

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA DEL MINERAL
DE HIERRO EN EL PROCESO DE SINTERIZACIÓN Y PRODUCCIÓN DE
PELLETSCON MATERIAL ULTRAFINO EN PAZDELRIO.**

DIANA MARCELA ÁLVAREZ PAIPA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTA DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2012

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA DEL MINERAL
DE HIERRO EN EL PROCESO DE SINTERIZACIÓN Y PRODUCCIÓN DE
PELLETSCON MATERIAL ULTRAFINO EN PAZDELRIO.**

DIANA MARCELA ÁLVAREZ PAIPA

**Trabajo de aplicación para optar por el título de
Ingeniería Química**

DIRECTORES

Dir. Doc. DIONISIO LAVERDE

Ing. CARLOS FERNANDO FLÓREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTA DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

Las viejas tradiciones reúnen lo que las nuevas aún no han logrado, el conocimiento se mezcla en una serie de sentimientos que se dividen entre los progenitores y aquellos que nos vieron dar nuestros primeros pasos, aún a los que vi marcar sus primeras huellas.

El tiempo cambia y sus giros se robaron años de dedicación, que son conocidos por el esfuerzo de ser lo que quisieron muchos. Estos pasos son obstaculizados por aquellos que ya los recorrieron y entre fórmulas y saberes mágicos, combinaron nuestras vidas en un solo problema. La solución estaba escrita en cada uno de nuestros corazones y hoy con el mejor de los conocimientos plasmado en líneas de hierro, dedico este trabajo a todos los que colocaron una partícula de vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser la razón que guía mis pasos en este camino de verdades y misterios, ya que es el centro de mi vida.

A mis padres Belisario Álvarez Barrera y Blanca Inés Paipa Morantes, por darme la vida y por todo el apoyo incondicional que me han brindado.

A mis hermanos, que gracias a ellos hoy existe una familia ejemplar, gracias por ser mis amigos, profesores y compañeros de viaje, a ustedes debo mucho.

A mis abuelos, los que están y los que ya partieron, que son los responsables de este compendio de seres que hoy viven gracias a ellos.

A la universidad y a todos los formadores que me han acompañado en estos cinco años y en éste proyecto de investigación.

A todos mis compañeros de camino, por ser los cómplices en éste sendero de riesgo y aventuras.

A los Jefes y compañeros de PazdelRio su apoyo y acompañamiento en logro de esta meta.

Al susurro de las palabras escritas en las noches, que se lleva la página donde están todos los esfuerzos que dejan un aliento de vida en un mundo de investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA	19
1.1. METODOLOGÍA PARA ESTUDIO DE LA GRANULOMETRÍA	19
1.1.1. Montaje de la planta piloto de Sinterizado	19
1.1.2. Caracterización de los materiales para las pruebas a nivel piloto de Sinterizado.	20
1.1.3. Estudio de variables que afectan el proceso de Sinterización.	21
1.1.4. Realización de los Sinterizados en planta piloto	21
1.2. METODOLOGÍA PARA PELETIZADO DE MATERIAL ULTRAFINO	22
1.2.1. Montaje de la planta piloto de Peletizado.	22
1.2.2. Caracterización de los materiales para pruebas a nivel piloto de Peletizado.	23
1.2.3. Realización de los Peletizados	23
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS	24
2.1. RESULTADOS DE ESTUDIO DE GRANULOMETRÍA	24
2.1.1. Caracterización de los materiales para las pruebas de Sinterizado	24
2.1.1.1. Análisis químico	24
2.1.2. Análisis granulométrico de los minerales de hierro	27
2.1.3. Fabricación de los Sinterizados	28
2.2. RESULTADOS DE ULTRAFINOS EN LA MEZCLA A SINTERIZAR.	31
2.3. RESULTADOS PELETIZADO	32
2.3.1. Análisis de humedad.	32
2.3.2. Análisis químico de los materiales a Peletizar.	33
2.3.3. Peletizados.	34
2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA	40
2.4.1. Análisis de la granulometría por Caja de bloques	40

2.4.2. Análisis de Varianza	40
CONCLUSIONES	42
RECOMENDACIONES	44
BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXOS	48

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción de los tamaños de partículas de minerales de hierro .	17
Tabla 2. Análisis químico de los materiales a Sinterizar.	25
Tabla 3. Humedad de los minerales.	25
Tabla 4. Composición porcentual de la mezcla TOTAL.	26
Tabla 5. Balance de masa	26
Tabla 6. Calculo de la basicidad	26
Tabla 7. Evolución de los Sinterizados en la planta piloto.	29
Tabla 8. Porcentajes de ultrafinos introducidos a la mezcla	31
Tabla 9. Porcentaje de agua absorbida en los materiales a Peletizar.	33
Tabla 10. Análisis químico de los materiales a estudiar para la formación de Pellets con material ultrafino.	33
Tabla 11. Resultados de ensayos de peletizado con todos los ultrafinos generados en PazdelRio con diferentes combinaciones de aglomerantes.	34
Tabla 12. Resultados de ensayos de Peletizado de los ultrafinos de Sinter con diferentes combinaciones de aglomerantes.	37
Tabla 13. Análisis de varianza	41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de Sinterización	15
Figura 2. Plano de la planta de Sinterización de PazdelRío.	20
Figura 3. Granulometría del mineral de Ubalá.	27
Figura 4. Granulometría del mineral de Ubalá.	27
Figura 5. Perfil de temperatura durante el Sinterizado del primer ensayo.	30
Figura 6. Porcentaje de finos de retorno generados durante los Sinterizados.	32
Figura 7. Briquetas	35
Figura 8. Pellets entre 2-8 mm	35
Figura 9. Pellets entre 2-20 mm	35
Figura 10. Ignición del Sinterizado en planta piloto	36
Figura 11. Torta de Sinter	36
Figura 12 . Análisis granulométrico absoluto de los pellets	38
Figura 13. Análisis granulométrico acumulado de los pellets	39
Figura 14. Sinter a partir de Pellets con ultrafinos de Sinter.	39
Figura 15. Variabilidad de la estabilidad con respecto a la granulometría.	40

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. MONTAJE DE LA PLANTA SINTERIZADORA	48
ANEXO B. MONTAJE DE LA PLANTA PILOTO DE PELETIZADO	51
ANEXO C. PROCEDIMIENTO PARA PRODUCCIÓN DE SINTER EN LA PLANTA PILOTO.	53

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA DEL MINERAL DE HIERRO EN EL PROCESO DE SINTERIZACIÓN Y PRODUCCIÓN DE PELLETS CON MATERIAL ULTRAFINO EN PAZDEL RÍO.*

AUTOR: DIANA MARCELA ÁLVAREZ PAIPA**

PALABRAS CLAVES: Granulometría, Estabilidad, Planta Piloto, Sinter, Pellets.

Este estudio se enfoca en evaluar la granulometría (≥ 7 mm) de los minerales de hierro y el comportamiento de los ultrafinos ($< 0,15$ mm) de reproceso en la Sinterización, para mejorar la estabilidad del Sinter en Pazdel Río. En una segunda etapa se utiliza estos ultrafinos para generar Pellets con características fisicoquímicas que puedan ser Sinterizables.

Se realizó el montaje de dos plantas piloto que simularan los procesos de Sinterizado y Peletizado. En la planta piloto de Sinterizado se desarrollaron una serie de experimentos que permitieron evaluar la granulometría de los minerales de hierro, para lo cual se necesitó realizar un análisis fisicoquímico de los materiales que conforman la mezcla a Sinterizar (mineral de hierro, caliza, coquecillo, laminilla y finos de retorno) y así determinar los parámetros de operación para realizar los Sinterizados; evaluar su resistencia mecánica a través de una prueba de estabilidad. El mismo tratamiento se le realizó a la mezcla pero agregando diferentes porcentajes de ultrafinos. Por último, se utilizó la planta de Peletizado para producir Pellets, ensayando diferentes combinaciones de materiales residuales para generar un aglomerante con la propiedad de adherir los ultrafinos y obtener como resultado principal Pellets Sinterizables que puedan ser incorporados nuevamente al proceso, con características químicas muy similares a la materia prima actual.

La granulometría de los minerales de hierro que permitieron obtener la máxima Estabilidad (65%) en la planta fue la < 7 mm. El comportamiento de los Ultrafinos arrojó resultados negativos al presentar mayor producción de finos de retorno, presentando desequilibrio en el proceso. El mejor aglomerante fue la combinación de la escoria baja en fósforo y finos de coque, que generaron Pellets con una distribución granulométrica adecuada, los cuales lograron recuperar hasta un 47% de contenido en hierro en los ultrafinos.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Director: Dr. Dionisio Laverde. Codirector: Ing. Carlos Flórez.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE INFLUENCE OF GRADING OF IRON ORE IN THE SINTERING PROCESS AND PELLET PRODUCTION WITH ULTRA MATERIALS IN PAZDELRIO.*

AUTHOR: DIANA MARCELA ÁLVAREZ PAIPA**

KEYWORDS: Granulometry, stability, Pilot Plant, Sinter, Pellet.

This study focused on evaluating the granulometry (≥ 7 mm) of the iron ores and the behaviour of the ultrathins (<0.15 mm) for reprocessing in Sintering and to improve stability Sinter in PazdelRio Sinter. In the second stage to generate these ultrafines, Pellets were used with physicochemical characteristics which had to be Sinterable. This was assembled from two pilot plant processes simulating Sintering and pelletizing.

In the pilot plant a series of Sintering experiments developed that allowed us to evaluate the size distribution of iron minerals, which are needed to perform a physicochemical analysis of the materials that make up the mixture to be Sintered (iron ore, limestone, coke fines, slide and return fines). This was in order to determine the parameters for the Sintering operation and to evaluate their mechanical strength through a stability test. The same treatment was applied to the mix but different percentages of ultrathin were added. Finally, the plant was used to produce Pellets pelleted by testing different combinations of waste materials to generate a binder with the ultrafine property of adhering the main results and obtaining Pellets Sinterable that can be incorporated back into the process. This has very similar chemical properties current to the feedstock.

The particle size of the iron ore that allowed for maximum stability (65%) in the pilot plant was <7 mm. When Ultrafines behavior presented negative results, the production of fine return increased. This presented an imbalance in the process. The binder was the best combination of low phosphorus slag and coke fines, generating Pellets with an appropriate size distribution, which were able to recover up to 47% iron content on the ultrathin.

