de la energía del impacto, causando rotura de la roca a molturar. Cuando la carga de la roca es baja, el contacto CM-CM retrasa la tasa de rotura ya que la energía se pierde. Por lo tanto, el operador tiene que calcular la cantidad óptima de cada componente para obtener el tamaño de producto requerido y mantener la tasa de salida predeterminada mientras se maximiza la eficiencia energética.

En la Figura 3, se observa que la carga del molino influye de manera importante en el tiempo de molienda; de tal forma que el tiempo es mínimo cuando la carga del molino ocupa el 50% de su volumen. De forma recíproca, la potencia absorbida por las partículas es máxima cuando el molino está cargado a la mitad de su volumen. En la práctica, se aconseja una carga de bolas, material a moler y líquido (en el caso de la molienda en húmedo), del 30 al 50% del volumen del molino [14, 17, 18].

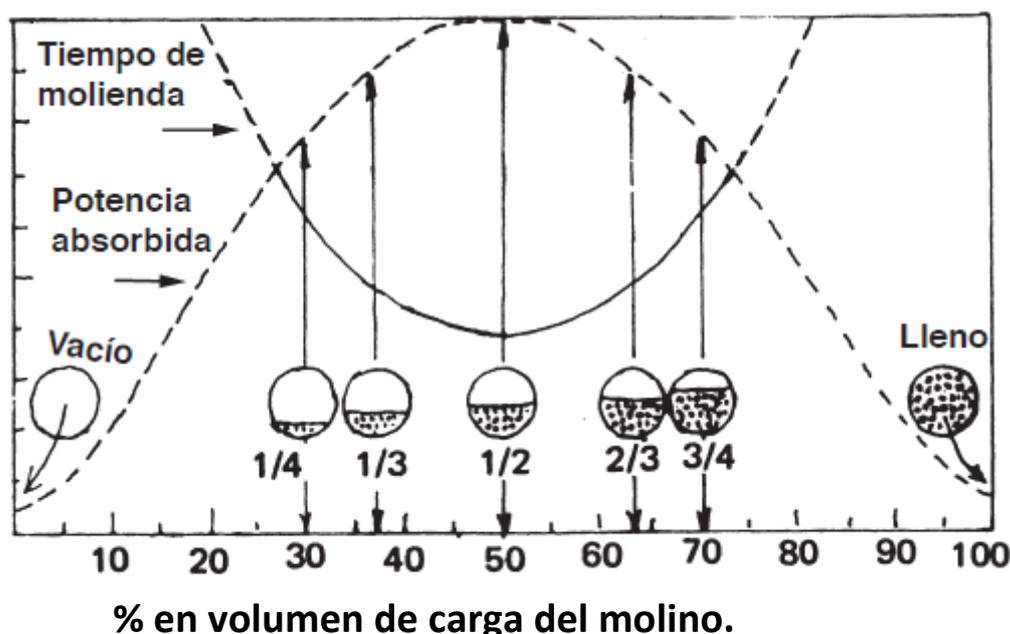


Figura 3. Tiempo de molienda y potencia absorbida en función del llenado del molino. Modificado de [18].

- *Cuerpos molidores*

Como ya fue indicado, la molienda suele dividirse en varias etapas, molienda primaria y secundaria, con el fin de lograr una mayor razón de reducción. Dentro de estas etapas, la selección de la proporción correcta entre el tamaño de cuerpos molidores y el tamaño de las partículas es un factor muy importante, ya que los cuerpos molidores grandes, son más eficientes para moler partículas gruesas, (4 a 20 mm) y los cuerpos molidores pequeños, son más eficientes para moler partículas pequeñas.

La cantidad, el tamaño y la masa de cada cuerpo molidor, depende de la carga del molino y de si estos son cargados por primera vez para iniciar una operación o como reemplazo de aquellos que se van desgastando [9, 19]. Para determinar el tamaño de los CM que se van a cargar para iniciar un proceso de molienda se hace uso de una ecuación empírica que relaciona el tamaño del CM con el tamaño del alimento mediante la ecuación 2 [17]:

$$d_b = 0,4 K\sqrt{F} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

F: Tamaño nominal del alimento (d_{80}) (cm)

K: Factor de molturabilidad 37,4 para minerales duros y 29,8 para minerales blandos.

Dentro de las características más importantes de los cuerpos molidores, se destaca su peso específico (conocido habitualmente como densidad), que permite su clasificación en:

a) medios de baja densidad ($\rho = 2.4 - 2.5 \text{ g/cm}^3$); ejemplo: porcelana normal o sílice.

b) medios de densidad media ($\rho = 2.6 - 2.7 \text{ g/cm}^3$); ejemplo: esteatita y porcelana de alto contenido de alúmina.

c) medios de alta densidad ($\rho = 3.4 - 3.9 \text{ g/cm}^3$); ejemplo: alúmina.

Cuanto más alto es el peso específico, mayor es, para los medios de molienda de igual volumen, la energía potencial alcanzada durante la rotación y la caída, lo cual significa una mayor fractura.

Otro de los factores importantes dentro de los cuerpos molidores, es la distribución que estos tengan en el molino, los molinos de pequeño volumen deben ser cargados con una cantidad de cuerpos molidores más pequeños que los molinos de mayores dimensiones. En general, se emplea una distribución en volumen de tres medidas de esferas, repartidas de la siguiente forma:

- 45 - 50% de esferas de diámetro inferior
- 25 - 30% de esferas de diámetro intermedios
- 25 - 30% de esferas de diámetro superior.

Cabe destacar, que la distribución de cuerpos moledores siempre va a estar en función del tamaño de partícula inicial y del tamaño final deseado. Si se tienen partículas grandes, se requiere bolas de mayor diámetro; si esta debe ser molturada finamente, hacen falta bolas de pequeño diámetro ya que de este modo aumentan los puntos de contacto, así como la superficie total de las mismas [18].

-Velocidad de rotación en función de la velocidad crítica

Inicialmente, cuando la velocidad de rotación de los molinos aumenta, la acción de moler se incrementa y también el rendimiento del molino. Pero cuando la velocidad es superior a un cierto valor, la carga junto con los medios de molienda tiende a aferrarse a la pared interior impidiendo que se produzca el efecto cascada requerido para la fractura de las partículas a moler. En tal caso la acción de moler se reduce considerablemente o se detiene por completo y la eficiencia energética de la fractura causada por el molino desciende drásticamente. La velocidad a la que se podría aprovechar al máximo la potencia de un molino es conocida como la Velocidad Crítica (V_c). Dada la inercia que pueden alcanzar los cuerpos moledores cuando el molino gira a la velocidad crítica o a valores cercanos a ella, estos pueden caer fuera de la zona de impacto con la carga y por lo tanto, golpearan con la pared del molino, produciendo grandes desperdicios de energía y deterioro del molino. Por tal razón, los molinos tienen que girar a velocidades inferiores a la velocidad crítica, para que se produzca la molienda. Para determinar la velocidad crítica (V_c) es necesario conocer el diámetro del molino, D , y el diámetro, d , de la bola (o varilla) más grande presente como medio de molienda. La Figura 4 muestra las fuerzas de equilibrio en una bola durante la rotación del molino.

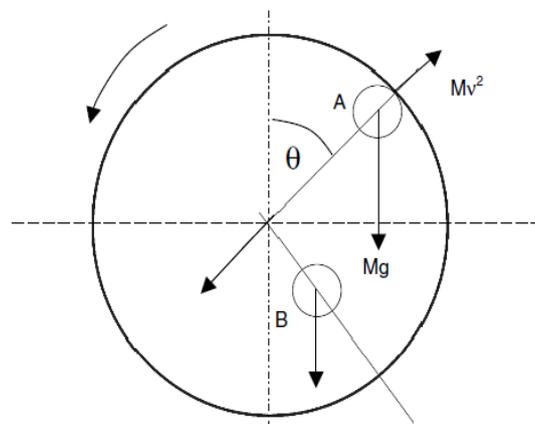


Figura 4. Las fuerzas de equilibrio en una bola debido a la rotación del molino [17].

En la posición A, la bola se mantiene contra la pared del revestimiento del molino gracias a que la fuerza centrífuga (Mv^2) supera a la fuerza de gravedad que actúa sobre ella. En este caso la fricción entre la bola y revestimiento del molino es despreciable. La posición B denota el centro de gravedad de toda la carga donde la distribución de las fuerzas es similar a la de A pero implica varios factores desconocidos como las fuerzas de fricción. Debido a la complejidad de la distribución de las fuerzas sólo se considera la posición A donde en equilibrio, la fuerza de gravedad ($Mg \cos\theta$), es igual a la fuerza centrífuga opuesta ($2Mv^2/(D)$).

$$Mg \cos\theta = \frac{2Mv^2}{D} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde: M = masa del cuerpo molidor

g = aceleración debida a la gravedad (m/s^2)

θ = ángulo de la componente de la fuerza de gravedad con la vertical

v = velocidad lineal (m/s) del cuerpo molidor

D = diámetro del molino. (m)

$$v = \frac{\pi D \omega}{60}$$

La velocidad rotacional es igual a:

(Ecuación 4)

Al reemplazar la ecuación 4 en 3 se obtiene:

$$\cos\theta = \frac{\left[2\pi\left(\frac{D}{2}\right)\omega\right]^2}{9,81\frac{D}{2}60^2}$$

(Ecuación 5)

Cuando $\theta = 0$, $\cos \theta = 1$, la fuerza de gravedad que tiende a sacar la bola de la pared estará al máximo y la velocidad requerida para superar esta fuerza se conoce como la velocidad crítica. (Ver Figura 4). Sustituyendo la ecuación 4 y la 5 en la 3, se tiene que la velocidad crítica vendrá dada por:

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \left(\frac{rev}{min} \right)$$

(Ecuación 6)

A nivel industrial, los molinos operan a un porcentaje de la velocidad crítica, el rango común de dicho porcentaje de la velocidad crítica a nivel operacional varía entre un 60% y 80% [14, 17,18].

Finalmente, es importante resaltar que los procesos de conminución, en especial la molienda son de gran importancia durante la incorporación de partículas (como las de los residuos de corte de vidrios), en los esmaltes y materiales para serigrafías, debido a que estos residuos vienen con un tamaño de partícula que impide que sean incorporados al proceso directamente. En el caso de los materiales para serigrafía, estos deben tener un tamaño de partícula inferior a 70 μm y según trabajos previos realizados en Colcerámica, en los esmaltes la cantidad adicionada no puede sobrepasar el 5% en peso de sólidos retenidos en la malla 325.

3.2 Esmaltes y materiales para serigrafías

En la fabricación de las baldosas cerámicas de piso y pared se desarrolla una serie de etapas que permiten obtener un producto con buenas propiedades para su aplicación. Esta serie de etapas se puede resumir de la siguiente manera: preparación de las materias primas, estas ya vienen preparadas de la planta ubicada en Girardota, conformado y secado en crudo de la pieza, cocción o cocciones con esmaltado, decorado, tratamientos adicionales y por último, clasificación y embalaje. En las etapas de esmaltado y decorado uno de los componentes principales es el vidrio, este le confiere al producto final características físicas que otros productos no lo harían.

3.2.1 Esmaltes

Los esmaltes son suspensiones acuosas compuestas por parte vítrea denominada frita (mezcla vítrea fundida enfriada bruscamente en agua) y aditivos que dependiendo del tipo de esmalte pueden ir o no, estos son elementos que actúan como fundentes (alcalinotérreos, boro y zinc), opacificantes (circonio o titanio), colorantes (óxidos de hierro, cobalto, cromo y manganeso) y arcillas que permiten darle plasticidad al esmalte durante la cocción. Estos materiales a temperaturas mayores a 1000 °C se combinan formando un eutéctico, que da como resultado una estructura amorfa (80-90% en peso) y cristalina (20-10%) otorgándole a la pieza final propiedades físicas, químicas y mecánicas tales como brillo y color, resistencia química y resistencia al rayado [16, 20,21].

