

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLIENDA Y SECADO POR PULVERIZACIÓN EN
LA EMPRESA CERÁMICA ITALIA S.A.**

**JOSE MANUEL MÉNDEZ HERNÁNDEZ
JORGE AUGUSTO HERNÁNDEZ MORA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2007**

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLIENDA Y SECADO POR PULVERIZACIÓN EN
LA EMPRESA CERÁMICA ITALIA S.A.**

**JOSE MANUEL MÉNDEZ HERNÁNDEZ
JORGE AUGUSTO HERNÁNDEZ MORA**

Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

**Director
Ing. Jorge Luís Grosso Vargas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2007**

A Dios y a María Auxiliadora por mantener firme en la decisión de finalizar mi carrera y por la compañía espiritual que en muchas oportunidades necesite.

A mi mamá, por el esfuerzo y los sacrificios que realizó para que mis sueños se vieran realizados pero sobre todo por esa gran confianza que deposito en mí.

A mis hermanas que en la distancia me han brindado el cariño de casa y siempre me esperan con un gran abrazo.

A mi nona querida, que aunque estas disfrutando de una mejor vida en el cielo quiero que estés orgullosa de mí y me envíes tu bendición.

A todos mis amigos que hicieron de esta ciudad una nueva casa, por brindarme su amistad incondicional y su compañía en este largo camino.

José Manuel Méndez Hernández

A Dios por otorgarme la fortaleza y la guía para superar las adversidades que se presentaron en este largo camino.

A mi padre que siempre me impulsaba a salir adelante con su constante motivación, a mi madre que con su apoyo y oraciones me brindaba la confianza para alcanzar mis metas y a mi familia por siempre estar presente cuando necesité su ayuda.

A mis amigos, porque más que compañeros son amigos, ya que sin ellos este logro no sería posible.

Lorge Hernández

TABLA DE CONTENIDO

	PAG.
INTRODUCCIÓN	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2. JUSTIFICACION	20
3. OBJETIVOS	21
3.1 OBJETIVO GENERAL	21
3.2 OBJETIVO ESPECIFICOS	21
4. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CERÁMICA	22
5. MARCOTEORICO	24
5.1 MOLIENDA	24
5.2 SECADO POR PULVERIZACION	26
6. METODOLOGÍA	29
7. RESULTADOS	31
7.1 TOLVA BASCULA	31
7.2 AUMENTO DE LA CARGA DE SÓLIDOS SECOS EN LOS MOLINOS	31
7.3 CALCULO DE PERDIDAS EN EL PROCESO	32

7.4 CALCULOS DEL DESGASTE DE CUERPOS MOLEDORES	33
7.5 CALCULO DE AGUA A CARGAR EN LA MOLIENDA	33
7.6 RESIDUO	34
7.7 DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (DTP)	35
7.8 MANEJO DE VARIABLES EN EL SECADO POR PULVERIZACION	36
7.9 CÁLCULO DEL DESGASTE DEL DIÁMETRO DEL ANILLO PORTATOVERAS DEL ATOMIZADOR	36
7.10 PROPIEDADES FISICOCERÁMICAS DEL PRODUCTO FINAL	37
7.11 VELOCIDAD DE FLUJO E ÍNDICE DE HAUSNER	39
8. ANALISIS DE RESULTADOS	44
9. CONCLUSIONES	47
10. RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFIA	52
ANEXOS	54

LISTA DE TABLAS

	PAG.
TABLA1. Tiempos de molienda para barbotina de gres requeridos al aumentar la carga seca	31
TABLA2. Molinos requeridos al aumentar la carga seca	32
TABLA3. Calculo de rechazo de los vibrotamices en pasta gres con caliza malla 200	32
TABLA4. Calculo del rechazo de los vibrotamices en pasta normal con caliza molida	32
TABLA5. Reducción del costo unitario de la pasta normal y pasta gres al aplicar el nuevo factor de consumo	33

LISTA DE FIGURAS

	PAG.
FIGURA1. Diagrama del ángulo de levantamiento α y el ángulo de cascada β	25
FIGURA2. Tiempo de molienda en función del llenado del molino	26
FIGURA3. Diseño esquemático del atomizador	27
FIGURA4. Esquema de la metodología empleada	29
FIGURA5. Porcentaje de sólidos secos para diferentes densidades	34
FIGURA6. Residuos obtenidos por molino de acuerdo a un número de giros programados	35
FIGURA7. Distribución granulométrica del molino 3, tomado como patrón	36
FIGURA8. Variación de la densidad aparente de la baldosa con respecto a la humedad residual del polvo atomizado	37
FIGURA9. Variación de la densidad aparente de la baldosa con respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado	37
FIGURA10. Variación de la resistencia mecánica en verde de la baldosa con respecto a la humedad residual del polvo atomizado.	37
FIGURA11. Variación de la resistencia mecánica en verde de la baldosa con respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado	37

FIGURA12. Variación de la resistencia mecánica en seco de la baldosa con respecto a la humedad residual del polvo atomizado	38
FIGURA13. Variación de la resistencia mecánica en seco de la baldosa con respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado.	38
FIGURA14. Variación de la expansión de prensado de la baldosa con respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado.	38
FIGURA15. Variación de la expansión de prensado de la baldosa con respecto a la humedad residual del polvo atomizado.	38
FIGURA16. Variación de la contracción de secado de la baldosa con respecto a la humedad residual del polvo atomizado	38
FIGURA17. Variación de la contracción de secado de la baldosa con respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado	38
FIGURA18. Variación de las pérdidas por calcinación de la baldosa con respecto a la humedad residual del polvo atomizado	39
FIGURA19. Variación de las pérdidas por calcinación de la baldosa con respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado.	39
FIGURA20. Variación de la contracción de cocción de la baldosa con respecto a la humedad residual del polvo atomizado.	39
FIGURA21. Variación de la contracción de cocción de la baldosa con respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado.	39
FIGURA22. Variación de la absorción de agua de la baldosa con respecto a la humedad residual del polvo atomizado.	39
FIGURA23. Variación de la absorción de agua de la baldosa con respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado	39

FIGURA24. Variación de la resistencia mecánica en cocido de la baldosa con respecto a la humedad residual del polvo atomizado	40
FIGURA25. Variación de la resistencia mecánica en cocido de la baldosa con respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado	40
FIGURA26. Medida de la velocidad de flujo con relación al volumen y a la masa del polvo atomizado para diferentes tamaños de gránulo	40
FIGURA27. Índice de Hausner, densidad aparente y vibrada del polvo atomizado para diferentes tamaños de gránulo	41
FIGURA28. Variación de la velocidad de flujo con la humedad residual del polvo atomizado	42
FIGURA29. Índice de Hausner, densidad aparente y vibrada del polvo atomizado a diferente humedad residual	42
FIGURA30. Comparación del tamaño de gránulo con respecto a la variación del diámetro de las boquillas	43

ANEXOS

	PÁG
ANEXO A. Requerimientos de molienda	54
ANEXO B. Control de cuerpos moledores	55
ANEXO C. Control de densidad	56
ANEXO D. Distribución granulométrica de la barbotina	57
ANEXO E. Acondicionamiento de la barbotina	60
ANEXO F. Tabla de condiciones de funcionamiento para el atomizador	61
ANEXO G. Pruebas de propiedades físicocerámicas	63

GLOSARIO

BARBOTINA: Producto de la molienda en húmedo donde las materias primas se dispersan en una suspensión de sólidos en agua.

DEFLOCULANTE: Aditivo utilizado en la molienda por vía húmeda que permite reducir la viscosidad de la barbotina y facilita la reducción del tamaño de partícula.

ACONDICIONAMIENTO DE LA BARBOTINA: Modificar las propiedades físicas de la barbotina, a los rangos óptimos para el proceso.

%SÓLIDOS SECOS (%SS): Cantidad de sólidos que permanecen en suspendidos en la barbotina, y depende de la densidad y de las propiedades de la materia prima.

RESIDUO: Medida indirecta de la distribución del tamaño de partícula posterior a la molienda. Es el peso seco del retenido en malla 230 (63 μ m), de 100 ml de barbotina.

CUERPOS MOLEDORES: Son los encargados de molturar el material cargado en los molinos. Los más eficientes son los que cuentan con mayor peso específico y la carga de los mismos debe hacerse de acuerdo a la granulometría inicial y final del producto.

DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA: Medida de la distribución de tamaños de partícula. Para el polvo atomizado se reporta en peso retenido en diferentes mallas y mediante análisis de velocidad de sedimentación para la barbotina.

ATOMIZADOR: Equipo utilizado para el secado por pulverización mediante el contacto de la barbotina nebulizada-aire caliente.

POLVO ATOMIZADO: Producto del atomizador que cuenta con una distribución granulométrica y humedad residual establecidas para el proceso.

PASTA GRES: Polvo atomizado utilizado en la producción de baldosas para piso, que proporciona condiciones de absorción de agua y resistencia mecánica al producto terminado.

PASTA NORMAL: Polvo atomizado utilizada en la producción de baldosas para pared, que proporciona condiciones de absorción de agua y resistencia mecánica al producto terminado.

REOLOGIA: El estudio de la fluencia debido al esfuerzo de corte, en un sentido totalmente general, tanto de los cuerpos sólidos (por ejemplo, se habla de la reología de los polvos), como de los fluidos (por ejemplo, refiriéndose a la reología de las barbotinas), o también de los gases.

COPA FORD: Recipiente de volumen y diámetro conocido utilizado para calcular la viscosidad de la barbotina tomando el tiempo de vaciado. Tiene forma de embudo con una abertura para la salida del fluido. El diámetro utilizado es de 4 mm para barbotina.

TOBERAS DE NEBULIZACIÓN: Dispositivo que se encarga de dispersar de la barbotina facilitando el secado. Las toberas empleadas generalmente son del tipo llamado “caracol”, donde un dispositivo en espiral imparte al fluido, bajo la acción de la presión aguas arriba, el movimiento rotatorio necesario para la dispersión del chorro con el impacto del aire externo.

BOQUILLAS: Abertura por donde se nebuliza el fluido, también conocidas como plaquetas perforadas. Las plaquetas con perforación pueden ser de tungsteno o diamantadas perforadas con luz de paso calibrada. Las plaquetas perforadas más utilizadas tienen generalmente un orificio con un diámetro entre 2.5 y 4 mm.

DENSIDAD VIBRADA: Peso del polvo atomizado contenido en un volumen conocido después de una acción de vibración controlada.

INDICE DE HAUSNER: Relación entre la densidad vibrada y la densidad aparente. Indica el grado de compactación o de empaquetamiento de un material.

RESUMEN

TITULO OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLIENDA Y SECADO POR PULVERIZACIÓN EN LA EMPRESA CERÁMICA ITALIA S.A.*

AUTORES MENDEZ HERNANDEZ JOSE MANUEL, HERNANDEZ MORA JORGE AUGUSTO **

PALABRAS CLAVES: Barbótina, molienda, distribución granulométrica, pasta gres, residuo, secado por pulverización, humedad residual, propiedades físicocerámicas.

En la industria cerámica es indispensable llevar a cabo estudios con el fin de mejorar el proceso de molienda y secado por pulverización. En este trabajo se determinó las variables que influyen en la preparación de la pasta atomizada, para implementar medidas que lleven a obtener productos cerámicos de mejor calidad.

En la molienda se evaluó las variables que afectan las propiedades de la barbótina, con el fin de conocer la distribución granulométrica a condiciones constantes de operación, esta determinación es importante debido a que indica como reaccionaría la baldosa prensada en los procesos siguientes, ya que de ahí provienen muchos de los defectos en el producto terminado.

De igual manera, en el secado por pulverización, se estudió las variables propias del equipo, la influencia de la humedad residual y la granulometría del polvo obtenido en las propiedades físico-cerámicas, para evitar complicaciones en el proceso productivo.

En el presente trabajo se identifican las variables del proceso, se realizan nuevos estudios en las propiedades de la barbotina, pasta atomizada y equipos para desarrollar mejoras en el sector cerámico y constituir una base para trabajos posteriores.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías físicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Director: Jorge Luis Grosso Vargas. Universidad industrial de Santander.

ABSTRACT

TITLE OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF MILLING AND DRYING BY PULVERIZATION IN CERAMICA ITALIA S.A.*

AUTORS MENDEZ HERNANDEZ JOSE MANUEL, HERNANDEZ MORA JORGE AUGUSTO**

KEY WORDS: barbotine, milling, particle sizing distribution, remainder, drying by pulverization, residual moisture, physioceramic properties

In the ceramic industry is absolutely necessary to carry out studies with the objective of improving the process of milling and drying by pulverization. In this work, the variables that affect the preparation of the atomized paste were determined in order to implement measures that lead to obtain ceramic products of better quality.

In the milling process, the variables that affect the properties of the barbotina were evaluated to know the particle sizing distribution under constant operating conditions. This evaluation is important because it is an indication of how the pressing tile would react during the following processes, due to indication a lot of defects on the finished product that come from there.

As well, in the drying by pulverization process, the inherent variables of the equipment, the influence of the residual moisture and the particle size of the obtained dust on the physioceramic properties were studied in order to avoid complications in the productive process.

In the present work, the variables of the process are identified; new studies on the properties of the barbotine, the atomized paste and the equipment are conducted in order to develop improvements in the ceramic industry and to build a basis for subsequent works.

* Degree project

** Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías físicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Director: Jorge Luis Grosso Vargas.

INTRODUCCIÓN

En la industria cerámica se busca aumentar la producción de baldosas cerámicas manteniendo los estándares de calidad, la cual depende principalmente de las materias primas, de las características de la barbotina y las condiciones del producto secado por pulverización, que influyen significativamente en las propiedades físico-cerámicas del producto terminado.

Cuando se habla de la molienda de sólidos, se entiende toda una serie de operaciones, tendientes a la reducción de las dimensiones de los materiales que van desde la pretrituración gruesa hasta una pulverización extrema. La molienda produce un material con un determinado diámetro medio de partícula y una distribución granulométrica adecuada para el producto. Para el desarrollo de este trabajo el proceso utilizado es molienda por vía húmeda.

La barbotina obtenida por molienda, se seca en un proceso continuo, que permite la obtención de un producto con un contenido de humedad residual controlado y con una granulometría adecuada para la siguiente fase de prensado. El equipo de secado, conocido como atomizador, se constituye esencialmente, de una cámara de forma tronco-cónica que genera en su interior, el intercambio de calor entre la barbotina finamente pulverizada, el aire caliente y los humos de combustión.

Para garantizar unas características estables de la barbotina y el polvo obtenido es necesario definir las propiedades de la materia prima, producto intermedio y las condiciones de operación del proceso

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro del proceso productivo cerámico, se presentan muchos y diversos defectos en las baldosas que se deben a la variación de las condiciones de descarga de la barbotina y las propiedades del polvo atomizado.

Para lograr productos de buena calidad se debe llevar control de los diferentes factores que influyen en la molienda como: la cantidad de agua; la compensación de la carga de materias primas por humedad residual, la altura de cuerpos moledores, el residuo en la molienda que ocasionan inconvenientes en el proceso y defectos en el producto terminado. Otras variables por estudiar debido a la influencia en la molienda son: El cargue de aditivos, revoluciones del molino, el diámetro promedio de partícula (D_p) y la distribución granulométrica de la barbotina.