* Graduation Project

**Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering Department. Director: Dr Dionisio Laverde. Co-director: Eng. Carlos Flórez.

INTRODUCCIÓN

PazdelRío es una empresa perteneciente a la multinacional Votorantim, dedicada a la fabricación de acero desde hace más de 60 años, siendo la única siderúrgica integrada de Colombia y la responsable de más del 30 % de la producción nacional en acero[1]. En la búsqueda de cambio para mejorar su productividad, en el año 2009 decidió implementar el uso de otro mineral con un 11% de mayor contenido de hierro, procedente del municipio de Ubalá, ubicado a 126 km de Bogotá, D.C. El mineral de Ubalá ha presentado mayor productividad para el Alto Horno en la producción de arrabio, gracias a su mayor contenido de hierro y menores contaminantes [2]. Pero, a la vez, ha presentado inconvenientes en las plantas de Sinterización y la de trituración del mineral Ubalá, ya que su naturaleza mineralógica es diferente, con un mayor contenido de humedad natural, impidiendo su correcto cribado y llegando a Sinterización con un buen porcentaje de mineral de Ubalá grueso y hasta un 30% de ultrafinos. Presentando una desmejora significativa en la calidad del Sinter relacionada con el incumplimiento en la estabilidad (resistencia mecánica), lo que conlleva a tener un bajo consumo de Sinter en el Alto Horno y generación de grandes cantidades de finos de retorno durante el proceso de Sinterización.

En éste estudio se pretende encontrar un rango de granulometría adecuado de los minerales de hierro de Ubalá y Uvo-Uche para mejorar la estabilidad como medida de calidad del Sinter enviado hacia el Alto Horno de PazdelRío y dar solución a la generación de ultrafinos dentro del proceso. Para lograr esto se requiere montar y adecuar unas plantas piloto de Sinterizado y Peletizado para simular estos procesos. Utilizando la planta piloto de Sinterizado para encontrar un rango de granulometría adecuado de los minerales de hierro. Estudiar el comportamiento del Sinterizado, al introducir a la mezcla ultrafinos directamente al proceso. Para

lograr esto, los ultrafinos se someten a un proceso nuevo de aglomeración en frío, más concretamente a un proceso de Peletizado, buscando generar Pellets con características granulométricas y fisicoquímicas adecuadas para ser Sinterizables.

La Sinterización es de gran importancia dentro del proceso Siderúrgico al permitir la recuperación y aprovechamiento de los materiales finos de hierro, Coque, caliza y laminilla procedentes de las operaciones de explotación, trituración, cribado, lavado, etc. Obteniendo mejor rendimiento y evitando problemas de operación en el Alto Horno [3]. En la Figura 1, se muestra un esquema del proceso de Sinterización.

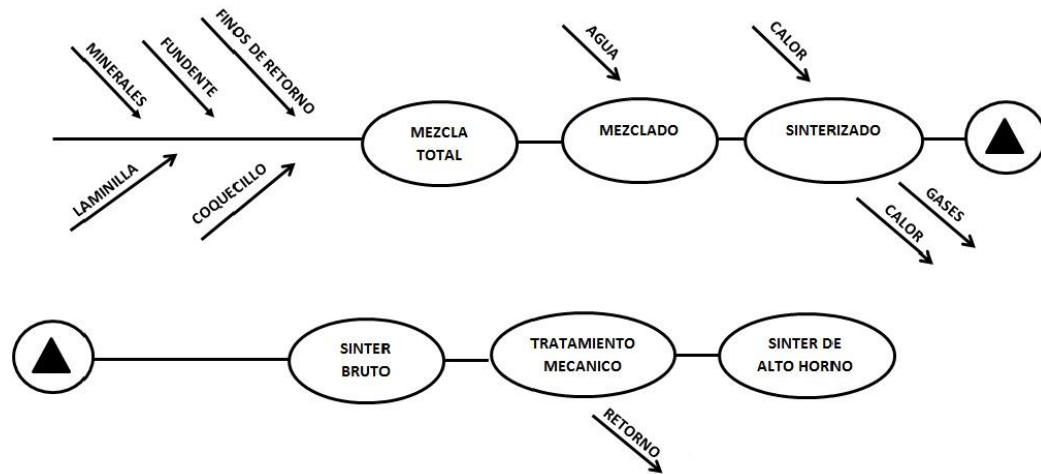


Figura 1. Proceso de Sinterización

La conformación de la mezcla de materiales finos a Sinterizar se hace con composiciones químicas definidas y se someten a un proceso de mezclado y micronodulación, que consiste en homogenizar la mezcla en un tambor giratorio, durante 4 minutos.

La mezcla preparada se deposita sobre una capa cama de mineral grueso de 3 cm que está sobre la parrilla de una cadena de carros de Sinterización, formando un lecho de 35 cm de altura, donde la superficie del lecho se lleva a una temperatura aproximada de 1150 °C[4], por el encendido de un horno que está

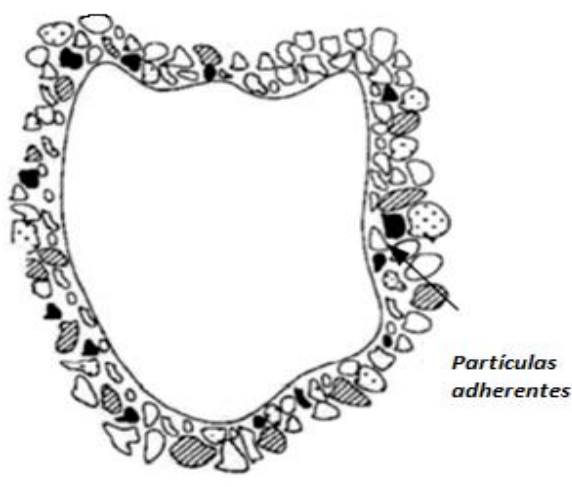
sobre el lecho y que al introducirle gas y aire realiza la ignición del combustible sólido contenido en la mezcla, evaporando la humedad de la superficie y haciendo que las partículas finas desde la superficie hasta la parte inferior se fusionen unas con otras[5], un efecto que se puede describir siguiendo el proceso de fumar cigarrillo, ya que la aspiración(succión) de aire es originada por una depresión por debajo de la cama, generada por un ventilador de hasta 1250 mmH₂O.

Después de la Sinterización, la torta formada es descargada a un triturador rotatorio y el producto es cribado en caliente, para retirar el material fino de tamaño inferior 7 mm que no es apropiado para hacer parte de la carga de Alto Horno. La resistencia mecánica está directamente relacionada con la tendencia a la formación de finos en el transporte y manipulación desde la máquina de Sinterización hasta el tragante del horno[6].

La granulometría de los materiales cargados a la mezcla a Sinterizar juega un papel importante, puesto que al haber uniformidad de tamaños, se presenta una mejor distribución de los componentes y por acción del movimiento circular del mezclador, las partículas se agrupan formando un microaglomerado [7]. Estas partículas están formadas por un núcleo de hematita, que durante la Sinterización permanece sin fundir, rodeado por granos más finos de mineral con ganga de sílice y con una basicidad (CaO/SiO₂) determinada [8].

En el estudio realizado por Honorato 2005 [9], se examina el rango de granulometría adecuada en el Sinterizado, indicado en la Tabla 1. Donde las partículas con tamaño mayor de 1 mm actúan como núcleos, mientras que las partículas inferiores a 0,2 mm actúan como finos adherentes al núcleo. Por tanto, tamaños de partículas intermedias de 0,2 mm a 0,1 mm no tienen un papel bien definido, no son nucleantes y al aumentar el contenido de agua que se añade a la mezcla de minerales durante la microaglomeración, se adhieren a los núcleos más gruesos pero se sueltan durante el Sinterizado.

Tabla 1. Descripción de los tamaños de partículas de minerales de hierro [10].

Partículas de Sinterfeed	
Grano grueso	
Estas no tienen la capacidad de adherirse a las partículas más finas que le rodean y no contribuyen al fenómeno microaglomerado. Debe ser minimizado en la conformación de la mezcla de Sinterización.	
Nucleantes	Estructura ideal de micronodulación
Tienen la capacidad de adherirse a las partículas más finas y constituyen los núcleos de las agrupaciones en la mezcla de Sinterizado. Se debe controlar la cantidad de partículas de goetita (nucleación de altos valores de PPC y P) con el fin de evitar formación de grandes grietas en la torta del Sinterizado y aumento en el contenido de fósforo, no deben contener sílice incluido en la estructura de forma liberada. Estas características influyen en la semi-fusión del Sinter.	
Nucleantes 1	
Presentan nucleación ideales porque son más eficaces para formar la capa adherente.	
Intermedio	
Estas partículas no contienen poder de adherirse y deben minimizarse en la composición de la mezcla Sinterizar.	
Adherentes	
Son partículas que se adhieren alrededor del núcleo fácilmente durante el proceso de micronodulación. Se puede presentar diferentes características mineralógicas que influyen en los fenómenos de aglomeración en frío, formando la fase líquida durante la cocción y la calidad intrínseca del Sinter.	
Superfinas	
Ultrafinos son partículas de alimentación de Pellets. Su participación en la alimentación de Sinterización debería reducirse al mínimo, ya que contribuyen en gran medida a reducir la permeabilidad del lecho de Sinterizado.	

A los ultrafinos es conveniente realizarles un proceso diferente antes de agregarlos nuevamente a la Sinterización. La Peletización resulta ser el proceso adecuado para el reaprovechamiento del material ultrafino que es difícil de Sinterizar.

La aglomeración en forma de Pellets demuestra ser una excelente carga para el proceso de Sinterizado debido a las siguientes propiedades:

- Su forma esférica y su rango de tamaños permite una buena distribución de la carga y por tanto buena permeabilidad de la mezcla.
- Los Pellets son homogéneos en composición química y conjuntamente con la porosidad hacen posible la fusión entre partículas químicamente reducibles.

Las fuerzas que contribuyen a la formación de pellets son las fuerzas de capilaridad entre partículas debido a la tensión interfacial aire - líquido. La adición de agua que provee fuerzas adhesivas actúa como lubricante para promover la compactación durante el movimiento de rotación [11].

La experiencia muestra que cada mineral en función de su naturaleza mineralógica y dependiendo de su granulometría adsorbe una cantidad de agua más o menos importante. Es así como se puede definir para cada mineral una humedad natural, una humedad de filtración y una humedad de Peletización en el proceso de aglomeración. La humedad de Peletizado es la que conduce a que la mezcla, tenga el mejor índice de porosidad.