Durante la cocción, las partículas de frita se ablandan creando una capa de vidrio continua sobre la pasta, esta contiene partículas de pigmento suspendidas que son las encargadas de interactuar con la luz incidente y darle el color al esmalte. Dependiendo de la composición del vidrio que se emplee en la frita se pueden obtener diferentes esmaltes, tales como, blancos brillantes (mayólica), esmaltes mate, perlados, cerosos entre otros [22]. Al contener un alto porcentaje en peso de fase vítrea, las características de la frita van a influir en las propiedades del esmalte y su comportamiento durante la cocción. Una de las características que debe tener la frita en el esmalte, es su baja temperatura de ablandamiento, entre 565-815°C lo que permite que las partículas fluyan juntas eliminando la porosidad y se adhieran al sustrato.

3.2.1.1 Porcentaje de sólidos secos en los esmaltes

El peso por litro (PXL) o densidad y la constante de Brogniart del esmalte son parámetros importantes que permiten determinar el porcentaje de sólidos en el esmalte, mediante la siguiente ecuación:

$$\% \frac{s}{s} = \frac{K * (\rho_{esmalte} - 1000)}{\rho_{esmalte}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

ρ = Densidad del esmalte (Kg/m³)

K = Constante de Brogniart

Con base al porcentaje de sólidos se calcula el porcentaje de vidrio a agregar.

3.2.1.2 Incorporación de residuos de vidrio en esmaltes

Como se mencionó anteriormente, las fritas son parte importante en el esmalte y son las principales responsables de sus propiedades físicas y químicas finales. Las principales características que se deben tener en cuenta durante la selección de esta son la viscosidad, tensión superficial, tamaño de partícula, temperatura de ablandamiento y composición que dependiendo del tipo de esmalte varía. Al adicionar vidrio estas propiedades podrían alterarse y afectar en gran medida su interacción con la luz obteniendo vidrios con características de brillo no deseadas. Adicionalmente, la incorporación de vidrio podría influir en la temperatura de ablandamiento, al contener el vidrio dentro de su composición química fundentes tales como Na₂O y K₂O, estos podrían destruir la red vítrea de la frita y generar temperaturas de ablandamiento del esmalte mucho menores, viéndose afectada la apariencia del esmalte generando defectos como el hervido, ya que los gases provenientes de la pasta no tienen el tiempo suficiente para salir antes de que el esmalte funda. Debido a esto la cantidad de vidrio que se adiciona debe de ser muy controlada para que no se alteren ninguna de las propiedades y características anteriormente mencionadas [22-25].

3.2.1.3 Técnicas de esmaltado

Se da cuando la baldosa pasa a través de una cortina de esmalte, la cantidad de esmalte aplicado va a depender del caudal de la cortina y de la velocidad de paso de la baldosa. Existen diferentes métodos de aplicación de los esmaltes sobre la baldosa, a saber:

-*Campana*. En este sistema, se crea un velo de esmalte. Está compuesto por un plato de acero inoxidable, un sistema de alimentación mediante tolva anti burbujas, una llave de paso con aguja de aplicación, una bandeja de recogida de esmalte y postes de sujeción.

-*Disco*. Se aplica el esmalte por centrifugación mediante un juego de discos de diferente diámetro (120-180 mm), que giran a una velocidad variable a una distancia de aproximadamente 40-50 cm de la baldosa cerámica a esmaltar.

- *Airless*: Este sistema permite la aplicación de pequeñas cantidades de esmalte por medio de un nebulizador. Consta de una bomba de tipo volumétrico continuo, para una presión de (5 a 30 Bar), accionada por un motor eléctrico, comandado por un variador de velocidad electrónico.

3.2.2 Serigrafías

La serigrafía es la técnica mayormente utilizada, debido a la facilidad de aplicación y la calidad de los colores obtenidos, está compuesta por suspensiones concentradas de sólidos. Estas, se componen de fritas cerámicas denominadas base serigrafica, aportándole fundencia, pigmentos y un líquido suspensivante denominado vehículo cuyos componentes principales son glicoles y resinas, estos le confieren a la serigrafía características adecuadas para su aplicación y se evaporan durante la cocción. Estas serigrafías, se aplican mediante pantallas con una malla tensada las cuales contiene el diseño que se desea incorporar en la baldosa. Al pasar sobre la pantalla un elemento que ejerce presión obliga a la pasta serigrafica a atravesarla quedando la impresión sobre la pieza [16, 20, 21].

Entre los principales componentes del vidrio (ver Tabla 1) se puede encontrar el óxido formador de la red tetraedral (SiO_2), fundentes (Na_2O) y (K_2O), óxidos modificadores (CaO), (BaO), (MgO), (Al_2O_3) y (TiO_2) que mejoran la resistencia química y al cuarteo, cada uno de estos le aporta propiedades físicas, químicas y mecánicas que van a depender de su relación con respecto a los otros componentes. [15]. Al observar la composición química de una base serigrafica empleada en la empresa COLCERAMICA S.A.S (ver Tabla 2), se puede identificar la alta correlación de componentes que tiene con respecto al vidrio, por lo que se esperaría que la incorporación de los residuos de vidrio en las bases serigráficas no afecten de forma significativa el desempeño de estas bases durante su cocción, pero si se incorpora en altos porcentajes podría afectar sus propiedades físicas especialmente el brillo. Es por esto que es pertinente realizar ensayos con diferentes porcentajes de vidrio en las bases serigráficas que permitan encontrar la cantidad adecuada de residuos de vidrio que puede aceptar cada una de estas.

Tabla 1. Composición química del vidrio obtenido del molino semi-industrial.

SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	BaO	Fe_2O_3	Cr_2O_3	SO_3	P_2O_5	PPI
71,2	0,92	0,04	8,71	3,94	13,99	0,37	0,024	0,16	0,001	0,02	0,007	0,4

Tabla 2. Composición química de una base serigrafica de alta temperatura.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
61,5	12,4	0,17	-	2,1	0,81	7,74	3,7
BaO	P ₂ O ₅	PbO	SO ₃	SrO	ZnO	ZrO ₂	B ₂ O ₃
0,12	-	0,13	0,04	0,01	0,22	3,12	5,1

3.3 Pruebas realizadas a producto terminado

3.3.1 Determinación de la resistencia al cuarteo

Se llama cuarteo a una línea fina y limitada a la superficie esmaltada de la baldosa, este fenómeno aparece cuando la diferencia de los coeficientes de dilatación del soporte y del esmalte es alta, por lo que en el esmalte se generan esfuerzos de tracción superiores a su resistencia mecánica.

Este ensayo se comienza realizando una inspección previa a las probetas en busca de defectos visibles, ya que todas las piezas que se van a ensayar deben estar libres de defecto al inicio de la prueba. Posteriormente se colocan las piezas a ensayar dentro del autoclave y se somete a un incremento exponencial de temperatura y presión hasta alcanzar $159\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$ y 500 ± 20 KPa respectivamente durante una hora. Una vez alcanzada la presión y temperatura se deja durante una hora, esto se conoce como 1 ciclo. Posteriormente se cierra la fuente de vapor y se espera media hora para sacar las piezas y dejarlas expuesta a la temperatura ambiente durante otra media hora. Una vez pasado este tiempo se aplica azul de metileno a las piezas a para revelar posibles fisuras y finalmente se enjuaga y se observa. Este procedimiento se repite 3 veces y si no presenta fisura el material ensayado pasa la prueba [18].

3.3.2 Determinación resistencia química

Esta prueba tiene como objetivo, determinar la resistencia química a temperatura ambiente de la superficie esmaltada de las baldosas. En este ensayo se evalúan 5 soluciones de ácido cítrico, ácido clorhídrico, hidróxido de potasio, cloruro de amonio e hipoclorito de sodio en sus respectivas concentraciones según la norma NTC 4321-13. Inicialmente, se depositan las diferentes soluciones dentro de un cilindro que debe estar previamente sellado y adherido a la baldosa a ensayar para evitar escape del líquido, este líquido, debe de estar a una altura de 20 ± 1 mm. Los reactivos anteriormente mencionados, se dejan actuar durante 96 horas. Una vez

pasadas las 72 horas, se retira el cilindro y se limpia la superficie que estuvo en contacto y se realiza un examen visual desde todos los ángulos [18].

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Con el fin de obtener la información técnica requerida para llevar a cabo el estudio que se ha propuesto se llevaron a cabo las siguientes actividades.

4.1 Validación resultados obtenidos previamente a escala de laboratorio

4.1.1 Lavado y molienda

Se realizó una validación de los resultados obtenidos anteriormente a escala de laboratorio, para esto fue necesario lavar los residuos que se generan del corte de las placas de vidrio (ver Figura 5.a y 5.b) y posteriormente se realizó una molienda en seco de 500 g de vidrio durante 40 minutos en un molino Rosetti (ver Figura 5.c).

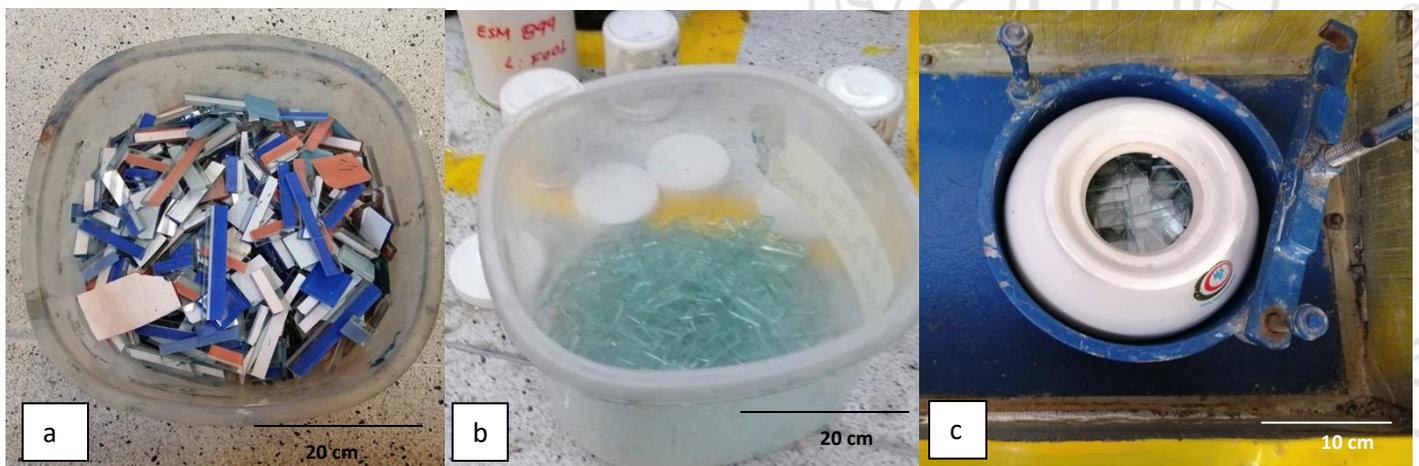


Figura 5. Lavado y molienda del vidrio a nivel de laboratorio. a. Residuos de corte de vidrio, b. Residuos de corte de vidrio después de lavar, c. Residuos de corte de vidrio en el molino Rosetti.

4.1.2 Validación porcentajes de vidrio que reciben los esmaltes y serigrafías.

Una vez molido el vidrio, este se tamiza y se trabaja con el pasante 70 μm . En el caso de las bases serigraficas, se trabajó con una relación sólidos/vehículo de 100/65 en peso y para los

esmaltes con los gramos secos hallados a partir de la densidad (PXL) y la constante de Brogniart correspondiente para cada esmalte. Para encontrar el porcentaje máximo del vidrio molido que pueden recibir tanto los materiales para serigrafía como los esmaltes, sin cambiar de manera significativa, sus propiedades o características físicas, se realizaron impresiones sobre una pantalla para las bases serigráficas (ver Figura 6.a) y trineos en el caso de los esmaltes (ver Figura 6.b) y se compararon con su patrón, es decir con serigrafías y esmaltes que no contienen vidrio reciclado en su composición química.

