

**GRANULACIÓN DE ESCORIA EN RÉGIMEN DE BAJA RELACIÓN DE
SiO₂/MGO EN LA EMPRESA CERRO MATOSO S.A**

SOHAD LERECH OSORIO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2012

**GRANULACIÓN DE ESCORIA EN RÉGIMEN DE BAJA RELACIÓN DE
SIO₂/MGO EN LA EMPRESA CERRO MATOSO S.A**

SOHAD LERECH OSORIO

**Tesis de grado para optar el título de
INGENIERO METALÚRGICO**

DIRECTOR:

ING. HUGO JAVIER ARANGO PATERNINA

Ingeniero de Control de Proceso y Mejoramiento

CERRO MATOSO- BHP BILLITON

CO-DIRECTOR:

Profesor. WALTER PARDAVÉ LIVIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2012

A Dios por la salud, la sabiduría y las ayudas divinas.

A mi Madre Irene y a mi Padre Carlos quienes con su amor y dedicación han contribuido en gran parte en mi formación.

A mis hermanos por su apoyo incondicional.

A mis amigos y colegas por compartir esta experiencia inolvidable.

A los integrantes de Cerro Matoso S.A por su ayuda, entusiasmo y hacerme sentir parte de esta hermosa empresa.

Sofad Lerech

Agradecimientos

Mis agradecimientos a

La empresa Cerro Matoso S.A y cada uno de sus integrantes, que con su gran calidad humana y apoyo incondicional hicieron posible el desarrollo de mi proyecto, además de enseñarme un estilo de vida de comportamientos seguros.

La Universidad Industrial de Santander, a la escuela de Ingeniería Metalúrgica por la formación integral como ingeniera y persona.

A mis profesores por la formación y enseñanzas.

Mis directores, Ingeniero Hugo y el profesor Walter, Ingeniero Luis Fernando, Ingeniero Bernardo Rueda, quienes además de orientarme, me ofrecieron su conocimiento, confianza, amistad y apoyo.

A mis compañeros de la universidad con los que me forme y ahora son colegas, por los muchos momentos inolvidables.

Sohad Lerech

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
JUSTIFICACIÓN.....	17
1. OBJETIVOS	20
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. MARCO TEORICO	21
2.1. ESCORIA	21
2.2 PROPIEDADES DE LA ESCORIA.....	21
2.2.1 Calor específico	21
2.2.2 Tensión superficial	22
2.2.3 Viscosidad	22
2.2.4 Conductividad térmica	23
2.3 GRANULACIÓN DE ESCORIA.....	23
2.3.1 Proceso de granulación en circuito de agua fría.	24
2.3.2 Distribución del agua en el sistema de granulación	25
2.3.3 Mecanismos de granulación de escoria	26
2.3.3.1 Fragmentación por impacto	26
2.3.3.2 Fragmentación por choque térmico:.....	27
2.3.3.3 Fragmentación por micro-explosione:	27
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	29
3.1 ETAPA I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	29
3.2 ETAPA II: ADQUISICIÓN DEL MATERIAL ESTUDIO	29

3.3 ETAPA III: ESTABLECER CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA ESCORIA CON EL RÉGIMEN DE BAJA RELACIÓN SIO ₂ /MGO.....	32
3.4 ETAPA IV: ANALIZAR CAMBIOS EN LAS VARIABLES OPERATIVAS DEL PROCESO DE GRANULACIÓN DE ESCORIA CON EL RÉGIMEN DE BAJA RELACIÓN SIO ₂ /MGO.....	33
3.5 ETAPA V: REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES	33
3.5.1 Actividad 5.1: Ensayos granulométricos de las muestras de escoria.	33
3.6. ETAPA VI: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	33
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	34
4.1.1 Tensión superficial.....	34
4.1.2 Viscosidad	35
4.1.3 Conductividad térmica	36
4.1.4 Calor Específico, Cp.	37
4.1.5 Efectos del cambio en las propiedades físico-químicas en el proceso de granulación.....	38
4.2 ANALIZAR CAMBIOS EN LAS VARIABLES OPERATIVAS DEL PROCESO DE GRANULACIÓN DE ESCORIA CON EL RÉGIMEN DE BAJA RELACIÓN SIO ₂ /MGO.....	40
4.2.1 Sistema de granulación.	40
4.2.2 Agua de granulación de escoria.....	41
4.2.3 Flujos de agua y escoria.	42
4.2.4 Diseño del granulador	42
4.2.5 Forma del chorro de agua.....	43
4.2.6 Formación de barba o costra en la punta de la canal.....	45
4.2.7 Mecanismos de granulación de escoria.	47
4.2.7.1 Fragmentación por impacto. El aumento de la granulometría en la escoria de Cerro Matoso S.A indica fallas en el mecanismo de fragmentación por impacto,	

influenciado por el cambio en la tensión superficial de la escoria líquida y el diseño de la presión del agua en el granulador.	47
4.2.7.2 Fragmentación por choque térmico:.....	47
4.2.7.3 Fragmentación por micro-explosiones.	48
4.2.8 Fallas en los mecanismos de granulación de escoria	48
4.3. REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES	49
4.3.1 Ensayos granulométricos de las muestras de escoria.....	49
4.4 AJUSTES REQUERIDOS EN LAS ADECUACIONES FÍSICAS DEL ÁREA PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE GRANULACIÓN.....	52
5. CONCLUSIONES	55
6. RECOMENDACIONES.....	57
BIBLIOGRAFIA.....	60
ANEXOS	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cambio de composición química en la escoria, Fuente. Autor.	34
Tabla 2. Efectos del cambio de composición química en las propiedades de la escoria, Fuente. Autor.	38

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Plan Quinquenal de la mina.	17
Figura 2. Diagrama Ternario del sistema SiO ₂ -MgO-FeO	18
Figura 3. Diagrama de flujo de granulación de escoria.	19
Figura 4. Interacción Escoria – Agua.	24
Figura 5. Granulación con canal frío.	25
Figura 6. Granulador y bocapato.	26
Figura 7. Fragmentaciones por micro-explosiones.	28
Figura 8. Gráfica composición química del mineral del depósito.	30
Figura 9. Organigrama para la Metodología Experimental.	31
Figura 10. Escoria granulada	32
Figura 11. Tensión superficial escoria CMSA, Simulado en el software SlagAn32 y tendencias graficadas en minitab 15.	35
Figura 12. Viscosidad escoria CMSA, Simulado en el software SlagAn32 y tendencias graficadas en minitab 15.	36
Figura 13. Conductividad térmica escoria CMSA, Simulado en el software SlagAn32 y tendencias graficadas en minitab 15.	37
Figura 14. Correlación entre calor específico de la escoria vs Relación de SiO ₂ /MgO.	38
Figura 15. Efecto de la viscosidad en el proceso de granulación.	39
Figura 16. Relación Agua-Escoria para el proceso de enfriamiento de la escoria.	41
Figura 17. Perdidas de presión según diámetro del chorro de agua.	44
Figura 18. Ampliación del área del chorro en la punta de la canal refrigerada.	44
Figura 19. Disminución largo de la canal.	45
Figura 20. Acumulación de costras en la punta de la canal refrigerada.	45
Figura 21. Obstrucción del granulador por costras acumuladas debajo de la canal refrigerada.	46

Figura 22. Historico de granulometría de la escoria granulada L2 Vs Pasante - acumulado.	49
Figura 23. Distribución granulométrica Vs Flujo de escoria, piquera Sur.	50
Figura 24. Distribución granulométrica Vs Flujo de escoria, Promedio del % retenido. Piquera Sur.	50
Figura 25. Distribución granulométrica Vs Flujo de escoria, piquera Norte.	51
Figura 26. Distribución granulométrica Vs Flujo de escoria, Promedio del % retenido. Piquera Norte.	51
Figura 27. Propuesta conceptual para un nuevo sistema de granulación en CMSA.	53
Figura 28. Sistema de granulación de escoria de la planta de STELCO en el lago Erie.	53
Figura 29. Inclinação de la punta de la canal.	54

RESUMEN

TITULO: GRANULACION DE ESCORIA EN REGIMEN DE BAJA RELACION DE SiO_2/MgO EN LA EMPRESA CERRO MATOSO S.A*

AUTORES: LERECH O. Sohad**

PALABRAS CLAVE: Granulación, Baja relación SiO_2/MgO , Cerro Matoso.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se obtuvieron Alternativas de solución para mejorar el proceso de granulación de escoria en el régimen de baja relación de SiO_2/MgO en la empresa cerro matoso S.A, estudiando las variables físico químicas de la escoria mediante software especializado y realizando trabajos de campo para la evaluación del proceso de granulación.

Se establece que el cambio de las propiedades físico-químicas de la escoria afectan los mecanismos de fragmentación en el proceso de granulación: La tensión superficial y viscosidad afectan el mecanismo de fragmentación por impacto; El cambio de conductividad térmica contribuye al mecanismo de fragmentación por choque térmico.

El principal problema del sistema de granulación consiste en la distribución del agua de granulación y agua de arrastre, sin embargo el volumen de agua utilizado para granular es el adecuado

Se requiere modificar todo el sistema de granulación, instalando bombas que permitan operar con mayor presión de agua e incrementar el flujo en el granulador, rediseño de las placas del granulador, y modificaciones en la canal refrigerada para dar la forma apropiada al chorro de escoria, esto incluyen distancias menores entre el granulador y la punta de la canal refrigerada, inclinación de la canal de granulación, para esto es necesario un estudio posterior El cambio en el diseño del granulador permitirá velocidades de agua uniformes en las boquillas y presiones que favorezcan los mecanismos de granulación de escoria. disminuyendo la fracción gruesa de la escoria granulada.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Ing Hugo Javier Arango Paternina Co-director: Ing Walter Pardave.

SUMMARY

TITLE: SLAG GRANULATION IN REGIME LOW RATIO OF SiO₂/MgO IN THE CERRO MATOSO S.A COMPANY.*

AUTHORS: LERECH O. Sohad**

KEYWORDS:

DESCRIPTION:

In this work were obtained Alternative solutions to improve slag granulation process in the regime of low ratio SiO₂/MgO in the Cerro Matoso S.A company, studying the physical and chemical variables of the slag using specialized software and conducting fieldwork evaluation of the granulation process.

It stated that the change of physico-chemical properties of the slag fragmentation mechanisms affect the granulation process: surface tension and viscosity will affect the mechanism of fragmentation by impact, thermal conductivity change mechanism contributes to shock fragmentation thermal.

The main problem granulation system consists of distribution of water and flush water granulation, however the volume of water used for granulating is suitable

Modify all the required granulation system, enabling installing pumps operate with higher water pressure and increase the flow in the granulator, redesigning granulator plates and cooled channel modifications as appropriate to give the stream of slag, this include shorter distances between the granulator and the tip of the chilled carcass, carcass lean granulation, this requires further study. The change in design speed granulator will allow uniform water nozzles and pressures that favor the mechanisms slag granulation. Disminiishing the coarse fraction of the granulated slag.

* Graduation Project

** Faculty of Physical and Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering. Project Director: Ing Hugo Javier Arango Paternina Project Co-director: PhD in Chemical Engineering. Msc Walter Pardave.

INTRODUCCIÓN

Cerro Matoso S.A es una empresa productora de Ferro-níquel que se encuentra ubicada en el municipio de Montelíbano, Córdoba. Contando con estándares operativos de talla mundial se constituye como un líder nacional en seguridad y salud ocupacional en la industria minera. Bajo su política de cero lesiones cada unidad correspondiente a la empresa realiza constantes cambios en pro de optimizar el proceso.

En Marzo de 2011 se implementó un modelo Operativo para operar con mineral de baja relación sílice/magnesio afectando el proceso de granulación de escoria el cual no ha conseguido tener la misma granulometría que se manejaba con el anterior régimen (alta relación), siendo causante de eventos no deseados que consisten en explosiones en el sistema de granulación de escoria.

La Unidad de Negocios de Secado - Calcinación y Fundición ha desarrollado estrategias para eliminar la exposición del personal en la línea de fuego, que consiste en la zona de piqueras de escoria y piqueras de metal; los cuartos de control de los operadores de fundición han sido removidos hacia lugares distantes, así mismo, se ha invertido en equipos automatizados y equipos de protección personal. La empresa día a día trabaja con sus integrantes para inculcar comportamientos seguros y en aras de disminuir riesgos intrínsecos de la operación tiene como objetivo mejorar el proceso de granulación.

La práctica empresarial cubrió el estudio de las variables operativas más importantes del proceso de granulación de escoria mediante actividades de campo y estudio de modelos predictivos utilizando software especializado.

Los resultados obtenidos consisten en la descripción de las posibles mejoras en el sistema de granulación de escoria que permitan conseguir granulometría adecuada para un proceso seguro.

JUSTIFICACIÓN

Cerro Matoso S.A es una empresa productora de Ferro-Níquel, ubicada en el Municipio de Montelíbano- Córdoba, para su producción cuenta con dos líneas y emplea el proceso pirometalúrgico de hornos rotatorios- hornos eléctricos o como sus siglas en ingles RKEF (Rotary Kiln-Electric Furnace) que da como resultado final la aleación metálica de FeNi y un subproducto denominado escoria. Las características de estos depende de la composición química del mineral y de las variables operativas del proceso ^[1].