Las humedades están ligadas entre sí, es por eso que un mineral que tenga una fuerte humedad natural, será muy difícil de secar por filtración, demandará una cantidad significativa de agua para saturarla y necesitará una humedad elevada en el proceso de aglomeración[12].

1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

El desarrollo de la metodología experimental se llevó a cabo en dos fases. Estudio de la granulometría de los minerales de hierro y los ultrafinos de Sinter, Seguido de la búsqueda de un aglomerante con la propiedad de adherir los ultrafinos para la producción de Pellets, posteriormente un análisis de resultados y por último, análisis Estadístico de la granulometría.

1.1. METODOLOGÍA PARA ESTUDIO DE LA GRANULOMETRÍA

La primera fase consta principalmente del montaje de la planta piloto de Sinterización, un análisis fisicoquímico de los materiales para la determinación de los parámetros de operación, posteriormente un diseño experimental para minimizar las pruebas y finalmente la realización de los ensayos, simulando el proceso industrial en planta piloto.

1.1.1. Montaje de la planta piloto de Sinterizado. Se realizó la instalación de una planta piloto para simular el proceso de Sinterización industrial, teniendo en cuenta las etapas principales del proceso.

Se dispuso de una bodega de almacenamiento de materiales para el cribado, conformación de la mezcla y mezclado. El equipo principal, la máquina Sinterizadora, está compuesta por una caja de Sinterizado, equipada con un circuito de aspiración capaz de crear depresiones hasta de 1100 mmH₂O. Los equipos instalados para el control de variables del proceso como la temperatura de los gases de succión y depresión del aire a través del lecho, se conectaron a la máquina Sinterizadora piloto como se ilustra en la figura 2. Para el tratamiento del

Sinter se construyó un equipo de rompimiento siguiendo las especificaciones de un equipo para prueba sharter (ver anexo A).

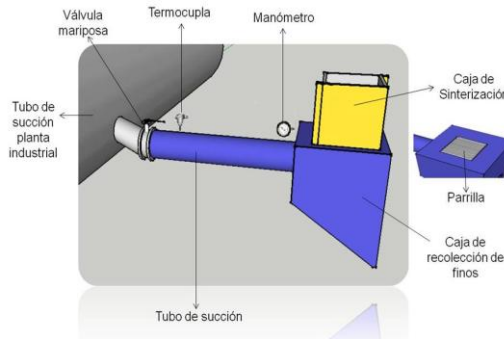


Figura 2. Plano de la planta de Sinterización de PazdelRío.

1.1.2. Caracterización de los materiales para las pruebas a nivel piloto de Sinterizado. La caracterización de los materiales que conforman la mezcla se llevó a cabo mediante un análisis químico y prueba de humedad, además de un análisis granulométrico de los minerales de hierro.

Se tomaron muestras de los materiales almacenados en la bodega de planta piloto las cuales fueron enviadas al laboratorio central de PazdelRio. En primer lugar se determinó la humedad de los materiales introduciendo 300 kg de cada material en una estufa de secado a una temperatura de $107^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 3 horas y se tomó 5 gr de cada uno de los materiales secados para el análisis químico por espectrometría de absorción atómica.

Con los resultados de humedad y análisis químico de los materiales se determinó la composición de la mezcla, realizando un balance de masa en base seca para una basicidad de 2. La basicidad se halló teniendo en cuenta la relación de los óxidos básicos y los óxidos ácidos (CaO/SiO_2) contenidos en los materiales.

Igualmente, para el análisis granulométrico de los minerales de Ubalá y Uvo-Uche, se tomó una muestra significativa de 1000 gr y se le realizó previo secado. Los minerales fueron tamizados a través de un juego de tamices de (16/12/10/7/5/3/1/0,5/0,225/0,2/0,15/<0,15mm) en orden de mayor a menor abertura, registrando el peso retenido de cada tamiz en valores absolutos y acumulados.

1.1.3. Estudio de variables que afectan el proceso de Sinterización. Una vez seleccionados y analizados los minerales de hierro, se efectuó un diseño experimental simple con un intervalo de confianza del 95% y error aceptable del 5%. Con el fin de determinar el número de réplicas necesarias para cada nivel de granulometría de los minerales de hierro (<7mm, <10mm, <12mm, <16 mm y <25 mm) utilizando la metodología de Robert O. Kuehl[13]. De tal manera que permitiera reducir el número de experimentos.

1.1.4. Realización de los Sinterizados en planta piloto: Una vez pesadas las cantidades necesarias para un flujo másico de 100Kg/por ensayo, se cargó al mezclador. El mezclado se realizó durante 4 min. Antes de sacar el material de mezclador, se tomó una muestra para humedad con el fin de determinar, si era necesario agregarle más agua para alcanzar la humedad requerida de 7%.

El material se lleva a la máquina Sinterizadora de la planta piloto, se carga hasta alcanzar una altura de 35 cm. La mezcla se sometió a ignición y simultáneamente con el encendido de la carga se abrió la válvula del tubo de succión hasta lograr su máxima depresión. Durante la ignición se registró cada minuto lecturas de la depresión y temperatura. Alcanzada la máxima temperatura, cuando ésta disminuye en 10 °C, se suspende la succión cerrando la válvula y se da por terminado el Sinterizado.

Terminado el ensayo, se lleva el Sinter obtenido a la máquina rompedora piloto donde se le realizan dos caídas, a una altura de 2 metros; seguidamente se tamiza por una malla de 7 mm y el Sinter no retenido se pesa para medir el porcentaje de finos de retorno obtenidos.

Una muestra de 25 Kg de Sinter(> 7mm) se envía al laboratorio central para medir la estabilidad por medio del ensayo Tumber. El índice de estabilidad se evalúa mediante comparación granulométrica, siguiendo la norma ASTM E279 (2005)[14].

1.2. METODOLOGÍA PARA PELETIZADO DE MATERIAL ULTRAFINO

En la segunda fase se realizó el montaje de una planta piloto de Peletizado, seguido de la caracterización química, además una prueba de filtración al vacío para la determinación de la humedad de Peletizado. Por último, la realización de una serie de pruebas con diferentes combinaciones de materiales residuales para generar un aglomerante con la propiedad de adherir los ultrafinos.

1.2.1. Montaje de la planta piloto de Peletizado. Después de haber adecuado la máquina Peletizadora (Anexo B), se ubicó cerca de la planta piloto de Sinterizado. La cual está compuesta por un disco peletizador de 180 cm de diámetro, fijándose en un ángulo de inclinación de 50°. La velocidad del disco es de 25 rpm, lo que permitió generar un correcto flujo del material y no rompimiento de Pellets.

Para el descargue de material se instaló una rampa con ángulo de caída de material de 55°, que fijó el tiempo de residencia del material sobre el disco y el tamaño final de los Pellets. Si este ángulo es pequeño produce Pellets grandes y un ángulo mayor genera Pellets pequeños dependiendo además de la velocidad de rotación del disco.

1.2.2. Caracterización de los materiales para pruebas a nivel piloto de Peletizado. Todos los materiales fueron analizados químicamente, mediante la técnica de espectrometría de absorción atómica. Igualmente, para establecer el porcentaje aproximado de humedad de Peletización se determinó la cantidad de agua absorbida por los materiales por filtración al vacío. La escoria como material aglomerante, se le tuvo que activar sus características aglomerantes mecánicamente mediante un proceso de molienda.

1.2.3. Realización de los Peletizados. Después de evaluados los ultrafinos, se desarrolló una serie de experimentos para la producción de Pellets, hasta obtener como resultado principal Pellets Sinterizables que puedan ser incorporados nuevamente al proceso.

En cada ensayo se calculó teóricamente la cantidad de material que integra la mezcla, para un flujo másico de 10 kg/ por ensayo. Luego, al material ultrafino se somete a un premezclado con los materiales aglomerantes, añadiendo agua sustancialmente hasta la formación de los primeros Pellets.

Los Pellets fueron descargados mediante una rampa instalada frente al disco de Peletizado y se llevaron a la planta piloto de Sinterización. Los ensayos en los cuales se logró Sinterizar los pellets, se tomó una muestra que fue enviada a laboratorio central para su análisis químico.

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.1. RESULTADOS DE ESTUDIO DE GRANULOMETRÍA

A continuación se presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a los materiales y con base a esto se determina la composición de la mezcla a Sinterizar, igualmente se analiza la distribución granulométrica de los minerales a estudiar, posteriormente se evalúan los resultados de los Sinterizados y por último, se presenta un análisis de varianza de los resultados.

2.1.1. Caracterización de los materiales para las pruebas de Sinterizado

2.1.1.1. Análisis químico: Los resultados obtenidos en el análisis químico se presentan en la Tabla 2. Se observa que el mineral de hierro de Ubalá presentó mejores características químicas en cuanto a su contenido de hierro con un 11,2% mayor y SiO_2 más bajo con respecto a las composiciones del mineral Uvo-Uche, así mismo los demás óxidos se mantuvieron en rangos estrechos.

Tanto en la planta de Sinterización como en el Alto Hornose pretende introducir a la carga un 90% de mineral ubalá del total de los minerales, para esto se requiere ajustar la basicidad a un valor de dos y neutralizar los óxidos ácidos introduciendo a la mezcla oxido de calcio (CaO); traducido en la cantidad de caliza y mineral agregar.

Tabla 2. Análisis químico de los materiales a Sinterizar.

ANÁLISIS QUÍMICO MUESTRAS PLANTA PILOTO							
PARAMETROS	FINOS DE SINTER	LAMINILLA	M. UBALÁ FINO	M. UVO-UCHE	CALIZA	COQUECILLO	
% SiO ₂	9,63	0,38	3,6	12	6,96	%MV(BS)	4,6
% CaO	20,25	0,25	0,7	2,9	49,57	% CENIZAS	17,1
% Al ₂ O ₃	3,6	0,1	0,6	6	1,6	%C.F.	78,2
% MgO	0,4	0,03	0,2	0,4	0,4		
% MnO	1,8	0,46	2,6	0,2	-		
% Fe	44,5	69,16	56,9	45,7	1,6		
% FeO	14,12	55,46	0,23	15,26	-		
PPC	-	-	9,4	10,9	39,4		

2.1.1.2. Humedad de los materiales: En la tabla 3, se observa la humedad natural de cada uno de los materiales que conforman la mezcla a Sinterizar, siendo representativa la humedad del mineral de Ubalá con un 13,53% por su mayor contenido. La humedad influyó en el balance de masa realizado en base seca. De igual manera, determinó la cantidad de agua a agregar para un requerimiento de humedad de la mezcla de 7%.