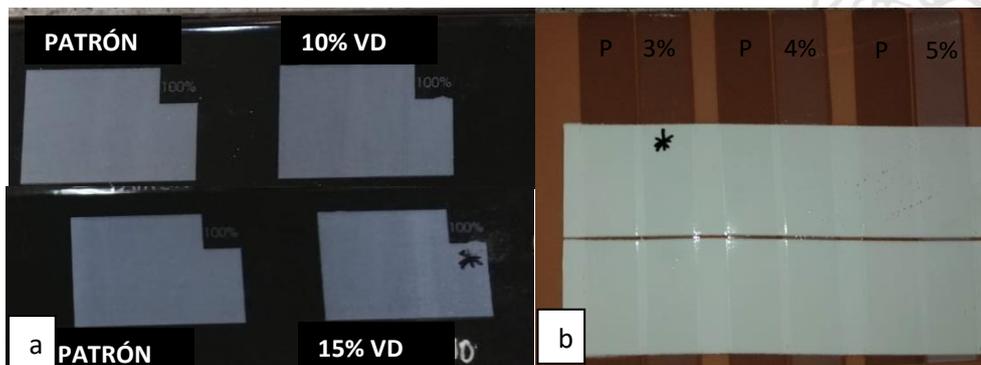


Figura 6. a. Base serigráfica referencia SR 112, b. trineo de esmalte de referencia TGA (P) patrón sin vidrio reciclado y 3,4 y 5% en peso de vidrio.

4.2 Variables críticas de la molienda a nivel semi-industrial

Después de validar la cantidad de vidrio que reciben los esmaltes y serigrafías se procedió a encontrar las variables críticas del proceso de molienda en el molino semi-industrial. Para esto fue necesario realizar una curva de moliendabilidad con el fin de identificar la variación del tamaño de partícula con respecto al tiempo de molienda. Se cargó el molino ocupando un 42% de su volumen, con los residuos de vidrio y con cuerpos moledores. Del volumen de material cargado el 51% en volumen correspondió a los cuerpos moledores y el 49% al vidrio. El factor de empaquetamiento de los cuerpos moledores fue de 0,6. La distribución de tamaño de los CM se puede observar en la Tabla 3.

Para la construcción de la curva de moliendabilidad, se determinó mediante tamizado el tamaño nominal d_{80} para diferentes tiempos de molienda hasta completar un total de 6 horas. Para la selección de la muestra representativa a tamizar se siguió la norma ASTM C702 método C como se muestra en la Figura 7.

Tabla 3. Relación de CM empleada para la curva de moliendabilidad.

Denominación cuerpo moledor	Tamaño cuerpo moledor (cm)	% en volumen
P	1,89	22,8
M	3,17	23,8
MG	3,86	25,9
G	5,2	27,4



Figura 7. Procedimiento de cono y cuarteo del vidrio molido a nivel semi-industrial.

Una vez hallada la curva de moliendabilidad se procedió a evaluar la influencia de las variables críticas de la molienda, tales como: la distribución de cuerpos moledores, moliendas que fueron designadas como M1, M2 y M3, así como la velocidad de rotación del molino en términos del porcentaje de la velocidad crítica, molienda designada como M4 y comparada con la M2. Estas moliendas se realizaron de acuerdo con lo indicado en la Tabla 4. Dado que se requiere fracturar las partículas desde un tamaño nominal $d_{80f}=58$ mm hasta un d_{80A} menor a $70 \mu\text{m}$, lo que implicaría una razón de reducción de al menos 830, es posible que esto no se pueda lograr en una sola etapa y bajo unas condiciones únicas de molienda, por lo que además de los anteriores, se realizaron algunos procesos de molienda en dos etapas. Para llevar a cabo la molienda por etapas se procedió a cargar el molino al 32% de su capacidad en volumen, donde el 26% en volumen eran CM grandes y el 74% restante vidrio. Pasado el tiempo de molienda requerido para alcanzar un $d_{80f}=1,8$ cm (molienda M5), $d_{80f}=1,4$ cm (molienda M6) y $d_{80f}=1,0$ cm (molienda M7), se adicionó el resto de CM (medianos y pequeños) hasta obtener una carga total del 56% del volumen del molino, tal y como se describe en la Tabla 4. Finalmente, se realizó la molienda M8 utilizando los mismos parámetros de la M7, pero aumentando el tiempo total de las dos etapas del proceso hasta 7 horas y 10 minutos, con el fin de evaluar si después de las 6 horas y 30 minutos se podría seguir disminuyendo el tamaño de partícula, ya que teóricamente se ha demostrado que después de cierto tiempo las partículas se empiezan a aglomerar debido

a la carga superficial de estas. Este es un fenómeno común, que ocurre tanto en la molienda en húmedo como en seco, pero en la molienda en húmedo se hace uso de aditivos como defloculantes que impiden las aglomeraciones [21, 24].

Tabla 4. Variables críticas de la molienda evaluadas.

N° Molienda	Distribución en peso de Cuerpos Moledores (CM)				Velocidad de rotación [rpm]	Tamaño nominal del alimento (d80f) [cm]	Tiempo [h:min]	Relación volumétrica CM/Vidrio	Volumen del molino cargado [%]
	P	PM	M	G					
M1	15	15	30	40	45,91	5,8	6:30	51/49	42
M2	25	10	30	35					
M3	50	-	25	25					
M4	25	10	30	35	45,91 (3h) – 31,9 (3:30 h)				
M5	50	-	25	25	45,91	1,8	7:10	60/40	56
M6						1,4			
M7						1,0			
M8						1,0			

4.3. Aseguramiento de la influencia de la incorporación del vidrio molido a nivel semi-industrial en algunas bases serigráficas y esmaltes.

Una vez halladas las variables críticas del proceso de molienda que permiten alcanzar el tamaño de partícula nominal requerido (70 μm) para que el vidrio pueda ser utilizado como materia prima de material para serigrafía y para la fabricación de esmaltes, se procedió a verificar que los porcentajes de vidrio encontrados previamente a nivel de laboratorio fueran los mismos que los que se pueden adicionar con las partículas molidas a nivel semi-industrial. Para esto se evaluaron las bases serigráficas de referencia SR 112 bajo residuo, 450/1091, SR 226 y KV 1219 y los esmaltes de referencia 911, TGA y 1299.

4.4 Evaluación del espesamiento de las bases serigráficas y de los esmaltes.

Con el fin determinar la influencia en las propiedades reológicas que tiene la incorporación del vidrio molido en los esmaltes y en las bases serigráficas antes mencionadas, se realizaron

medidas de espesamiento. Para las bases serigráficas de baja temperatura, se trabajó una relación en peso de sólidos/vehículo 100/75 y en las de alta temperatura 100/70. El ensayo consistió en agitar 200 mL de la suspensión a 23 Hz durante 3 minutos, una vez terminado este tiempo se toma la viscosidad 10 segundos después en el viscosímetro Brookfield con una aguja número 4 y una velocidad de rotación de 30 rpm, posteriormente se detiene la aguja y se espera 3 minutos con esta sumergida en la suspensión evaluada, pasados esos 3 minutos se realiza una segunda medida de viscosidad con el fin de evidenciar el espesamiento o la fluidez de la suspensión.

4.5 Ensayos a nivel semi-industrial (L1 y L4)

Para evaluar el vidrio en la línea 1 donde se realizan las baldosas de monococción, se trabajó con el listello reineta realizando un total de 1300 unidades, mientras que en la línea 4 donde se realizan los decorados con vidrio, inicialmente se trabajaron 2 referencias (N003 VD y AZ 041 VD), se realizaron dos placas de cada color, 1 sin vidrio denominado patrón y otra con vidrio en su formulación, al evidenciar buenos resultados se procedió a realizar 44 placas de la referencia N003 VD para observar su comportamiento en la línea de producción.

4.6 Propuesta para incorporación de rechazo de vidrio molido en otros procesos.

De los ensayos de molienda a nivel semi-industrial se pudo establecer que no todo el vidrio alcanza un tamaño inferior a 70 μm y por lo tanto, aquellas partículas más grandes a este tamaño no se puede aprovechar para incorporarlas en esmaltes y material para serigrafías, por lo que surgió la necesidad de hallar otro proceso para poderlas utilizar.

Se propone incorporar parte del vidrio rechazado en espesados sobre placas de vidrio mediante la impresión sobre pantallas de 10 y 24 hilos, para esto, se realizaron ensayos mezclando vidrio, pigmentos y un vehículo serigráfico llamado RECICOL en diferentes proporciones con el fin de encontrar una que permitiera garantizar una buena aplicación y buen acabado.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Validación de resultados obtenidos a nivel de laboratorio

De lo obtenido en el molino Rosetti solo el 42,8% de la masa se podría utilizar para realizar los ensayos (ver Tabla 5). Por su parte, al observar los datos de la tabla 6, las bases serigráficas de alta temperatura (SR 112 y SR 230) y baja temperatura SR 226 son las que reciben mayor

porcentaje de vidrio dentro de su composición, esto podría deberse a que en la composición química de estas bases (ver Tabla 6) los elementos que componen el vidrio están en altos porcentajes, como es el caso de los formadores de la red vítrea (SiO_2 , B_2O_3), fundentes (Na_2O y K_2O) y algunos modificadores (MgO y CaO). Adicionalmente, la base serigráfica de referencia SR 112 es la que más recibe vidrio debido a su apariencia blanca mate que permite que el vidrio se incorpore y no cause ruido en su apariencia, este acabado blanco mate, se lo confieren el ZnO y el ZrO_2 , ya que se ha demostrado que la adición del ZnO aumenta el índice de refracción y el ZrO_2 es un opacificante en el vidrio [27,28].

Al observar las bases serigráficas que menos reciben vidrio, la KV1219 y 450/1091, tienen alto contenido de alúmina, que es utilizada para aumentar su cristalinidad, por lo que la incorporación de partículas de vítreas puede causar variaciones en algunas propiedades físicas relacionadas con la cristalografía, entre ellas, su índice de refracción, dando como resultado el rechazo del vidrio a partir de ciertos porcentajes.

Tabla 5. Distribución granulométrica obtenida en el molino Rosetti.

Malla	Abertura (μm)	Masa retenida (g)	% masa retenida	%Masa acumulada pasante
40	400	68,1	13,7	86,3
60	250	73,4	14,7	71,6
200	70	143,8	28,8	42,8
Tapa	0	213,1	42,8	0

Tabla 6. Porcentaje máximo de vidrio que se puede incorporar en esmaltes y bases serigráficas.

Esmalte	% Recibido	Base serigráfica	% Recibido	Base serigráfica	% Recibido
		de alta temperatura		de baja temperatura	
TGA	3	450/1091	3	SR 226	10
911	3	SR 230	10	KV 1219	5
1299	4	SR 112	15	-	-
811	2	-	-	-	-
ESMALTOBIO					
1001	8				

Tabla 7. Análisis de composición química bases serigráficas.