En el secado por pulverización de la barbotina se valoran las variables del equipo como la distribución-número de boquillas y temperatura de entrada de aire caliente que son indispensables para obtener el polvo atomizado dentro del rango establecido. Además se debe verificar la humedad residual, la granulometría, el grado de compactación y fluidez que dan idea del comportamiento del polvo atomizado en el proceso siguiente.

Es necesario definir condiciones en los procesos de molienda, homogenización y secado; de manera que garantice las características de la barbotina y del polvo atomizado.

2. JUSTIFICACIÓN

Las propiedades de la barbotina después de la molienda y las condiciones del polvo atomizado serán evaluadas y a partir de ellas se realizarán cambios necesarios que lleven a mejorar la calidad del producto final.

En el proceso de molienda, un factor muy importante es la carga de materias primas y cómo influye en las propiedades de la barbotina. Por otra parte, se busca aumentar la carga de sólidos secos en los molinos para aumentar la productividad. Para ello se debe mantener constante la altura de los cuerpos moledores y los tiempos de molienda de acuerdo al número de revoluciones en cada molino para obtener un residuo establecido en la barbotina y una distribución del tamaño de partícula patrón ya que afectan la baldosa prensada, ocasionando numerosos defectos durante el secado y la cocción.

En el proceso de secado por pulverización, la cantidad de polvo producido depende de las propiedades de la barbotina siendo necesario ajustes en las condiciones de operación, de esta manera, se obtendrá un polvo con condiciones de humedad residual y granulometría adecuados para el prensado, evitando defectos y pérdidas en el proceso tales como: el desconchado o laminaciones, cambios en tamaño de las baldosas, obtención de superficies irregulares y disminución de la resistencia mecánica provocados por variaciones en el grado de compactación.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

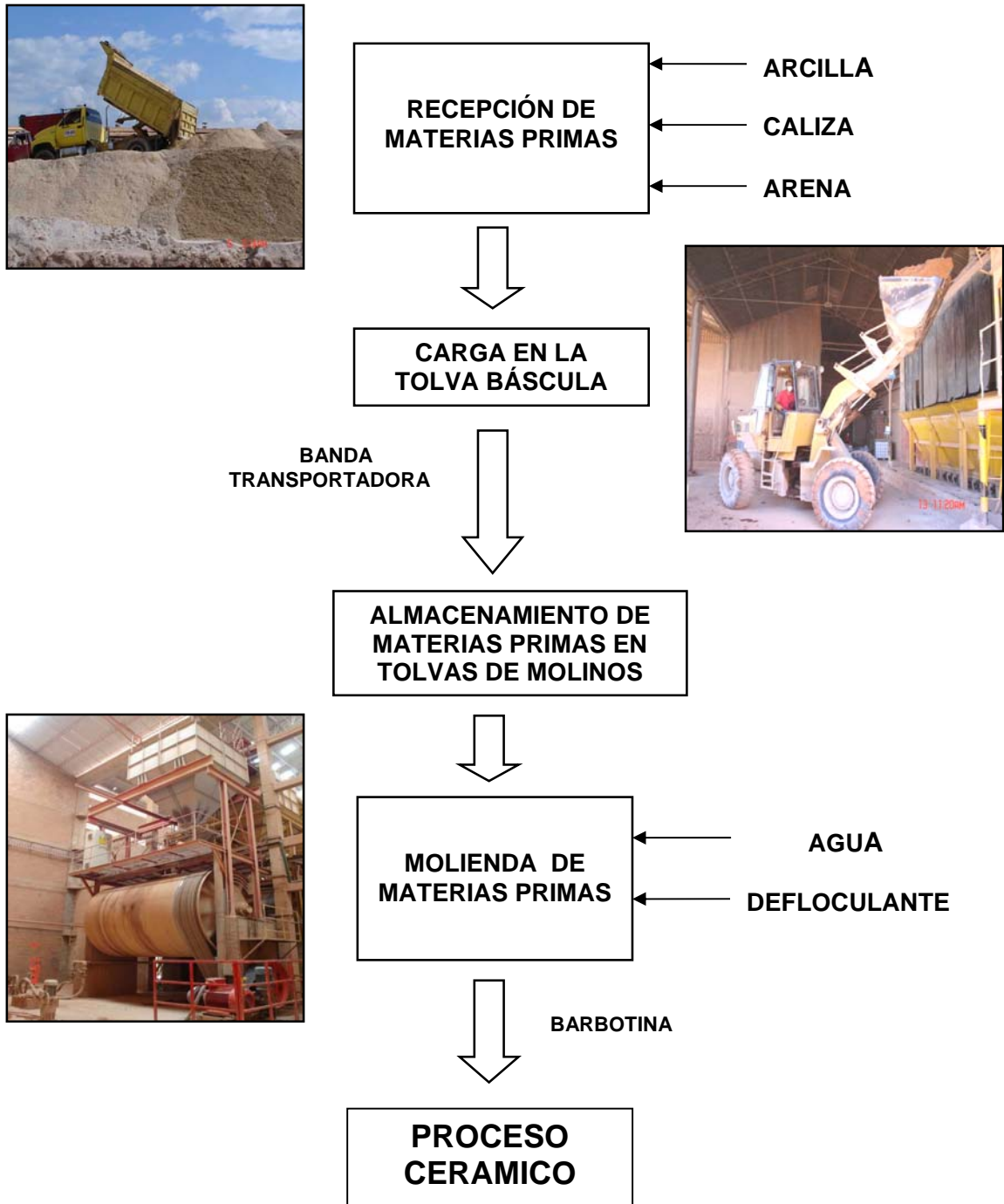
Determinar la influencia de las diferentes variables del proceso de molienda y secado por pulverización en las propiedades de la barbotina en las diferentes etapas de procesamiento, buscando un rango de operación de los equipos que garantice la fabricación de baldosas cerámicas de primera calidad.

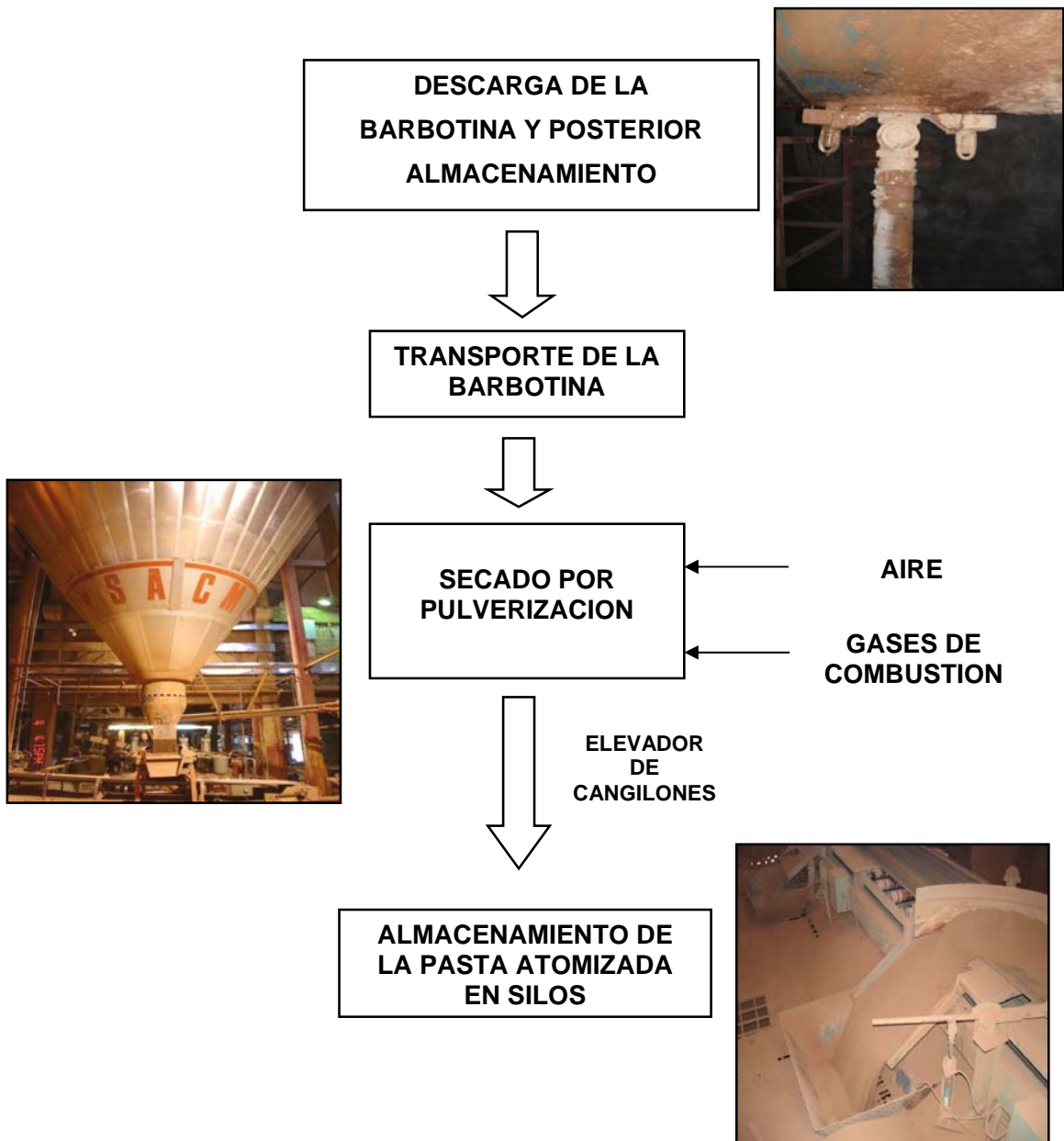
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar la influencia que tienen las diferentes variables del proceso de molienda por vía húmeda en las propiedades físicas de la barbotina.
- Estudiar la factibilidad del aumento de carga de sólidos secos en la molienda y establecer cambios necesarios en el proceso que garanticen el producto intermedio y una distribución granulométrica adecuada en la barbotina.
- Calcular las pérdidas durante el tamizado de la barbotina, para establecer costos de producción del polvo atomizado.
- Identificar los dispositivos apropiados para el funcionamiento del atomizador, y las variables propias del equipo que permitan un rango de operación controlable.
- Verificar la influencia de las condiciones del polvo atomizado como humedad residual, granulometría, velocidad de flujo e Índice de Hausner y su efecto en las propiedades físico-cerámicas de la pieza moldeada.

4. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CERÁMICA

La fabricación de baldosas presenta una serie de operaciones que inician con la recepción de materias primas hasta el almacenamiento del producto terminado.





5. MARCO TEÓRICO

5.1 MOLIENDA

La molienda de sólidos es una reducción tamaño que busca obtener un producto con un determinado diámetro de partícula y una distribución adecuada para el proceso. El objetivo final de la molienda es garantizar una homogeneidad de las materias primas (arcilla, arena, caliza) y aumentar la reactividad.

La molienda se ve afectada por las propiedades y algunos factores de las materias primas como las dimensiones, dureza, peso específico, humedad residual y la tendencia a aglomerarse. En el caso concreto de las materias primas se cuenta con arcillas heterogéneas, desde el punto de vista mineralógico, físico y composición química¹.

Existen dos procesos, uno **vía Húmeda** y otro **vía Seca**. La molienda en húmedo garantiza una mejor homogenización y una reducción mayor de tamaño. Esta molienda de las materias primas, dispersa las arcillas y demás materiales en una suspensión en agua junto con defloculantes que reduce la cantidad de agua requerida, obteniendo un producto llamado barbotina. Para una correcta molienda y un buen funcionamiento del equipo, es necesario seguir algunas reglas o conceptos básicos:

VELOCIDAD DEL MOLINO: un molino que gira a unas RPM, de diámetro; cuenta con una velocidad lineal:

$$v = \left(\frac{\pi}{60} \right) Dn \quad (1)$$

v = velocidad lineal
 D = diámetro del molino
 n = número de revoluciones

¹ Sociedad Anónima Cooperativa Mecánica Imola(SACMI); Asociación Española de Técnicos Cerámicos (ATC). Tecnología cerámica aplicada. Ed. Faensa Editrice Ibérica. Castellón, España. 2001.

La velocidad del molino le proporciona una fuerza centrífuga a los cuerpos moledores, levantándolos hasta un ángulo α sobre la horizontal. Una vez alcanzado este ángulo los medios de molienda caen en forma de parábola formando un ángulo β llamado ángulo de cascada.

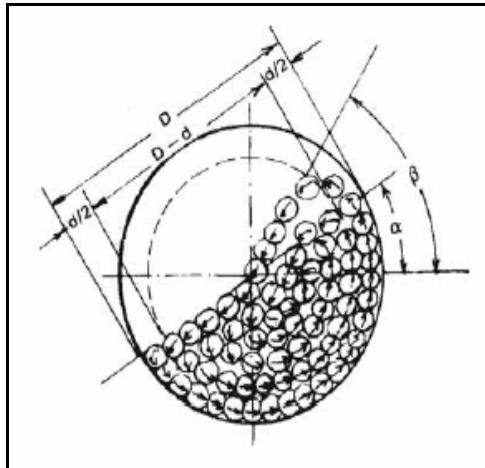


FIGURA 1. Diagrama de ángulo de levantamiento α y ángulo de cascada β . (Tomado de SACMI, tecnología cerámica aplicada, tomo II, cap 1)

Las mejores condiciones de molienda se obtienen cuando el ángulo de levantamiento está comprendido entre $45-60^\circ$. Si el ángulo es menor de 45° la molienda no es eficaz, el desgaste de los cuerpos moledores y el revestimiento es mayor. Si es mayor de 90° los cuerpos moledores quedan adheridos al revestimiento y la molturación es nula. Se puede concluir que al aumentar la velocidad de un molino, aumenta en primera instancia la eficiencia de la molienda para luego disminuir. Existe entonces un punto óptimo donde el tiempo es mínimo².

MEDIOS DE MOLIENDA: Juegan un papel importante en la molienda. Es más eficiente cuando los medios de molienda son bolas esféricas o cilíndricas, que cuando son de forma irregular. Dependen principalmente del peso específico, entre mayor sea este valor mayor acción molturadora tiene.

² Sociedad Anónima Cooperativa Mecánica Imola(SACMI); Asociación Española de Técnicos Cerámicos (ATC). Tecnología cerámica aplicada. Ed. Faensa Editrice Ibérica. Castellón, España. 2001.

CARGA DE MEDIOS DE MOLIENDA: Influye directamente en el tiempo de molienda. A medida que aumenta la carga de bolas en el molino el tiempo disminuye pasando por un mínimo cuando la altura es casi la mitad del diámetro del molino, para luego aumentar³.