Tabla 3. Humedad de los minerales.

MATERIAL	HUMEDAD (%)
Laminilla	2,07
Caliza molida	0,67
Mineral fino Ubalá	13,53
Mineral fino Uvo-Uche.	8,33
Coquecillo Sinter	6,40
Finos de Sinter	0,07

2.1.1.3. Composición de la mezcla: La Tabla 4, muestra la composición de la mezcla TOTAL, dividida en un 64.7% de mezcla preliminar, 22.6% de finos de retorno (representa el 35% de la mezcla preliminar) y para lograr el poder calorífico necesario en la semi-fusión de los materiales se necesitó de 5.7% de coquecillo.

Tabla 4. Composición porcentual de la mezcla TOTAL.

Total de la mezcla a Sinterizar	
Mezcla PRELIMINAR	64,70%
%finos de retorno	22,60%
% coquecillo	5,70%
Sobreparrilla	7%

La composición de la mezcla PRELIMINAR se determinó por medio un balance de masa en base seca mostrado en la tabla 5, teniendo en cuenta la Caracterización química de los materiales para obtener una basicidad de 2, determinada en la Tabla 6.

Tabla 5. Balance de masa

MATERIAL	PESO HUMEDO Kg	MEZCLA HÚMEDA %	H2O %	PESO SECO Kg	SILICE		CALCIO		PPC		SINTER Kg
					%	Kg	%	Kg	%	Kg	
CALIZA	10,99444	17,00	0,67	10,92077	6,96	0,8	49,57	5,4	39,40	4,30278	6,61799
M. UVO- UCHE	4,85049	7,50	8,33	4,44644	12,00	0,5	2,90	0,1	10,90	0,48466	3,96178
MINERAL UBALA	43,65438	67,50	13,53	37,74794	3,60	1,4	0,70	0,26	9,40	3,54831	34,19964
FINOS DE SINTER	4,5	7,00	0,07	4,5	9,63	0,4	20,25	0,92	0,00	0,0	4,52395
LAMINILLA	0,6	1,00	2,07	0,6	0,38	0,0	0,25	0,00	0,00	0,0	0,63334
TOTAL MEZCLA PRELIMINAR	64,67316	100,00	25%	48,71829	6,34%	3,1	13,80%	6,7	17,11%	8,3	49,93670
CENIZAS COQUECILLO	0,5	0		0,5	45,00%	0,2	3,85%	0,02			0,47616

Tabla 6. Calculo de la basicidad

Peso Total SiO ₂ :	3,3
Peso Total CaO:	6,7
Basicidad Calculada (CaO/SiO ₂)	2,04

Los porcentajes de laminilla y finos de retorno se dejaron iguales a los introducidos en la conformación de pila del proceso industrial. El porcentaje total de mineral a utilizar fue del 75% (distribuido en un 90% por mineral Ubalá y 10% por mineral de Uvo-Uche) y 17% de caliza.

2.1.2. Análisis granulométrico de los minerales de hierro. En la Figura 3 y 4, se observa la distribución granulométrica acumulada y absoluta de los minerales. El mineral de Ubalá presenta un aumento significativo en el tamaño de partícula de 0,5 mm hasta 5 mm lo que indica que este mineral contiene una cantidad de material nucleante favorable para la microaglomeración de la mezcla; mientras que el mineral Uvo-Uche presenta un aumento de material intermedio entre 0,3 mm y 1 mm, características no conveniente (Honorato, 2005) ya que ni son nucleantes, ni adherentes.

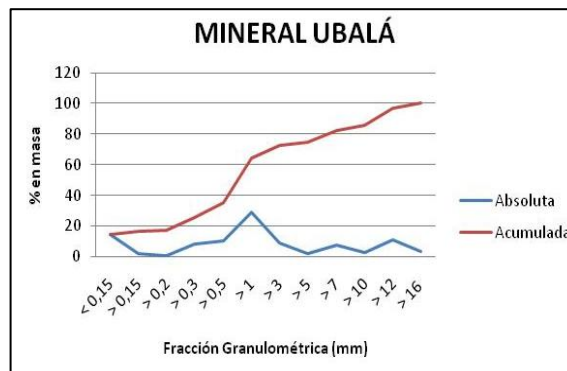


Figura 3. Granulometría del mineral de Ubalá.

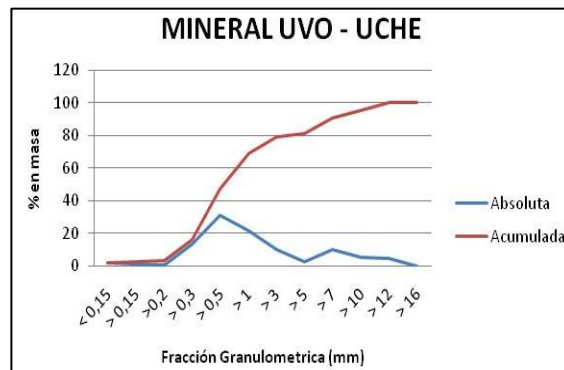


Figura 4. Granulometría del mineral de Ubalá.

También, se observa que el mineral de Ubalá y Uvo-Uche presenta un 25% y 19% respectivamente, de partícula gruesa (>7 mm) motivo de este estudio, igualmente

es significativo el contenido de ultrafinos (14%) en el mineral de Ubalá perjudiciales para el proceso.

2.1.3. Fabricación de los Sinterizados. En la tabla 7 se presenta la evolución de los Sinterizados realizados en la planta piloto de Sinterización, usando la mezcla de materiales descrita en las tablas 4.

Tabla 7. Evolución de los Sinterizados en la planta piloto.

# Ensayo	% Humedad	Granulometría	Control de variables durante el ensayo				Resultados finales						
		Mineral ubalá y Uvo-Uche	Succión (mmH2O)	Temp. Max. succión °C	Velocidad de Sinterizado (cm/min)	Tiempo de Sinterizado (min)	Peso Sinter (Kg)	Finos de retorno Kg	Producto obtenido (kg)	%Finos retorno	Rendimiento de la mezcla (%)	Densidad de la carga (Kg/m3)	Estabilidad (%)
5	7%	<7 mm	1100	288	2,3	15	52,4	28,20	75,6	37%	84%	1507	65,3
7	7%	<7 mm	1100	349	2,5	14	51,6	29,60	76,2	39%	85%	1569	64,3
8	7%	<7 mm	1100	321	2,3	15	53,3	29,00	77,3	38%	86%	1536	65,1
10	7%	<10 mm	1100	316	2,3	15	48,9	31,00	74,9	41%	83%	1510	56,7
12	7%	<10 mm	1100	305	2,5	14	51,0	30,00	76,0	39%	84%	1486	59,9
13	7%	<10 mm	1100	307	2,2	16	50,0	30,40	75,4	40%	84%	1496	52,7
15	7%	<12 mm	1100	292	2,3	15	52,0	31,80	78,8	40%	88%	1458	59,4
16	7%	<12 mm	1000	305	2,3	15	49,0	31,00	75,0	41%	83%	1477	53,3
17	7%	<12 mm	1100	312	2,3	15	52,7	30,80	78,5	39%	87%	1488	59,5
23	7%	<16 mm	1100	267	2,3	15	49,0	30,00	74,0	41%	82%	1490	57,5
24	7%	<16 mm	1100	295	2,3	15	50,1	30,00	75,1	40%	83%	1480	59,4
25	7%	<16 mm	1000	297	2,3	15	49,0	31,00	75,0	41%	83%	1486	54,7
26	7%	<25 mm	1100	313	2,3	15	52,3	30,00	77,3	39%	86%	1498	52,5
27	7%	<25 mm	1100	251	2,3	15	51,4	29,40	75,8	39%	84%	1478	59,7
28	7%	<25 mm	1100	280	2,3	15	51,0	31,80	77,8	41%	86%	1470	56,1
18	7%	ultrafinos 4 %	1000	322	2,3	15	50,0	32,00	77,0	42%	86%	1510	56,9
19	7%	ultrafinos 4 %	1000	320	2,4	16	49,3	33,00	77,3	43%	86%	1533	59,3
30	7%	ultrafinos 4 %	1000	251	2,2	16	51,3	32,40	78,7	41%	87%	1550	56,13
31	7%	ultrafinos 6%	1100	237	2,0	17	50,0	31,40	76,4	41%	85%	1520	57,8
32	7%	ultrafinos 6%	1100	238	2,0	17	48,0	34,00	77,0	44%	86%	1508	56,1
35	7%	ultrafinos 8%	1000	291	1,8	20	50,1	32,40	77,5	42%	86%	1490	56,53
36	7%	ultrafinos 8%	1100	289	1,8	20	49,8	33,60	78,4	43%	87%	1497	56,2
37	7%	ultrafinos 10%	1100	270	1,8	20	50,3	34,2	79,5	43%	88%	1501	55,93
38	7%	ultrafinos 10%	1000	278	1,8	20	51,9	33,6	80,5	42%	89%	1498	54

Los Sinterizados se fabricaron fijando como constantes varios parámetros de operación que pueden influir durante el proceso, de acuerdo con la práctica industrial, tales como:

1. Granulometría de coque y caliza menor a 3 mm.
2. Granulometría de laminilla y finos de Sinter menor a 7 mm.
3. Tiempo de mezclado de 4 min.
4. Altura del lecho 35 cm.
5. Succión de aire de 1100 mmH₂O.
6. Humedad de 7%.

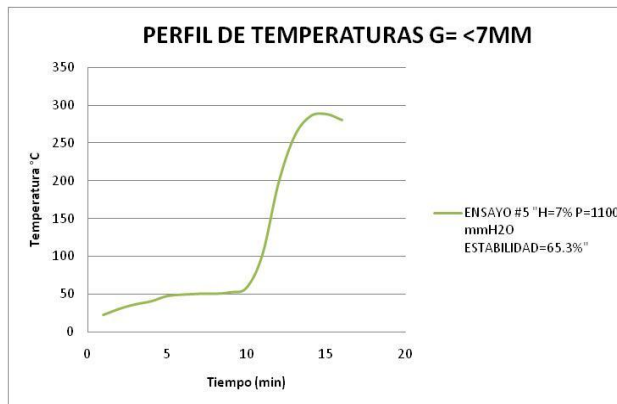


Figura 5. Perfil de temperatura durante el Sinterizado del primer ensayo.