En el año 2011 cambió la composición química del mineral al modificar las proporciones de sus componentes, como se aprecia en la tabla 1 existe disminución del contenido de FeO desde 15% al 11.5% y aumento en el porcentaje de magnesio desde 16 % a 22% disminuyendo la relación de sílice-magnesio desde un rango de 2.7-2.65 a valores entre 1.75-1.9, estos cambios influyen en las propiedades físico-químicas de la escoria ^[2].

Figura 1. Plan Quinquenal de la mina.

Mineral	FY11Q1	FY11Q2	FY11Q3	FY11Q4	FY12S1	FY12S2
Fe	15,22	15,14	9,64	11,6	12,15	11,09
Al ₂ O ₃	2,07	2,08	1,32	1,64	1,61	1,53
SiO ₂	43,39	44,45	43,96	42,75	42,24	43,23
MgO	16,05	16,03	24,33	22,62	22,31	22,75
S/M	2,7	2,77	1,81	1,89	1,89	1,9

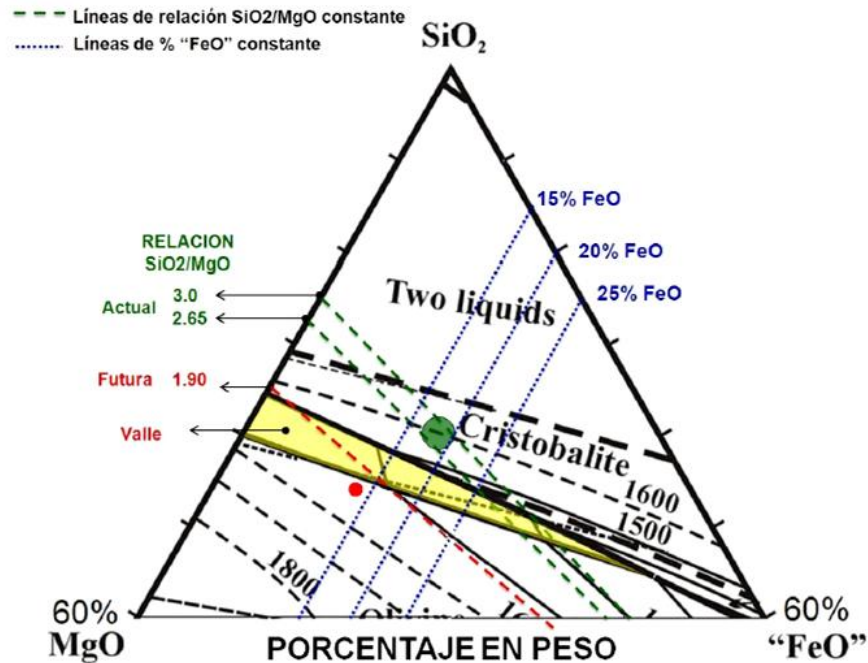
Escoria	FY11Q1	FY11Q2	FY11Q3	FY11Q4	FY12S1	FY12S2
Fe			7,23	8,7	9,11	8,32
Al ₂ O ₃	2,78	2,79	2,03	2,35	2,32	2,24
S/M	2,68	2,75	1,78	1,86	1,87	1,87

Q, cuatrimestre ; S: semestre; FY: Año financiero.

Fuente: Plan Quinquenal Mina, versión de 2010.

Los cambios en la composición química del mineral se reflejan en el diagrama ternario (figura 2); los puntos verde y rojo representan la ubicación del proceso antes y después del cambio de composición química.

Figura 2. Diagrama Ternario del sistema SiO₂-MgO-FeO



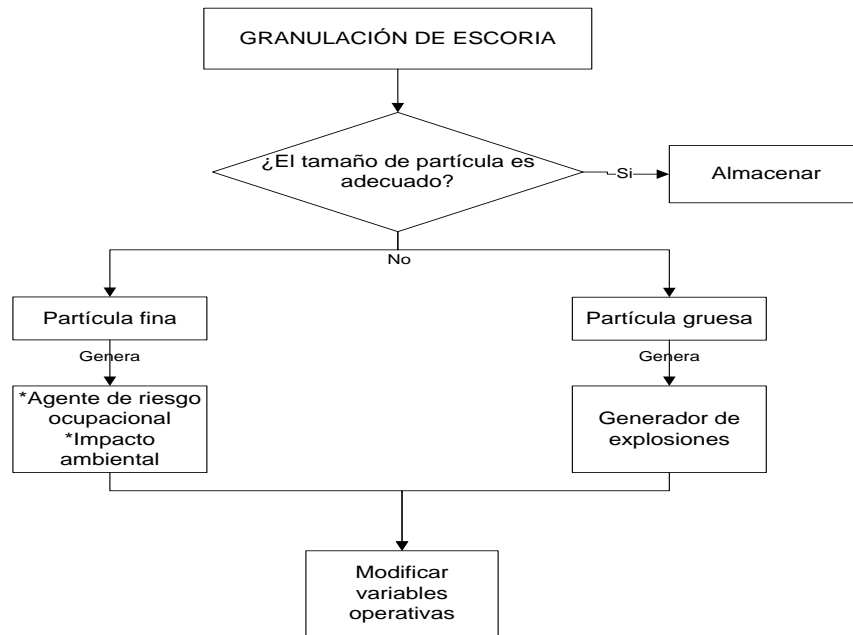
Fuente: Ref [18]

El metal procesado en el horno eléctrico es colado y llevado a otra fase del proceso que consiste en la refinación cuyas características finales dependerán de las demandas del cliente; la escoria líquida sobrecalentada es evacuada y sometida a la acción de chorros de agua a alta presión para lograr su granulación^[1].

El proceso de granulación tiene como objetivo obtener partículas de escoria con tamaño adecuado para su posterior procesamiento ^[3], si en el proceso se obtienen partículas de escoria demasiado finas se puede generar un riesgo en salud ocupacional^[4], si por el contrario son partículas gruesas pueden generar

explosiones en el proceso de granulación de escoria lo que implica peligro para la operación y para los trabajadores (Figura 3).

Figura 3. Diagrama de flujo de granulación de escoria.



Fuente: Autor.

Los cambios sucedidos en la mina han generado modificación en la granulometría de la escoria hacia una escoria más gruesa haciendo necesario realizar ajustes en las variables operativas que permitan optimizar el proceso de granulación de escoria en el régimen de baja relación SiO_2/MgO .

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer los cambios necesarios para mejorar el proceso de granulación de escoria en el régimen de baja relación SiO_2/MgO

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las variables físico-químicas de la escoria que afectan el proceso de granulación y el impacto relativo de las mismas.
- Determinar las variables físicas del sistema de granulación que impactan la granulometría de la escoria.
- Determinar los ajustes requeridos en las adecuaciones físicas del área para optimizar el proceso de granulación.
- Evaluar el impacto de las modificaciones realizadas en la granulometría y seguridad en la operación de granulación.

2. MARCO TEORICO

2.1. ESCORIA

En un proceso de fundición la escoria se puede definir como el subproducto formado por óxidos y silicatos metálicos, entre otros; contiene elementos que no se reducen durante el proceso de reducción o que se oxidan durante el proceso de refinación^[5,6].

La relación de escoria- metal de los hornos fundidores de la empresa Cerro Matoso S.A corresponde a 14:1^[7], considerándose un subproducto de altos volúmenes es necesario un tratamiento posterior al colado que consiste en la granulación de la escoria, el procesamiento en la planta de trituración para finalmente ser almacenada.

2.2 PROPIEDADES DE LA ESCORIA

2.2.1 Calor específico

El calor específico de un material se refiere a la cantidad de energía requerida para incrementar en un grado centígrado la temperatura de un gramo de sustancia, a medida en que se tenga mayor calor específico (Cp) se tendrá mayor requerimiento de energía para calentar^[8].

Los requerimientos de agua necesarios para realizar el enfriamiento de la escoria en el sistema de granulación sin tener altos volúmenes de vapor son establecidos

por el calor específico de la escoria; alto calor específico indica mayor requerimiento de agua ^[9].

2.2.2 Tensión superficial

El fenómeno que explica la tendencia de un líquido a disminuir su superficie hasta alcanzar el estado de menor energía buscando un equilibrio estable se denomina tensión superficial ^[10].

Esta propiedad es responsable de la resistencia que un líquido presenta a la penetración de su superficie, de la tendencia a la forma esférica de las gotas de un líquido, del ascenso de los líquidos en los tubos capilares y de la flotación de objetos u organismos en la superficie de los líquidos.

La tensión superficial de las escorias líquidas en general, disminuye al aumentar el contenido de sílice. Se obtiene una baja tensión superficial mediante la adición de óxidos de metales alcalinos, ácido bórico, sulfuro de calcio y ácido fosfórico en tanto que la cal, el óxido de hierro y la alúmina aumentan la tensión superficial ^[11].

2.2.3 Viscosidad

La viscosidad es la medida de la resistencia de un material no cristalino a una deformación permanente; describe "la capacidad de deslizamiento de un fluido" y es proporcional a la velocidad a la que las partes de un fluido son separadas entre sí; establece, además, la proporcionalidad existente entre el esfuerzo por unidad de área (F/A) necesario para producir un gradiente de velocidades en un fluido^[9].

La viscosidad de las escorias fundidas dependen de sus componentes; las escorias de silicato usualmente disminuye con el incremento del contenido del óxido básico. En ciertas escorias la viscosidad de las mezclas puede ser considerablemente menor que la viscosidad de cualquiera de los componentes

que las constituyen. Lo anterior se aprovecha durante la fabricación de acero en que la composición de las escorias se ajusta de tal manera que proporciona la baja viscosidad que se desea. Las escorias fluidas resultantes permiten un mejor contacto escoria-metal y también una descarga más fácil de la escoria fundida ^[11].

2.2.4 Conductividad térmica

La habilidad de un material para transferir calor se denomina conductividad térmica y se puede definir como la cantidad de calor transportado de las regiones de alta temperatura a las regiones de baja temperatura en una sustancia conforme a la ley de Fourier descrita en la ecuación 2^[9].

$$q = -\lambda \text{ grad}T \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: $T = \text{grad}T = \frac{\Delta T}{\Delta d}$

q : Flujo de calor

λ : Conductividad térmica

La conducción se da dentro de todos los materiales ya sean sólidos, líquidos o gaseosos mediante los mecanismos de conducción, convección y radiación.

El óxido de magnesio se caracteriza por tener un punto de fusión alto y propiedades refractarias, es decir que tiene baja conductividad térmica de tal manera que en la medida que se incremente el contenido de MgO en las escorias se espera que se disminuya la conductividad térmica ^[11].

2.3 GRANULACIÓN DE ESCORIA

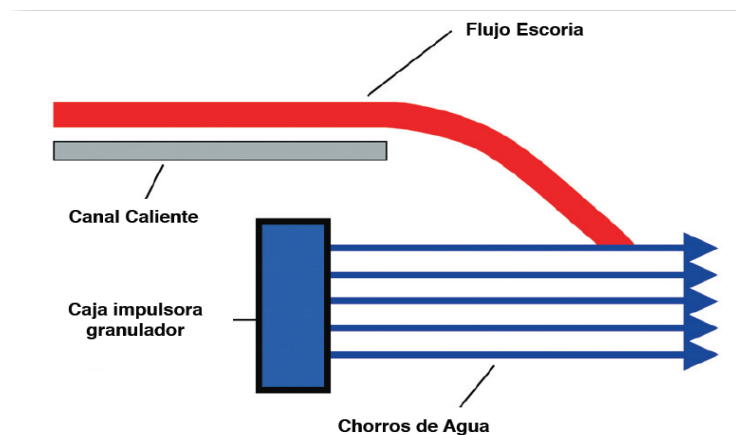
El proceso de granulación es utilizado en la industria metalúrgica para el tratamiento de crecientes volúmenes de escoria tiene como objetivo obtener

partículas de escoria con tamaño adecuado (Partículas con un rango menor o igual a 3 mm) para su posterior procesamiento ^[12], aunque existen diferentes sistemas de granulación tales como: proceso de enfriamiento instantáneo de escoria, proceso de granulación en circuito de agua fría, proceso de granulación con rueda, entre otros^[13]; En la empresa Cerro Matoso S.A se utiliza el proceso de granulación en circuito de agua fría.

2.3.1 Proceso de granulación en circuito de agua fría.

En el proceso de granulación en circuito de agua fría se realiza un rápido enfriamiento de la escoria fundida como consecuencia del impacto entre la corriente de escoria y el agua de granulación (Figura 4) ^[14].

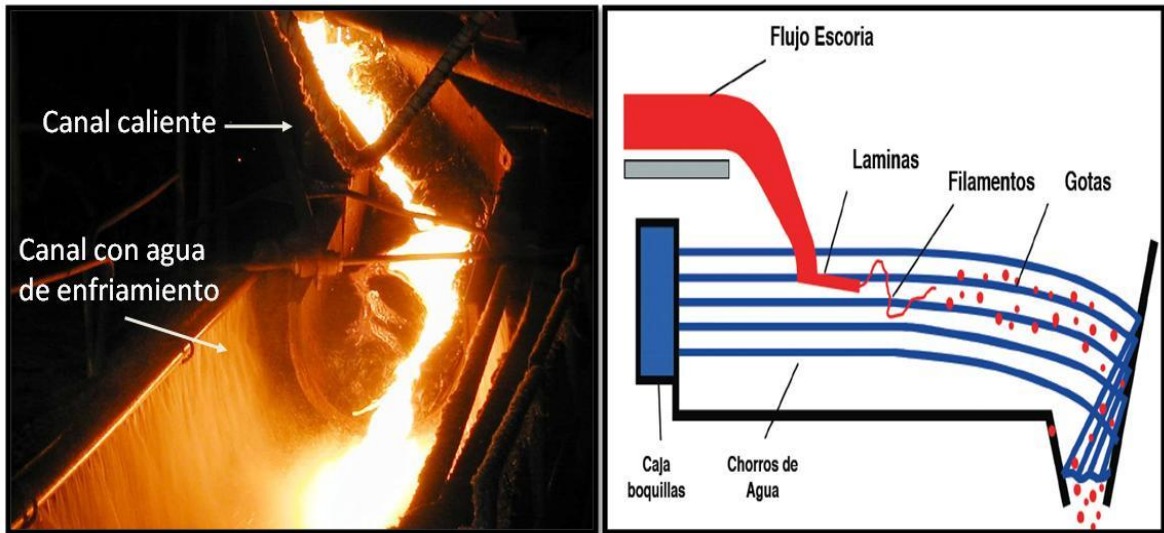
Figura 4. Interacción Escoria – Agua.