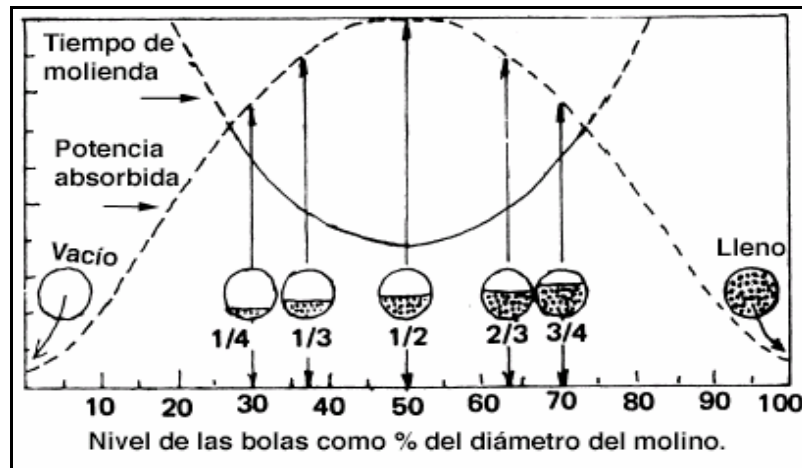


FIGURA 2. Tiempo de molienda en función del llenado del molino. (Tomado de SACMI, tecnología cerámica aplicada, tomo II, cap 1)

En la práctica es aconsejable cargar alrededor de 50-55% del volumen útil de molino en bolas. De este volumen cerca del 30% estará ocupado por los medios de molienda y el restante serán espacio disponibles para la carga de material. Las bolas deben cargarse con una distribución dada, que permita molturar el material cargado y entregue la barbotina con la distribución y residuo señalado.

5.2 SECADO POR PULVERIZACIÓN

La barbotina obtenida por molienda por vía húmeda se seca con la técnica de secado por pulverización mediante instalaciones conocidas como atomizadores en un proceso gestionado de manera continua y automática, que permite la obtención de un producto con un contenido de humedad residual controlado, con una granulometría ideal para la siguiente fase de prensado.

³ Sociedad Anónima Cooperativa Mecánica Imola(SACMI); Asociación Española de Técnicos Cerámicos (ATC). Tecnología cerámica aplicada. Ed. Faensa Editrice Ibérica. Castellón, España. 2001.

La instalación de secado se constituye esencialmente de una cámara de forma y volumen calculado para generar, en su interior, el intercambio de calor necesario para calentar la barbotina hasta la evaporación del agua. En este caso, el aire caliente en contacto con las partículas líquidas dispersas provoca su evaporación por transmisión. El atomizador con dispositivo de nebulización con toberas es del tipo de corrientes mixtas, con aire descendiente y la nebulización de la barbotina orientada hacia arriba.

La figura 3 presenta un esquema de la torre de secado, relativa a un atomizador, donde se puede observar los dispositivos apropiados para el funcionamiento del mismo.

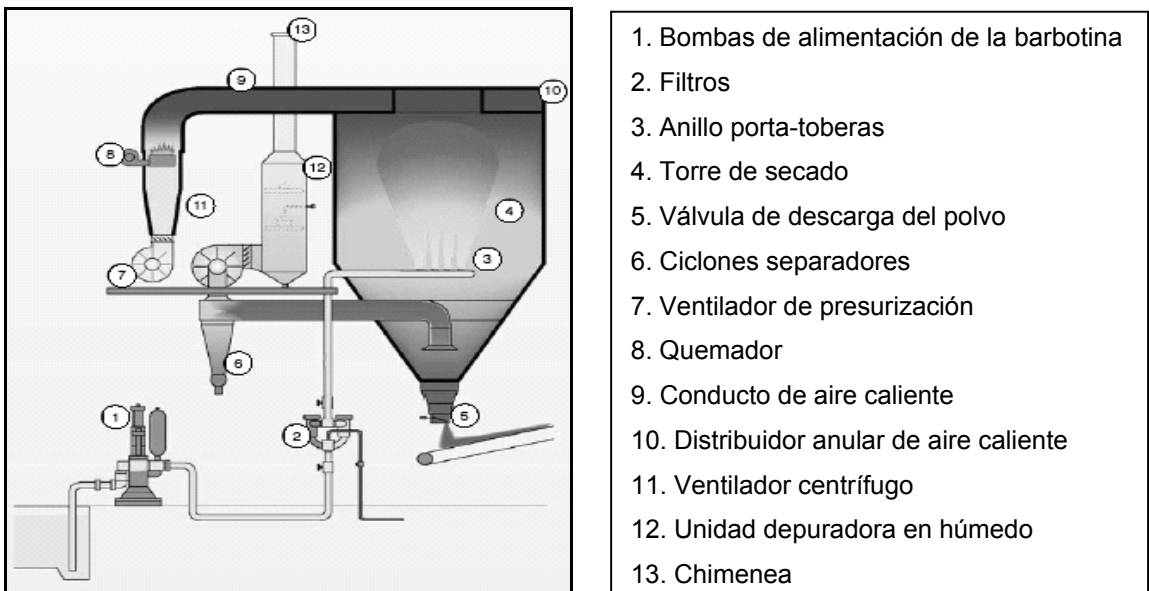


FIGURA 3. Diseño esquemático del atomizador. (Tomado de SACMI, tecnología cerámica aplicada, tomo II, cap 2)

En líneas generales, la humedad residual y la granulometría del polvo atomizado de las diferentes pastas, puede considerarse similar, la humedad residual del atomizado puede variar del 5 al 8% en función de las características del polvo. Es posible intervenir, en cierta medida, sobre algunas variables relacionadas con las condiciones de trabajo del atomizado, así como algunos parámetros de la barbotina, para modificar y optimizar la granulometría, humedad residual y producción en el atomizador⁴.

⁴ Sociedad Anónima Cooperativa Mecánica Imola(SACMI); Asociación Española de Técnicos Cerámicos (ATC). Tecnología cerámica aplicada. Ed. Faensa Editrice Ibérica. Castellón, España. 2001.

La operación del prensado y la microestructura de la pieza prensada están marcadamente afectadas por las características de los aglomerados de las partículas como distribución y tamaño, y por los aditivos de prensado como la humedad residual. Éstas características determinan a su vez otras propiedades como la densidad aparente, la velocidad de flujo y la compactación del polvo obtenido por secado por pulverización representado como el Índice de Hausner⁵.

⁵ AMOROS, J. *et al.* Características de Polvos Cerámicos para Prensado. En: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. (ene. - feb. 1987); p. 31 - 37

6. METODOLOGÍA

Partiendo de la revisión de especificaciones de los equipos, algunos artículos e identificación de los inconvenientes que se presentan con la manipulación de variables del proceso se desarrolló paralela y secuencialmente trabajos en la molienda y secado.

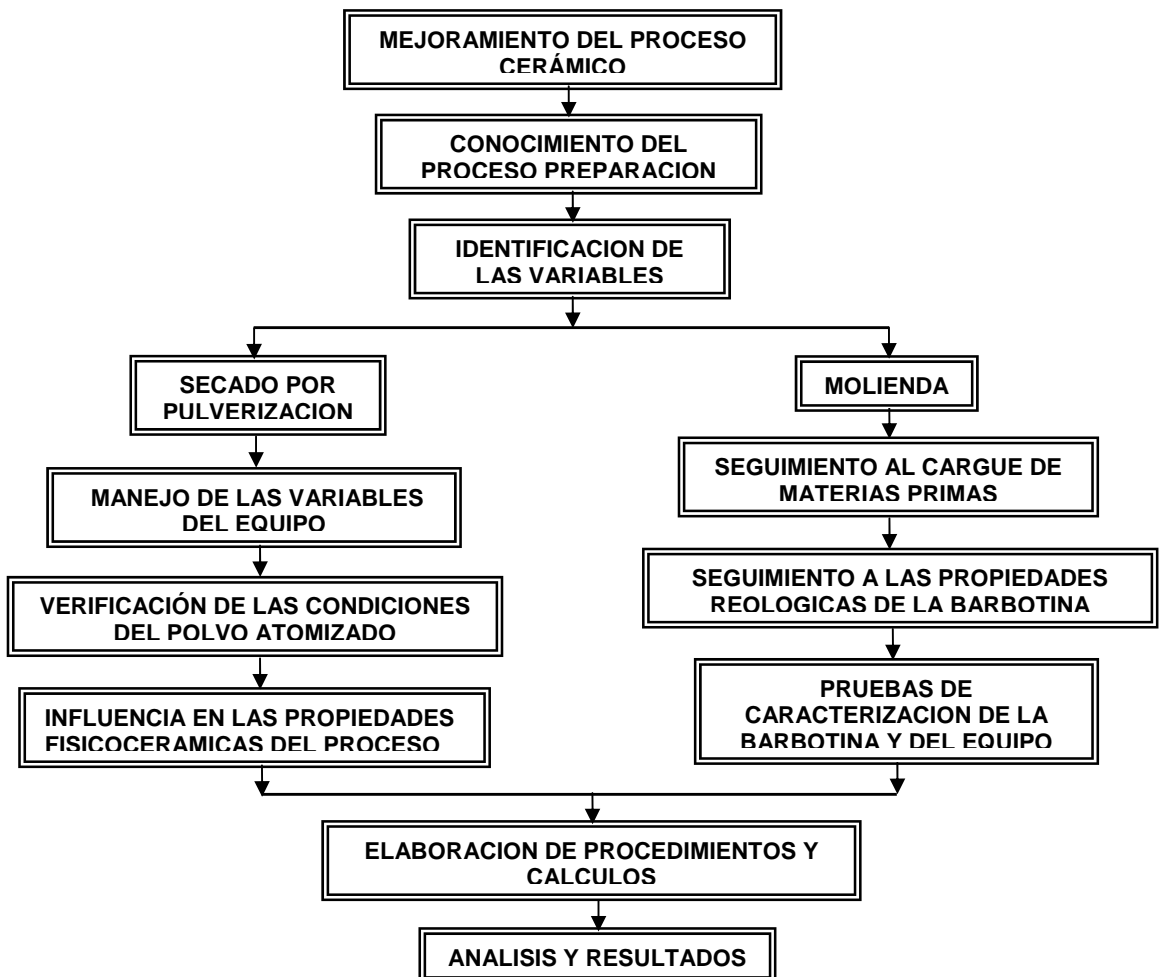


FIGURA 4. Esquema de la metodología empleada (Fuente: Autores).

Se tomaron muestras de materias primas y se calculó la humedad residual en balanzas termogravimétricas para prever como afectaban los cambios la carga de material. Para aumentar los sólidos secos se utilizaron los catálogos de fabricación de los molinos para deducir la carga óptima. Una vez controlada la carga de materias primas se tomaron los datos de las condiciones de descarga y se determinó el porcentaje de sólidos secos para diferentes densidades. Las propiedades medidas y analizadas fueron: densidad, viscosidad, residuo seco retenido en malla 230 de 100 ml de barbotina.

Se desarrolló pruebas de desgaste de cuerpos moledores, moliendo una cantidad conocida de bolas de alúmina durante 12 h. Se realizaron recargas de bolas de alúmina hasta obtener una carga que garantizó la altura de los cuerpos moledores obteniendo una relación de desgaste por molienda.

La metodología empleada en la determinación de residuos, fue la de tomar muestras consecutivas de los molinos y establecer este valor, modificando las variables hasta conseguir establecer que los residuos se mantuvieran constantes reduciendo el rango de precisión. En la determinación de tamaños de partículas se empleó el método del hidrómetro por ser un método económico y confiable.

En el secado por pulverización, se realizó seguimiento a las variables propias del atomizador como la temperatura de entrada del aire caliente a la torre de secado, la presión de la bomba de alimentación de barbotina, el diámetro de las toberas de nebulización, etc.

Se evaluaron las propiedades inherentes al polvo atomizado, como la velocidad de flujo, la densidad aparente, la densidad vibrada, el índice de Hausner con la variación de la humedad residual y el tamaño de gránulo.

De igual manera, se estimó la influencia de la humedad residual y el tamaño de gránulo del polvo atomizado en las propiedades fisicocerámicas de la baldosa prensada como densidad aparente, resistencia mecánica, contracción, realizando baldosas prensada a 250 bar a escala de laboratorio con una humedad residual entre 0-10% y un tamaño de gránulo entre 100-900 μm .

7. RESULTADOS

7.1 TOLVA BÁSCULA

Se debe reducir el desfase en el peso de las materias primas debido a que genera problemas de inventario, de densidad y defloculación de la barbotina. Se redujo el rango de desfase permitido en la carga de sólidos secos a un valor de ± 10 Kg de la cantidad exacta a cargar y efectuar mayor número de mediciones de humedad.

7.2 AUMENTO DE LA CARGA DE SÓLIDOS SECOS EN LOS MOLINOS

Los molinos a estudiar cuentan con un volumen útil de 30626 litros. La carga óptima para este equipo es:

% Carga seca	28	carga seca	23324	Kg
% Carga de bolas	25	carga de bolas	23000	Kg
% Agua	40	carga de agua	11944	Kg
% Volumen utilizado	93	carga total	58268	Kg

Los molinos se deben trabajar a una mayor carga de sólidos secos, teniendo en cuenta la máxima capacidad que éste puede albergar, sin modificar significativamente los tiempos de molienda. Se realizaron las siguientes pruebas según la tabla 1.

TABLA 1. Tiempos de molienda para barbotina de gres, requeridos al aumentar la carga seca

CARGA SECA (Kg)	rev / molienda	tiempo / molienda
18000	1000	1 h – 20 min
20000	1125	1 h – 30 min
22000	1250	1 h – 40 min

El aumento en las revoluciones es del 12.5% en una carga de 20000 kg y del 25% en una carga de 22000 Kg. Los tiempos fuera de la molienda no se modificaron. En el proceso se optó por mantener 20 Ton, por cuestiones de sobre-tamaño de las materias primas. Al aumento de la carga seca se reducen el número de molinos requeridos / día (tabla 2) manteniendo la calidad del producto constante. (ANEXO A)

TABLA 2. Número de moliendas requeridas en producción de acuerdo a la carga seca

CARGA SECA (Kg)	MOLIENDAS / DIA
18000	31
20000	28
22000	25

7.3 CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN EL PROCESO

La barbotina genera un rechazo al pasar por los vibrotamices (malla 70-100). Debido al cambio de composición es necesario recalcular este valor.

TABLA 3. Cálculo del rechazo de los vibrotamices en pasta gres con caliza malla 200.

PASTA GRES	DENSIDAD(g/L)	VISCOSIDAD (centistokes)	RESIDUO (g)*	%SS	RECHAZO%
PRUEBA 1	1681	31,1	5,5	63,5	0,24
PRUEBA 2	1665	28	6,5	63,3	0,23
PRUEBA 3	1667	29,5	5,6	63,2	0,25
PROMEDIO					0,24

(*) El residuo es el retenido seco de 100ml de barbotina en malla 230.
Porcentaje de sólidos secos (%SS)

TABLA 4. Cálculo del rechazo de los vibrotamices en pasta normal con caliza molida.

PASTA NORMAL	DENSIDAD (g/L)	VISCOSIDAD (centistokes)	RESIDUO (g)*	%SS	RECHAZO %
PRUEBA 1	1687	29,7	5,5	63,9	0,24
PRUEBA 2	1688	53,2	6,2	64,5	0,36
PRUEBA 3	1675	55,4	7,2	63,8	0,31
PROMEDIO					0,30

(*) El residuo es el retenido seco de 100ml de barbotina en malla 230.
Porcentaje de sólidos secos (%SS)

TABLA 5. Reducción del costo unitario de la pasta normal y pasta gres al aplicar el nuevo factor de rechazo

	PASTA NORMAL		PASTA GRES	
COSTO TOTAL	15.203.720	pesos	25.378.911	Pesos
PRODUCCIÓN	160.020	Kg	260.100	Kg
FACTOR	2.45	0.30	2.45	0.24
RECHAZO (Kg)	3920,49	576,072	6372,45	936,36
COSTO / Kg PASTA	97,40	95,35	100,02	97,93
DIFERENCIA	2,04	Pesos/Kg pasta	2,10	Pesos/Kg pasta

7.4 CÁLCULO DE DESGASTE DE CUERPOS MOLEDORES

Es necesario conocer el desgaste de los cuerpos molidores en los molinos MTD 340, para mantener la altura constante en alrededor del 55% del diámetro del molino. En la práctica esta altura representa el 44% del diámetro del molino. (ANEXO B).