El perfil de temperatura de los gases de succión en todas las pruebas de Sinterizado fue similar a la ilustrada en la figura 5. Este perfil da un indicio de la evolución del frente de llama durante la cocción en la caja de Sinterizado, además de haber sido el parámetro de finalización del ensayo una vez la temperatura adquirió su máximo valor y descendió en 10°C.

Aunque la máxima temperatura llegó a valores diferentes durante todos los Sinterizados, el tiempo de duración por ensayo fue casi constante con un promedio de 14,9 min, lo que indica que la planta industrial para lograr la Sinterización completa de la mezcla debe trabajar a una velocidad de 2,3 cm/min.

El cambio en la densidad de la carga se debe a la variación de granulometría. Al introducir la mezcla en la caja de Sinterización, se buscó que la fuerza con la que se distribuyera el material fuera la misma, puesto al introducirlo manualmente permite manipulación, lo que afecta el comportamiento del Sinterizado.

Los mejores Sinterizados, desde el punto de vista de su resistencia, fueron conseguidos para las mezclas 5, 7 y 8, con un índice promedio de Tumbler del 65 %. Necesitando un tiempo promedio de Sinterizado de 14 min, succión e 1100 mmH₂O y humedad de 7%.

2.2. RESULTADOS DE ULTRAFINOS EN LA MEZCLA A SINTERIZAR.

Se remplazaron los porcentajes nombrados en la tabla 8, por una misma cantidad de mineral de Ubalá, agregándose de forma progresiva y observándose notablemente la reducción de la estabilidad, hasta un 10% con relación a la máxima obtenida.

Tabla 8. Porcentajes de ultrafinos introducidos a la mezcla

<u>% ULTRAFINOS AGREGADOS</u>	<u>ESTABILIDAD</u>
ultrafinos 4 %	56,90
Ultrafinos 4 %	59,30
Ultrafinos 4 %	56,13
Ultrafinos 6 %	57,80
Ultrafinos 6 %	56,10
Ultrafinos 8 %	56,53
Ultrafinos 8 %	56,20
ultrafinos 10%	55,93
ultrafinos 10%	54,00

En la Figura 6, Se observa el aumento en la cantidad de finos de retorno generados en los 7 últimos ensayos, al haber introducido ultrafinos (<0,15 mm) nuevamente al proceso. De igual manera, se aumentó el tiempo necesario para la Sinterización de 15 min a 20 min.

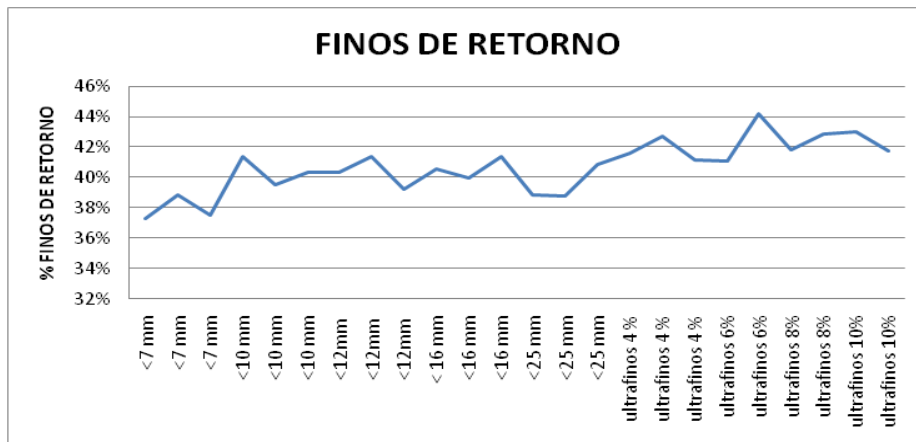


Figura 6. Porcentaje de finos de retorno generados durante los Sinterizados.

2.3. RESULTADOS PELETIZADO

Se presentan los análisis químicos y de humedad obtenidos del laboratorio central PazdelRio a los materiales ultrafinos. De igual manera, la evolución de los Peletizados.

2.3.1. Análisis de humedad. En la Tabla 9, se encuentra los resultados obtenidos de la prueba de humedad por filtración al vacío. Los materiales estudiados tienen una característica en común, son derivados de productos con un tratamiento térmico previo, siendo menor su permeabilidad ya que la mayor parte de los materiales son ultrafinos (< 0.5 mm), absorbiendo mayor cantidad de agua debido a su mayor superficie de contacto y disminución de espacios libres entre las partículas. Se obtuvo este comportamiento en casi todos los materiales formando una capa de agua en la superficie, impidiendo el paso de ésta, excluyendo a los finos de coque que por su granulometría y características presentaron mejor permeabilidad al paso del agua.

Teniendo en cuenta que la humedad de Peletizado está por debajo de la humedad de saturación, el porcentaje más indicado para iniciar el estudio estaría alrededor del 25% por la gran cantidad de agua que absorbieron los materiales finos.

Tabla 9. Porcentaje de agua absorbida en los materiales a Peletizar.

Número de ensayo	Material	Tiempo de filtración (min)	Agua retenida (ml)	% de agua absorbida
1	Cal viva	120	40	28.57%
2	Finos de coque	40	20	17%
3	Caliza	100	45	31%
4	Escoria	90	39	28.6%
5	finos de Sinter	100	50	33%
6	Mezcla(cal viva, finos de coque y bentonita)	140	51	28.5%
7	Mezcla(caliza, finos de coque y bentonita)	120	50	33.3%
8	Mezcla(escoria , finos de coque y bentonita)	120	49	32.8%

2.3.2. Análisis químico de los materiales a Peletizar. En Tabla 10, se presenta la composición química de los materiales a estudiar, donde se destaca principalmente el %SiO₂ por ser el principal aportante del volumen de escoria que forma la masa de Sinter y le da la resistencia necesaria para su uso en el Alto Horno, el %CaO cuyo efecto es regular la basicidad del Sinter, actuando como fundente en la carga del Alto Horno. También, se observa el contenido de hierro metálico que se puede recuperar de cada uno de los materiales ultrafinos.

Tabla 10. Análisis químico de los materiales a estudiar para la formación de Pellets con material ultrafino.

Materiales	%SiO ₂	%CaO	%Al ₂ O ₃	%MgO	%MnO	PPC	%Fe	%FeO	%Fe ₂ O ₃
Cal Viva	6	1,2	85,8	0,6	-	4,3	-	-	1,3
Bentonita	39,4	0,46	1,47	37,31	-	0	4,8	-	7
Ultrafino B-182	9,74	14,77	3,6	0,4	2,4	0	47,4	3,6	63,7
Polvillo AH	4,4	8,9	0,9	1,2	5,5	2,2	46,85	6,71	59,56
Ultrafino Ubalá	4,2	2,8	0,5	0,2	3,7	12,3	52,8	0,1	75,39
Polvillo de la acería	9,8	11	3,8	0,3	1,4	-	50,7	9,8	61,6
Ultrafino A-182	12	18,1	3,3	0,4	2,1	-	43,6	2,3	59,3
Escoria baja en Fósforo	31,26	39,87	1,3	2	0,9	6,8	18	11,7	-

2.3.3. Peletizados. En la Tabla 11 se muestran los ensayos realizados para Peletizar los ultrafinos generados durante todo el proceso Siderúrgico y los tipos de aglomerantes utilizados.

Tabla 11. Resultados de ensayos de peletizado con todos los ultrafinos generados en PazdelRio con diferentes combinaciones de aglomerantes.

Ensayo, núm.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
AGLOMERANTES							
%Cal viva (< 0,2 mm)	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
%Bentonita (< 0,15 mm)	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
%Coquecillo (< 3 mm)	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
COMPOSICIÓN							
%Ultrafinos A-182 (<0,5 mm)	-	-	-	-	30%	-	10%
%Ultrafinos B-182 (<0,1 mm)	79%	-	-	35%	35%	-	80%
%Ultrafinos B-509 (<0,15 mm)	-	79%	-	-	-	-	10%
%Polvillo del alto horno (<0,15 mm)	-	-	-	30%	-	-	-
%Polvillo de acería (<0,15 mm)	-	-	79%	35%	35%	-	-
%Ultrafino ubalá (<0,15 mm)	-	-	-	-	-	79%	-
CANTIDADES							
Contenido total de mezcla (Kg)	10	10	10	10	10	10	10
Cant. Caliza (Kg)	0	0	0	0	0	0	0,0
Cant. Cal viva (Kg)	1	1	1	1	1	1	1,0
Cant. Bentonita (Kg)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,1
Cant. Coquecillo (Kg)	1	1	1	1	1	1	1
Cant. Total de ultrafinos (Kg)	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
Cant. A-182 (Kg)	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
Cant. B-182 (Kg)	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
Cant. B-509 (Kg)	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
PARAMETROS							
Humedad (%)	25	20	8	16m	16	14	20
Angulo (°)	50	50	50	50	50	50	50
Velocidad (rpm)	25	24	22	28	25	24	22
Duración de peletizado (min)	15	20	25	14	13	12	15
SINTERIZADO							
Cantidad de pellets Sinterizados (Kg)	9,6	8,9	7,9	8,6	8,7	9,4	8,8
Temp máx. (°C)	170	148	159	168	190	179	154
Presión de succión (mmH ₂ O)	300	400	350	300	300	400	300
Duración del Sinterizado (min)	10	13	12	13	14	12	10
Cantidad de Sinter obtenido (Kg)	7,4	6,2	5,6	7,5	7,9	8,5	8
RESULTADOS DE LAB. PDR							
% SiO ₂	10,97	11,61	5,8	10,83	10,94	9,74	11,48
% CaO	18,09	19,27	12,45	18,38	17,79	13,94	20,16
% Al ₂ O ₃	3,3	3,9	1,8	4	3,8	3	4
% MgO	0,4	0,5	0,7	0,5	0,5	0,4	0,5
% MnO	3,1	2,9	1,6	2,2	2,5	3,7	3,3
% Fe TOT.	45	43,4	54,5	46,2	46,5	49,3	42,8
% FeO	19,7	20,1	21,9	31,5	30,8	28,1	23
% Fe ₂ O ₃	42,5	39,7	53,6	31,1	32,3	39,4	35,8
Basicidad	1,65	1,66	2,14	1,7	1,63	1,43	1,76

Algunos materiales ultrafinos (<0,15 mm) peletizaron (ensayos P1, P2, P3 y P6) sin necesidad de combinarlos con otros, utilizando una mezcla de aglomerantes compuesta por cal viva, finos de coque y bentonita.