Fuente: Ref [13]

El canal con el agua de enfriamiento se instala como continuación del canal caliente que transporta la escoria desde el horno hasta el agua de las boquillas de granulación que rompe la corriente de escoria formando láminas que se componen inicialmente en filamentos y luego en gotas (figura 5) ^[15]

Figura 5. Granulación con canal frío.



Fuente: Ref [14,15]

Los factores que influyen en el proceso de granulación son: el flujo de la escoria, su temperatura, la pendiente, forma de la rampa que transporta la escoria desde el horno a la canal refrigerada, viscosidad, tensión superficial, presión de granulación y volumen de agua.

El proceso de granulación de escoria utilizando agua a presión es complejo y puede ser afectado por aspectos fisicoquímicos, mecánicos y geométricos.

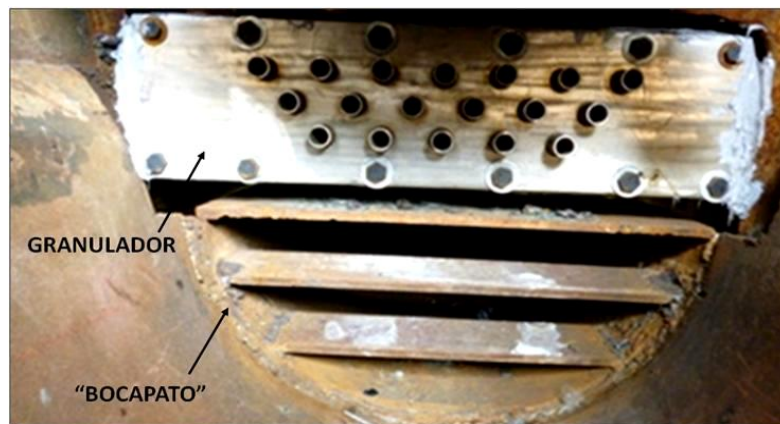
2.3.2 Distribución del agua en el sistema de granulación

En el proceso de granulación es importante la distribución del agua con la que trabaja; el volumen total de agua suministrada al sistema de granulación se divide en agua de granulación y en agua de enfriamiento y transporte; el agua de granulación se direcciona hacia el granulador y es la encargada de la formación de las partículas de escoria; el agua de enfriamiento y transporte es el agua que va hacia el “bocapato” y tiene como finalidad asegurar el enfriamiento de la escoria

granulada y transportarla por el canal hacia los sistemas de drenaje y evacuación (figura 6)^[15].

En los sistemas de granulación de escoria típicamente se utiliza 20% del flujo total de agua en el granulador para una relación agua-escoria mínima 2:1 y máxima de 2.7:1 con presión entre 40-60 PSI esto asegura el proceso de granulación^[16].

Figura 6. Granulador y bocapato.



Fuente: Autor.

2.3.3 Mecanismos de granulación de escoria

En el proceso de granulación en circuito de agua fría se pueden identificar 3 mecanismos de granulación, estos fenómenos se presentan simultáneamente y son: Fragmentación por impacto, Fragmentación por choque térmico y Fragmentación por microexplosiones. Estos mecanismos serán descritos a continuación:

2.3.3.1 Fragmentación por impacto: El flujo de escoria líquida con baja velocidad (<3 m/s) y altas temperaturas (>1500°C) desciende en cascada hacia el canal de granulación sobre un chorro de agua dirigido con alta velocidad y presión (40 PSI) como resultado del impacto del flujo de agua en el flujo de escoria ocurre

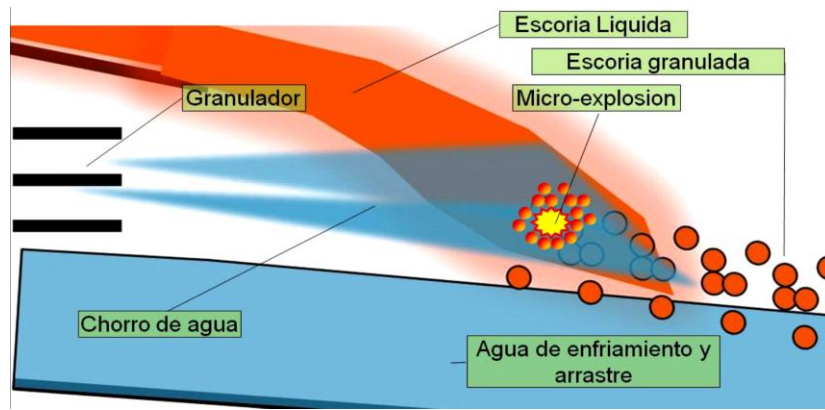
su fragmentación en pequeñas gotas o partículas que caen sobre una canal donde se termina el proceso de enfriamiento acelerado y solidificación. El tamaño de las partículas de escoria formadas depende principalmente de la tensión superficial de la escoria líquida y de la presión del agua con la que se granula [15].

2.3.3.2 Fragmentación por choque térmico: Este fenómeno ocurre por gradientes de temperatura entre el agua de granulación y las partículas de escoria quienes sufren un enfriamiento más rápido en la superficie que en el centro, esto genera durante su solidificación contracciones no uniformes que ocasionan deformaciones y concentraciones de esfuerzos en la superficie formando grietas que finalmente provocarán falla por fractura en las partículas de escoria.

La intensidad del choque térmico para el caso de granulación de escoria líquida con agua dependerá de la temperatura de la escoria, de la temperatura del agua y del volumen de agua disponible para el enfriamiento^[15].

2.3.3.3 Fragmentación por micro-explosione: El fenómeno de las micro-explosiones consiste en explosiones de vapor causadas por partículas muy pequeñas de agua que quedan envueltas en una matriz de escoria líquida, el agua se evapora y expande rápidamente, explotando y generando la fragmentación fina de la escoria [17]

Figura 7. Fragmentaciones por micro-explosiones.



Fuente: Ref [9]

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

La metodología experimental desarrollada consistió en seis (6) etapas, como se muestra en el diagrama de la Figura 8.

Las actividades son descritas a continuación

3.1 ETAPA I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se revisaron diversas fuentes bibliográficas tales como: libros especializados, artículos publicados en revistas nacionales e internacionales y bases de datos referentes a los temas de interés en este estudio.

3.2 ETAPA II: ADQUISICIÓN DEL MATERIAL ESTUDIO

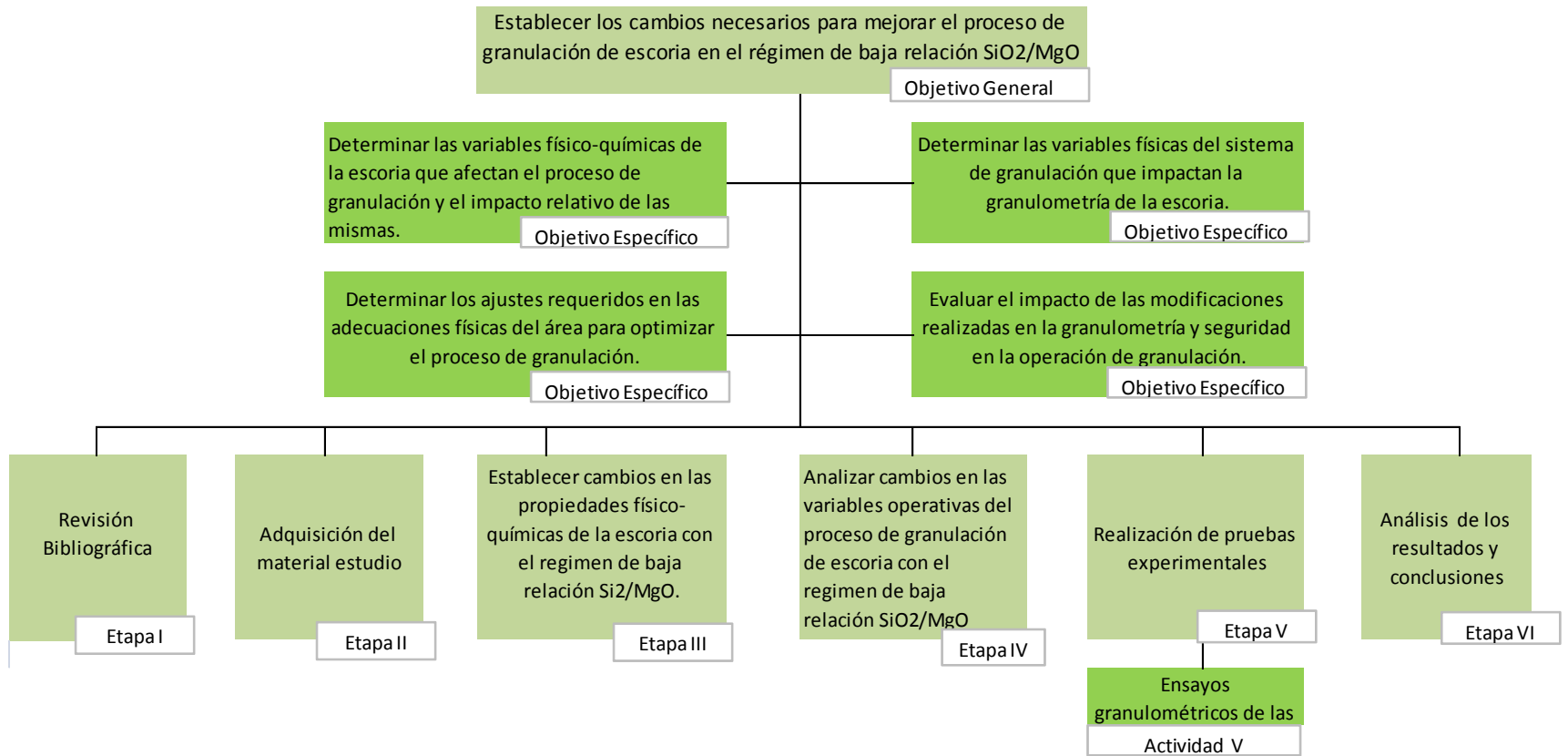
Para este estudio fueron utilizadas muestras de escorias resultantes de la operación de CMSA. Las cuales son complejas debido a la presencia de varios componentes menores, sin embargo, son consideradas compuestas principalmente por: $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-MgO}$ (silicato alumino-ferromagnesiano), tales componentes provienen del mineral con composición química mostrada en la figura 8 ^[5].

Figura 8. Gráfica composición química del mineral del depósito.



Fuente. Autor.

Figura 8. Organigrama para la Metodología Experimental.



Fuente: Autor

Las muestras de escoria granulada (figura10) fueron tomadas de las dos piqueras de la segunda línea de producción y consistieron en: 3 muestras de 12 kilogramos para cada uno de los flujos específicos de sangría de 200, 300 y 400 Tph, completando un total de 18 muestra; la toma de las muestras se logró mediante trabajo de campo.

Figura 9. Escoria granulada



Fuente. Autor.

3.3 ETAPA III: ESTABLECER CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA ESCORIA CON EL RÉGIMEN DE BAJA RELACIÓN SiO_2/MgO .

En esta etapa se tuvieron en cuenta los cambios en las propiedades más relevantes en el proceso de granulación que son: viscosidad, tensión superficial, conductividad eléctrica y capacitancia las cuales se establecieron mediante la simulación de diferentes relaciones de SiO_2/MgO usando el software SlagAn32 y graficando las tendencias en minitab 15.

3.4 ETAPA IV: ANALIZAR CAMBIOS EN LAS VARIABLES OPERATIVAS DEL PROCESO DE GRANULACIÓN DE ESCORIA CON EL RÉGIMEN DE BAJA RELACIÓN SIO₂/MGO.

En esta etapa se realizaron estudios en los parámetros de diseño del granulador y en los mecanismos de granulación de escoria con el fin de establecer si existieron cambios en las variables operativas en el sistema de granulación correspondiente al “boca de pato”, granulador y aspersores de agua en la canal refrigerada.

3.5 ETAPA V: REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.5.1 Actividad 5.1: Ensayos granulométricos de las muestras de escoria.

Se estableció la distribución de tamaño de las 18 muestra provenientes de las piqueras norte y sur del horno de producción de la línea 2 mediante el paso de la escoria granulada en una serie de tamices de 22.4mm, 12.5mm, 6.3mm, 2 mm, 1mm y 0.25mm.

Se determinó el efecto del flujo de escoria sobre la distribución granulométrica clasificando el muestreo de la escoria a diferentes velocidades de escoriado (200-300 – 400 tph).