BASE SERIGRAFIC	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	TiO₂	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	BaO
	43,4	14,1	0,1	8,2	4,5	1,7	3,5	2,2	-
KV 1219	HfO₂	P₂O₅	PbO	SO₃	SrO	ZnO	ZrO₂	B₂O₃	PPI entre 110°C y 1000°C
	0,1	0,1	-	0,0	-	8,1	3,12	5,1	5,60
SR 226	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	TiO₂	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	BaO
	56,3	-	-	-	7,2	-	14,9	-	-
SR 226	HfO₂	P₂O₅	PbO	SO₃	SrO	ZnO	ZrO₂	B₂O₃	PPI entre 110°C y 1000°C
	-	-	-	-	-	-	-	21,6	-
SR 112	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	TiO₂	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	BaO
	57,8	6,0	-	-	9,2	3,1	1,2	3,2	-
SR 112	HfO₂	P₂O₅	PbO	SO₃	SrO	ZnO	ZrO₂	B₂O₃	PPI entre 110°C y 1000°C
	-	-	-	-	-	8,2	7	4,2	-
450/1091	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	TiO₂	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	BaO
	61,5	12,4	0,2	-	2,1	0,8	7,7	3,7	0,1
450/1091	HfO₂	P₂O₅	PbO	SO₃	SrO	ZnO	ZrO₂	B₂O₃	PPI entre 110°C y 1000°C
	-	1,0	0,1	0,0	0,0	0,2	N.D	8,7	0,60

5.2 Influencia de las variables críticas de molienda a nivel semi-industrial

En la Figura 8 se puede ver la evolución en la reducción de tamaño de las partículas de vidrio cuando son molidas. A partir de este resultado se pudo establecer que en los primeros 140 minutos se logra la mayor razón de reducción (Rr), alcanzando valores de 192 con respecto al alimento. Después de los 140 minutos se evidencia que las partículas no reciben la energía suficiente para fracturarlas hasta el tamaño requerido (menor a 70 μm). Dentro de los primeros 140 minutos es evidente que los cuerpos moledores imprimen la energía mecánica suficiente a las láminas de vidrio para lograr la reducción de su tamaño desde $d_{80F} = 58 \text{ mm}$, hasta $d_{80A} = 297,3\mu\text{m}$, lo cual se logra principalmente mediante impacto de alta energía potencial. Lo anterior indica que el tamaño de los cuerpos moledores debe ser el mayor posible, para lograr con esto una alta energía potencial. A medida que transcurre el tiempo de molienda y que por lo tanto, las láminas de vidrio se convierten en partículas, la probabilidad de que los cuerpos moledores más grandes logren impactarlas se reduce, entonces la energía potencial que ellos pueden transmitir empieza a desperdiciarse en el proceso, empezando a adquirir mayor relevancia la energía potencial que puedan imprimir los CM de tamaño mediano. Después de los primeros 140 minutos de molienda, el tamaño alcanzado por las partículas de vidrio quizás es demasiado pequeño como para que los cuerpos moledores más grandes y medianos logren impactarlas de manera efectiva, produciéndose una baja tasa de reducción de tamaño y alto desperdicio de energía. Es quizás a partir de este momento, que cobran mayor relevancia los

cuerpos molidores más pequeños que llenan los intersticios dejados por los más grandes y medianos, alcanzando mayores factores de empaquetamiento, que aumenten la probabilidad de que se produzca la fractura de las partículas de vidrio. Dado que la masa de los cuerpos molidores pequeños genera baja energía potencial, es posible que la fractura de las partículas también se haya producido por los mecanismos de cruceo y abrasión causados por fuerzas compresivas y por fricción [12,31].

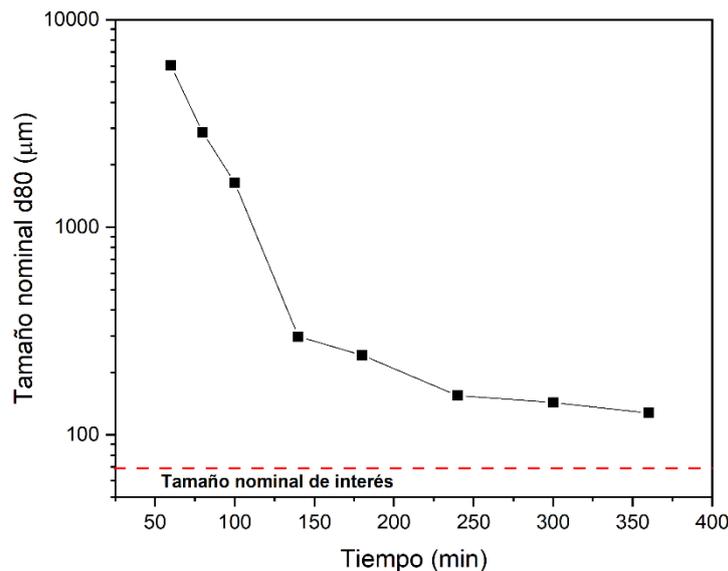


Figura 8. Curva de moliendabilidad.

Los resultados de la curva de moliendabilidad hicieron evidente la necesidad de evaluar el efecto de las variables críticas de molienda que fueron seleccionadas y descritas en la Tabla 4 de la metodología, con el fin de determinar las condiciones a las que se alcanza el tamaño de partícula deseado (70 µm).

El primero de los parámetros evaluados fue la distribución de cuerpos molidores, para lo cual se llevaron a cabo las moliendas M1, M2 y M3, descritas en la Tabla 4. Los resultados indican que el porcentaje en peso pasante por la malla de 70 µm (-70 µm) alcanza un valor de 32,8%, 42,6% y 24,1% para las moliendas M1, M2 y M3 respectivamente, ver Figura 9. Estos resultados hacen evidente que cuando la cantidad de cuerpos molidores pequeños exceden en gran medida a los grandes como en la molienda M3, en la que la cantidad en peso de CM pequeños es de 50 % y la de los CM grandes es 25%, se obtiene muy bajo porcentaje de fracción -70 µm (24,1 % en peso). Esto se da porque los cuerpos molidores grandes son los que tienen la capacidad de fracturar las láminas de vidrio alimentadas al molino, llevándolas a tamaños lo suficientemente pequeños para que los cuerpos molidores medianos y pequeños puedan cumplir su función. En este caso el 25% en peso de cuerpos molidores grandes fueron insuficientes y por lo tanto, una cantidad importante de láminas y/o partículas de vidrio no

alcanzaron la reducción de tamaño requerida para que los CM medianos y pequeños las llevaran a un tamaño inferior a $70\ \mu\text{m}$.

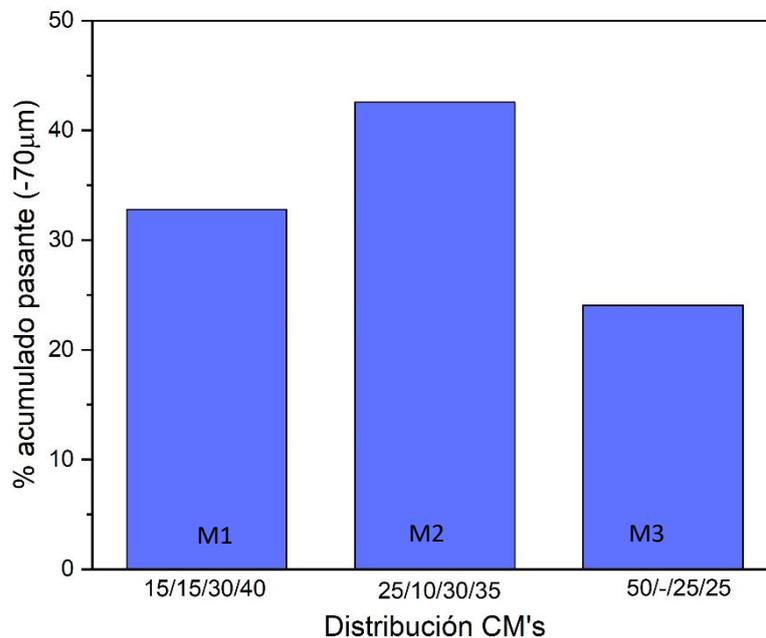


Figura 9. Influencia de la distribución de tamaño de cuerpos moledores en el porcentaje acumulado pasante.

Además fue evidente que al aumentar la cantidad de cuerpos moledores grandes hasta 40% en peso, como en la molienda M1, se presenta un aumento del porcentaje de masa de la fracción $-70\ \mu\text{m}$ a 32,8% en peso. Sin embargo, al compararlo con lo obtenido en la molienda M2, se observa que al mantener un mayor equilibrio entre los porcentajes de los cuerpos moledores con diferente tamaño ($P=25\%$, $PM+M=40\%$ y $G=35\%$) a expensas de una leve disminución de la cantidad de los medianos y grandes, se logra un aumento aún mayor de la fracción $-70\ \mu\text{m}$ hasta 42,6% en peso.

Lo anterior hace evidente la importancia de la distribución de tamaño de cuerpos moledores sobre la cantidad de partículas inferiores a $70\ \mu\text{m}$ y además que, la cantidad máxima de partículas con tamaño inferior a $70\ \mu\text{m}$ es similar a la obtenida en los ensayos de laboratorio (42,6% para M2 Vs 42,8% para molienda en laboratorio con molino Rosetti), ver Tabla 5, sin embargo, este porcentaje aún se considera bajo para el propósito de este semestre de industria. Posteriormente, se quiso observar la influencia de los mecanismos de fractura por lo que se decide realizar la molienda M4 donde se evaluó si después de 3 horas, la fractura por impacto promovida por el movimiento en cascada que logran los cuerpos moledores cuando la velocidad del molino supera el 70 % de la velocidad crítica (N_c) [12], aún tenía un efecto predominante sobre la reducción de tamaño hasta la fracción $-70\ \mu\text{m}$. Para lograr lo anterior, se utilizó la distribución de cuerpos moledores y los demás parámetros similares a los de la molienda M2, pero en este caso, a partir de las 3 horas de ensayo se redujo la velocidad del molino de 45,9

rpm (72% Nc) a 31,9 rpm (0,5 Nc). Los resultados obtenidos indican que el porcentaje en peso correspondiente a la fracción $-70\ \mu\text{m}$ es de aproximadamente 30,44 %, mientras que para M2 fue de 42,6%. Lo anterior permitió establecer que, la fractura por impacto aún sigue predominando después de 180 minutos de molienda, pues la fractura producida por la aplicación de fuerzas compresivas y de fricción cuando el molino gira al 50% Nc no logra reducir la misma cantidad de partículas que la que se da por impacto, (ver Figura 10) [12].

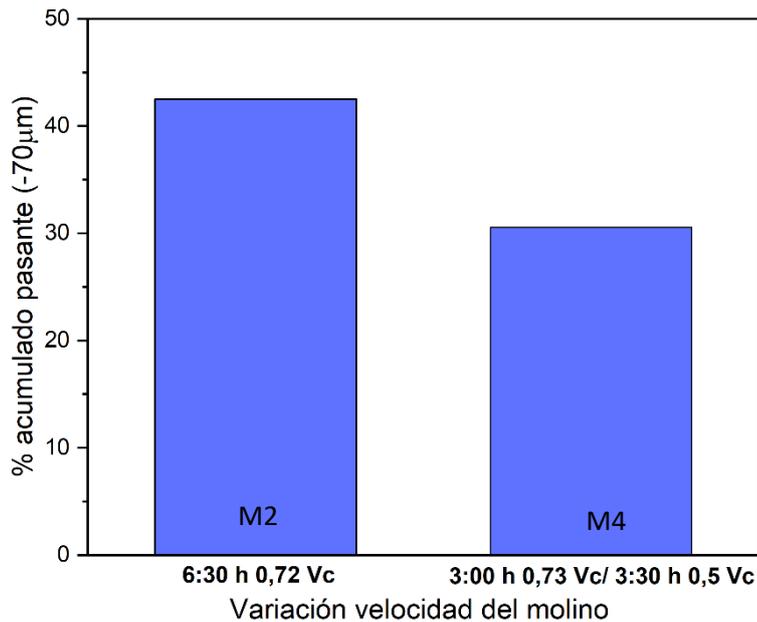


Figura 10. Influencia de la velocidad del molino en el porcentaje de masa acumulada pasante.

Los resultados anteriores hacen evidente la dificultad de alcanzar en una sola etapa y bajo unas únicas condiciones de molienda una razón de reducción superior a 830 como se requiere para fracturar las partículas desde un d_{80f} de 58 mm hasta un d_{80A} inferior a $70\ \mu\text{m}$.