Para los ultrafinos del MulticiclónA-182 y Polvillos del Alto Horno, se realizó una mezcla de los ultrafinos que sí peletizaron (ensayos P4 y P5), utilizando la misma combinación de aglomerantes.

Los tamaños de pellets producidos estuvieron entre 5 mm y 40 mm indicados en las Figuras 7, 8 y 9.



Figura 7. Briquetas



Figura 8. Pellets entre 2-8 mm



Figura 9. Pellets entre 2-20 mm

Los Pellets se llevaron a la planta piloto de Sinterización donde se sometieron a un proceso de Sinterización con los parámetros nombrados en la Tabla 11, e ilustrando su proceso en (Figuras 10 y 11). Los resultados fueron satisfactorios en cuanto a las características químicas requeridas, pero produjeron un Sinter frágil y por tanto generación de más finos de reproceso.



Figura 10. Ignición del Sinterizado en planta piloto



Figura 11. Torta de Sinter

En la tabla 12, se muestran los ensayos realizados con material ultrafino de Sinter utilizando como aglomerantes caliza, alquitrán y escoria de la acería.

Tabla 12. Resultados de ensayos de Peletizado de los ultrafinos de Sinter con diferentes combinaciones de aglomerantes.

Ensayo, núm.	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
AGLOMERANTES								
%Cal viva (< 0,2 mm)	5%	5%	10%	20%	-	-	-	-
%Caliza (<3 mm)	9%	8%	-	-	-	-	-	-
%Bentonita (< 0,15 mm)	2%	2%	1%	-	-	-	-	-
%Coquecillo (< 3 mm)	9%	10%	10%	8%	9%	10%	10%	7%
% Escoria (< 1 mm)	-	-	-	-	21%	20%	20%	17%
% Alquitrán	-	-	-	10%	-	-	-	-
COMPOSICIÓN								
%Ultrafinos A-182 (<0,5 mm)	10%	10%	10%	10%	10%	-	10%	10%
%Ultrafinos B-182 (<0,1 mm)	80%	80%	30%	80%	80%	-	80%	80%
%Ultrafinos B-509 (<0,15 mm)	10%	10%	10%	10%	10%	-	10%	10%
%Ultrafino ubalá (<0,15 mm)	-	-	-	-	-	70%	-	-
% Finos de retorno(<7 mm)	-	-	50%	-	-	-	-	-
CANTIDADES								
Contenido total de mezcla (Kg)	10,7	10,4	10	10	11,7	10	10	10
Cant. Caliza (Kg)	1,0	0,5	-	-	-	-	-	-
Cant. Cal viva (Kg)	0,5	0,8	1	2	-	-	-	-
Cant. Bentonita (Kg)	0,2	0,2	0,1	-	-	-	-	-
Cant. Alquitrán (Kg)	-	-	-	1	-	-	-	-
Cant. Coquecillo (Kg)	1	1	1	0,8	1	1	1	0,7
Cant. Escoria (Kg)	-	-	-	-	2,5	2	2	1,7
Cant. Total de ultrafinos (Kg)	7,6	7,5	7,9	6,2	8,2	7	7	7,6
Cant. A-182 (Kg)	0,79	0,79	0,79	0,62	0,82	0,7	0,7	0,76
Cant. B-182 (Kg)	6,32	6,32	2,37	4,96	6,56	5,6	5,6	6,08
Cant. B-509 (Kg)	0,79	0,79	0,79	0,62	0,82	0,7	0,7	0,76
Cant. Finos de retorno (Kg)	-	-	3,95	-	-	-	-	-
PARAMETROS								
Humedad (%)	30	32	20	25	23	23	23	24
Angulo (°)	50	50	50	50	50	50	50	50
Velocidad (rpm)	20	20	25	25	25	25	25	25
Duración de peletizado (min)	20	25	12	15	25	14	10	15
SINTERIZADO								
Cantidad de pellets Sinterizados (Kg)	8,6	8,9	9,5	9,2	9,51	9,7	9,9	10,0
Temp máx. (°C)	180	140	164	175	167	168	169	170
Presión de succión (mmH ₂ O)	300	400	300	300	300	300	300	300
Duración del Sinterizado (min)	10	10	8	12	12	10	12	14
Cantidad de Sinter obtenido (Kg)	7,2	7	8,1	7				
RESULTADOS DE LAB. PDR								
% SiO ₂	11,74	12,71	10,59	12,47	12,05	12,13	12,21	12,3
% CaO	20,46	21,35	19,57	24,32	23,40	24,14	24,89	25,6
% Al ₂ O ₃	4,2	4,5	3,9	3,9	4,0	3,9	3,9	3,8
% MgO	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
% MnO	3,5	4,5	4,8	3,7	4,6	4,8	5,0	5,2
% Fe TOT.	42,2	40,3	42,5	38,8	39,0	46,2	43,9	48,3
% FeO	26,3	30,1	7,6	19,1	20,3	29,1	28,9	30,2
% Fe ₂ O ₃	31,3	24,3	41,2	34,4	35,5	36,2	37,0	37,7
Basicidad	1,74	168	1,85	1,95	1,89	2,01	1,99	1,87

Para los ensayos (P8 y P9) se utilizó caliza como aglomerante pero se tuvo que agregar un 5% de cal viva y 2% de bentonita para lograr la formación de pellets, por tanto se demuestra que la caliza no proporciona buenos resultados.

La utilización de alquitrán como aglomerante produjo pellets con buena distribución de tamaños que se lograron Sinterizar, pero no es conveniente utilizarlo porque durante la combustión genera vapores, que al contacto con el polvo son explosivos.

Por último, se realizó una previa investigación teórica para la utilización de escoria como aglomerante, que generó la idea de activar sus propiedades adherentes por medio mecánico (molienda de la escoria). Entre más finos (< 0,2 mm) presenta, mejores características. Se realizaron tres ensayos (P13, P14 y P15) utilizando escoria baja en fósforo. El análisis granulométrico absoluto y acumulativo de los pellets obtenidos en las pruebas con escoria se muestra en la Figura 12 y 13.

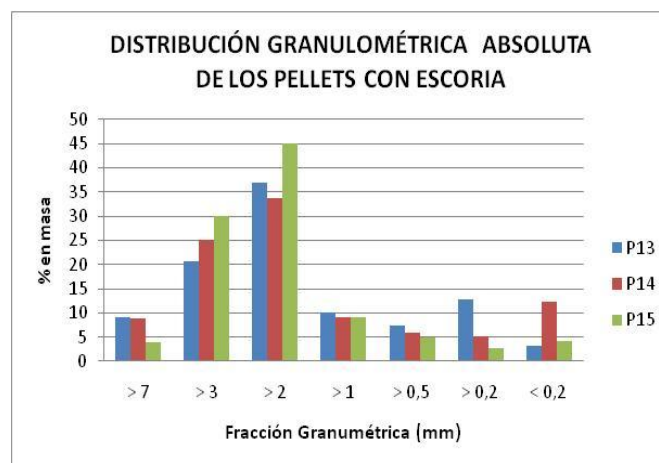


Figura 12 . Análisis granulométrico absoluto de los pellets

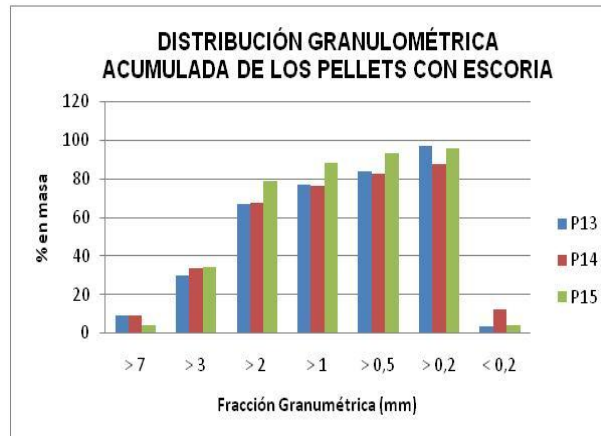


Figura 13. Análisis granulométrico acumulado de los pellets

En la figura 12, alrededor del 85% de los pellets obtenidos están en el rango de 1 mm a 7 mm, datos acordes con la distribución de granulometría que se requiere para el proceso de sinterizado. Es representativo un promedio del 38,5 del material entre 2mm y 3 mm.

En la figura 13, se observa que más del 95% del material ultrafino de sinter fue recuperado y llevado a la granulometría requerida para la sinterización de los pellets, tan solo el 4% de los pellets está por debajo de 0,2 mm.

Estos pellets fueron llevados a la planta de Sinterización, obteniendo sinter con características adecuadas mostradas en la tabla 12 (ensayos 14 y 15). Los resultados son ilustrados en la figura 14.

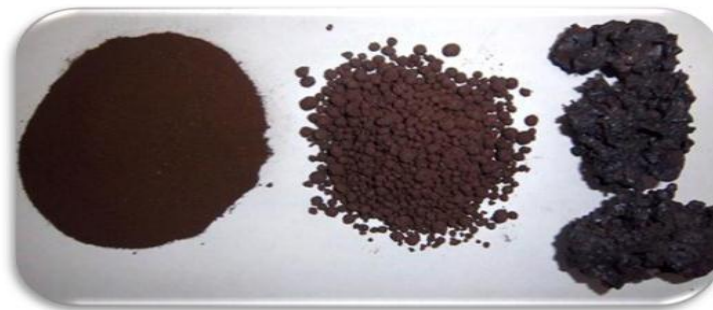


Figura 14. Sinter a partir de Pellets con ultrafinos de Sinter.

2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA

2.4.1. Análisis de la granulometría por Caja de bloques

Los resultados de estabilidad de las pruebas con granulometría de mineral mayor a 7 mm, se ilustran por medio de un Boxplot.