3.6. ETAPA VI: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos, se determinaron los ajustes requeridos en las variables físico-químicas como en las adecuaciones físicas del área para optimizar el proceso de granulación.

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 ETAPA III: Cambios en las propiedades físico-químicas de la escoria con el régimen de baja relación SiO₂/MgO.

La composición química del mineral de Cerro Matoso S.A sufrió un cambio que consistió principalmente en la modificación de las proporciones de FeO, MgO y relación de SiO₂/MgO, como se puede apreciar en la tabla 1.

Tabla 1. Cambio de composición química en la escoria

	Alta relación SiO₂/MgO	Baja relación SiO₂/MgO	Efecto
%FeO	15	11.5	↓
% MgO	16	22	↑
SiO₂/MgO	2.7-2.65	1.75-1.9	↓

Fuente. Autor.

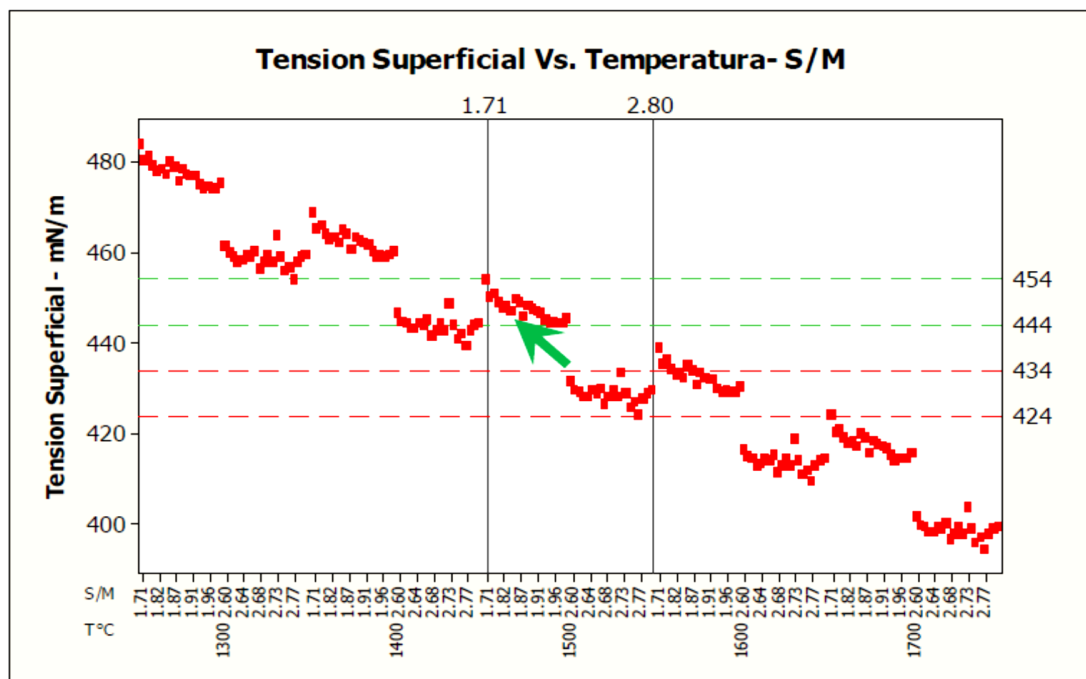
Para estudiar el efecto del cambio de composición química del mineral en las propiedades físico-químicas de la escoria más relevantes en el proceso de granulación, se simuló tendencias bajo los siguientes parámetros: variación de temperatura de 1300 °C a 1700 °C, para un rango de relación SiO₂/MgO entre 1.71 a 2.8.

4.1.1 Tensión superficial.

La tensión superficial disminuye con el incremento de la temperatura y con el incremento de la relación SiO₂/MgO como se puede observar en la figura 11.

Las escorias ácidas poseen menor tensión superficial que las escorias básicas, esto ocurre porque el SiO_2 actúa como tensoactivo disminuyendo la tensión superficial ^[10]. El porcentaje de MgO aumento con el cambio de la composición química en la empresa Cerro Matoso S.A resultando escorias más básicas lo que representa un aumento del 5 % de la tensión superficial.

Figura 10. Tensión superficial escoria CMSA, Simulado en el software SlagAn32 y tendencias graficadas en minitab 15.



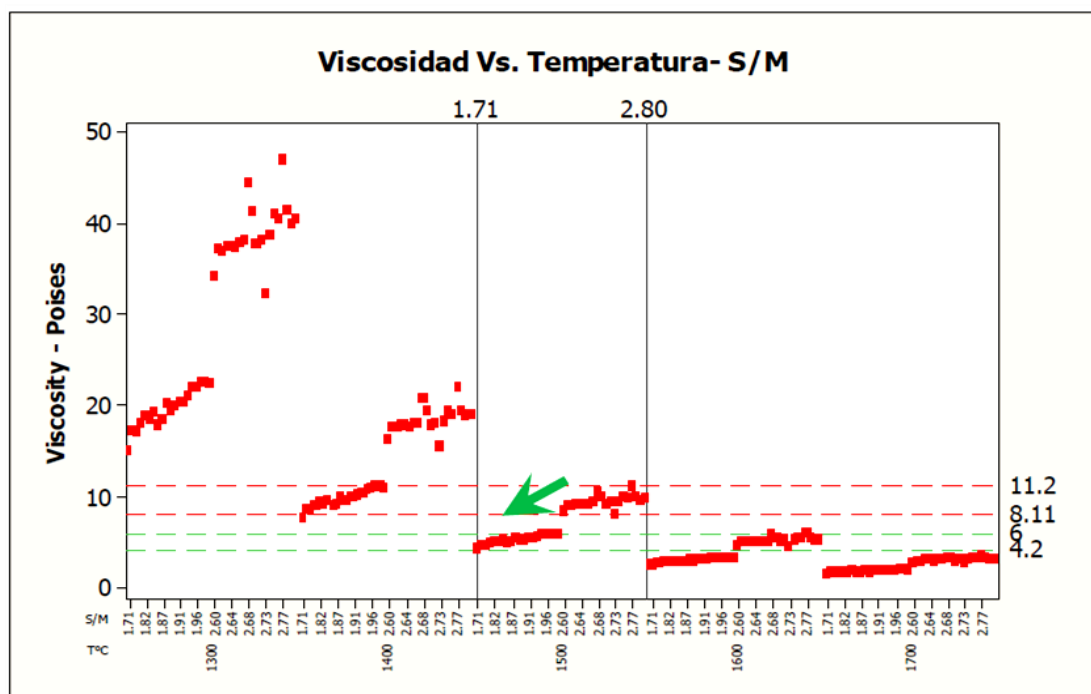
Fuente. Autor.

4.1.2 Viscosidad

La viscosidad fue una de las propiedades más afectadas por el cambio de relación con una disminución del 50% ante el proceso anterior. En la figura 12 se observa que la viscosidad tiende a disminuir con el incremento de la temperatura y con bajos valores de la relación SiO_2/MgO .

La estructura reticular que poseen las escorias ricas en sílice (SiO_2) es afectada por la adición de óxidos básicos o el incremento de la temperatura, los cuales ocasionan ruptura de los enlaces de oxígeno, de esta manera las cadenas de Sílice se hacen más cortas facilitando su movilidad, haciéndola más fluida y finalmente disminuyendo la viscosidad

Figura 11. Viscosidad escoria CMSA, Simulado en el software SlagAn32 y tendencias graficadas en minitab 15.



Fuente. Ref [9]

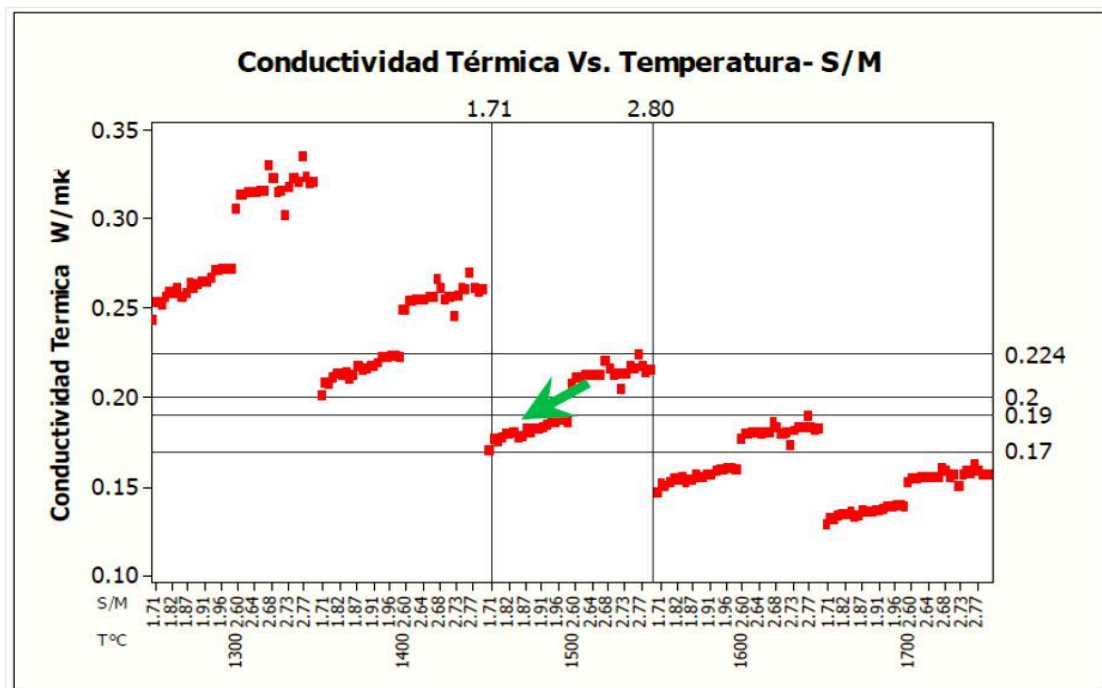
4.1.3 Conductividad térmica

En la Figura 13 se observa que la conductividad térmica tiende a aumentar a medida que desciende la temperatura, contrario a lo que sucede con el descenso de la relación SiO_2/MgO , las escorias de baja relación son de menor conductividad térmica lo que significa que poseen menor transferencia de calor a sus alrededores y contienen mayor cantidad de MgO lo que las hace más refractarias.

La disminución del 10% en la conductividad térmica en las actuales escorias afecta el mecanismo de fragmentación por choque térmico como se verá más adelante.

El MgO se caracteriza por tener un punto de fusión alto y por tener propiedades refractarias ^[12]. Su aumento resulta en la disminución de la conductividad térmica en bajas relaciones de SiO₂/MgO.

Figura 12. Conductividad térmica escoria CMSA, Simulado en el software SlagAn32 y tendencias graficadas en minitab 15.

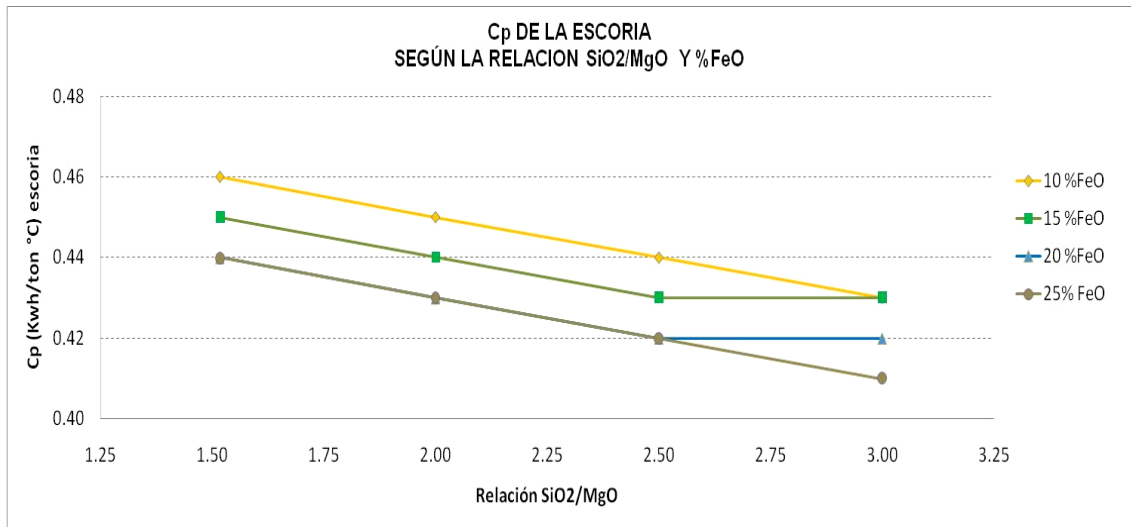


Fuente. Autor.

4.1.4 Calor Específico, Cp.

Existió un incremento en el valor de Cp (figura 14) el cual depende de las características químicas de la escoria. Los valores fueron suministrados por la empresa. Esta propiedad puede afectar el requerimiento de agua de granulación

Figura 13. Correlación entre calor específico de la escoria vs Relación de SiO₂/MgO.



Fuente. Ref 15

4.1.5 Efectos del cambio en las propiedades físico-químicas en el proceso de granulación.

Los cambios en las propiedades físico-químicas de la escoria se pueden apreciar en la tabla 2.