Por tal razón, como fue indicado en la metodología, se realizaron en dos etapas las moliendas M5, M6 y M7, evaluando para la segunda etapa la relación entre el tamaño máximo de cuerpos molidores y el tamaño nominal del alimento. Los cuerpos molidores utilizados para la primera etapa fueron solamente los más grandes (52 mm), puesto que son estos los que por su mayor masa tienen una capacidad superior de fracturar las láminas de vidrio iniciales cuyo tamaño nominal d_{80f} es de 58 mm. Para la segunda etapa se utilizó una distribución de cuerpos molidores constituida por 50 % en peso de pequeños, 25 % de medianos y 25 % de grandes. En este caso se utilizó la misma distribución de CM empleada en M3, a pesar del bajo porcentaje en peso obtenido en la fracción $-70\ \mu\text{m}$ cuando se emplearon en una sola etapa. La razón para

la selección de esta distribución de CM se basó en que el tamaño de las partículas de vidrio logrado en la primera etapa de molienda debe ser lo suficientemente pequeño para que los cuerpos molidores medianos y los pequeños sean capaces de molerlas, sin que haya tantos cuerpos molidores grandes impactando entre ellos y generando grandes desperdicios de energía, lo cual se logra con los cuerpos molidores más grandes.

Los resultados obtenidos indican claramente que el porcentaje en peso de partículas correspondientes a la fracción $-70\ \mu\text{m}$ aumentan significativamente cuando el proceso de molienda se realiza en dos etapas, ver Figura 11.

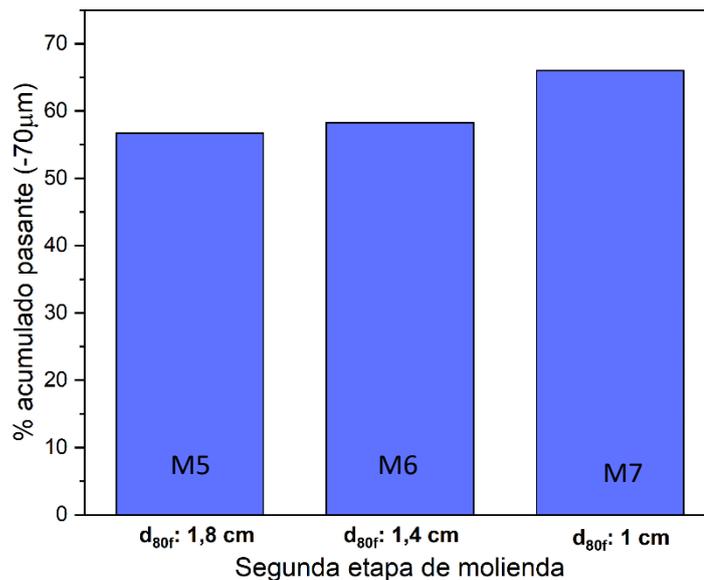


Figura 11. Influencia del tamaño del alimento en el porcentaje de masa acumulada pasante.

Los resultados de M5 indican que al utilizar solo cuerpos molidores grandes durante los primeros 20 minutos de la primera etapa de la molienda se alcanza un tamaño nominal d_{80f} de 1,8 cm y con la posterior inclusión de los cuerpos molidores medianos y pequeños en proporciones similares a las de M3 se obtiene una cantidad de partículas correspondientes a la fracción $-70\ \mu\text{m}$ de más del doble (aproximadamente 56,7 % en peso) que para la molienda M3 (24,1 % en peso). Por su parte, el aumento en el tiempo de la primera etapa de molienda realizada para M6 permitió una reducción del tamaño nominal (d_{80f}) hasta 1,4 mm y con ello, un aumento en las partículas de vidrio correspondientes a la fracción $-70\ \mu\text{m}$ de la etapa 2, hasta 58,26 % en peso. Finalmente, con un aumento aún mayor en el tiempo de la primera etapa de la molienda M7 se logra una reducción en el tamaño de las partículas de vidrio hasta un tamaño nominal (d_{80f}) de 1,0 mm, con el cual se obtiene una cantidad de partículas de la fracción $-70\ \mu\text{m}$ de aproximadamente 66 % en peso después de la segunda etapa de molienda.

Lo anterior indica que a medida que se reduce el tamaño de las partículas alimentadas en la segunda etapa de molienda, la efectividad de la distribución de cuerpos molidores utilizada para reducirlas a la fracción $-70\ \mu\text{m}$ aumenta. Lo que corrobora la importancia de llevar las

partículas hasta un tamaño lo suficientemente pequeño para que los cuerpos moledores medianos y pequeños puedan fracturarlas de una manera eficiente.

Finalmente, la molienda M8 realizada de manera similar a la M7, pero aumentando el tiempo total para las dos etapas del proceso hasta 7 horas y 10 minutos permitió alcanzar un porcentaje de partículas de vidrio correspondientes a la fracción $-70\ \mu\text{m}$ de 72% en peso, ver Figura 12. Lo anterior permitió establecer que después de 6 horas y 30 minutos, los cuerpos moledores aún continúan realizando la fractura de las partículas y además se corroboró la importancia de llevar a cabo el proceso de molienda en dos etapas y con la distribución de cuerpos moledores utilizada en cada una de ellas.

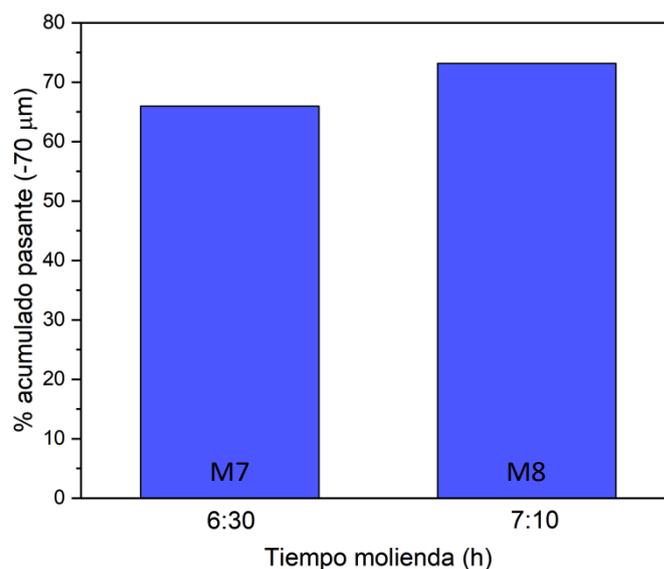


Figura 12. Influencia del tiempo de molienda sobre el porcentaje de partículas de vidrio correspondientes a la fracción $-70\ \mu\text{m}$.

Finalmente, el análisis de la influencia de las variables críticas de molienda a nivel semi-industrial permitió establecer que: *i*) desde el inicio y hasta el final de la molienda, el mecanismo de fractura por impacto predomina y favorece el aumento en la cantidad de partículas correspondientes a la fracción $-70\ \mu\text{m}$, por lo que la velocidad de giro del molino debe ser de trabar al 72% de su velocidad crítica y se deben alimentar cuerpos moledores con la masa suficiente para transmitirle a las partículas de vidrio la suficiente energía potencial para fracturarlas cuando son impactadas. *ii*) Pasado un tiempo desde el inicio de la molienda, la energía potencial suministrada a las partículas de vidrio por los cuerpos moledores grandes cada vez es menor (debido a que chocan más entre ellos que con las partículas a moler), siendo más relevante entonces el impacto generado por los cuerpos moledores medianos y pequeños.

Lo anterior indica que cuando se requieren altas razones de reducción como en el caso de este estudio, es más recomendable hacer la molienda en dos etapas con el fin de tener altos valores

para la relación de tamaño máximo de cuerpos molidores frente al tamaño máximo nominal del alimento. La primera de las etapas tiene como objetivo fracturar las láminas de vidrio solamente usando cuerpos molidores grandes que son los únicos que por su masa pueden provocar su fractura hasta tamaños en los que los cuerpos molidores medianos y pequeños puedan cumplir su función. En la segunda etapa utilizando una distribución de cuerpos molidores que puedan lograr alto empaquetamiento. En este caso se utilizó una distribución en peso de 25% de cuerpos molidores grandes, 25% de medianos y 50 % de pequeños, que corresponde con lo recomendado en la literatura, ver Anexo 1 [18].

5.3 Influencia de la incorporación de vidrio molido a nivel semi-industrial en las propiedades reológicas algunas bases serigráficas y esmaltes

La leve disminución de la viscosidad con el tiempo que experimentaron las bases serigráficas de alta temperatura, indica que estas no presentan fenómeno de espesamiento sino de fluidez. Este comportamiento se presenta en las muestras con y sin vidrio. Adicionalmente, es evidente que la adición de las partículas vidrio molido genera cambios apreciables en la viscosidad de las bases serigráficas de alta temperatura. Mientras en la de referencia 450/1091, la viscosidad aumentó, en la SR112 disminuyó. Este mismo comportamiento se presentó tanto en la evaluación realizada a 10 segundos, como la de 190 segundos. Ver Figura 13.

Por su parte, el aumento de la viscosidad con el tiempo observado en las bases serigráficas de baja temperatura y en los esmaltes muestra una tendencia al espesamiento, el cual es bastante leve para las bases serigráficas de baja temperatura con y sin adición de vidrio y mucho más marcado para los esmaltes como el de referencia 911 con y sin adición de vidrio.

Por su parte, al igual que en el caso de las bases serigráficas de alta temperatura, la adición de partículas de vidrio molido, genera cambios en la viscosidad de las bases serigráficas de baja temperatura y en los esmaltes. En general, la adición de las partículas de vidrio produce un aumento de la viscosidad tanto en tiempos cortos como a 190 segundos, sin embargo, en los esmaltes 811 y 911 la viscosidad a 10 segundos permanece constante, Ver Figura 14 y Figura 15. El cambio en la viscosidad tanto de las bases serigráficas de alta y baja temperatura, como de los esmaltes, con la adición de las partículas de vidrio es debido a la variación de las características reológicas de la suspensión, las cuales dependen de [29]:

- Forma, tamaño y distribución granulométrica de las partículas.
- Porcentaje de partículas en la suspensión
- Temperatura de la suspensión.
- La estabilidad de la suspensión, la cual está dada por el pH, la composición química y el área superficial de las partículas, así como de la composición química del medio dispersante.

Como se mostró previamente en la Tabla 7, la composición química de cada una de las referencias de las bases serigráficas de alta temperatura es diferente, al igual que en las bases serigráficas de baja temperatura y en los esmaltes. Adicionalmente, el porcentaje de sólidos en las suspensiones no siempre fue el mismo, por lo que la adición de las partículas de vidrio molido genera diferentes comportamientos reológicos en este tipo de materiales.

En las figuras 14 y 15 se puede observar que la incorporación del vidrio aumenta la viscosidad en la mayoría de las serigrafías excepto en la SR 112 con respecto a las muestras patrón. En la composición química del vidrio (ver tabla 1), se ve claramente que los componentes que aumentan la viscosidad (SiO_2 , Al_2O_3 y K_2O) constituyen el 73,8% de su composición total por lo que es de esperarse que estos elementos aumenten la viscosidad de las bases serigráficas al interaccionar con estas. Adicionalmente, a menor tamaño de partícula la interacción de fuerzas interparticulares es mayor formando aglomeraciones entre partículas y provocando aumento en la viscosidad. En el caso de la base serigrafica SR 112 su composición en elementos que disminuyen la viscosidad como lo es el Na_2O es de 1,2 y al incorporar vidrio aumenta a 3,06, mientras que los elementos que aumentan la viscosidad pasan de un 67% a un 67,7% por lo que tienen mayor influencia en su composición final los que disminuyen la viscosidad que los que la aumentan [28,30].

Cabe destacar que lo anteriormente mencionado es solo una hipótesis, ya que teóricamente se ha demostrado que componentes como el SiO_2 , Al_2O_3 y K_2O aumenta la viscosidad de las suspensiones a ciertos valores de pH [32, 33]. Para evidenciar este comportamiento se deben realizar curvas de potencial Z las cuales permiten entender cuál es la influencia de los componentes del vidrio en esmaltes y materiales para serigrafía.