Se realizaron pruebas de desgaste en el laboratorio y se obtuvo una relación de pérdida de peso de 0.08% / 12 horas de molienda. A nivel industrial se hizo seguimiento a las recargas necesarias para recuperar la altura en los molinos, dando como resultado 7.125 Kg / molienda. Se hicieron nuevas recargas de cuerpos molidores hasta mantener la altura constante, siendo necesario cargar en cada molienda 25 unidades de bolas de alúmina (11.875 Kg), con un comportamiento semejante para las dos pastas.

7.5 CÁLCULO DEL AGUA A CARGAR EN LA MOLIENDA

Se implementó la teoría de porcentaje de sólidos donde la carga de agua dependerá de la densidad a la cual se desea descargar la barbotina. Se elaboraron pruebas de laboratorio a diferentes densidades y se calcula su respectivo %SS. (FIGURA 5)

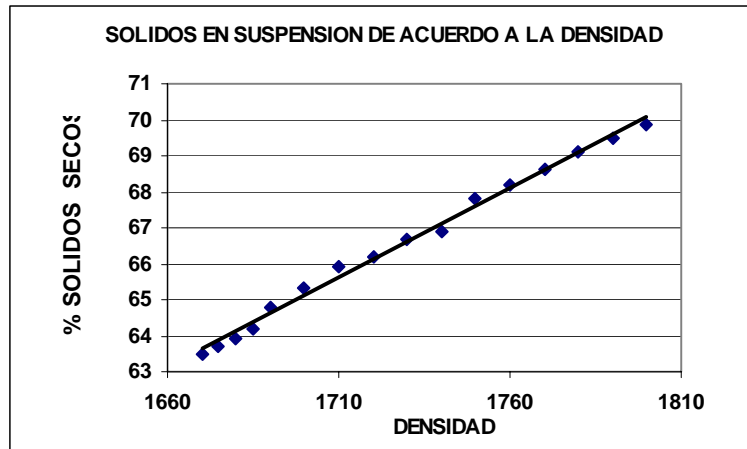


FIGURA 5. Porcentaje de sólidos secos obtenidos para diferentes densidades (Fuente: Autores).

Se tomó la densidad de 1.67 Kg/L, porque se encontró que las propiedades de la barbotina son las ideales en proceso y un menor requerimiento de defloculantes. Los sólidos secos en suspensión a esta densidad son de 63,5%. Este valor es un indicativo de la cantidad de agua requerida para la molienda según la ecuación 2.

$$kg \text{ sec os} \frac{36.5kgH_2O}{63.5kg \text{ sec os}} \frac{1LH_2O}{1kgH_2O} = LH_2O \quad (2)$$

7.6 RESIDUO

Inicialmente se encontró residuos debajo 7-9 gramos de retenido seco en malla 230 de 100 ml de barbotina, que es lo recomendable para el proceso.

Como es una variable que depende del número de giros, se programaron los molinos a las mismas revoluciones por minuto buscando obtener un residuo constante o con la menor variación posible. Los resultados se observan en la figura 6.

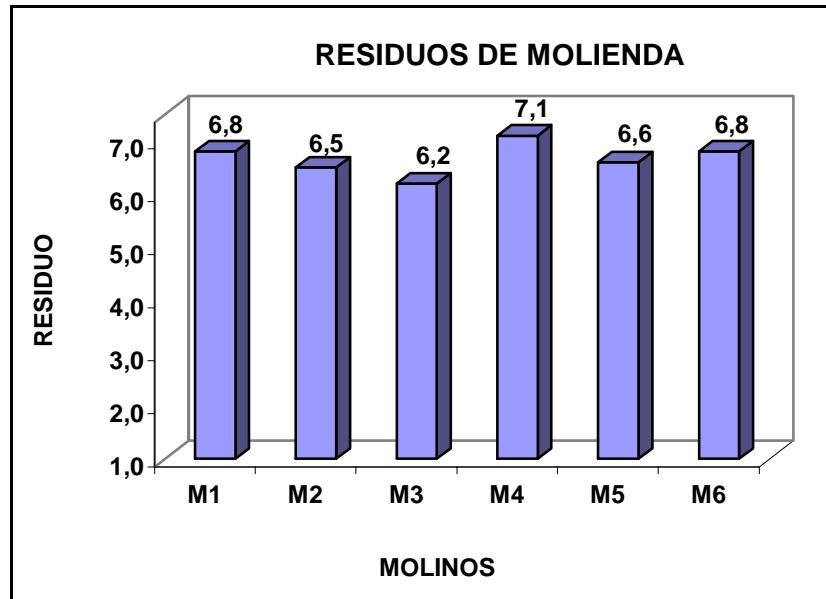


FIGURA 6. Residuos obtenidos por molino, de acuerdo a un número de giros programado. (Fuente: Autores).

7.7 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA (DTP)

Es necesario determinar una distribución granulométrica de la barbotina que sea reproducible en cada molienda para favorecer la conformación y cocción de las baldosas. Con el fin de conocer la distribución granulométrica en la barbotina se realizó un análisis aplicando el método del hidrómetro que se basa en la velocidad de sedimentación expresada por la ley de Stokes, según la ecuación 3.

$$v = \frac{\tau_s - \tau_f}{9\eta} \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (3)$$

v = velocidad de caída de la esfera (cm/ s)
 τ_s = peso específico de la esfera
 τ_f = peso específico del fluido
 η = viscosidad absoluta (g / cm s)
 D = diámetro (cm)

Se tomó el molino #3 como patrón con el fin de tener un punto de comparación y determinar diferencias en la distribución granulométrica de la barbotina en cada molino.

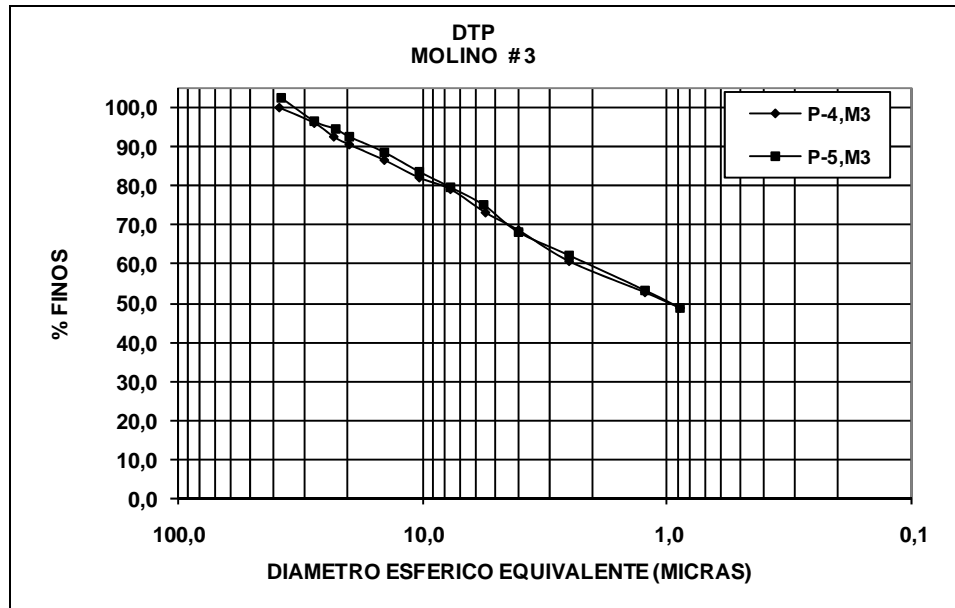


FIGURA 7. Distribución granulométrica del molino #3 tomado como patrón. (Fuente: Autores).

7.8 MANEJO DE VARIABLES EN EL SECADO POR PULVERIZACIÓN

De acuerdo al comportamiento de las propiedades de la barbotina; de las variables operacionales tales como: la presión de succión, la cantidad y la temperatura de aire caliente, la distribución y el número de toberas de nebulización, el diámetro de las boquillas; se define un rango de operación del atomizador según los requerimientos de producción, para una determinada densidad y viscosidad de la barbotina. (ANEXO E)

7.9 CÁLCULO DEL DESGASTE DEL DIÁMETRO DE LAS BOQUILLAS DEL ANILLO PORTATOBERAS DEL ATOMIZADOR

Se hizo seguimiento a los diámetros de las boquillas manteniendo un área constante, teniendo en cuenta las necesidades de producción, lo cual proporcionó como resultado un desgaste de acuerdo al diámetro y área de las boquillas, respectivamente:

$$0,03 - 0,06 \frac{mm}{día} \qquad 0,05 - 1,0 \frac{mm^2}{día}$$

7.10 PROPIEDADES FISICOCERÁMICAS DEL PRODUCTO FINAL

Se evaluaron propiedades fisicocerámicas tales como: densidad aparente, resistencia mecánica en verde, seco y cocido, contracción de secado y cocción, expansión de prensado, y absorción de agua para baldosas prensadas a 250 bares para diferentes humedades y tamaños de gránulo. (Anexo G)

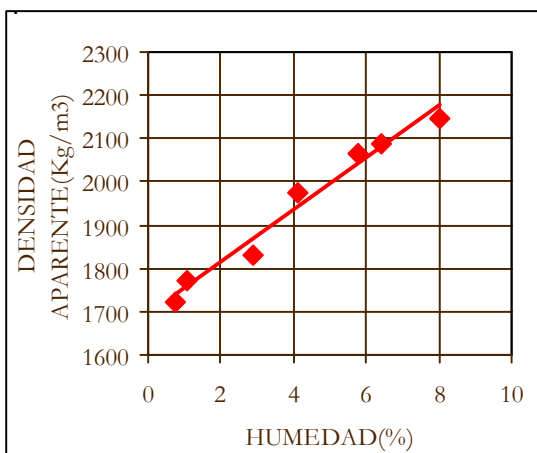


FIGURA 8. Variación de la densidad aparente de la baldosa respecto a la humedad residual del polvo atomizado

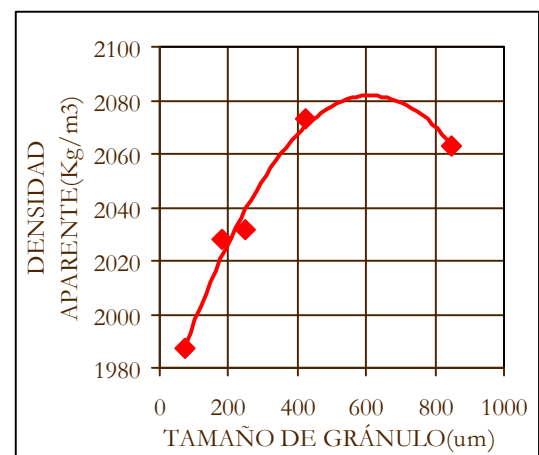


FIGURA 9. Variación de la densidad aparente de la baldosa respecto a la humedad residual del polvo atomizado

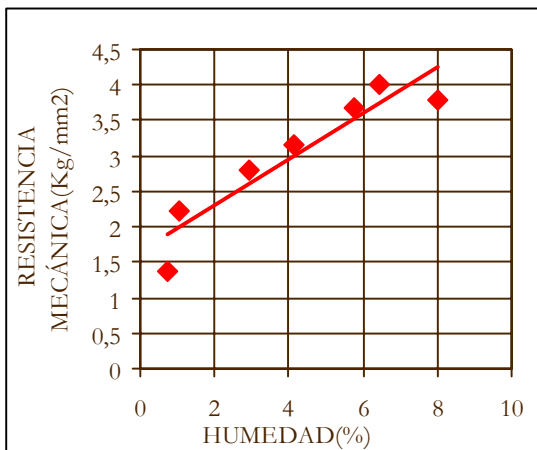


FIGURA 10. Variación de la resistencia mecánica en verde de la baldosa respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado

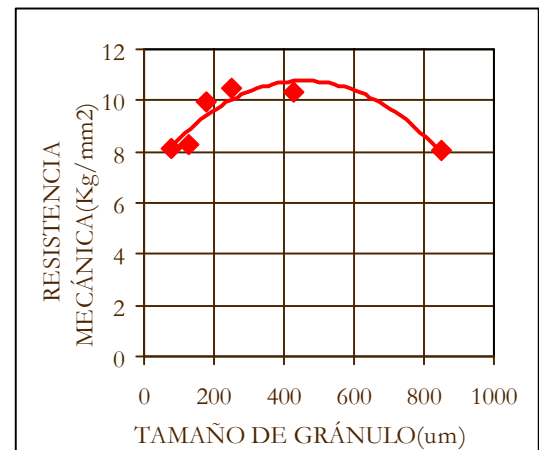


FIGURA 11. Variación de la resistencia mecánica en verde de la baldosa respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado

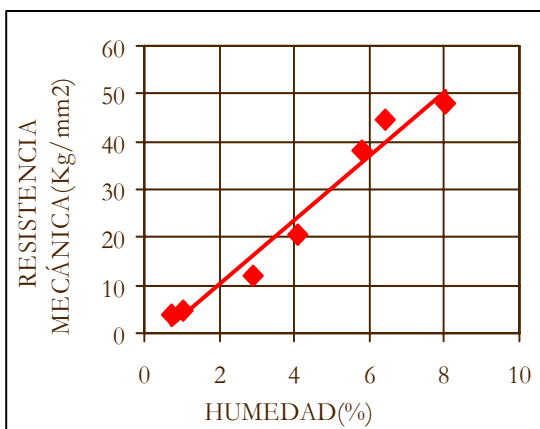


FIGURA 12. Variación de la resistencia mecánica en seco de la baldosa respecto a la humedad residual del polvo atomizado

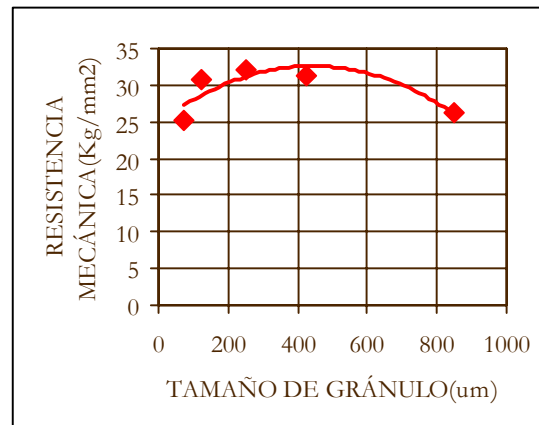


FIGURA 13. Variación de la resistencia mecánica en seco de la baldosa respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado

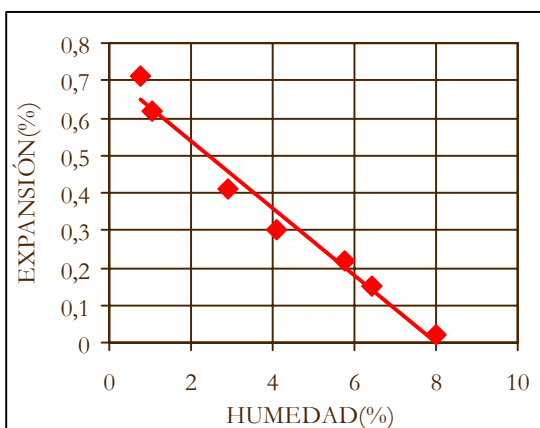


FIGURA 14. Variación de la expansión de prensado de la baldosa respecto a la humedad residual del polvo atomizado