Tabla 2. Efectos del cambio de composición química en las propiedades de la escoria

	Alta relación SiO ₂ /MgO	Baja relación SiO ₂ /MgO	DELTA
Viscosidad (Poises)	10	5	50% ↓
Tensión superficial (mN/m)	420	440	5% ↑
Capacidad Calórica Cp (kwh/Ton°C)	0.42	0.45	7% ↑
Conductividad térmica (W/mK)	0.2	0.18	10% ↓

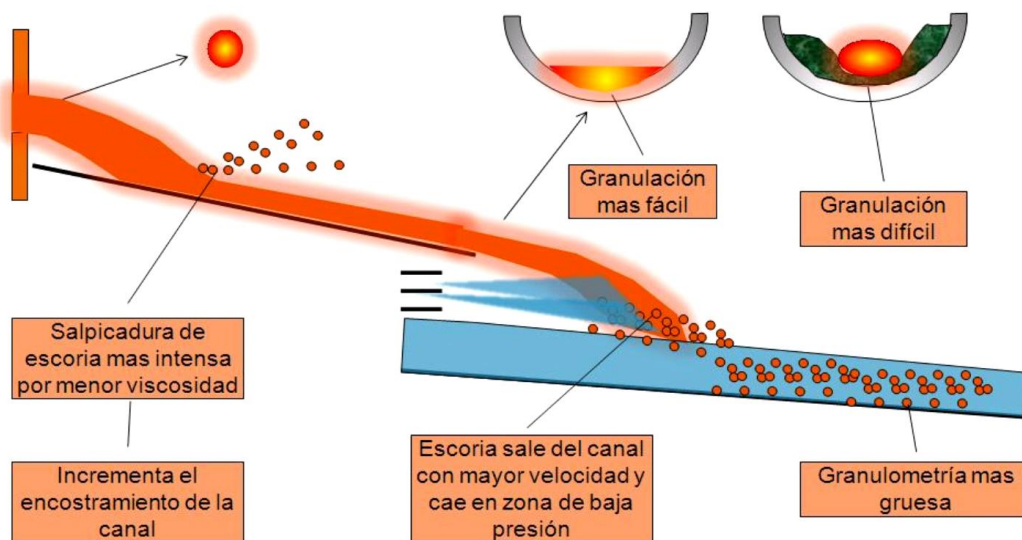
Fuente. Autor.

La propiedad más afectada con el cambio de relación de SiO_2/MgO es la viscosidad con una disminución del 50 %; En teoría no es la variable principal en el proceso de granulación como si lo es la tensión superficial, pero con la disminución significativa de la viscosidad de la escoria se observa que la mayor fluidez logra desarrollar mayor velocidad en la descarga.

La mayor velocidad de la escoria cambia el punto de caída hacia la canal refrigerada y hacia la canal de granulación (figura 15), al caer la escoria en puntos diferentes a los diseñados en el sistema se afecta considerablemente los mecanismos de granulación y con esto el proceso de granulación.

Muchas partículas de escoria son impulsadas por el impacto con el agua hacia adelante y hacia las paredes de las canales de granulación, si no se han granulado bien y no se ha logrado enfriar lo suficiente estas partículas se encuentran en un estado de alta viscosidad o semi-líquidas y se adhieren unas con otras obstruyendo la canal refrigerada

Figura 14. Efecto de la viscosidad en el proceso de granulación.



Fuente. [15]

.El cambio en la conductividad térmica afecta el mecanismo de fragmentación por choque térmico y también tiene efectos en el encostramiento de la canal refrigerada, estos aspectos se abarcan más adelante.

El cambio en las propiedades de viscosidad y tensión superficial influyen en que sea más difícil granular este tipo de escoria con la configuración actual del sistema de granulación.

El cambio en la capacidad calórica influye en el requerimiento de agua para el proceso de granulación de la escoria, el aumento del C_p de la escoria da como consecuencia una mayor entrega de calor hacia el agua de granulación incrementando la rata de evaporación del agua.

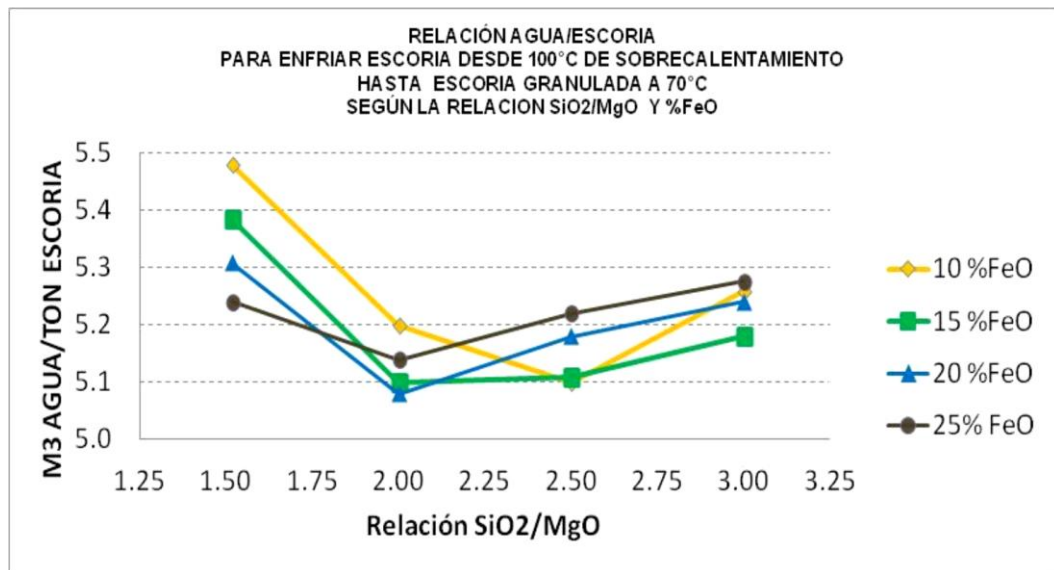
4.2 ANALIZAR CAMBIOS EN LAS VARIABLES OPERATIVAS DEL PROCESO DE GRANULACIÓN DE ESCORIA CON EL RÉGIMEN DE BAJA RELACIÓN SiO_2/MGO .

4.2.1 Sistema de granulación.

El proceso de granulación trata crecientes volúmenes de escoria para formar partículas de tamaño adecuado. Este sistema se encuentra diseñado para suministrar un volumen de agua que cumpla con el enfriamiento de la escoria desde una temperatura de sangrado de $1500^{\circ}C$ - $1540^{\circ}C$ hasta $70^{\circ}C$ y genere mínimas cantidades de vapor (rata de 10% de evaporación).

En la figura 16 se puede observar las curvas de relación agua-escoria necesaria para enfriar la escoria granulada desde una temperatura de $100^{\circ}C$ por encima de la temperatura de liquidus ($1550^{\circ}C$) hasta $70^{\circ}C$ con generación de vapor de 10 %.

Figura 15. Relación Agua-Escoria para el proceso de enfriamiento de la escoria.



Fuente. Ref [15].

En estas curvas se observa que para lograr una tasa de evaporación de 10% con un delta de sobrecalentamiento de 100 °C de la escoria con la composición química actual se requiere una relación de agua-escoria de 5.1:1, sin embargo, el factor de seguridad en el diseño del sistema de granulación trabaja con valores mínimos de relación agua-escoria de 10:1, asegurando menores valores en la tasa de evaporación.

Se realizaron estudios en los parámetros de diseño del granulado y en los mecanismos de granulación de escoria los cuales son expuestos a continuación:

4.2.2 Agua de granulación de escoria.

El cambio en la capacidad calórica de la escoria afecta el requerimiento de agua para el proceso de granulación de la escoria, al incrementar el C_p de la escoria esta entregará mayor calor hacia el agua de granulación incrementando así la tasa

de evaporación del agua, afectando el proceso de granulación. Sin embargo estudios previos a este trabajo [9], concluyeron que con los parámetros de diseño del granulador y las condiciones actuales de flujo de agua; valores de C_p ; flujo y delta de sobrecalentamiento de la escoria no hay necesidad de incrementar el flujo de agua ni restringir el flujo de escoria.

4.2.3 Flujos de agua y escoria.

Se realizaron mediciones de los flujos de agua y escoria en el sistema de granulación del horno de la línea de producción 2, donde se establece que el máximo flujo de escoria que se puede manejar garantizando la relación agua-escoria de 10:1 es de 400 tph (para un flujo de agua total de 4000 – 4200 m³/h).

Estos flujos de escoria son menores que los obtenidos cuando se tiene alto nivel de escoria en el horno (600 -650 tph), lo que hace necesario hacer regulación del flujo de escoria para evitar rebosar el límite del sistema

4.2.4 Diseño del granulador.

El granulador se diseñó de tal manera que el agua sea proyectada con un caudal, presión y velocidad que permita romper y granular efectivamente el chorro de escoria; dependiendo de la cantidad y forma de los agujeros del granulador se obtendrán diferentes valores de presión y velocidad para un mismo caudal de agua.

En el diseño del sistema de granulación se ha identificado deficiencia en la distribución del agua de granulación. Actualmente, el flujo de agua en el granulador es del 8% o menor del volumen total del sistema con una presión en la descarga de las bombas de 40 PSI; trabajando con relación agua-escoria en el granulador inferior a 1:1 para un flujo de escoria de 350-400 tph. Típicamente en

los sistemas de granulación se utiliza 20% del flujo total de agua en el granulador para una relación agua-escoria mínima 2:1 y máxima de 2.7:1 con presión entre 40-60 PSI asegurando el proceso, es decir, que la empresa se encuentra por debajo de los estándares de distribución establecidos.

De las principales deficiencias que se ha identificado en el sistema es la distribución de agua en el granulador, que si bien es cierto, así ha operado desde el inicio de su implementación, también lo es que con las nuevas propiedades de la escoria hace evidente la vulnerabilidad del proceso.

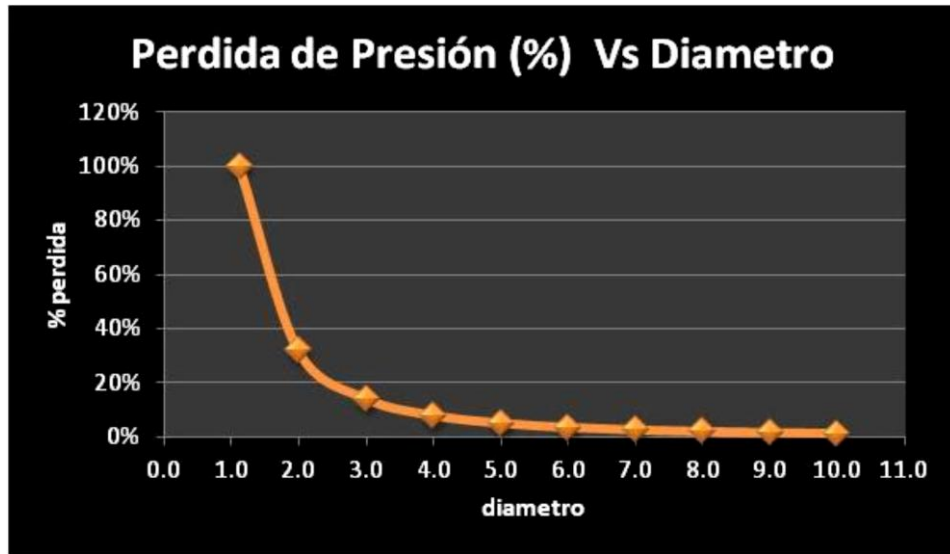
4.2.5 Forma del chorro de agua.

Se ha detectado que el chorro de agua que sale del granulador se abre demasiado rápido antes de impactar el flujo de escoria reduciendo la presión de impacto como se puede apreciar en la Figura 17.

En la Figura 18 se observa el incremento del área transversal del chorro de agua al llegar al final de la canal refrigerada; el incremento del diámetro corresponde 6-7 veces lo que da como consecuencia una pérdida de presión de hasta el 90% con respecto a la presión de descarga del granulador y por consiguiente la fragmentación del chorro no es efectiva.

Los factores que afectan el fenómeno de pérdida de presión son: la forma del agujero, la forma de descarga del orificio (terminación del tubo), la distancia entre el granulador y la punta de la canal refrigerada, la inclinación del granulador, entre otras.

Figura 16. Perdidas de presión según diámetro del chorro de agua.



Fuente. Ref [15]

Figura 17. Ampliación del área del chorro en la punta de la canal refrigerada.



Fuente. Autor.

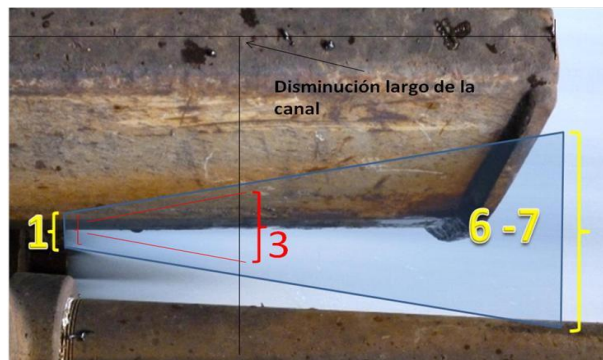
Distancias menores entre el granulador y la punta de la canal refrigerada y orificios de menor diámetro reducen la pérdida de presión del chorro de agua hasta en un

50 % (figura 19); Sin embargo es necesario no tener espacios amplios entre agujeros que afecten el proceso de granulación.

4.2.6 Formación de barba o costra en la punta de la canal

Se ha identificado que el agua del granulador alcanza a humedecer (salpicaduras) la punta de la canal refrigerada incrementando la capacidad de enfriamiento localmente lo cual facilita el encostramiento y formación de barba, afectando el proceso de granulación (figura 20).

Figura 18. Disminución largo de la canal.



Fuente. Autor.