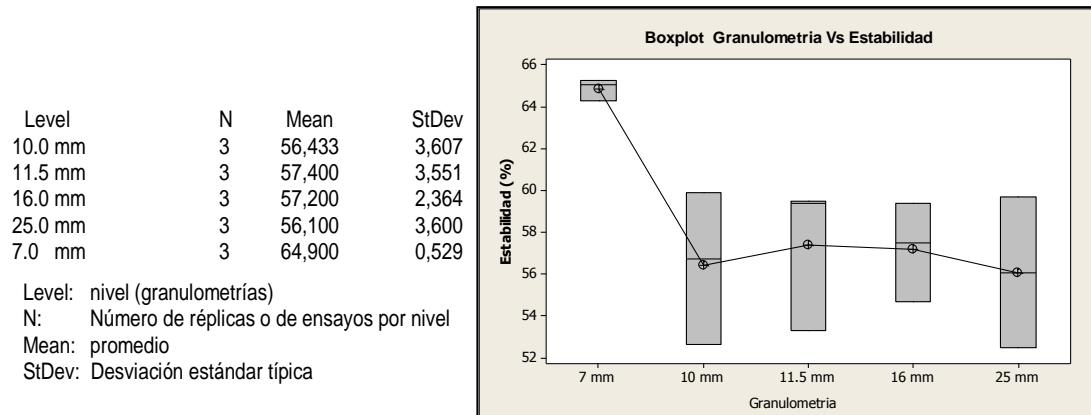


Figura 15. Variabilidad de la estabilidad con respecto a la granulometría.

En la Figura 15. Se observa que el rango de granulometría que logró la mejor estabilidad (65%) se encuentra entre 0,15 mm y 7 mm. Para granulometrías entre 10 mm y 25 mm el promedio de estabilidad fue del orden del 57% con valores muy bajos con respecto a lo esperado.

2.4.2. Análisis de Varianza

Para demostrar que tan significativa es la influencia de la estabilidad en el Sinter, se realiza un análisis de varianza (ANOVA) que proporciona información más profunda de la hipótesis estudiada:

- ✓ hipótesis nula: la granulometría no es significativa
- ✓ hipótesis alternativa: la granulometría es altamente significativa.

Para un nivel de confianza del 95%, la hipótesis nula se rechazará si el valor de P es menor que 0,05 y se acepta la hipótesis alternativa.

Tabla 13. Análisis de varianza

One-way ANOVA: ESTABILIDAD versus GRANULOMETRIA

Source	DF	SS	MS	F	P
GRANULOMETRIA	4	161,54	40,39	4,54	0,024
Error	10	88,91	8,89		
Total	14	250,45			
S = 2,982		R-Sq = 64,50%			R-Sq(adj) = 50,30%

ANOVA: Análisis de varianza

Source: fuente de variación

DF: grados de libertad

SS: suma de cuadrados

MS: suma de cuadrados medios

F: estadística F

P: probabilidad

S: desviación estándar de todos los datos

R-Sq: coeficiente de correlación

En la Tabla 13, el análisis de varianza (ANOVA) indica que P es igual a 0,024 con lo que se rechaza la hipótesis nula (P es menor que 0,05) y se acepta la hipótesis alternativa indicando que la granulometría del mineral de hierro influye significativamente en la estabilidad del Sinter.

CONCLUSIONES

- La puesta en marcha de las plantas piloto permitió que la planta de Sinterización de PazdelRío tenga unos elementos muy útiles de investigación, que contribuyen a las mejoras que se quieren realizar para obtener un producto de mejor calidad y amigable con el medio ambiente.
- Se demostró que la granulometría influye significativamente en la estabilidad del Sinter arrojando mejores resultados con granulometrías menores a 7 mm.
- Se observó una influencia negativa al introducir a la mezcla diferentes porcentajes de Ultrafinos (0,15 mm) de los multiciclones A-182 y B-182, disminuyéndose la estabilidad hasta un 10%, aumentando el tiempo necesario para la Sinterización de 15 min a 20 min y generando nuevamente un 40% de finos de retorno, siendo el 10% de éstos nuevamente ultrafinos.
- Se demostró que todos los materiales ultrafinos (< 0,15 mm) producidos en el proceso de Siderúrgico son Peletizables y Sinterizables, lográndose recuperar un promedio del 47% tenor de hierro en Sinter a partir de ellos.
- La distribución granulométrica obtenida en los Pellets con los ultrafinos de Sinter y los aglomerantes utilizados, muestra que el 97% del material ultrafino inicial, es transformado en un material Sinterizable (mayor a 0,2 mm) mediante el proceso de Peletización.
- El aglomerante que presenta mayor interés a nivel industrial y económico, es la escoria baja en fósforo, por cumplir con las características químicas requeridas, distribución granulométrica adecuada, bajo costo por ser un pasivo ambiental en la Planta y no utilizado en ningún proceso productivo en la

actualidad y principalmente, la reincorporación del material ultrafino de Sinter al proceso, en forma de pellets que se demostró son Sinterizables.

RECOMENDACIONES

- Para cumplir con las especificaciones que se establecen en este trabajo, la planta de trituración necesita de cambios, para lo cual se hace necesario introducir una operación de humidificación o secado del mineral de Ubalá por ser el más significativo en la mezcla, que ayudaría a mejorar el proceso de Sinterizado y al cumplimiento con los parámetros determinados.
- Planear una serie de pruebas teniendo en cuenta un diseño experimental, con el fin de verificar las cantidades mínimas de finos de coque y escoria a utilizar, para disminuir costos en combustible y generar la mejor distribución granulometría de pellets a Sinterizar.
- El proyecto abre la posibilidad para que la planta de Sinterización pueda aumentar su productividad en aproximadamente un 3%, aprovechando el material ultrafino en la producción de Sinter, contribuyendo a que el proceso Siderúrgico en PazdelRío aprovechando residuos no utilizados actualmente y obtenga un equilibrio en el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. CORES* J. MOCHÓN*, I. RUIZ-BUSTINZA* Y R. PARRA** Control del avance del frente de llama en el lecho de Sinterización [Publicación periódica] // REVISTA DE METALURGIA. - 2010. - pág. 11.
- [2] A. CORES* S. FERREIRA* Y M. MUÑIZ** Racionalización de mezclas de minerales de hierro para la obtención [Publicación periódica] // REVISTA DE METALURGIA. - Mexico : [s.n.], mayo-junio de 207-222, 2009. - pág. 16.
- [3] ANTONIO FORMOSO* ALFREDO MORO**, GERARDO FERNÁNDEZ-PELLO***, MOISÉS MUÑIZ***, Estudio de la granulación de la mezcla de minerales de hierro en el proceso [Publicación periódica] // REVISTA DE METALURGICA . - 2000. - pág. 12.
- [4] ANTONIO FORMOSO* ALFREDO MORO**, GERARDO FERNÁNDEZ-PELLO***, MOISÉS MUÑIZ***, Estudio de la granulación de la mezcla de minerales de hierro en el proceso [Publicación periódica] // REVISTA DE METALURGIA. - 2000. - pág. 10.
- [5] F. GARCIA - CARCEDO N. AYALA, ISIDRO A. Y A. MORO N. CORNEJO, S. FERREIRA, A. HERNANDEZ, A. COBO, E. ALAIZ Y J.R GARCÍA Posibles actuaciones para la minimización del impacto ambiental de los humos de la Sinterización siderúrgica [Publicación periódica] // REVISTA DE METALURGICA. - 2004. - pág. 4.

[6] Garbers-Craig* E. Lwamba* and A.M. Control of the grain size distribution of the raw material mixture in the production of iron Sinter [Publicación periódica] // Template Journal. - 2008. - pág. 8.

[6] HERNANDEZ ALBERTO WAKED y CRUZ HERNANDO MONROY Estudio de los parametros de Sinterización y características fisico-químicas y micrográficas del Sinter para mejorar la estabilidad [Libro]. - TUNJA : [s.n.], 1970.

[7] LUIS OSACAR BENITEZ GUEVARA DANIEL GARCIA MUÑOZ Estudio de los Efectos de la adición de mineral de olivino a la mezcla de sinter en Acerías Paz del Río S.A. [Publicación periódica] // Monografía . - 1994. - pág. 2093.

[8] JORGE VON BERGEN ARMANDO PETTOROSSO, DANIEL SCHNIDRIG, PEDRO ETCHEVARNE, BEATRIZ DOGLIANI, DANIEL DALMASO, SILVINA RAMOS, MARTÍN DOMINGUEZ, SOLEDAD OREGGIONI agglomeration process in the briquette form to be used in the blast furnace [Publicación periódica] // Instituto Argentino de Siderurgia. - 2009. - pág. 7.

[9] HONORATO EDILSON PINTO “Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.S.F), para melhorias na produtividade e qualidade do sinter para os altos-fornos” [Publicación periódica] // Prof. Dr. Ing. Varadarajan Seshadri. - 2005. - pág. 126.

[10] M.D. Salvador* V. Bonache*, V. Amigó* y D. Busquets* Estudio del comportamiento durante la Sinterización de mezclas WC-Co finas, ultrafinas y nanocristalinas obtenidas por molienda de alta energía [Publicación periódica] // REVISTA DE METALURGIA . - 2004. - pág. 14.

[11] IBAMOSO EMERSON AVELLA* EDGAR DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA MAQUINA PELETIZADORA PARA ABONO PAZDELRIO [Sección de libro]. - TUNJA : Facultad de ingenierias- Escuela de metarurgica, 2005.

[12] FERREIRA ENRIQUE Estudio de los parametros de Sinterización y características Físico- químicas y micrograficas del Sinter para mejorar la estabilidad. [Sección de libro]. - Belencito : [s.n.], 1970.

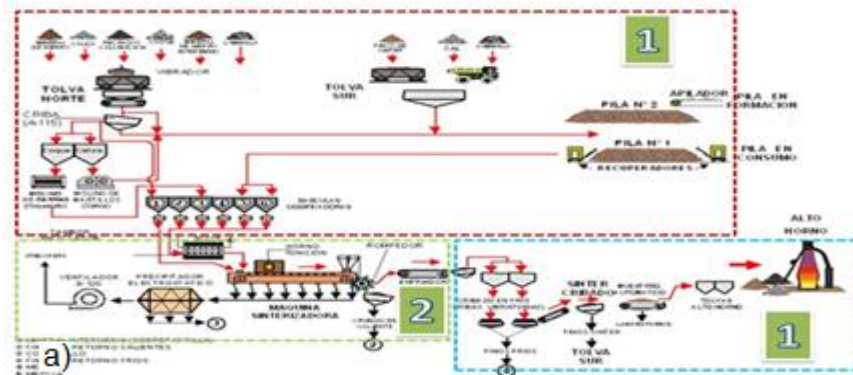
[13] KUEHL ROBERT O. Principios Estadísticos para el diseño y analisis de investigaciones [Libro]. - Mexico : Thomson Learning, 2001.