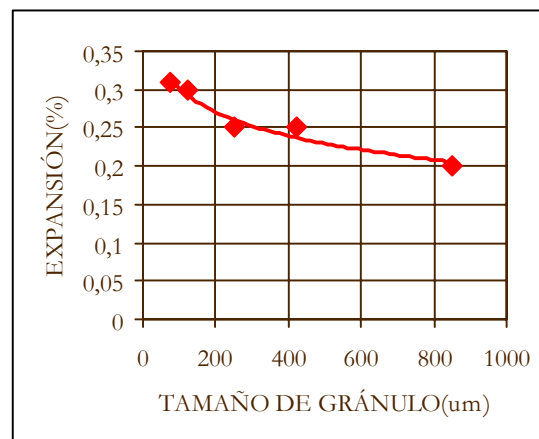


FIGURA 15. Variación de la expansión de prensado de la baldosa respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado

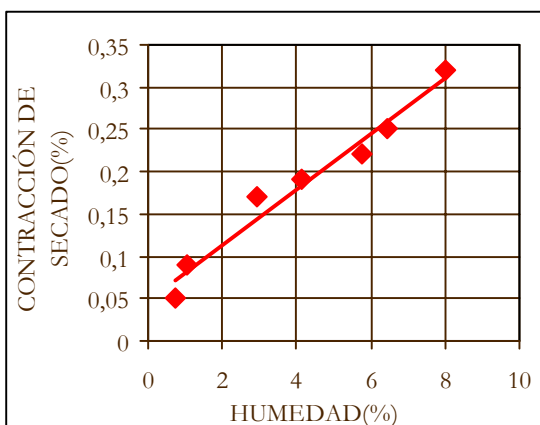


FIGURA 16. Variación de la contracción de secado de la baldosa respecto a la humedad residual del polvo atomizado

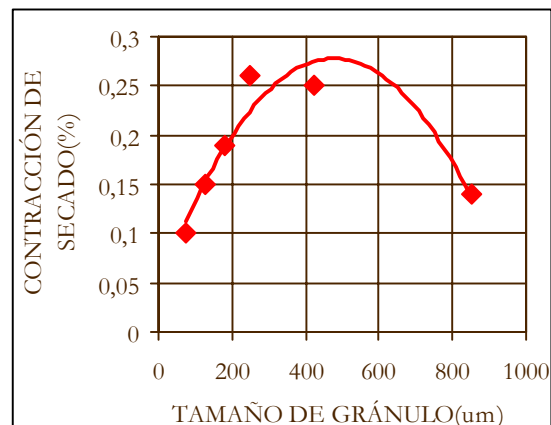


FIGURA 17. Variación de la contracción de secado de la baldosa respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado

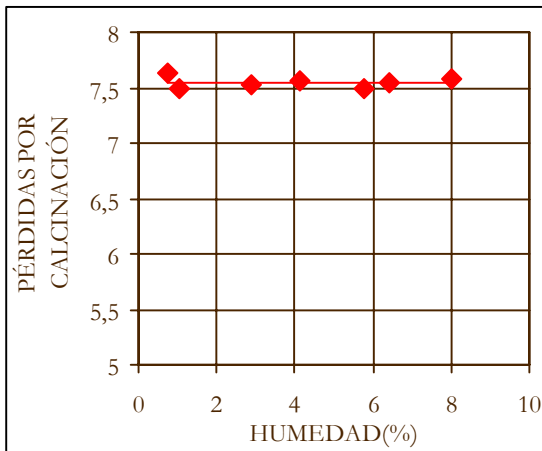


FIGURA 18. Variación de las pérdidas por calcinación de la baldosa respecto a la humedad residual del polvo atomizado

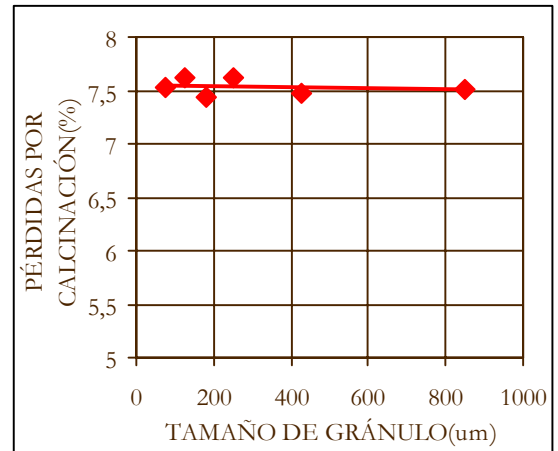


FIGURA 19. Variación de las pérdidas por calcinación de la baldosa respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado

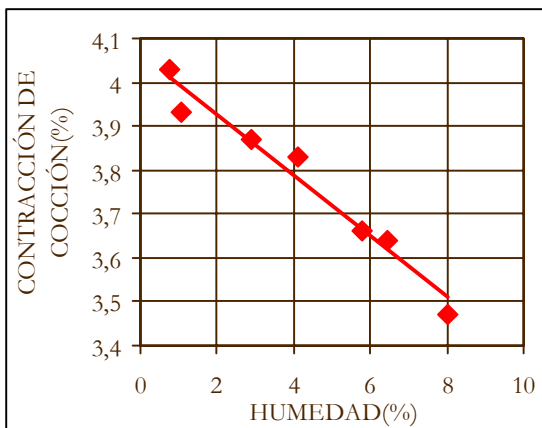


FIGURA 20. Variación de la contracción de cocción de la baldosa con respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado

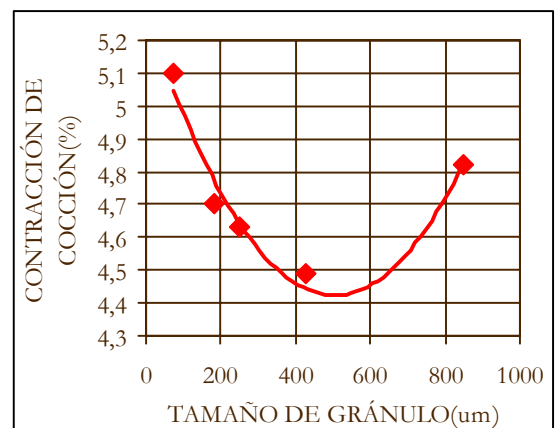


FIGURA 21. Variación de la contracción de cocción de la baldosa respecto a la humedad residual del polvo atomizado

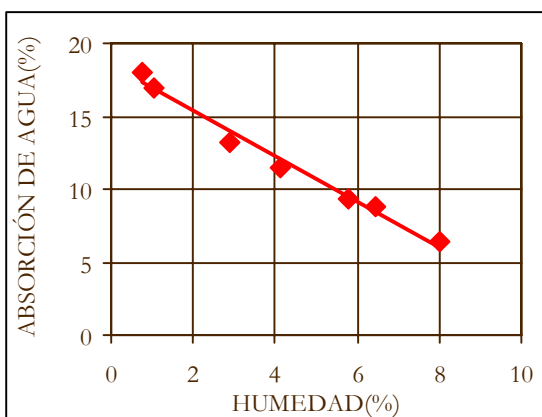


FIGURA 22. Variación de la absorción de agua de la baldosa con respecto a la humedad residual del polvo atomizado

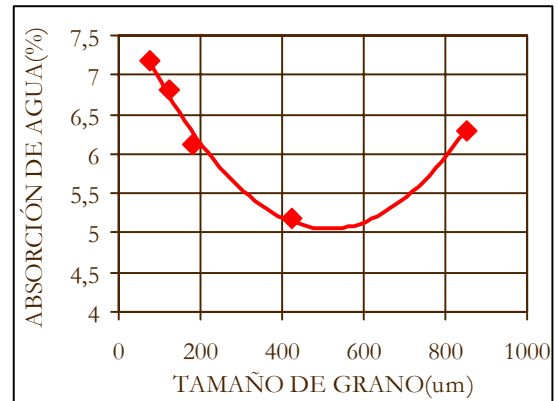


FIGURA 23. Variación de la absorción de agua de la baldosa con respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado

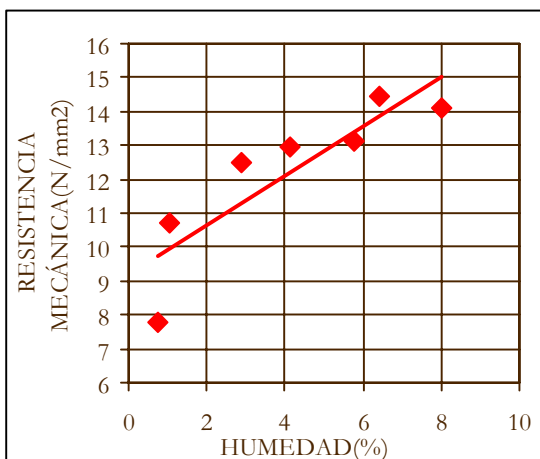


FIGURA 24. Variación de la resistencia mecánica en cocido de la baldosa respecto a humedad residual del polvo atomizado

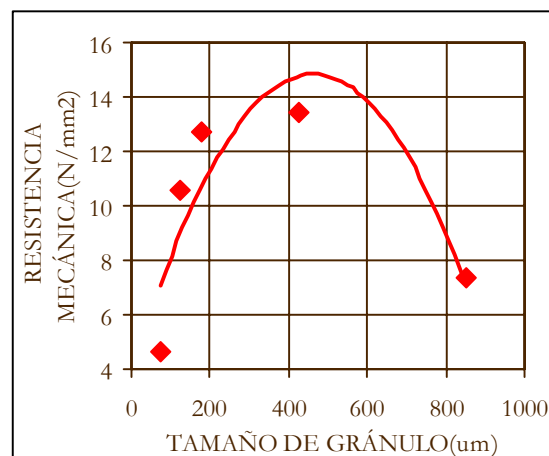


FIGURA 25. Variación de la resistencia mecánica en cocido de la baldosa respecto al tamaño de gránulo del polvo atomizado

7.11 VELOCIDAD DE FLUJO E ÍNDICE DE HAUSNER

Se realizaron mediciones con respecto a la cantidad de pasta retenida por cada tamiz para determinar como afectaba la granulometría la fluidez del polvo atomizado con humedad residual del $6\% \pm 0,2\%$, tanto relativa al volumen como a la masa, la velocidad de flujo se establece determinando el tiempo empleado para 100 ml de polvo atomizado para salir de una copa ford # 8, los resultados se muestran en la siguiente figura.

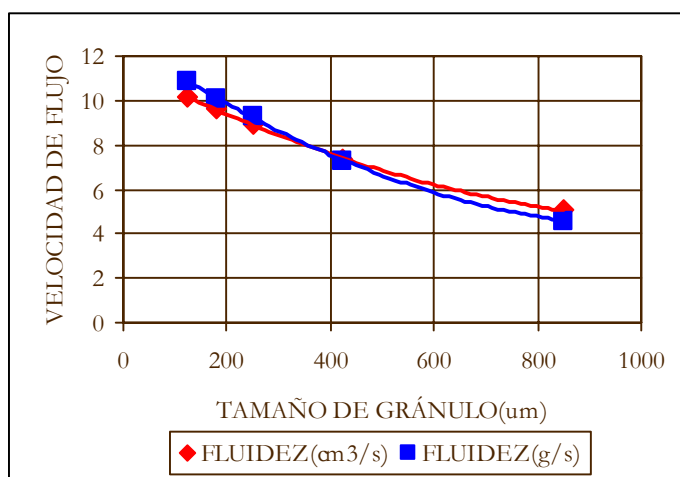


FIGURA 26. Medida de la velocidad de flujo con relación al volumen y a la masa del polvo atomizado para diferentes tamaños de gránulo. (Fuente: Autores).

(*) Con el polvo atomizado pasante por el tamiz Malla 120 (Abertura de $125 \mu\text{m}$) no se logró realizar la experimentación ya que permanece adherida a las paredes de la copa Ford.

El Índice de Hausner es el más adecuado para la caracterización de la fluidez del polvo, indica el grado de compactación o empaquetamiento de un material, mientras más cercano a 1 es mejor. De la misma forma, la densidad aparente de un polvo está en función del volumen de los espacios intergranulares y de la densidad del gránulo o del aglomerado. La densidad vibrada se usa para calcular el factor de prensado y altura de llenado de los silos.

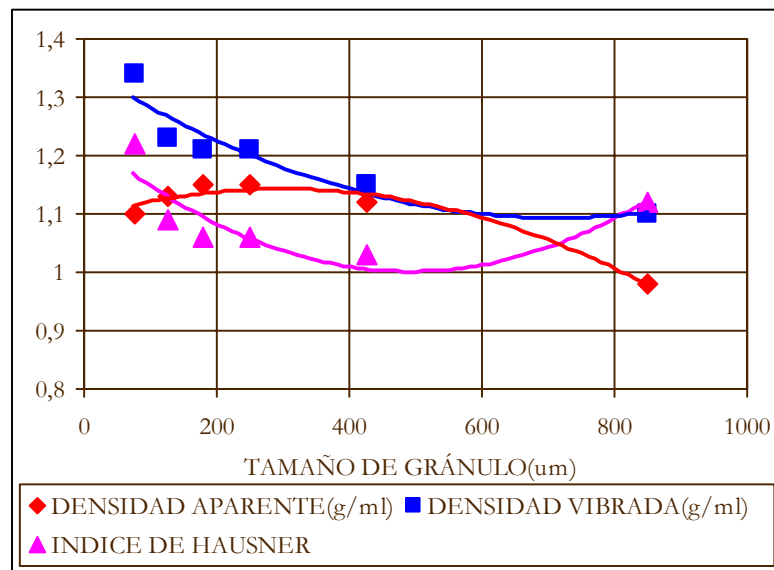


FIGURA 27. Índice de Hausner, Densidad aparente y vibrada del polvo atomizado para diferentes tamaños de gránulo. (Fuente: Autores).

(*) Con el polvo atomizado pasante por el tamiz Malla 120 (Abertura de 125 µm) no se logró realizar la experimentación ya que permanece adherida a las paredes de la copa Ford.

De la misma forma, se realizaron controles para evaluar la influencia de la humedad residual en la velocidad de flujo y el índice de Hausner para determinar un rango de operación óptimo para el polvo atomizado que permita obtener fluidez y compactación.

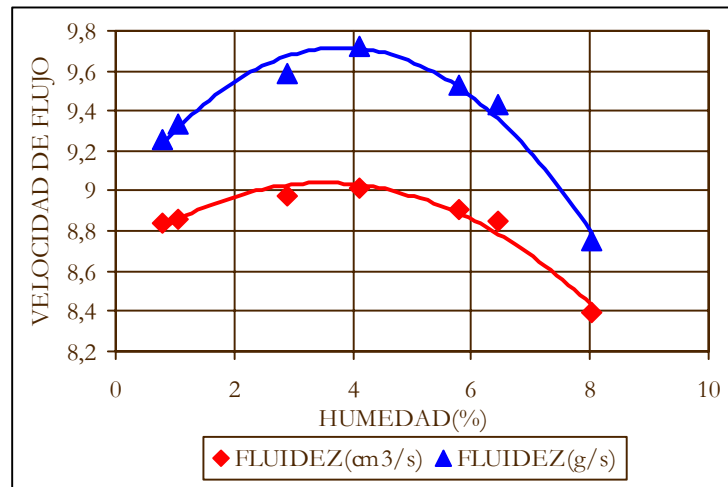


FIGURA 28. Variación de la velocidad de flujo con la humedad residual del polvo atomizado (Fuente: Autores).