Figura 19. Acumulación de costras en la punta de la canal refrigerada.



Fuente. Autor.

La formación excesiva de barba o costra en la punta de la canal obstruye el chorro de agua (figura 21) el cual no puede impactar la escoria líquida ocasionando que esta fluya por encima de la barba cayendo lejos sin ser debidamente granulada; altos volúmenes de escoria cayendo directamente al agua de arrastre puede producir explosiones en el sistema de granulación.

Figura 20. Obstrucción del granulador por costras acumuladas debajo de la canal refrigerada.



Fuente. Autor.

Otro fenómeno que puede ocurrir es la formación de costras a lo largo de la canal refrigerada debido a la mala limpieza o mal posicionamiento de la canal, esto ocasiona la desviación del flujo de escoria hacia un costado afectando el impacto del agua del granulador.

4.2.7 Mecanismos de granulación de escoria.

4.2.7.1 Fragmentación por impacto. El aumento de la granulometría en la escoria de Cerro Matoso S.A indica fallas en el mecanismo de fragmentación por impacto, influenciado por el cambio en la tensión superficial de la escoria líquida y el diseño de la presión del agua en el granulador.

Como se estudió en el ítem 3.1.1 en el nuevo régimen SiO_2/MgO (baja relación) hubo un incremento de 5 % en la tensión superficial de la escoria, sin embargo, estudios realizados para la empresa pronostican un incremento adicional debido al aumento del FeO y la disminución del contenido de SiO_2 , lo que exige requerimientos de mayor presión en el granulador para asegurar la efectividad del proceso.

Operar el sistema de granulación en igualdad de condiciones que el régimen anterior con los cambios presentados en la tensión superficial de la escoria aumenta el porcentaje de partículas gruesas.

4.2.7.2 Fragmentación por choque térmico: Los gradientes de temperatura que se manejan en el proceso de granulación involucra cambios de fase líquido-sólido y cambios alotrópicos de la sílice (SiO_2), produciendo fallas por choque térmico.

El cambio en la relación de la composición química del mineral hace que las escorias de baja relación SiO_2/MgO posean menor conductividad térmica, es decir, son más refractarias, duras y frágiles (baja tenacidad) por lo tanto tienen menor resistencia al choque térmico; contrario a lo que sucede actualmente se debería mostrar una distribución granulométrica más fina que las escorias de alta relación SiO_2/MgO .

La intensidad del choque térmico para el caso de granulación de escoria líquida con agua depende de la temperatura de la escoria, de la temperatura del agua y del volumen de agua disponible para el enfriamiento; todos estos factores no han sido modificados.

4.2.7.3 Fragmentación por micro-explosiones. El volumen de agua es adecuado en el proceso para flujos de escoria máximos de 400 tph, si sobrepasa este límite no se tiene la relación agua-escoria (10:1) conforme con el diseñado el sistema de granulación, esto ocasiona que el tercer mecanismo de fragmentación falle y produzca explosiones, la magnitud de estas dependerán del volumen de agua evaporada.

4.2.8 Fallas en los mecanismos de granulación de escoria. El cambio en las propiedades de la escoria de Cerro Matoso S.A hace que las condiciones para las cuales fue diseñado el sistema de granulación no sean las mismas. La granulación de escoria con mayor tensión superficial en presiones de flujo de agua del granulador diseñado para el anterior régimen (baja relación SiO₂/MgO) no genera un eficiente mecanismo de fragmentación inicial por impacto.

La fragmentación por impacto es la principal etapa en el control del proceso de granulación, si existe alguna falla los siguientes mecanismos (fragmentación por choque térmico y fragmentación por micro-explosiones) presentarán deficiencia en el proceso.

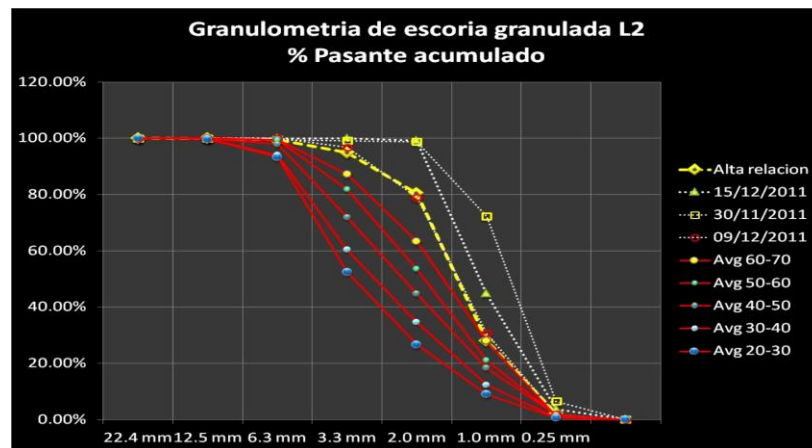
La fase inicial del proceso no es la única afectada por los bajos volúmenes de agua en el granulador, también, es responsable de la menor fragmentación por choque térmico; mecanismo que debe ocurrir o termina completándose más tarde cuando las partículas de escoria son enfriadas por el agua de arrastre. Es por esto que se debe dar suma importancia en distribuir hasta un 66% del volumen de agua de granulación en los pisos superiores donde ocurre la fragmentación inicial.

4.3. REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

4.3.1 Ensayos granulométricos de las muestras de escoria.

En la figura 22 se puede observar el histórico de las tendencias de la granulometría de la escoria para muestras tomadas en el año 2011. La escoria de alta relación SiO_2/MgO presenta mayor porcentaje de partículas finas (rango de 2 mm a 0.25 mm) comparado con la granulometría presentada con el régimen actual.

Figura 21. Historico de granulometría de la escoria granulada L2 Vs Pasante - acumulado.



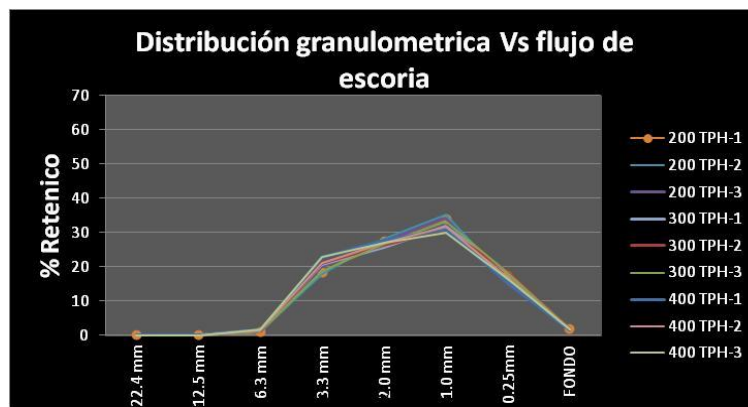
Fuente. Ref [15]

El efecto del flujo de escoria sobre la distribución granulométrica en la piqueras norte y sur de la línea de producción 2 se puede apreciar en las figura 23 y figura 24 (piquera sur) y la figura 24 y figura 25 (piquera norte).

La piquera sur presenta alta variación en la distribución granulométrica con los diferentes flujos ensayados, en la figura 23 se puede apreciar que para el mismo flujo (200, 300 y 400 tph) se tienen diferentes tendencias; en la figura 24 se

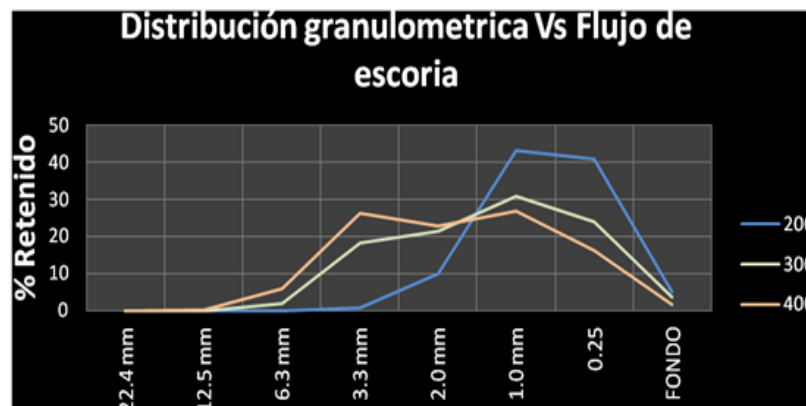
comparan los promedios de porcentaje retenido para cada uno de los flujos de escoria, se puede observar que existe una menor distribución granulométrica para el flujo de escoria de 200 tph con un porcentaje retenido en partículas de 1 mm alrededor del 40%. En las tendencias de la piquera sur se establece que a mayor flujo de escoria se obtienen partículas más gruesas confirmando que a mayor tasa de escoriado se tiene más dificultad para granular.

Figura 22. Distribución granulométrica Vs Flujo de escoria, piquera Sur.



Fuente. Autor

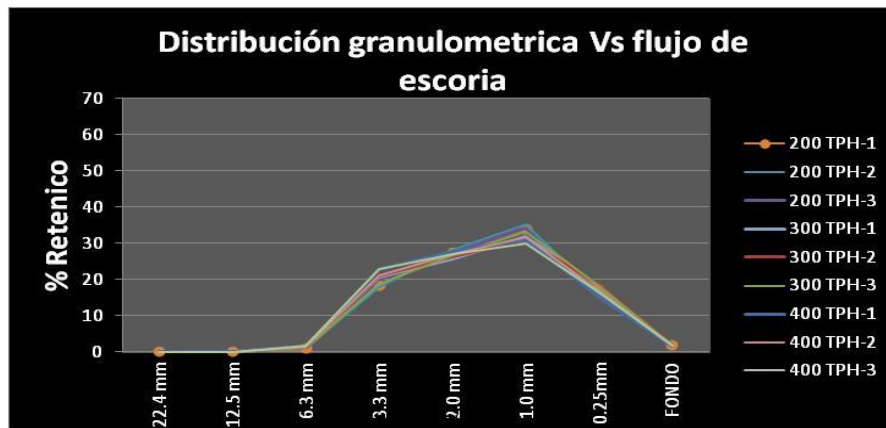
Figura 23. Distribución granulométrica Vs Flujo de escoria, Promedio del % retenido. Piquera Sur.



Fuente. Autor

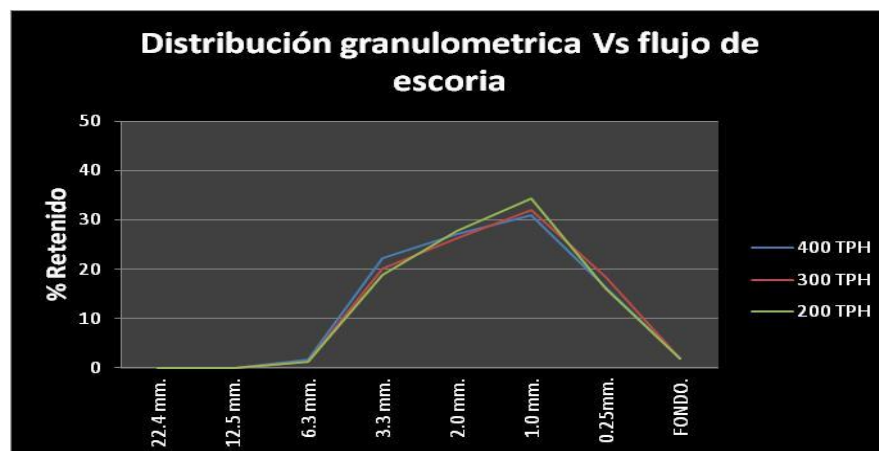
En la figura 25 y figura 26 se observa que la distribución granulométrica de la escoria en la piquera norte es más uniforme, existe mayor porcentaje de retenido en la malla de 1 mm comparado con las otras distribuciones, sin embargo, el porcentaje retenido de granulometría más fina de la escoria en la piquera norte es menor (30%) que los porcentaje retenido en la piquera sur (40%).

Figura 24. Distribución granulométrica Vs Flujo de escoria, piquera Norte.



Fuente. Autor

Figura 25. Distribución granulométrica Vs Flujo de escoria, Promedio del % retenido. Piquera Norte.



Fuente. Autor

4.4 AJUSTES REQUERIDOS EN LAS ADECUACIONES FÍSICAS DEL ÁREA PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE GRANULACIÓN.

Con el propósito de disminuir la fracción gruesa de escoria granulada es necesario realizar ajustes al sistema de granulación teniendo en cuenta los factores que afectan la eficiencia como lo son: el diseño del granulador, la forma del chorro de agua del granulador, la distancia entre el granulador y la punta de la canal; así mismo, tener en cuenta las propiedades físico-químicas de la escoria en el régimen de baja relación de SiO_2/MgO .

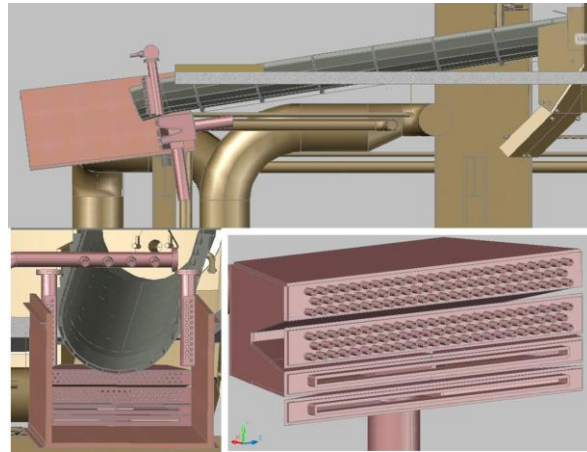
Un proceso de granulación óptimo es posible incrementando la velocidad de salida de agua, sin embargo se debe tener en cuenta que existen limitaciones en el volumen de agua disponible para el sistema de granulación, así que este cambio no puede existir sin sacrificar cobertura del ancho de la canal de granulación o sin separar demasiado los agujeros.