[14] E279-97 Standard Test Method For Determination Of Abrasión Resistance Of Iron Ore Pellets And Sinter By The Tumber Test . - Reapproved 2005.

ANEXOS

ANEXO A. MONTAJE DE LA PLANTA SINTERIZADORA

Se realiza una descripción detallada de la instalación de la planta piloto que permite simular de forma adecuada las operaciones más importantes del proceso de Sinterización: 1) preparación de la carga, 2) Sinterización de la mezcla y 3) tratamiento del Sinter enviado a Alto Horno, descritas en el gráfico a).



Adecuación de equipos para la preparación de la carga

Para simular las operaciones descritas en figura b), se construyó un juego de tamices de 3, 5, 7, 10, 12, 16 y 25 mm para la selección de las materias primas según la especificación granulométrica requerida; para los procesos de homogenización, humidificación y nodulación se adecuó un mezclador de concreto tipo trompo que cuenta con un juego de aspas que permiten la caída de materia en forma de cascada, simulando de forma adecuada el proceso de mezclado que realiza del trommel industrial en la planta de Sinterización (figura c).

OPERACIÓN	EQUIPO INDUSTRIAL	EQUIPO PILOTO
Recepción y almacenamiento de materias primas	Tolva norte y tolva sur	Bodega de almacenamiento materias primas
Molienda y cribado	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Molino de martillos para caliza ✓ Molino de barras para Coque. ✓ Cribado industrial. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ caliza y coquecillo de molinos planta industrial. ✓ Juego de tamices. ✓ cribado manual.
Dosificación	patios de mezcla	Pesado y cargado en canecas
Homogenización	2 recuperadores	Mezclador de concreto tipo trompo. 3 minutos
Humidificación	Tromel	Mezclador de concreto tipo trompo. 2 minutos
b) nodulación	Tromel	Mezclador de concreto tipo trompo. 2 minutos



Montaje principal de Sinterización

Para simular el proceso de Sinterización (figura d), se instaló el equipo principal, la máquina Sinterizadora (Figura e), que está compuesta por una caja de Sinterizado de 40 cm de sección transversal, una parrilla cuadrada de 30 cm de lado y un tubo de succión anexo al tubo de succión principal de la planta industrial, capaz de crear depresiones hasta de 1150 mmH₂O. Los equipos instalados (termocupla y manómetro) para el control de variables del proceso como la temperatura de los gases de succión y depresión del aire a través del lecho, se conectaron a la maquina Sinterizadora piloto.

OPERACIÓN	EQUIPO INDUSTRIAL	EQUIPO PILOTO
Carga de la mezcla	Rodillo dosificador B-108	Manual
Encendido de la mezcla	Horno de ignición. Combustible: gas de coque	800 gr carbón vegetal y aserrín
Cocción	Maquina Sinterizadora.	Caja Sinterizadora
d) Succión	Ventilador industrial	Tubo de succión planta industrial
control succión	Aerodinas (Dumper)	Válvula tipo mariposa

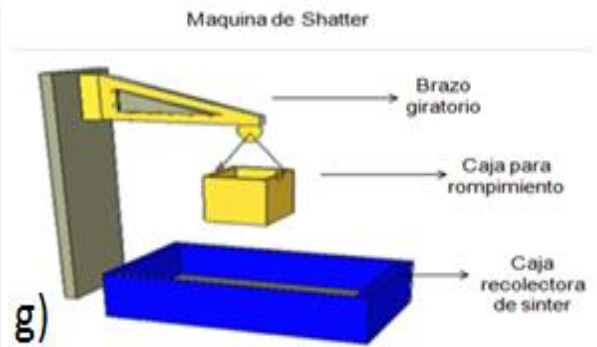


Construcción de equipo para el tratamiento del Sinter

Para el tratamiento del Sinter se construyó un equipo de rompimiento que simule las operaciones descritas en la figura f), siguiendo las especificaciones de un

equipo para prueba sharter. Consta de una caja para introducir la torta Sinterizada que se eleva hasta una altura de 2 m por medio de una diferencial enganchada a un brazo grúa, sistema que permite el rompimiento al caer a una segunda caja de acero para la recolección de Sinter (figura g).

OPERACIÓN	EQUIPO INDUSTRIAL	EQUIPO PILOTO
Trituración	Martillos rompedores de impacto	Maquina de Shatter
Cribado en caliente	Criba industrial	Cribado manual
Enfriamiento	Ventiladores	Medio ambiente
f) Caracterización	Laboratorio Materias primas Paz del Rio	Laboratorio Materias primas Paz del Rio



ANEXO B.MONTAJE DE LA PLANTA PILOTO DE PELETIZADO

Después de diseñar y llevar a cabo la construcción de la maquina Peletizadora (Figura h), esta se ubicó cerca de la planta piloto de Sinterizado (Figura e). La máquina peletizadora funciona con un motor–reductor de 3HP, Trifásico, Voltaje de 440v.



Para evitar que el material a peletizar se pegue y forme costras, se construyó una estructura para el cepillo raspador que permite sujetarlo y mantenerlo en su posición de trabajo. Estos fueron colocados a una distancia de la pared del disco para que no produzca fricción y a un ángulo adecuado para prevenir que se pegue el material y forme pellets no homogéneos.

El disco se fijó en un ángulo de inclinación de 50° , al cual se generaron pellets con la distribución granulométrica deseada. La velocidad del disco es de 25 rpm, ésta permitió generar un correcto flujo del material y no rompimiento de pellets.

Para el sistema de rocío se realizó la instalación de flauta tipo regadera, encargada de dar la humedad requerida para la formación homogénea de los pellets.

Para el descargue de material se instaló una rampa con ángulo de caída de material de 55° , este fija el tiempo de residencia del material sobre el disco y el

tamaño final de los pellets. Si este ángulo es pequeño produce pellets grandes y un ángulo mayor genera pellets pequeños dependiendo además de la velocidad de rotación del disco.

ANEXO C. PROCEDIMIENTO PARA PRODUCCIÓN DE SINTER EN LA PLANTA PILOTO.

Preparación de la planta.



- ✓ Verificar funcionamiento de mezcladora
- ✓ Armar y hermetizar las paredes de la caja de Sinterizado con silicona.
- ✓ Hacer aseo a caja de rompimiento, caja de recolección de finos y limpieza a los barrotes de sobreparrilla.
- ✓ Colocar diferencial e izar la caja para el equipo de rompimiento en caliente.
- ✓ Romper y seleccionar el carbón vegetal.
- ✓ Pesar 1000 g de carbón vegetal.
- ✓ Pesar 400 g de aserrín y se humedecido con gasolina.

Preparación de mezcla

Flujo másico de la planta piloto 100 Kg/ensayo

Granulometría utilizada:

Material	Granulometría
Mineral uvo-uche	Nivel a estudiar
Mineral Ubalá	Nivel a estudiar
caliza	< 3 mm
Coquecillo	< 3 mm
Laminilla	< 7 mm
Finos de Sinter	< 7 mm
Sobreparrilla	16 mm – 25 mm

Datos resultado	Cantidad	Unid.
Mezcla preliminar	64,7	Kg
Uvo -Uche	4,9	kg
Ubalá	43,7	kg
Caliza	11,0	kg
Laminilla	0,6	kg
Finos Sinter	4,5	kg
Finos de retorno	22,6	Kg
Coquecillo	5,7	kg
Sobreparrilla	7	kg
relación caliza/mineral	226,7	
Volumen de H2O	3500,0	ml
Cant. Agua	3,5	kg

Preparar cantidades previamente calculadas.



- ✓ La mezcla se realizó en la bodega de planta piloto donde se encuentra ubicada la mezcladora.
- ✓ Humedecer el mezclador para evitar alteraciones de humedad del ensayo.
- ✓ Adicionar primero la mezcla seca y luego el agua.
- ✓ adicionar de agua para llevar a cabo la microaglomeración en el mezclador.

Mezclar durante:

Preparación de la mezcla	Tiempo (min)
Mezcla inicial de los materiales en seco	3
Mezcla con adición progresiva de agua, hasta alcanzar humedad deseada	2
Mezcla final para obtener una buena humidificación	3

- ✓ La medición de humedad se hizo primero palpándola, hasta que al apretar con la mano se viera la adherencia del material.
- ✓ tomar una muestra para medir humedad en sensor del tromel, registro 7%.

Procedimiento para llevar a cabo el Sinterizado



- ✓ trasladar mezcla desde la cuadrilla especial.
- ✓ Cargar la mezcla manualmente al segundo piso para realizar Sinterizado.
- ✓ Cargar la mezcla a la caja de Sinterizado manualmente asegurando uniformidad.
- ✓ Pesar la mezcla no adicionada
- ✓ Adicionar carbón vegetal y aserrín humedecido con gasolina.
- ✓ Con una antorcha prender el aserrín al mismo tiempo se abre toda la válvula de succión.
- ✓ Simultáneamente arrancar el cronometro.
- ✓ Registrar temperatura de gases de salida y presión de succión.
- ✓ La Sinterización se termina cuando la temperatura de los gases de succión empiecen a descender.

Descarque de la torta



- ✓ Se desmontaron las paredes de la caja de Sinterizado y se procedió a romper inmediatamente.
- ✓ Para determinar la cantidad de finos de retorno se tamizo el Sinter en la malla de 7 mm.

Control del proceso

Tiempo (min)	ENSAYO #	
	Temperatura (°C)	Presión (mmH2O)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
10,5		
11		
11,5		
12		
12,5		
13		
13,5		
14		
14,5		
15		
Succión planta		

Resultados Finales

RESULTADOS FINALES	Unid
peso Mezcla preliminar preparada	Kg
peso mezcla preliminar cargada	Kg
peso Mezcla sobrante	Kg
TOTAL CARGADO	Kg
TIEMPO DE TEMP. MAX	min
PESO SINTER OBTENIDO	Kg
FINOS BAJO PARRILA	Kg
FINOS DE RETORNO (<7 mm)	Kg
% finos de retorno	%
ESTABILIDAD %	%
RENDIMIENTO DE MEZCLA	%
densidad de la carga	Kg/m ₃