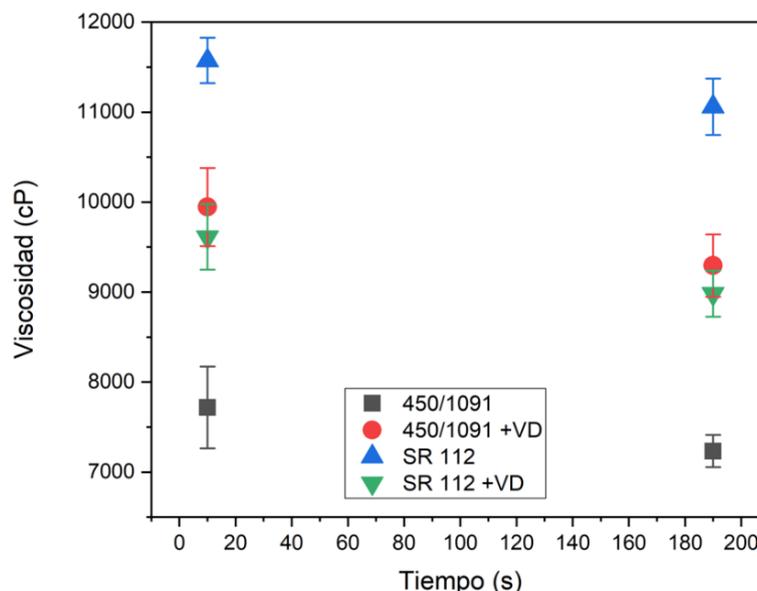


Figura 13. Espesamiento de bases serigráficas de alta temperatura con y sin vidrio.

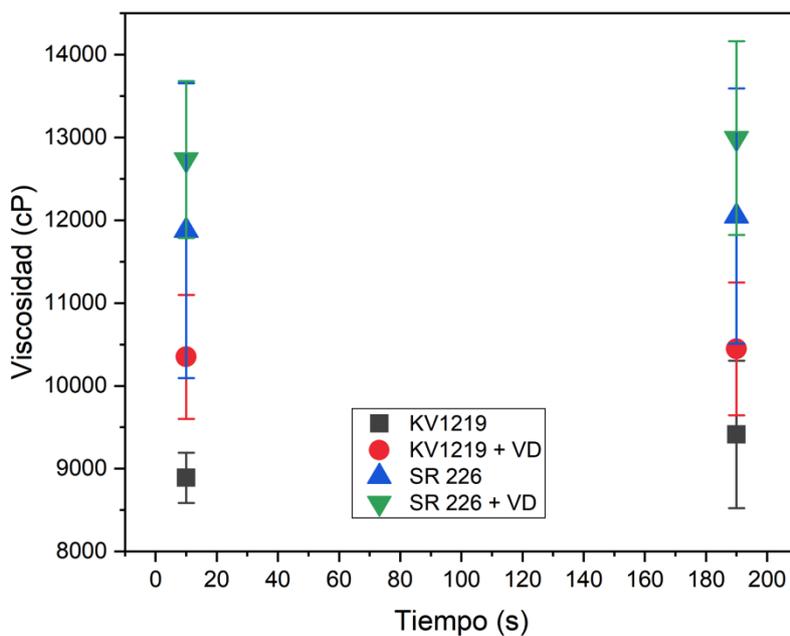


Figura 14. Espesamiento de bases serigráficas de baja temperatura con y sin vidrio.

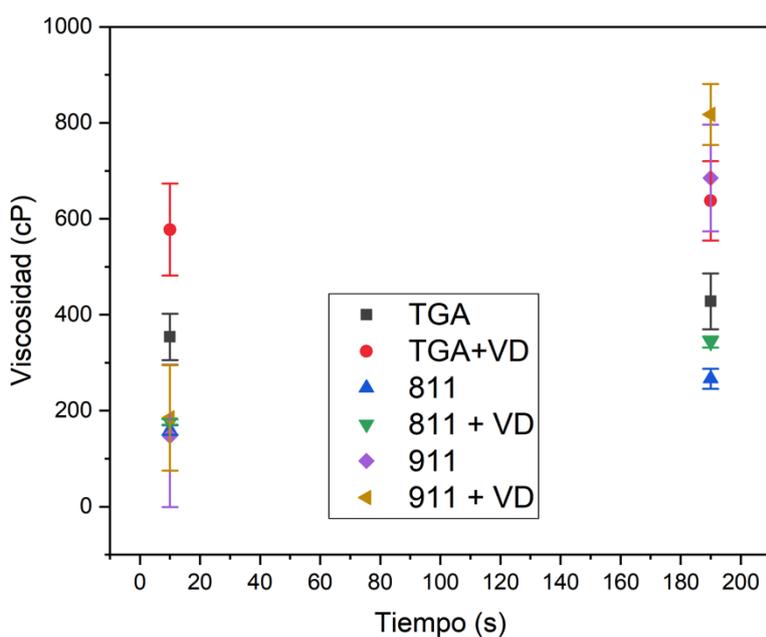


Figura 15. Espesamiento de algunos esmaltes con y sin vidrio.

5.4 Incorporación del vidrio obtenido a nivel semi-industrial en algunas bases serigráficas y esmaltes

Al incorporar el vidrio molido obtenido a nivel semi-industrial no se observa ninguna variación en las propiedades físicas tales como el brillo y la rugosidad con respecto a los resultados

obtenidos a escala de laboratorio en el molino Rosetti. Cabe destacar la importancia de estos resultados, ya que se puede concluir que el vidrio molido en el molino no va a generar ninguna influencia negativa en los esmaltes y materiales para serigrafías al incorporarlo en los porcentajes previamente hallados, como se observa en la Figura 16 donde se realiza un comparativo con su respectiva base serigrafica y esmalte sin vidrio.

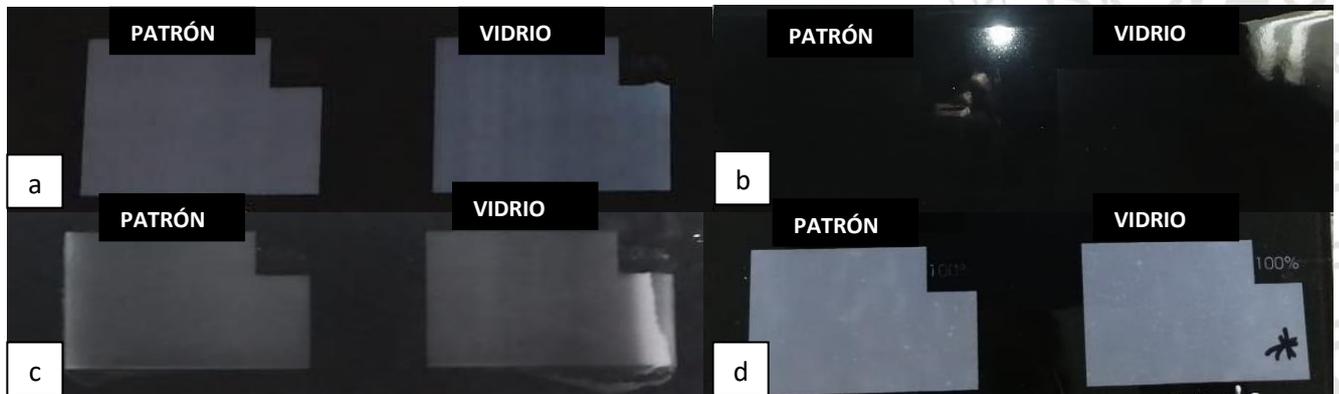


Figura 16. Bases serigráficas evaluadas a. Referencia SR 112 bajo residuo, b. Referencia 450/1091, c. Referencia SR 226, d) KV 1219.

5.5 Ensayos obtenidos a nivel semi-industrial

5.5.1 Ensayos en listellos redondos L1

Antes de obtener muestras en la línea de producción, se realizaron ensayos en bizcocho 30x60 que se queman a alto ciclo a una temperatura de 1115/1135 °C con ciclo de 53 minutos y en listellos redondos quemados a bajo ciclo a una temperatura de 1125/1145°C a un ciclo de 32 minutos. En la Figura 17 se puede observar que la incorporación del vidrio en el esmalte TGA no genera variaciones en el brillo, ni en el acabado superficial, a partir de estos resultados obtenidos, se procedió a realizar el ensayo a una mayor escala donde los listellos fabricados tenían vidrio en el esmalte y en la base serigrafica.

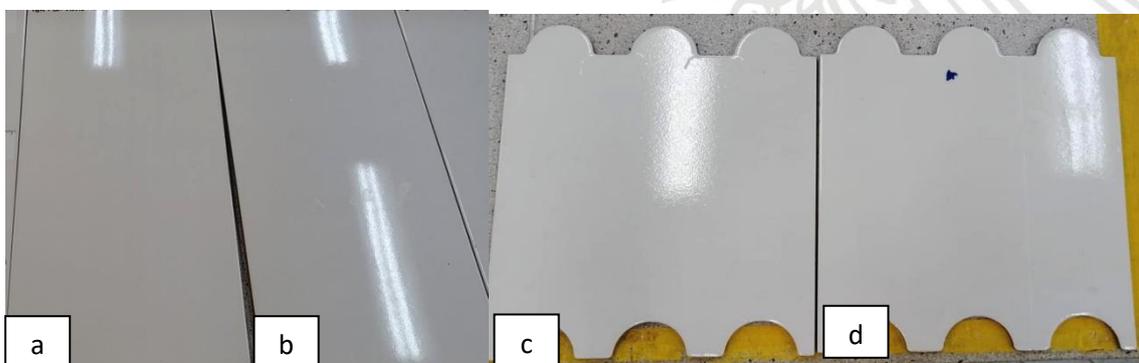


Figura 17. Base formato 30x60 y listello redondo engobados con 759 y esmaltados con TGA a. TGA+ vidrio b. Patrón TGA (sin vidrio reciclado), c. TGA + vidrio, d. Patrón TGA (sin vidrio reciclado).

Durante el ensayo en la línea se evidencia un aumento en la viscosidad medida con copa Ford #4 en el esmalte TGA, como era de esperarse de acuerdo con los resultados obtenidos en la Figura 15 (ver Tabla 8). Adicionalmente en las serigrafías hubo necesidad de aumentar la cantidad del vehículo que la conforma, ya que estas no presentaban las condiciones reológicas adecuadas para la impresión de las tintas serigráficas. Este resultado también se esperaba por los resultados obtenidos previamente, (ver Figuras 13 y 14).

Tabla 8. Variables tomadas en la línea para esmalte TGA.

VARIABLES LISTELLO REDONDO		
	CON VIDRIO	SIN VIDRIO
PXL	1752	1750 ± 10
VISCOSIDAD COPA FORD # 4	49	25 ± 5
APLICACIÓN	15,3	14 ± 0,5

En la inspección visual realizada a los listellos redondos reineta negro fabricados utilizando esmalte TGA y bases serigráficas 450/1091 y SR 226, a los que se le adicionó vidrio molido, no se evidenció alteraciones en las propiedades físicas como color y brillo de dichas piezas. La incorporación del vidrio molido tampoco generó defectos como hervido, puntos o manchas, ver Figura 18.

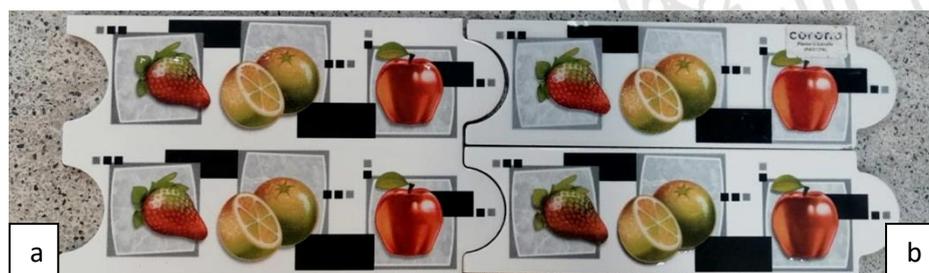


Figura 18. Listello redondo reineta negro. a) patrón b) Muestra evaluada con vidrio en esmalte TGA y serigrafías 450/1091 y SR 226.