El diseño de granulador debe permitir tener velocidades uniformes en las boquillas y presiones que favorezcan la fragmentación, para esto es necesario ensayar diferentes geometrías de los orificios del granulador y en diferentes distribuciones.

Se propone granuladores que ofrezcan alto desempeño trabajando con varios niveles o pisos de granulación combinando boquillas y ranuras (figura 27), generando barreras que eviten que la escoria líquida tenga la posibilidad de atravesar estos pisos sin ser fragmentada.

El tener varios pisos de granulación incrementa la intensidad del choque térmico y la velocidad de enfriamiento, así como también incrementa la seguridad del sistema dado que este tipo de granulador trabaja con dos bombas simultáneamente y en caso de falla de una la otra asume la carga.

Figura 26. Propuesta conceptual para un nuevo sistema de granulación en CMSA.



Fuente. CMSA

En la Figura 28 se muestra un granulador en acción, este diseño tiene 7 niveles de agua con alta velocidad y presión, nótese que la escoria no logra atravesar el chorro de agua; a diferencia de Cerro Matoso S.A el toda de agua del sistema se consume en el granulador y la escoria se granula directamente a un patio.

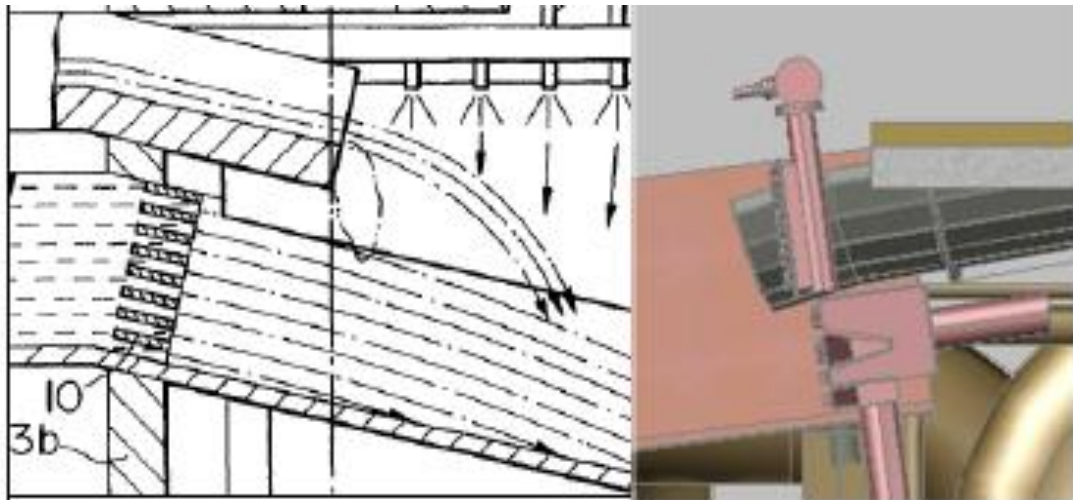
Figura 27. Sistema de granulación de escoria de la planta de STELCO en el lago Erie.



Fuente Ref [15]

Con las propiedades de la escoria y el actual diseño en el sistema de granulación, es posible que altos flujos de escoria se filtren directamente al agua de arrastre sin ser granulada completamente ocasionando explosiones, esta condición puede tener una posible solución o mejora inclinando la canal o la última sección de la misma como se muestra en la Figura 29, con esto se busca incrementar el ángulo de incidencia del flujo de escoria sobre el flujo de agua.

Figura 28. Inclinación de la punta de la canal.



Fuente Ref [15]

5. CONCLUSIONES

Con el nuevo régimen de baja relación de SiO_2/MgO en la empresa Cerro Matoso S.A se tienen escorias con 50% menos de viscosidad, 10% menos de conductividad térmica, aumento de 5% en la tensión superficial y aumento 7% en la capacidad calorífica comparada con el anterior régimen de producción.

El cambio de las propiedades físico-químicas de la escoria afectan los mecanismos de fragmentación en el proceso de granulación: La tensión superficial y viscosidad afectan el mecanismo de fragmentación por impacto; El cambio de conductividad térmica contribuye al mecanismo de fragmentación por choque térmico.

La escoria actual en Cerro Matoso S.A requiere en el sistema de granulación una relación de Agua-Escoria de 5.1:1 para lograr una tasa de evaporación de 10%; con valores mínimos de relación agua-escoria de 10:1 el presente sistema posee la capacidad adecuada de volúmenes de agua para lograr la granulación de la escoria.

El sistema de granulación actual es deficiente en la distribución del agua de granulación con 8% del volumen total de agua en el granulador a diferencia del 20% que se usa típicamente en los procesos de granulación. Requiriendo cambios en el sistema de granulación que permitan la distribución típica de los sistemas de granulación.

En los estudios de distribución granulométrica se establece que el sistema de granulación de la piquera sur es más eficiente que la piquera norte con un 40% en

porcentaje retenido de granulometría más fina comparado con el 30 % por ciento de la piquera norte.

El flujo y presión del agua de granulación se encuentra distribuida inadecuadamente para obtener partículas escoria con bajo tamaño en su distribución granulométrica (rango de 3mm-1mm), haciendo necesario regulación de flujo de escoria para no tener alto niveles que sobrepasen la relación agua-escoria de 10:1.

Se requiere modificar todo el sistema de granulación, instalando bombas que permitan operar con mayor presión de agua e incrementar el flujo en el granulador, rediseño de las placas del granulador, y modificaciones en la canal refrigerada para dar la forma apropiada al chorro de escoria, esto incluyen distancias menores entre el granulador y la punta de la canal refrigerada, inclinación de la canal de granulación, para esto es necesario un estudio posterior.

El cambio en el diseño del granulador permitirá velocidades de agua uniformes en las boquillas y presiones que favorezcan los mecanismos de granulación de escoria.

Los cambios en el diseño del granulador incrementarán la velocidad de salida del agua con el propósito de disminuir la fracción gruesa de la escoria granulada.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos:

Realizar estudios reológicos de la escoria.

Analizar mediante estudios posteriores a esta investigación las modificaciones necesarias en el sistema de granulación de escoria.

Capacitar al estudiantado en el manejo de software utilizado en la industria para un mejor desempeño en el campo laboral.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] EMPRESA CERRO MATOSO S.A. Manual del Proceso de Producción de Ferroníquel. Cerro Matoso S.A.
- [2] ARANGO, H.J. Operación con Mineral de Baja relación SiO₂/MgO. Montelibano, informe interno, empresa Cerro Matoso S.A. 2010.
- [3] TRIDÍ, Informe de Granulación Escoria Cerro Matoso S.A, Septiembre 2011.
- [4] COLMENA., Informe de Salud ocupacional, Enero de 2011.
- [5] LOVERA; ARIAS; ROSA. La valoración de las escorias metalúrgicas como recursos industriales. Revista del instituto de investigación Facultad de ingeniería geología, minería, metalúrgica y geográfica, Vol 7, No 13. 2004.
- [6]SAMAYOA, ELBER. Evaluación de la Escoria de Ferroníquel como agregado fino para morteros de Albañilería y acabados. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala 2009.
- [7] EMPRESA CERRO MATOSO S.A. Manual de la subfase de sangría y granulación de escoria. Cerro Matoso S.A.
- [8] CALLISTER, W. Ciencia e Ingeniería de Materiales. LTC Editora. 2002. Rio de Janeiro. Ed 5. Cap 19-20.
- [9] OLIVEIRA; MILLER; MADÍAS. Tensión superficial, viscosidad y densidad de algunas escorias CaO-Al₂O₃.En: Metal. 1999, Vol. 35 no.2.,p.91-99.
- [10] SKUPIEN. The surface tension and foaming behavior of melts in the system CaO-FeO-SiO₂.En: Metallurgical and materials transactions B. 2000, Vol.31B31B, p.921-925.
- [11] MILLS; YUAN; JONES. Estimating the physical properties of slags. En: The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2011, Vol. 111.
- [12] VAN; GREIVELDINGER; WENNER. Evolution of granulation technologytms. En: EPD congress 2006; TMS, The Minerals, Metals & Materials Society, 2006. P.553-565.

- [13] GUANGQIANG LI, HONGWEI NI. Recent process of hot stage processing for steelmaking slags in China considering stability and heat recovery. [diapositivas] Second International Slag Valorisation Symposium, 2011. 39 diapositivas, color.
- [14] NORVAL. Granulation of materials. En: EPD congress 2006; TMS, The Minerals, Metals & Materials Society, 2006.
- [15] ARANGO, H. J. Proceso de sangría y granulación de escoria. Montelibano, informe interno, empresa Cerro Matoso S.A. 2011.
- [16] HALF; SKYE RESOURCES INC. FENIX Feasibility Study Slag Handling Design Basis November, 2005.
- [17] GEORGE; NEXHIP; KENNEDY; FOSTER; RYAN WALTON. Copper matte granulation at the kennecott utah copper smelter En: EPD congress 2006; TMS, The Minerals, Metals & Materials Society, 2006.
- [18] DIAZ, ANA. Diagramas ternarios Escoria Cerro Matoso S.A, [diapositivas] Informe interno empresa Cerro Matoso S.A, 2010. 25 diapositivas, color.

BIBLIOGRAFIA

- ARANGO, H.J. Operación con Mineral de Baja relación SiO₂/MgO. Montelibano, informe interno, empresa Cerro Matoso S.A. 2010.
- ARANGO, H. J. Proceso de sangría y granulación de escoria. Montelibano, informe interno, empresa Cerro Matoso S.A. 2011.
- CALLISTER, W. Ciencia e Ingeniería de Materiales. LTC Editora. 2002. Rio de Janeiro. Ed 5. Cap 19-20.
- COLMENA., Informe de Salud ocupacional, Enero de 2011.
- DIAZ, ANA. Diagramas ternarios Escoria Cerro Matoso S.A, [diapositivas] Informe interno empresa Cerro Matoso S.A, 2010. 25 diapositivas, color.
- EMPRESA CERRO MATOSO S.A. Manual del Proceso de Producción de Ferroníquel. Cerro Matoso S.A.
- EMPRESA CERRO MATOSO S.A. Manual de la subfase de sangría y granulación de escoria. Cerro Matoso S.A.
- GEORGE; NEXHIP; KENNEDY; FOSTER; RYAN WALTON. Copper matte granulation at the kennecott utah copper smelter En: EPD congress 2006; TMS, The Minerals, Metals & Materials Society, 2006.
- GUANGQIANG LI, HONGWEI NI. Recent process of hot stage processing for steelmaking slags in China considering stability and heat recovery.

[diapositivas] Second International Slag Valorisation Symposium, 2011. 39 diapositivas, color.

- HALF; SKYE RESOURCES INC. FENIX Feasibility Study Slag Handling Design Basis November, 2005.
- LOVERA; ARIAS; ROSA. La valoración de las escorias metalúrgicas como recursos industriales. Revista del instituto de investigación Facultad de ingeniería geología, minería, metalúrgica y geográfica, Vol 7, No 13. 2004.
- MILLS; YUAN; JONES. Estimating the physical properties of slags. En: The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2011, Vol. 111.
- NORVAL. Granulation of materials. En: EPD congress 2006; TMS, The Minerals, Metals & Materials Society, 2006.
- OLIVEIRA; MILLER; MADÍAS. Tensión superficial, viscosidad y densidad de algunas escorias CaO-Al₂O₃. En: Metal. 1999, Vol. 35 no.2, p.91-99.
- SAMAYOA, ELBER. Evaluación de la Escoria de Ferroníquel como agregado fino para morteros de Albañilería y acabados. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala 2009.
- SKUPIEN. The surface tension and foaming behavior of melts in the system CaO-FeO-SiO₂. En: Metallurgical and materials transactions B. 2000, Vol.31B31B, p.921-925.
- TRIDÍ, Informe de Granulación Escoria Cerro Matoso S.A, Septiembre 2011.

- VAN; GREIVELDINGER; WENNER. Evolution of granulation technologytms.
En: EPD congress 2006; TMS, The Minerals, Metals & Materials Society, 2006.
P.553-565.

ANEXOS

1. Distribución de tamaño de la escoria granulada con el modelo de Gaudin-Schuman.

En la granulométrica de las muestras de escoria de la piquera sur se realizan ajustes de datos en el tamaño de distribución granulométrica por medio del modelo de Gaudin- Shuman.