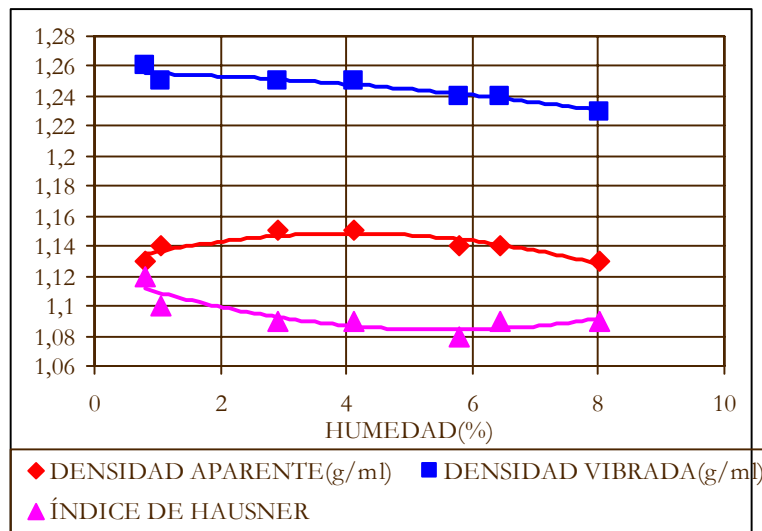


FIGURA 29. Índice de Hausner, Densidad aparente y vibrada del polvo atomizado a diferente humedad residual. (Fuente: Autores).

De acuerdo a los resultados del tamaño de gránulo, lo más recomendable para el proceso sería trabajar el polvo atomizado con poco material fino y grueso, para aumentar la fluidez y el grado de empaquetamiento del mismo. Por ésta razón, se trabajó el atomizador a una distribución de toberas de nebulización con boquillas de diámetro igual o superior a 3.5 mm, para la eliminación del material grueso del polvo atomizado.

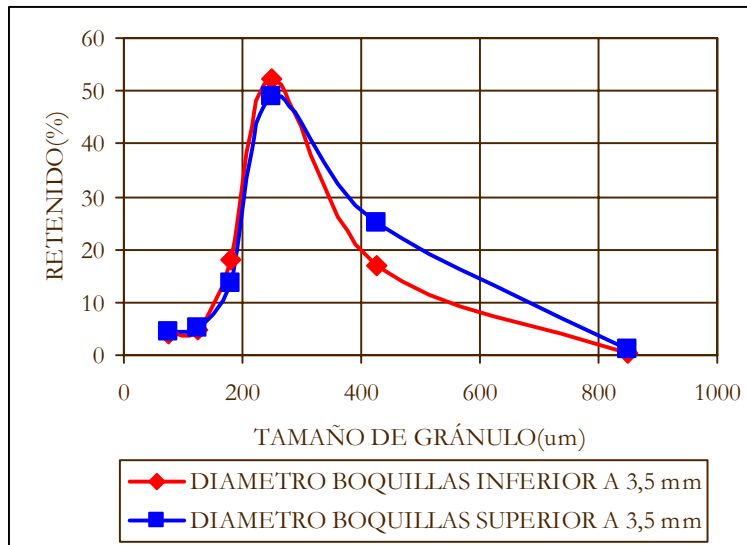


FIGURA 30. Comparación del tamaño de gránulo con respecto a la variación del diámetro de las boquillas en las toberas de nebulización (Fuente: Autores).

De la misma forma, se trabajó con barbotina a unas condiciones de densidad y porcentaje de sólidos secos superior, sin afectar drásticamente la viscosidad y a una presión de la bomba de la entrada de barbotina moderada ($\pm 20 - 25$ bar) para disminuir el porcentaje de finos en el polvo atomizado.

8. ANALISIS DE RESULTADOS

CARGA DE MATERIAL AL MOLINO

El aumento de sólidos secos presenta inconvenientes en el cargue cuando el material esta húmedo porque tiende a aglomerarse y la falta de trituración previa de las materias primas dificulta el desempeño de los molinos establecidos según la tabla 2.

El aumento de sólidos extiende el número de revoluciones por minuto en la molienda (tabla 1) ya que depende de la carga de sólidos y del molino en funcionamiento. Para cumplir con los requerimientos de producción al aumentar la carga de sólidos secos con las diferentes cargas señaladas se necesitan menos molinos para una producción requerida. El uso de los equipos de molienda se reduce en un 13% al aumentar la carga de sólidos secos debido que el número de moliendas posibles de acuerdo a la capacidad instalada se reduce en 19%. (ANEXO A)

Las recargas de cuerpos molidores en cada molienda tiene su incidencia en el costo de la pasta, aumentado su valor en 2.76 pesos por Kg de pasta, de acuerdo a lo referido en el numeral 7.4.

Para mantener la densidad de la barbotina constante se estableció un porcentaje de sólidos secos a partir de la figura 5 y de las observaciones en la variación de viscosidad indicando que para un porcentaje de sólidos secos de 63.5% permite reproducir los valores de densidad y proporciona características adecuadas en la barbotina. (ANEXO B)

RESIDUO

El rechazo de material grueso en los vibrotamices aumenta con la viscosidad, según la tabla 3-4, factor que debe ser controlado en la molienda y almacenamiento. Inicialmente este factor era de 2.45% para las dos pasta en producción, luego de las pruebas

realizadas se aplicó un nuevo factor de rechazo de 0,24% para pasta gres y 0,30% para pasta normal. Se recalculó el valor de la pasta atomizada reduciendo en 23 millones de pesos mensuales el costo de la producción de pastas de acuerdo a los datos consignados en la tabla 5.

Se observó una variación de los residuos (figura 6) debida a la variabilidad de tamaños en la materia prima y que la distribución de los cuerpos moledores no es semejante en todos los molinos, presentándose en diferentes velocidades lineales que modifican el ángulo de cascada de las bolas de alúmina.

DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA

La distribución del molino patrón (figura 7) muestra que el 50% de los sólidos suspendidos en la barbotina tienen un tamaño aproximado a 1 μm y el 10% está por encima de 20 μm . Se hicieron dos pruebas las cuales presentan una diferencia máxima de 2.3% en el rango de 10-20 μm . Las curvas de los molinos restantes se compararon con el molino patrón (ANEXO D) y se observó que no existe una diferencia amplia entre las curvas, la máxima diferencia encontrada es de 4% en el molino #4. Se demostró que es posible obtener distribuciones de tamaño de partícula semejante independiente del molino en funcionamiento, manteniendo la altura y número de giros constante.

Las diferencias entre las distribuciones pueden ser ocasionadas por la carga descompensada de materias primas. Además las distribuciones con menor densidad corren ligeramente hacia arriba la distribución. El porcentaje de tamaño de 1 μm se mantiene en 50% y del 10% mayor de 20 μm independiente del molino. La distribución del molino #1 que gira a menor número de revoluciones por minuto está por encima del molino #3. Se observó que las curvas se entrecruzan para todos los molinos, indicando que hay tamaños de partícula que se encuentran en igual porcentaje.

PROPIEDADES FISICOCERÁMICAS

Como se observa en las figuras 8, a medida que aumenta la humedad residual del polvo atomizado se incrementa la densidad aparente de la baldosa prensada debido a que el aumento del porcentaje de humedad residual produce un acercamiento de las partículas, y un incremento de los contactos entre los gránulos. Dicho acercamiento, permite la formación de una textura más compacta y, por lo tanto, a un incremento en las cargas de rotura y en la compacidad de la pieza moldeada, tanto para la baldosa prensada en verde como en seco, ver figuras 10 y 12. De la misma forma, un incremento del tamaño de gránulo conlleva a este acercamiento de las partículas ocasionando que la densidad aparente y la resistencia mecánica, tanto en verde como en seco, aumenten, ver figuras 9,11 y 13.

En las figuras 14 y 15 el porcentaje de expansión disminuye con respecto a un aumento de la humedad residual del polvo atomizado debido a la mayor compacidad que le proporciona el contenido de agua actúa como lubricante facilitando la cohesión entre partículas al aplicar una presión determinada evitando que la pieza moldeada aumente de tamaño. De igual manera, para gránulos de mayor tamaño disminuye la expansión de prensado.

Como se observa en las figuras 16 - 17 al aumentar el porcentaje de agua del polvo atomizado contenido en la pieza, se incrementa la contracción de secado, ya que las partículas sólidas se acercan entre ellas con un movimiento hacia un centro común proporcionalmente a la cantidad de humedad residual retirada, que cesa solo cuando todos los gránulos se encuentran en contacto.

En las figuras 18 - 19, las pérdidas por calcinación se mantienen constantes, tanto para una variación de la humedad residual del polvo atomizado de la baldosa prensada como para un tamaño de gránulo diferente, ya que dependen básicamente de la mineralogía de las materias primas constituyentes.

En las figuras 20 - 21, se presenta una disminución de la contracción de cocción al aumentar la humedad residual y el tamaño de gránulo, para la misma temperatura de cocción. De forma similar, en las figuras 22 - 23 disminuye la absorción de agua debido al mayor empaquetamiento de los gránulos que impide la adición de humedad.

En las figuras 24 - 25, la resistencia mecánica en cocido aumenta a medida que se incrementa la humedad residual debido al mayor empaquetamiento de los gránulos a medida que aumenta el contenido de agua en la pieza moldeada. Igualmente, el aumento del tamaño de gránulo incrementa resistencia mecánica en la pieza moldeada aumentando el empaquetamiento entre partículas hasta un punto que por su mismo tamaño la fracción de espacios vacíos le proporciona fragilidad a la baldosa.

FLUIDEZ E ÍNDICE DE HAUSNER

De la figura 26, se desprende que las fracciones de gránulos menores a 125 μm presenta una velocidad de flujo nula. Las fracciones inferiores a 250 μm presentan buena fluidez debido a que estas fracciones de menor tamaño son gránulos esféricos de superficie lisa, a pesar del gran número de contacto entre ellos. Para la fracción comprendida entre 250 y 450 μm la velocidad de flujo no presenta mucha variación, para las fracciones granulométricas superiores presentan una disminución de la velocidad de flujo debido a que estas fracciones están formadas por apelmazamiento de gránulos de menor tamaño que incrementan las fuerzas de rozamiento disminuyendo por tanto la velocidad de flujo.

Como se observa en la figura 27, la fracción menor de 125 μm presenta una densidad aparente baja comparado con tamaño de gránulos mayores, por vibración se alcanza la mayor densidad, asimismo, la densidad aparente y la densidad vibrada de los gránulos atomizados disminuye para valores mayores a 250 μm en función del aumento de la dimensión de los gránulos, debido fundamentalmente a la existencia de cráteres huecos al interior de los mismos. Se alcanza el mínimo Índice de Hausner para los tamaños medios de gránulo (180 - 425 μm).

La figura 28 refleja para valores medios de humedad residual (3 - 5 %) presenta la mejor fluidez; para valores menores de humedad disminuye la fluidez debido a la liberación de

agua se genera una superficie rugosa en los gránulos. De igual forma, para valores mayores de humedad, la fluidez disminuye a causa de la aglomeración de gránulos.

En la figura 29 al incrementar la humedad residual del polvo atomizado, los valores de la densidad aparente, la densidad vibrada y el índice de Hausner tienden a mantenerse constantes, teniendo en cuenta, que para una humedad residual entre 3-5% se encuentran los valores más cercanos a 1.

CURVA GAUSSIANA

Como se refleja en la figura 30, se obtiene una disminución de la dispersión del tamaño de gránulo del polvo atomizado, debido al suficiente espacio entre las toberas de nebulización que genera que los espirales de barbotina no colisionen entre sí, provocando la formación de aglomerados en el caso del material grueso,

9. CONCLUSIONES

El número de moliendas requeridas en el proceso se reduce en 4%, sin cambios del gasto energético al aumentar la carga de sólidos secos en 11% en cada molienda manteniendo la calidad de la barbotina.

La viscosidad de la barbotina aumenta en un 50% cuando se mantiene en reposo al terminar la molienda o cuando se mantiene almacenada durante un tiempo mayor a 12 h.

Se estableció un valor de densidad constante de 1670 g/l y una disminución de la viscosidad al garantizar la cantidad de agua adecuada para la molienda de acuerdo al porcentaje de sólidos secos (63.5%) reduciendo el número de acondicionamiento de la barbotina.

Se reduce el número de acondicionamientos de la barbotina al terminar la molienda, debido al control en la carga de materias primas

Se redujo los costos de producción alrededor de 2.5 pesos / kg de pasta atomizada, que representa 23 millones de pesos / mes al recalcular el factor de rechazo que se modificó cuando cambió de la materia prima plástica (caliza).

La distribución granulométrica de la barbotina obtenida después del proceso de molienda no depende del molino utilizado, y se mantiene sin modificaciones durante la agitación en el almacenamiento.

El tamaño de gránulo comprendido entre 200 y 600 μm posee las mejores propiedades físico-cerámicas necesarias para el proceso con una humedad residual alrededor del $6\% \pm 0.2\%$.

Se disminuyó la amplitud de la Curva Gaussiana en un 20 %, homogenizando el tamaño de gránulo con una reducción de la presión de la alimentación de barbotina y un aumento del diámetro de las toberas de nebulización.

Para aumentar la producción de polvo atomizado en 1 ton/h es necesario incrementar el área de nebulización en $10 \text{ mm}^2 \pm 10\%$ manteniendo la densidad y la viscosidad de la barbotina constantes.

Se debe aumentar o disminuir la temperatura de entrada del aire caliente en $\pm 40 \text{ }^\circ\text{C}$ por cada variación de 3 bares en la presión de la bomba de succión de barbotina para mantener la humedad residual y el tamaño de gránulo dentro de los parámetros establecidos.

El índice de Hausner presenta un mejor comportamiento en un rango de humedad comprendido entre 3 y 6% donde se presentan los valores máximos de velocidad de flujo, asimismo, un tamaño de gránulo comprendido entre 200 - 600 μm con buena fluidez y un óptimo grado de empaquetamiento.

Se observó una reducción de la dispersión del tamaño de gránulo en el polvo atomizado para valores mayores a 300 μm en un 15 % con una mayor separación de las toberas de nebulización con boquillas de mayor diámetro.

10. RECOMENDACIONES

Se sugiere que los molinos giren a igual número de revoluciones y mantener constante la altura de los cuerpos molidores para obtener un residuo promedio en cada molienda.

Se recomienda aplicar el procedimiento para el acondicionamiento de la barbotina, establecida durante el desarrollo del trabajo.

La identificación de la distribución granulométrica de la barbotina debe ser base para nuevos estudios con el fin de identificar la distribución recomendable que proporcione mejores condiciones en el producto terminado.

Se recomienda incrementar la humedad residual del polvo atomizado menor o igual a 7% para mejorar las propiedades físicocerámicas del producto mejorado, debido que para valores mayores se afecta drásticamente la contracción de secado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sociedad Anónima Cooperativa Mecánica Imola(SACMI); Asociación Española de Técnicos Cerámicos (ATC). Tecnología cerámica aplicada. Ed. Faensa Editrice Ibérica. Castellón, España. 2001.