Pruebas de producto terminado

- *Cuarteo*

Después de someter las muestras a 3 ciclos en el autoclave se realiza la prueba de revelado de grietas con azul de metileno. La incorporación de vidrio en el esmalte podría volverlo más frágil y al momento de estar sometido a las expansiones y contracciones debido a los cambios cristalográficos por la influencia de la temperatura, este puede ser más susceptible al agrietamiento. Por lo anterior, la ejecución de esta prueba permite observar la influencia de la incorporación de vidrio en la resistencia al agrietamiento del esmalte.

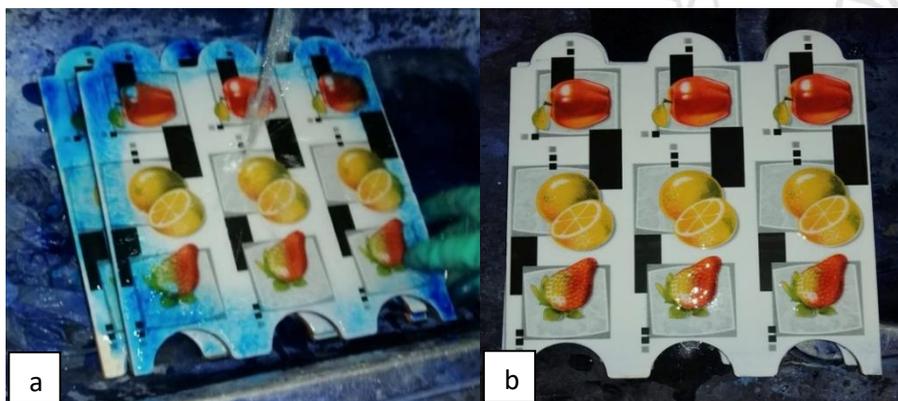


Figura 19. Listellos después de sacarlos del autoclave, a. sometida a azul de metileno para observar evidencia de grieta b. después del lavado.

Una vez limpiada la superficie esmaltada (figura 19.a) no se evidencian grietas por lo que se concluye que la poca adición de vidrio en esmaltes y serigrafías no tiene incidencia en la resistencia al agrietamiento de los listellos.

- *Manchas*

Para la prueba de manchas se llevó a cabo el procedimiento descrito en 3.3.2 donde se evidencia que después de la exposición a los reactivos descritos en la norma NTC 4321-14, no se presentó ningún tipo de mancha en la superficie esmaltada, concluyendo que la influencia de vidrio no genera reacciones con las soluciones evaluadas, ver Figura 20.



Figura 20. LÍstello redondo sometido a las soluciones descritas en la norma norma NTC 4321-14.

5.5.2 Ensayos en fichos para mosaicos L4.

Durante los ensayos realizados en la línea de decoración de vidrio (L4), el color N003 VD no presentó ninguna alteración en sus propiedades físicas ni reológicas (ver Figura 21.a y 21.b), sin embargo, el color de referencia AZ 041 VD presentó variaciones en el tono con respecto al patrón como se observa en la Figura 21.c y 21.d.

Con el fin de corroborar si la incorporación de vidrio si estaba generando las variaciones de tono, se prepara la fórmula del AZ 041 VD en el laboratorio y se compara con la evaluada en la línea. Al observar la figura 21.e se evidencia que el vidrio no afecta el tono, posiblemente la fórmula ensaya como patrón en la línea contenía un poco más de pigmento adicionado a la hora de prepararlo, o durante los ensayos que se realizaron en la línea se pudo haber contaminado, generando variaciones en el tono.

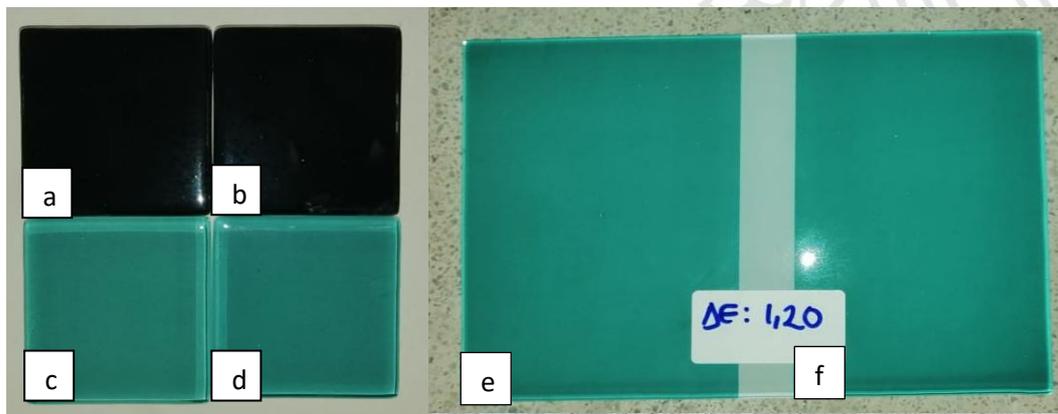


Figura 21. Ensayos obtenidos a nivel semi-industrial a. Patrón de serigrafía N-003, b. Serigrafía N-003 con vidrio c. Patrón serigrafía AZ-041 VD patrón, d. serigrafía AZ-041 con vidrio, e. AZ-041 patrón, f. AZ-041 con vidrio.

Una vez evidenciado que la incorporación de vidrio no genera variaciones en las propiedades físicas, especialmente el color, se procede a realizar un ensayo con un mayor número de muestras, 44 en total. Durante este ensayo se evidencia un buen comportamiento reológico a la hora de la decoración en pantalla y después de la cocción no se presenta variaciones en las propiedades físicas tales como tono y brillo como se observa en la Figura 22.



Figura 22. Referencias de vidrio evaluadas con la tinta serigráfica N 003.

5.6 Espesorados en fichos de vidrio

Al evaluar parte del rechazo de vidrio ($-250 \mu\text{m} +70 \mu\text{m}$) equivalente al 29 % en peso del vidrio total rechazado se observa que este presenta una buena adherencia y buen espesorado sobre las placas de vidrio (ver Figura 23).

En la Figura 23.a se observan algunas zonas con suciedad como se observa en la zona demarcada por la circunferencia roja, adicionalmente al tocar la superficie esta se presenta áspera, lo que indica que a la temperatura (790°C) trabajada el vidrio no había alcanzado su punto de ablandamiento, es decir le faltaba más fundencia.

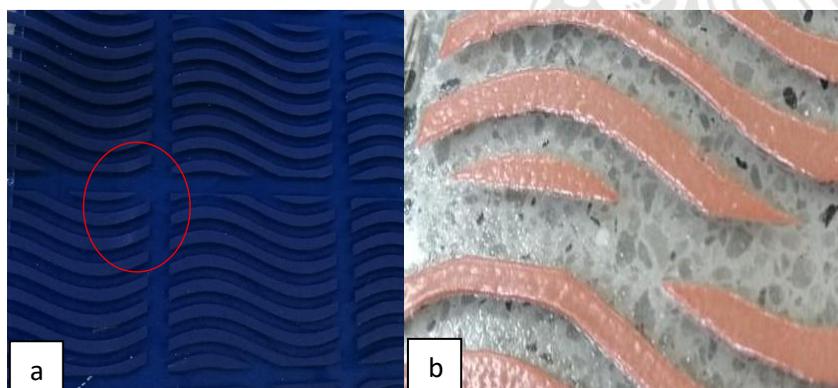


Figura 23. Espesorados obtenidos con vidrio y pigmentos malla 10 H.

A partir de los resultados anteriores, se realizó un segundo ensayo incorporando una base fundente de referencia SR 226 con el fin de disminuir el punto de ablandamiento, esta se trabajó con 5 y 10% en peso y una relación sólidos/vehículo (RECICOL) 100/40 en peso. En la Figura 24 se observan los 3 diferentes ensayos realizados. La cantidad de vehículo empleado con respecto a los sólidos fue alta, presentando poco empastado y afectando su acabado final la como se pueden ver en algunas zonas demarcadas con una circunferencia roja.

En la Figura 24.a, se observa la relación 70/20/10 en peso de vidrio, pigmentos y fundente respectivamente con una pasada. A pesar de que se logra tener un buen decorado, esta no genera el efecto de relieve o espesorado que se esperaba. Por lo anterior, se decidió aumentar el número de pasadas a dos (ver Figura 24.c). En esta prueba, el porcentaje en peso de fundente se mantuvo, pero no se logró obtener el efecto de espesorado en la decoración, indicando que el porcentaje de fundente evaluado disminuía mucho el punto de ablandamiento haciendo que el decorado se extendiera sobre la superficie del ficho de vidrio.

Posteriormente, se decide realizar un tercer ensayo disminuyendo el porcentaje en peso de fundente y manteniendo el número de pasadas (ver Figura 24.b). En este ensayo, se logró aumentar el relieve en la decoración y su definición a lo requerido. Adicionalmente, con lo observado durante la decoración, se recomienda disminuir la relación de vehículo para aumentar el empastado y evitar que el vidrio se esparza durante la impresión sobre la placa de vidrio.

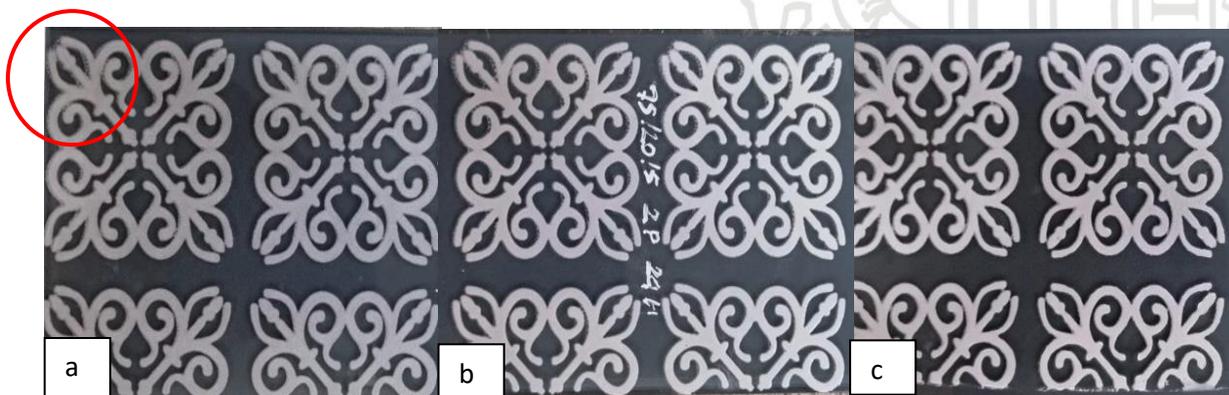


Figura 24. Espesorados malla 24 hilos (120 μm) con fundente, a. 70/20/10 1 pasada, b.75/20/5 2 pasadas y c.70/20/10 2 pasadas.

Con el fin de aumentar la cantidad de vidrio de rechazo empleado, se realizaron nuevamente ensayos en una malla de mayor abertura (10 Hilos, correspondiente a 280 μm), (ver Figura 25). Adicionalmente, se quiere observar la influencia del fundente en los espesorados, realizando una impresión con fundente en una alta proporción y otra sin fundente.

Como era de esperarse la adición del fundente debido a su alto contenido de Na_2O disminuye el punto de ablandamiento provocando una estructura con muy poca definición. Por otra parte la estructura que se logra sin adición de fundente se ve definida y con un buen espesor. A partir de los resultados mostrados anteriormente se logra observar que es necesario una baja cantidad de fundente, menor al 6% en peso para obtener un buen espesorado con una buena definición.



Figura 25. Espesorados con malla de 10 hilos con fundente a. 2 pasadas 60/20/20 y b. 80/20 sin fundente 2 pasadas.

6. VIABILIDAD ECONOMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO

6.1 Beneficio económico que genera la incorporación de vidrio molido en esmaltes y material para serigrafía.

En la Tabla 8, se muestra las utilidades que deja la incorporación del vidrio reciclado en esmaltes y materiales para serigrafía, estos valores se obtienen a partir de su uso en 22 toneladas mensuales de esmaltes y materiales para serigrafía de los cuales 1,2 toneladas serán vidrio reciclado. Debido a la demanda de vidrio molido, es necesario utilizar los 3 turnos para garantizar la cantidad de vidrio requerida. Se puede observar que el insumo que mayor demanda y utilidad genera es el esmalto 1001, generando una utilidad de \$2.090.716 por mes. A partir de lo anterior se puede concluir que este proyecto genera una viabilidad y rentabilidad económica de \$32.425.116 (ver Tabla 9) para la empresa COLCERAMICA S.A.S.

Adicionalmente, con parte del rechazo del vidrio molido que no cumple con el tamaño de partícula nominal requerido para incorporarlo en esmaltes y material para serigrafía, se generaría una utilidad de \$4.432 por parte de los espesorados propuestos con vidrio molido empastado.

Tabla 8. Utilidad mensual que generaría cada insumo.

INSUMO	CONSUMO (Kg/mes)	% RECIBIDO	Ahorro (Kg/mes)	costo Kg	Ahorro (\$/mes)	Costo VD (Kg/mes)	Utilidad mensual (\$/mes)
ESMALTOBBIO 1001	10200	8	816,0	\$ 4.330	\$ 3.533.280	\$ 1.442.564	\$ 2.090.716
TGA	7714,0	3	231,4	\$ 2.693	\$ 623.214	\$ 409.115	\$ 214.099
911	1871,1	3	56,1	\$ 3.553	\$ 199.438	\$ 99.233	\$ 100.205
1299	1243,9	5	62,2	\$ 3.075	\$ 191.253	\$ 109.953	\$ 81.300
811	714,5	2	14,3	\$ 2.730	\$ 39.012	\$ 25.263	\$ 13.749
450/1091	252,3	3	7,6	\$ 4.206	\$ 31.836	\$ 13.381	\$ 18.455
KV1219	46,9	5	2,3	\$ 58.527	\$ 137.374	\$ 4.149	\$ 133.224
SR 112	55,0	15	8,2	\$ 5.987	\$ 49.377	\$ 14.580	\$ 34.797
SR 226	25	10	2,5	\$ 7.987	\$ 19.968	\$ 4.420	\$ 15.548

Tabla 9. Utilidad mensual y anual de la incorporación de vidrio en esmaltes y materiales para serigrafía.

\$	2.702.093	UTILIDAD VD MES
\$	32.425.116	UTILIDAD VD AÑO

7. CONCLUSIONES

- Mediante ensayos de molienda a nivel semi-industrial se identificaron las variables críticas que más afectan al proceso de conminución de los residuos de vidrio, encontrándose que las más importantes son: *i)* la relación entre el tamaño máximo de los cuerpos moledores y el tamaño máximo nominal del alimento, lo que implicó realizar el proceso en dos etapas. *ii)* la distribución de tamaño de cuerpos moledores, *iii)* la velocidad del molino y *iv)* el tiempo de molienda. Lo anterior permitió proponer a la empresa un instructivo para la molienda de residuos de vidrio a escala semi-industrial, a través del cual se obtiene el tamaño nominal de partícula adecuado para la incorporación de este material en esmaltes y material para serigrafía, que se presenta en el Anexo 1.
- La concordancia entre los resultados de los ensayos realizados a nivel de laboratorio y la de los llevados a cabo a escala semi-industrial, permiten indicar que los resultados de este proyecto son reproducibles con los obtenidos previamente.
- Se evidencia que los porcentajes de vidrio molido incorporados a los esmaltes y las bases serigráficas no afectan las propiedades físicas, ni mecánicas de los productos terminados en los que son utilizados. Sin embargo, su incorporación si aumenta sus propiedades reológicas durante el trabajo en la línea.
- Con este proyecto se logra dar un valor agregado a los residuos generados en el corte de mosaicos. Adicionalmente, se presentan varias propuestas para utilizar el 100% de estos residuos promoviendo la economía circular mediante un proyecto ambientalmente sostenible.

8. PASOS A SEGUIR Y RECOMENDACIONES

- Proponer una forma de tamizar de manera eficiente, ya que en este momento la planta no cuenta con un sistema para tamizar el producto del vidrio molido a escala semi-industrial.
- Esmaltar y decorar más referencias con esmaltes y materiales para serigrafía que incluyan vidrio molido en su composición.
- En la parte de espesados con vidrio molido empastado, probar otras granillas trasparentes, metalizadas, mates, blancas, entre otras para darle al vidrio un mayor valor agregado, con nuevos acabados.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] bb. (s.f.). mundo, B. n. (11 de julio de 2019). *BBC*. Obtenido de Día Mundial de la Población: ¿cuántos seres humanos han vivido en la Tierra?: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48958753>.
- [2] Twenergy. (11 de diciembre de 2019). *Twenergy*. Obtenido de Colombia apuesta por el reciclaje del vidrio: <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/reciclaje/colombia-apuesta-por-el-reciclaje-de-vidrio-618>
- [3] Statista. (s.f.). *Energy & Environmental Services Waste Management*. Recuperado el 7 de Agosto de 2020, de <https://www.statista.com/statistics/1055604/key-figures-glass-recyclingglobally/#:~:text=As%20of%202018%2C%20the%20glass,32%20percent%20of%20waste%20recycled>.
- [4] Trilles-Lázaro, V. R., & Allepuz, S. (2011). Reutilización de vidrio reciclado y residuos cerámicos en la obtención de gres porcelánico. *Eco-logik. Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 50(2), XVII–XVIII. <https://doi.org/10.3989/cyv.2011.v50.i2.986>
- [5] Allepuz, S., Fraga, D., Carda, J. B., Plaza, A., & Recycling, C. (n.d.). *Incorporating Ceramic Manufacturing Waste and Recycled Glass Into the*. (1), 1–12.
- [6] Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). Chapter 5 – Comminution. *Wills' Mineral Processing Technology*, 109–122. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097053-0.00005-4>
- [7] Neikov, O. D. (2019). Mechanical Crushing and Grinding. In *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100543-9.00002-6>
- [8] Of, P., & This, M. (n.d.). *3 Milling and Equipment 1.0*. 20–55.
- [9] Kelly Errol – Spottiswood David, Introducción al procesamiento de minerales, Noriega Editores, 1990.303748853-E-G-Kelly-D-J-Spottiswood-Intr.pdf. (n.d.).
- [10] Zhang, Z.-X. (2016). Effect of Loading Rate on Rock Fracture. *Rock Fracture and Blasting*, 89–110. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802688-5.00004-x>
- [11] Coatings, F. (2016). 5 Pigments, Fillers, and Extenders 5.1. *Fluorinated Coatings and Finishes Handbook*, 83–106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1522-7.50008-X>
- [12] Kelly, E. G. (1989). *Introduction to Mineral Processing*. (M. E. Services, Ed.

- [13] R.P King. (2003). modeling and simulation of minerals processing systems. 2nd edition. edited by c.l. schneider and E.A. king. Published by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- [14] F. Vargas, «Capítulo 3 Conminución, Tratamiento de Materias Primas,» Medellín 2018. Adicionalmente notas de clase.
- [15] [10] Pennsylvania Crusher. (2003). *HANDBOOK OF CRUSHING With Posimetric Feeders*. Retrieved from http://www.penncrusher.com/Size_Reduction/handbook_of_crushing.cfm
- [16] Baena, J. R. (2011). *Baldosas cerámicas y gres porcelánico: Un mundo en permanente evolución*. 123. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/40184/>
- [17] Gupta A. Yan D. *Introduction to Mineral Processing Design and Operation PREFACE*. (2006). Chapter 7.2 Mineral processing.
- [18] Tecnología cerámica aplicada. SAC Volumen II. *Asociación española de técnicos cerámicos*.
- [19] Loveday, B. K., & Dong, H. (2000). Optimization of autogenous grinding. *Minerals Engineering*, 13(13), 1341–1348. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00117-5](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00117-5).
- [20] A, E. M. I. C. (2006). Cerámica y Vidrio *Cerámica y Vidrio. Glass*.
- [21] Kalirajan, M., Ranjeeth, R., Vinothan, R., Vidyavathy, S. M., & Srinivasan, N. R. (2016). Influence of glass wastes on the microstructural evolution and crystallization kinetics of glass-ceramic glaze. *Ceramics International*, 42(16), 18724–18731. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.01>.
- [22] Enamels, D., King, B. W. A., Stanton, D. L., & Stanton, R. A. (2015). *Enamel Frits for Glass and Ceramic Decorating*. (March), 20–24.
- [23] Casasola, R., Rincón, J. M., & Romero, M. (2012). Glass-ceramic glazes for ceramic tiles: A review. *Journal of Materials Science*, 47(2), 553–582. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5981-y>
- [24] Cerámicos, A. t. (1986). *Tecnología de la fabricación de azulejos*. Centro experimental SACMI.
- [25] [9] D. Franco, «Materias primas utilizadas para la fabricación de vidrio, Tecnología del vidrio» Medellín 2020. Adicionalmente notas de clase.
- [26] Evcin, A. (2011). Investigation of the effects of different deflocculants on the viscosity of slips. *Scientific Research and Essays*, 6(11), 2302–2305. <https://doi.org/10.5897/SRE10.686>
- [27] KINZIE, C. J., & COMMONS, C. H. (1934). the Effect of Zirconium Oxide in Glasses, Glazes, and Enamels. *Journal of the American Ceramic Society*, 17(1–12), 283–283. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1934.tb19324.x>
- [28] HURT, J. C., & PHILLIPS, C. J. (1970). Structural Role of Zinc Oxide in Glasses in the System Na₂O-ZnO-SiO₂. *Journal of the American Ceramic Society*, 53(5), 269–273. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1970.tb12091.x>
- [29] Of, A., Effect, T. H. E., The, O. F., Variables, M., The, D., Of, R., & Limoníticas, S. (2011). Análisis Del Efecto De Las Principales Variables Que Determinan El Comportamiento Reológico De Suspensiones Limoníticas. *Tecnología Química*, XXXI(3), 106–118.
- [30] D, Franco, «Materiales primas utilizadas para la composición de vidrio,» Medellín 2020. Adicionalmente notas de clase.
- [31] Rahaman, M. N. (2017). Ceramic processing and sintering, second edition. *Ceramic Processing and Sintering, Second Edition*, 1–875. <https://doi.org/10.1201/9781315274126>
- [32] Setz, L. F. G., Silva, A. C., Santos, S. C., Mello-Castanho, S. R. H., & Morelli, M. R. (2013). A viscoelastic approach from α -Al₂O₃ suspensions with high solids content. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(15–16), 3211–3219. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.06.002>.

[33] Burgos-Montes, O., & Moreno, R. (2009). Stability of concentrated suspensions of Al₂O₃-SiO₂ measured by multiple light scattering. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(4), 603–610. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.07.044>

ANEXO 1.

INSTRUCTIVO PARA LLENADO DEL MOLINO Y VARIABLES CRITICAS FINALES.

PRIMERA ETAPA					
Kg vidrio	Kg cuerpos molidores grandes (5,2 cm)			Tiempo (h)	Frecuencia (Hz)
30	20,81			1:30	32
SEGUNDA ETAPA					
Kg vidrio	Kg cuerpos molidores			Tiempo (h)	Frecuencia (Hz)
NOTA: No se adiciona vidrio, se trabaja con el vidrio de la primera etapa, es decir 30 Kg.	1,9 cm	3,8 cm	5,2 cm	5	32
	29,77	17,473	17,473		