- [2] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR); Baldosas Cerámicas para Revestimientos de Suelos y Paredes. Ed. StockCero S.A. Madrid, España, 1999. p. 5 - 16, 365 - 375.

- [3] NAVARRO, Enrique y otros. Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE). Controles de Fabricación de Pavimentos y Revestimientos Cerámicos. Ed. Faensa Editrice Ibérica. Castellón, España. 1996. p. 116 - 127, 142, 152 - 163.

- [4] BARBA, Antonio y otros. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. Ed. Instituto de tecnología cerámica. Castellón, España. p. 129-211.

- [5] BELTRÁN, V. *et al.* Materias Primas: Características técnicas de las arcillas utilizadas para la fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos en pasta roja. En: Técnica Cerámica. No. 164 (1988); p. 280 - 287

- [6] BELTRÁN, V. *et al.* Influencia de las condiciones de Prensado (Presión y Humedad del Polvo), sobre la Estructura Porosa y la Capacidad de Succión de agua del Soporte Cerámico Cocido, que se utiliza en la Fabricación de Azulejos por Bicocción. En: Instituto de Tecnología Cerámica: Universidad de Valencia. (1989); p. 145 - 150

- [7] BOIX, A. *et al.* Mineralogía de Arcillas: Mineralogía y Propiedades Tecnológicas de Arcillas utilizadas en el sector Pavimento - Revestimiento Cerámico. En: Técnica Cerámica. No. 224 (1993); p. 404 - 413

- [8] BERNAL, I. *et al.* Análisis Próximo de Arcillas para Cerámica. En: Revista Académica Colombiana de Ciencias. Vol. 27, No. 105 (dic. 2003); p. 569 - 578
- [9] JAZAYERI, S. *et al.* Influencia de Nefelina Sienita y del tiempo de molienda en las propiedades reológicas de una barbotina de Porcelana Gres. En: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 42, No. 4 (jul. - ago. 2003); p. 209 - 213
- [10] AMOROS, J. *et al.* Características de Polvos Cerámicos para Prensado. En: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. (ene. - feb. 1987); p. 31 - 37
- [11] AMOROS, J *et al.* Prensado Unidireccional de Polvos Cerámicos aglomerados por Atomización: Mecanismo de Compactación. En: Instituto de Tecnología Cerámica: Universidad de Valencia. (1989); p. 133 - 137
- [12] DÍAZ, L.A.; TORRECILLAS, R. Arcillas Cerámicas: Una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. En: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 41, No. 5 (sep. - oct. 2002) p. 459 - 469
- [13] BLASCO, A; ENRIQUE, J; ARREBOLA, C. Los defloculantes y su acción en las Pastas Cerámicas para Atomización. En: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 22, No 3 (1982) p. 143 - 148

ANEXO A. REQUERIMIENTOS DE MOLIENDA

Al aumentar la carga de sólidos secos en la molienda el número de molinos requeridos en producción disminuye. De acuerdo con la capacidad instalada se aprovecha en menor proporción cuando se trabaja una carga de 22 tn debido a que se tendría una capacidad instalada alta comparada con la producción requeridos.

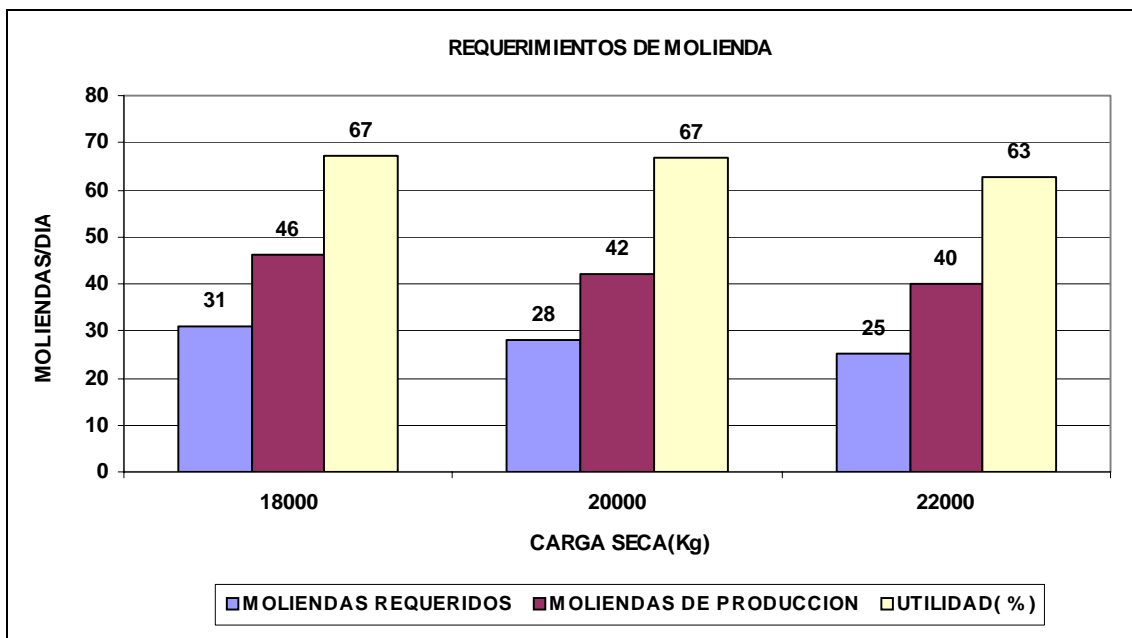


FIGURA A1. Molinos requeridos por producción diariamente, disponiendo de la capacidad que se tenga instalada para cada carga seca.

ANEXO B. CONTROL DE CUERPOS MOLEDORES

Los molinos MTD 340 cuentan con un revestimiento de alumina en su interior, el cual reduce el diámetro utilizado en la molienda.

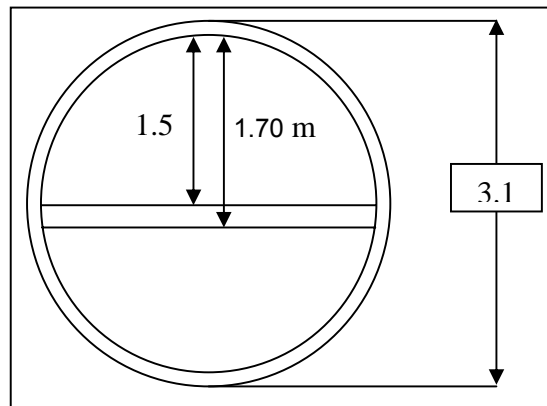


FIGURA B1. Especificaciones del diámetro del molino y la altura de bolas.

La carga de cuerpos molidores permite mantener un control en la altura de los cuerpos molidores que repercuten en los tiempos de molienda.

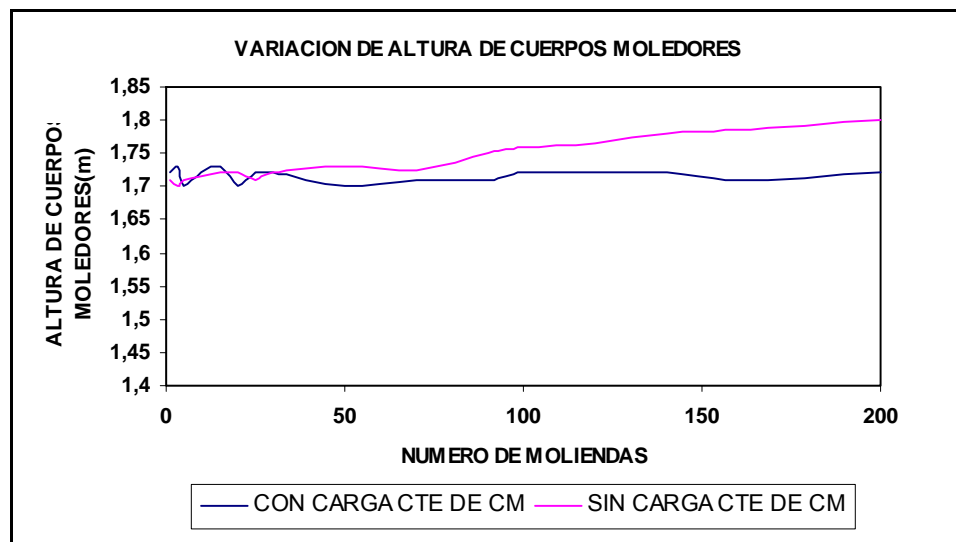


FIGURA B2. Variación de las alturas de acuerdo a la carga constante de cuerpos molidores y su desgaste según el número de moliendas.

ANEXO C. CONTROL DE LA DENSIDAD

La densidad de la barbotina sufre grandes cambios debido a la falta de mantenimiento y control del suministro de agua a los molinos y debido a la descompensación en la carga de materias primas; una vez controladas estas variables las densidades se comportaron de forma muy semejante en cada molienda.

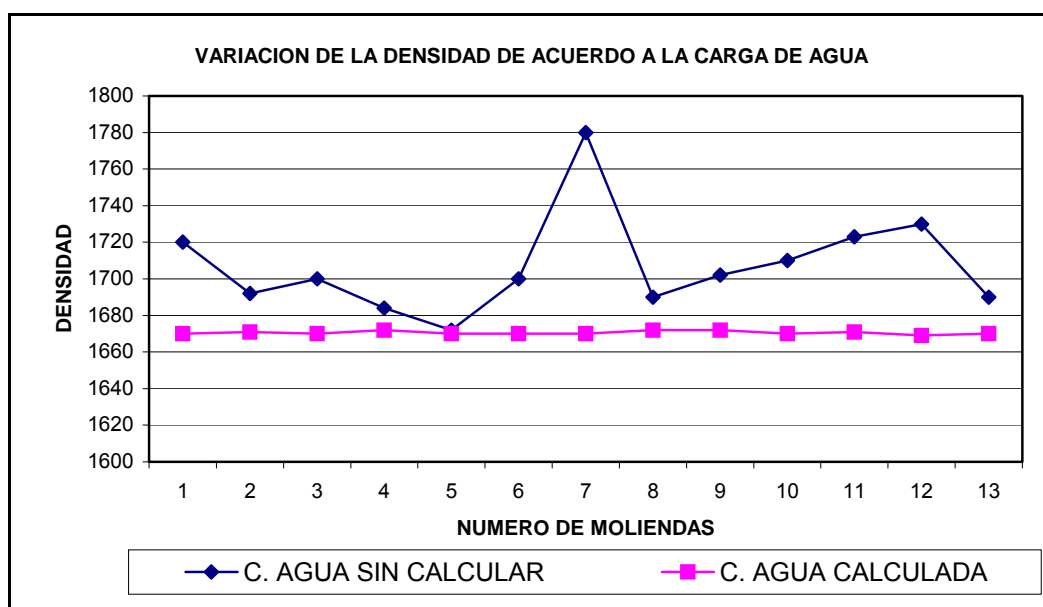


FIGURA C1. Comparación de las densidades con carga de agua programada vs. Carga de agua al tanteo.

ANEXO D. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA BARBOTINA

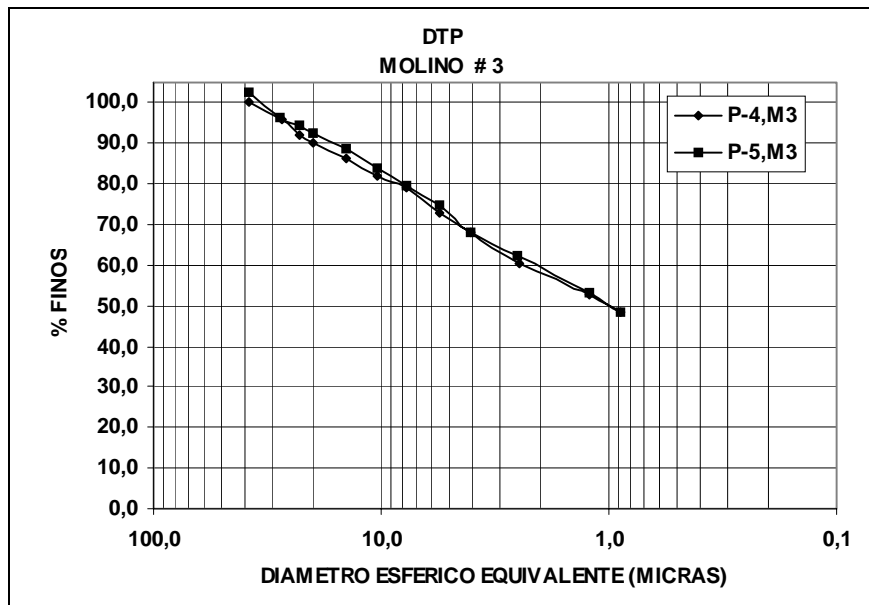


FIGURA D1. Distribución granulométrica del molino #3 tomado como patrón.

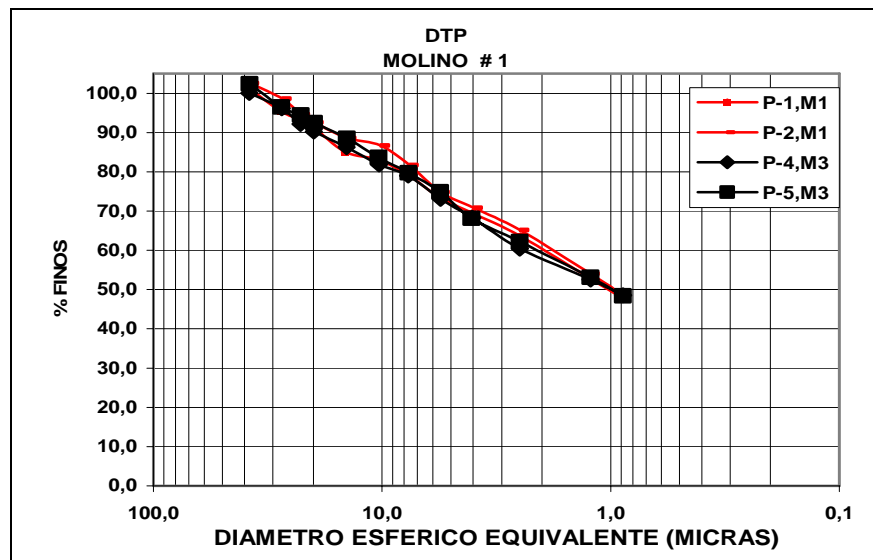


FIGURA D2. Distribución granulométrica del molino # 1.

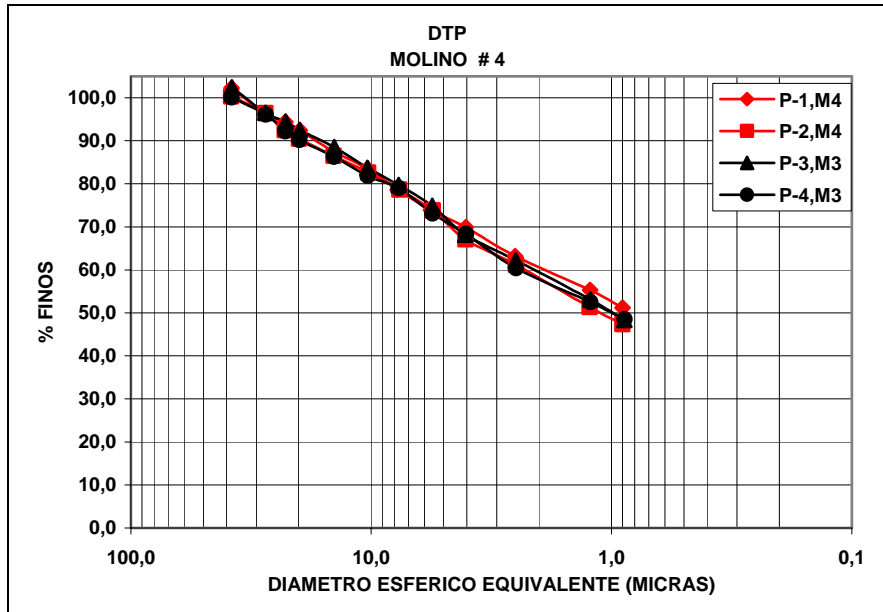


FIGURA D3. Distribución granulométrica del molino #4.

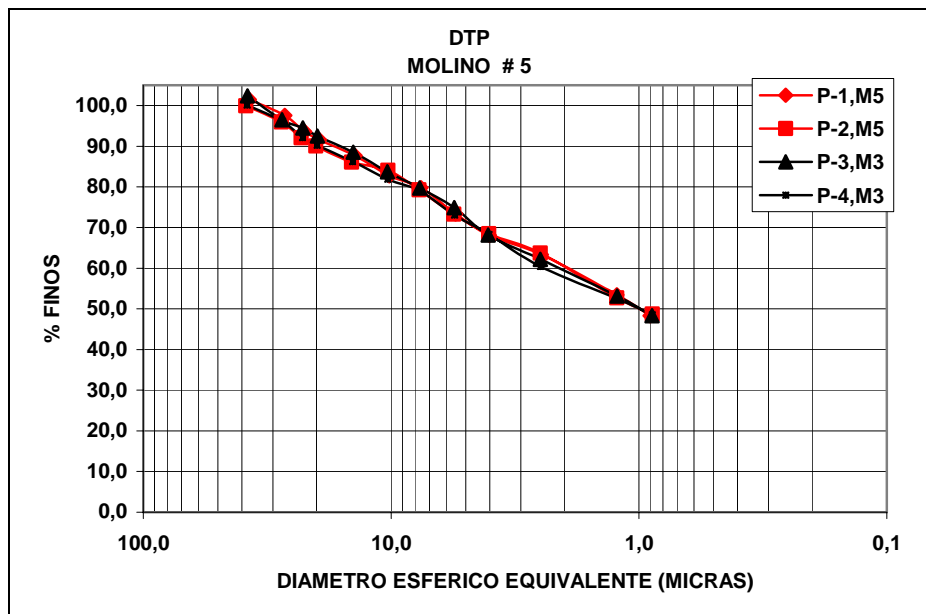


FIGURA D4. Distribución granulométrica del molino #5.

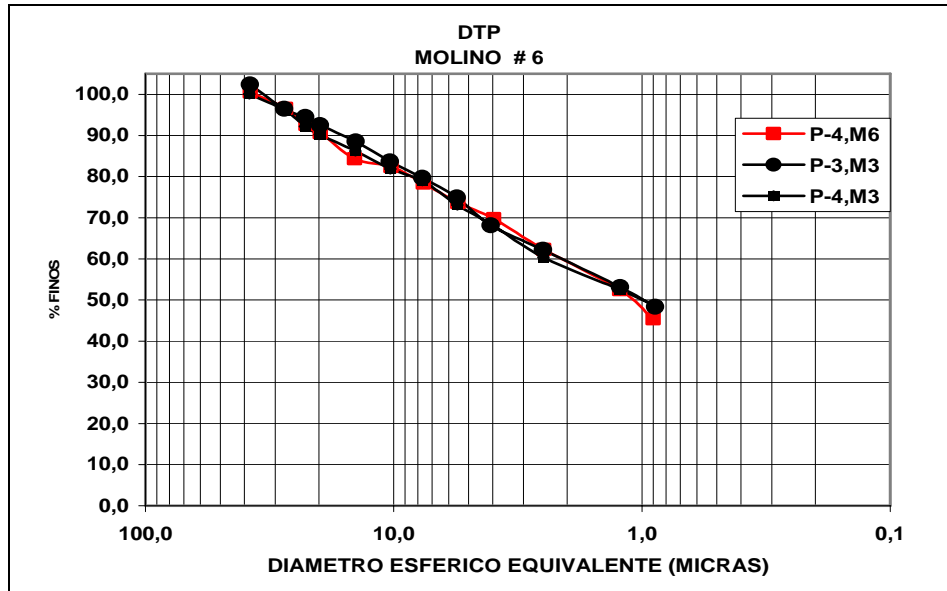


FIGURA D5. Distribución granulométrica del molino #6.

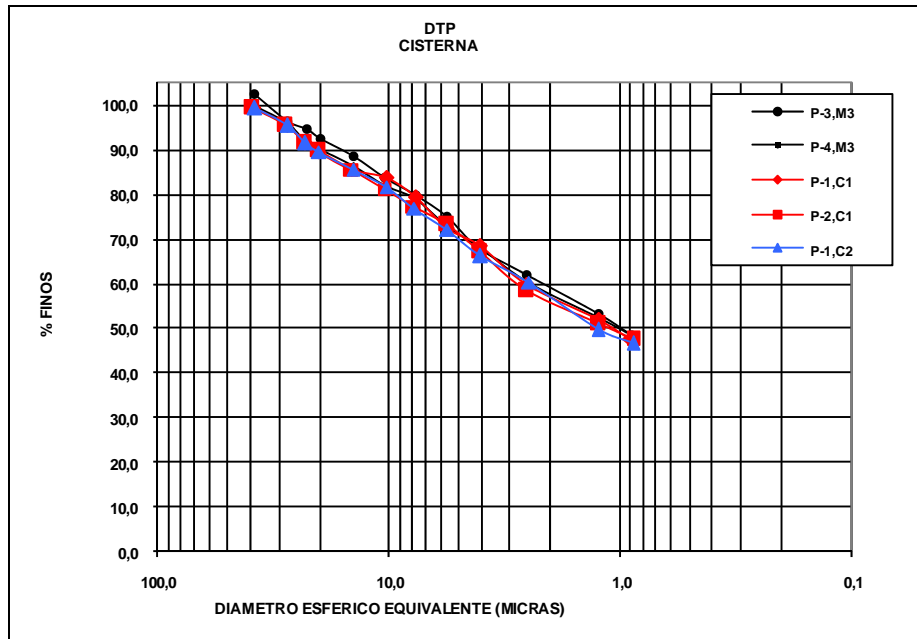


FIGURA D6. Distribución granulométrica de la cisterna.

ANEXO E. ACONDICIONAMIENTO DE LA BARBOTINA

El acondicionamiento debe realizar de la siguiente manera:

- ✓ Tomar las condiciones de densidad, viscosidad y residuo.
- ✓ Acondicionar inicialmente la densidad, solo con agua.
- ✓ Tomar de nuevo las condiciones de densidad, viscosidad. Una vez la densidad este sobre la norma se acondiciona la viscosidad si es necesario.
- ✓ Tomar nuevamente las condiciones. En caso que las condiciones sigan por fuera de norma, se debe acondicionar nuevamente, de lo contrario se procede a descargar.

1. DENSIDAD

La norma indica que la densidad de la barbotina debe estar en el rango de 167,0-169,0 g/100cm³. Por cada punto arriba de la norma se cargara 250 litros de agua. Se debe tener en cuenta que la viscosidad disminuye de 3-5 segundos por cada 250 ml de agua de acondicionamiento. Si la viscosidad es alta y la cantidad de agua no coloca dentro de la norma la viscosidad, se puede cargar Polialgilato de Sodio. En caso de estar por debajo de la norma debe informar al jefe de área.

2. VISCOSIDAD

La norma indica que la viscosidad debe estar en un rango de 18-25 segundos. Si al acondicionar con agua la viscosidad sigue arriba de la norma, se carga Polialgilato de Sodio partiendo de la relación que por cada kilogramo la viscosidad baja 1.2 segundos. Para mayor eficiencia se debe cargar el Polialgilato de Sodio con una cantidad de agua entre 50-100 ml. En caso de estar por debajo se debe informar al jefe de área.

3. RESIDUO

La norma indica que el residuo debe estar entre 8-9 gramos. Por cada gramo arriba de la norma se debe moler nuevamente por 15 minutos. Si esta por debajo de la norma se debe informar al jefe de área.

ANEXO F. TABLA DE CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL ATOMIZADOR

De acuerdo al comportamiento de las variables involucradas, decisiones tomadas y mediciones se ha definido un rango de operación del atomizador según los requerimientos de producción, para una determinada densidad y viscosidad de la barbotina

Variables		Tamaño de gránulo	Humedad	Producción	Aire requerido
Porcentaje de agua en la barbotina	↑	↓	↑	↓	↑
Temperatura de la barbotina	↑		↓	↑	
Densidad de la barbotina	↑	↑	↓	↑	↓
Viscosidad de la barbotina	↑	↑			↓
Presión de la bomba	↑	↓	↑	↑	↑
Diámetros de las boquillas	↑	↑	↑	↑	↓
Altura del espiral de barbotina	↑	↑	↑	↑	↓
Distancia de las toberas de nebulización en el anillo distribuidor	↑	↓			
Temperatura de entrada del aire	↑		↓	↑	
Cantidad de aire en el proceso	↑		↓	↑	↑
Número de toberas de nebulización	↑		↑	↑	

PRODUCCIÓN (Ton/h)	DENSIDAD (g/100mL)	VISCOSIDAD (s)	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (bar)	AREA (mm2)	BOQUILLAS	CANTIDAD DE AIRE (%)	CAUDAL BARBOTINA(m3/h)
7 - 8	167.0 - 167.5	20 - 25	600 - 640	20 - 23	70 - 80	8	45 - 50	13 - 14
8 - 9				24 - 27		9	50 - 55	14 - 15.5
9 - 10				28 - 30		10	55 - 60	15.5 - 17
8 - 9	167.0 - 167.5	20 - 25	640 - 680	20 - 23	80 - 90	8	50 - 55	14 - 15.5
9 - 10				24 - 27		9	55 - 60	15.5 - 17
10 - 11				28 - 30		10	60 - 65	17.5 - 19
9 - 10	167.0 - 167.5	20 - 25	680 - 720	20 - 23	90 - 100	9	50 - 55	15.5 - 17
10 - 11				24 - 27		10	55 - 60	17.5 - 19
11 - 12				28 - 30		11	60 - 65	19 - 20.5
10 - 11	167.0 - 167.5	20 - 25	720 - 760	20 - 23	100 - 110	10	55 - 60	17.5 - 19
11 - 12				24 - 27		11	60 - 65	19 - 20.5
12 - 13				28 - 30		12	65 - 70	20.5 - 22
11 - 12	167.0 - 167.5	20 - 25	760 - 800	20 - 23	110 - 120	11	55 - 60	19 - 20.5
12 - 13				24 - 27		12	60 - 65	20.5 - 22
13 - 14				28 - 30		13	65 - 70	22.5 - 24
12 - 13	167.0 - 167.5	20 - 25	800 - 850	20 - 23	120 - 130	12	60 - 65	20.5 - 22
13 - 14				24 - 27		13	65 - 70	22.5 - 24
14 - 15				28 - 30		14	70 - 75	24 - 25.5
13 - 14	167.0 - 167.5	20 - 25	850 - 900	20 - 23	130 - 140	12	60 - 65	22.5 - 24
14 - 15				24 - 27		13	65 - 70	24 - 25.5
15 - 16				28 - 30		14	70 - 75	25.5 - 27.5
14 - 15	167.0 - 167.5	20 - 25	900 - 950	20 - 23	140 - 150	13	65 - 70	24 - 25.5
15 - 16				24 - 27		14	70 - 75	25.5 - 27.5
16 - 17				28 - 30		15	75 - 80	27.5 - 29

FIGURA F2. Rango de operación de los dispositivos del atomizador

ANEXO G. PRUEBAS DE PROPIEDADES FISICOCERÁMICAS

- **Densidad Aparente**

Se determina mediante el método de inmersión en mercurio que consiste en pesar la pieza y calcular su volumen basándose en el principio de Arquímedes. La densidad aparente, ρ se calcula a partir de la ecuación 4.

$$\rho = \rho_{Hg} \frac{M_S}{M_L} \quad (4)$$

ρ_{Hg} = Densidad del Mercurio
 M_S = Masa de la probeta
 M_L = Masa de Mercurio desalojado por la pieza

- **Resistencia Mecánica a la flexión en verde**

Consiste en determinar el módulo de ruptura para la baldosa después del prensado. La resistencia mecánica se calcula de acuerdo de la ecuación 5.

$$\sigma = \frac{3F_{MAX} L}{2be^2} \quad (5)$$

σ = Resistencia Mecánica
 F_{MAX} = Carga de Rotura
 L = Distancia entre apoyos
 b = Anchura de la probeta
 e = Espesor de la probeta

Este cálculo lo realiza el equipo utilizado para medir la resistencia mecánica conocido como Crómetro.

- **Resistencia Mecánica a la flexión en seco**

Se realiza la misma operación de la resistencia mecánica en verde sobre la baldosa seca.

- **Expansión después del Prensado**

Es la diferencia entre las dimensiones de la baldosa después del prensado y las del molde de la prensa, se calcula a partir de la ecuación 6.

$$E = \frac{L_2 - L_1}{L_1} * 100 \quad (6)$$

E = Expansión de prensado
*L*₂ = longitud pieza moldeada
*L*₁ = longitud molde

- **% Contracción de Secado**

Es la diferencia de dimensiones de la baldosa en la entrada y salida del secadero, se calcula a partir de la ecuación 7.

$$C.S. = \frac{L_2 - L_1}{L_2} * 100 \quad (7)$$

CS = contracción de secado
*L*₂ = longitud pieza prensada
*L*₁ = longitud pieza secada

- **% Pérdidas por Calcinación**

Es la diferencia de pesos entre la baldosa seca y la baldosa cocida. La muestra cocida a una temperatura entre 1135 y 1160 °C, se calcula a partir de la ecuación 8.

$$P.C. = \frac{P_2 - P_1}{P_2} * 100 \quad (8)$$

PC = Pérdidas por calcinación
*P*₂ = Peso pieza secada
*P*₁ = Peso pieza cocida

- **% Contracción de Cocción**

Es la diferencia de dimensiones entre la baldosa seca y la baldosa cocida.

$$C.C. = \frac{L_2 - L_1}{L_2} * 100 \quad (9)$$

CC = contracción de cocción
*L*₂ = longitud pieza secada
*L*₁ = longitud pieza cocida

- **% Absorción de Agua**

Es la diferencia entre la baldosa cocida y la baldosa cuando ha absorbido una determinada cantidad de agua. Las muestras cocidas a las diferentes temperaturas se pesan (P_1); entonces se introducen en un baño de agua por una prolongada ebullición (2 h). Se dejan enfriar a temperatura ambiente y con un paño húmedo se elimina el exceso de agua de las superficies de las baldosas.

$$A.A. = \frac{P_2 - P_1}{P_2} * 100 \quad (10)$$

AA = Absorción de agua

P_2 = Peso pieza cocida con agua absorbida

P_1 = Peso pieza cocida

- **Resistencia Mecánica a la flexión en cocido**

Se realiza la misma operación de la resistencia mecánica en verde sobre la baldosa cocida.