Mediante la siguiente ecuación general:

$$\text{Log } fx = \alpha \text{ Log } X + \text{Log}\left(\frac{100}{X_0^\alpha}\right)$$

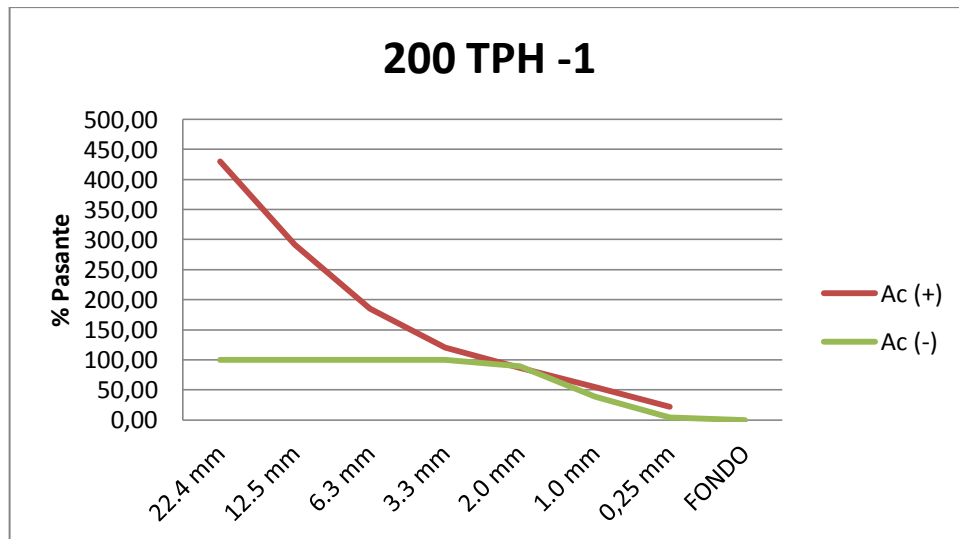
Donde:

Xo: Tamaño mínimo de la distribución.

α : Constante granulométrica.

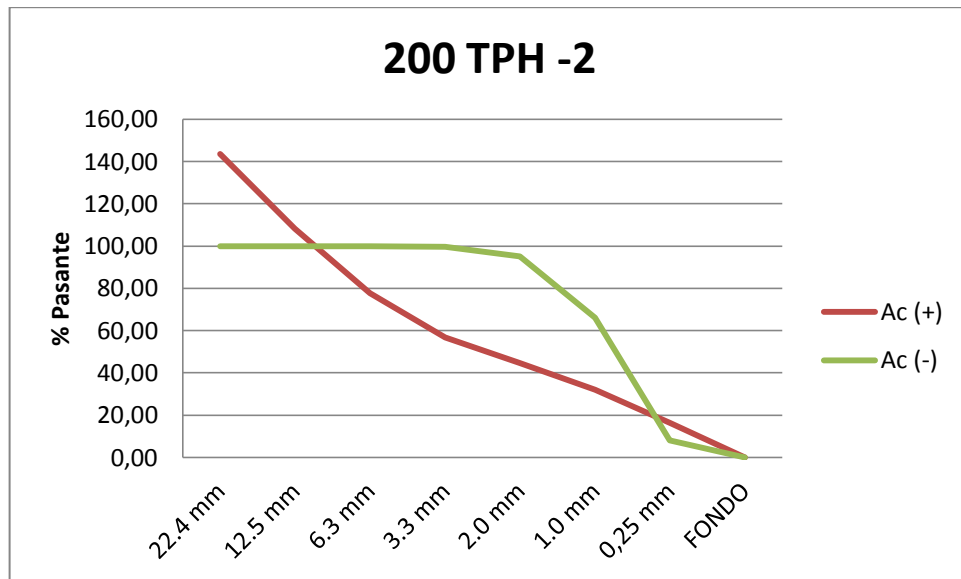
En las figura 30- 38 se grafican los resultados, y se representa Ac (-) como el porcentaje de distribución acumulativa real y Ac (+) el porcentaje de distribución acumulativa calculado por la ecuación de Gaudin-Schuman..

Figura 29. Distribución de tamaño , escoria granulada, piquera sur, flujo de sangría 200 tph, muestra 1.



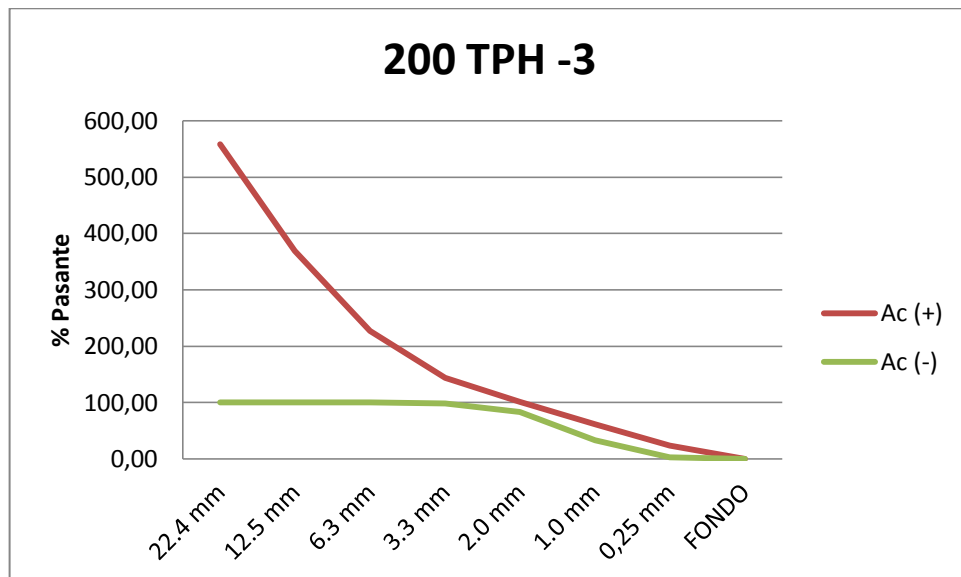
Fuente. Autor

Figura 30. Distribución de tamaño, escoria granulada, piquera sur, flujo de sangría
200 tph, muestra 2.



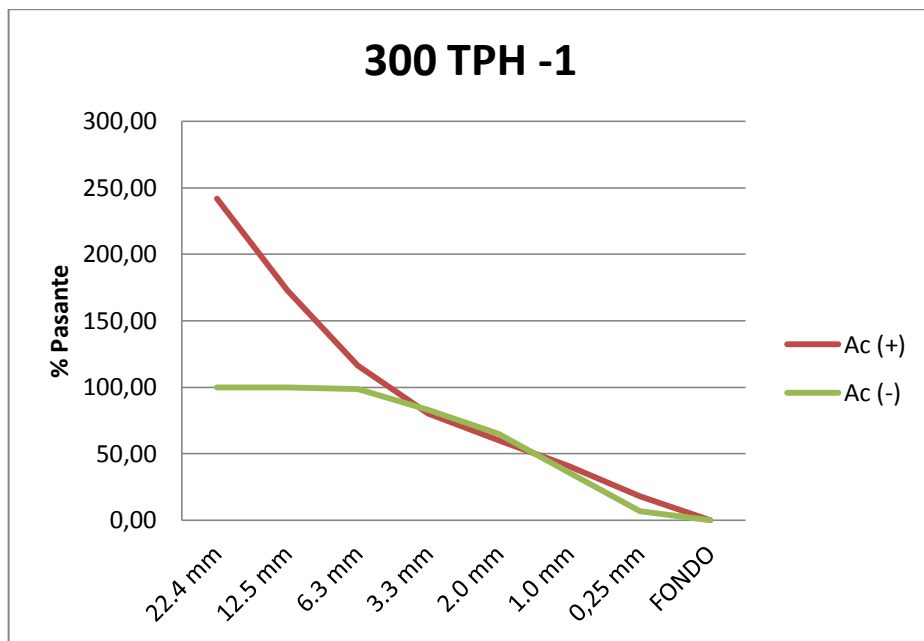
Fuente. Autor

Figura 31. Distribución de tamaño, escoria granulada, piquera sur, flujo de sangría
200 tph, muestra 3.



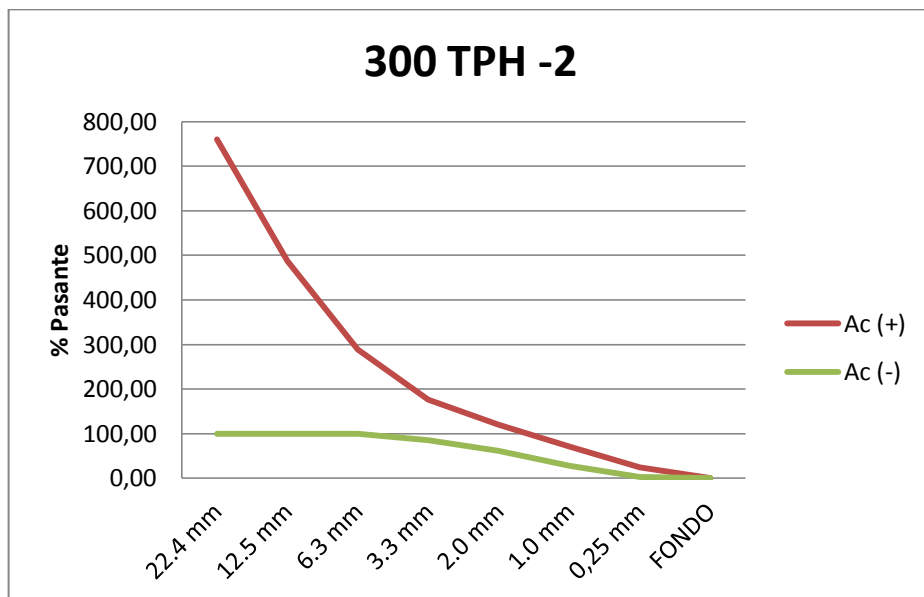
Fuente. Autor

Figura 32. Distribución de tamaño, escoria granulada, piquera sur, flujo de sangría 300 tph, muestra 1.



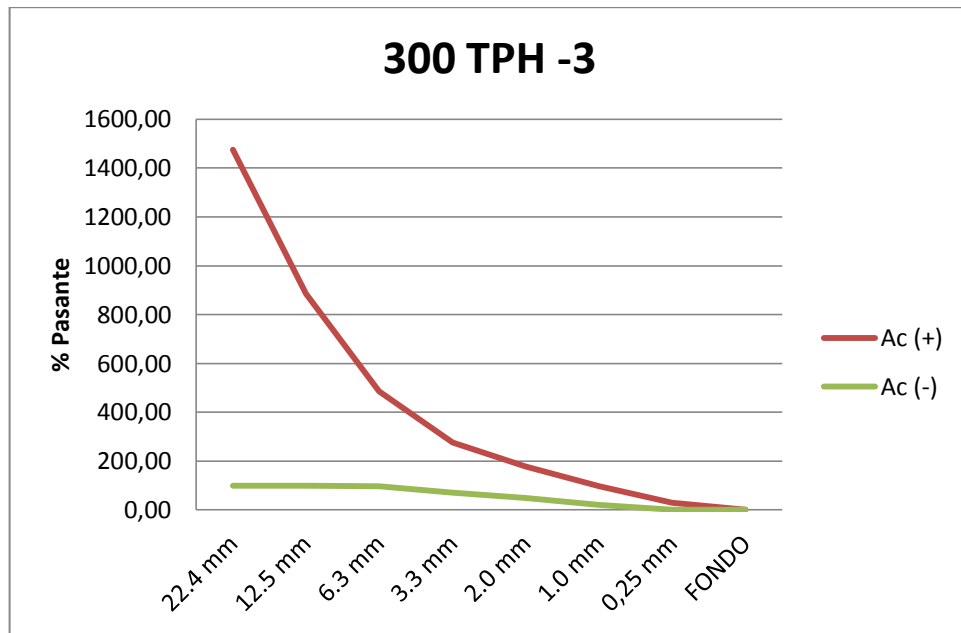
Fuente. Autor

Figura 33. Distribución de tamaño, escoria granulada, piquera sur, flujo de sangría 300 tph, muestra 2.



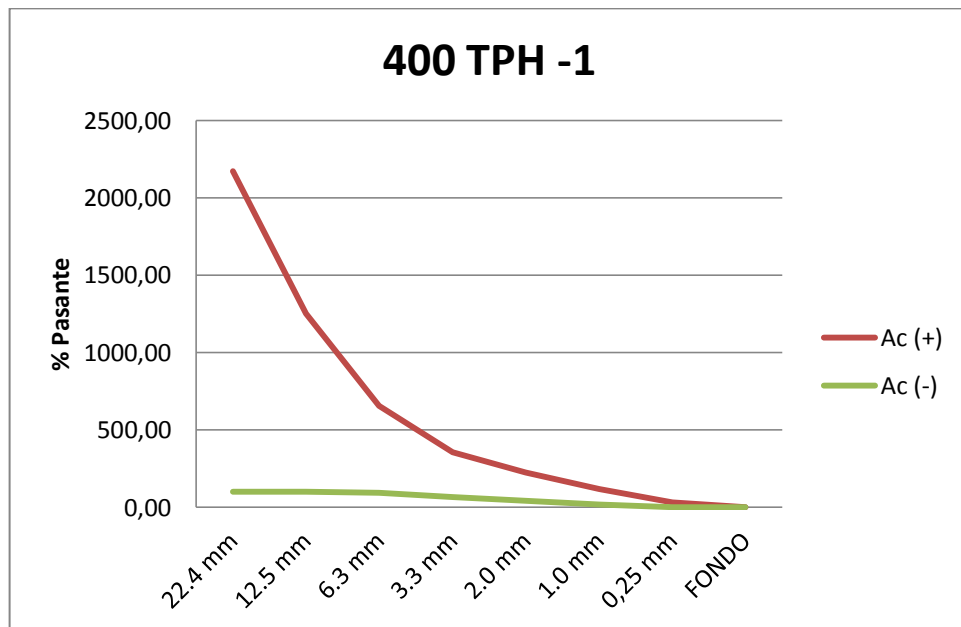
Fuente. Autor

Figura 34. Distribución de tamaño, escoria granulada, piquera sur, flujo de sangría
300 tph, muestra 3



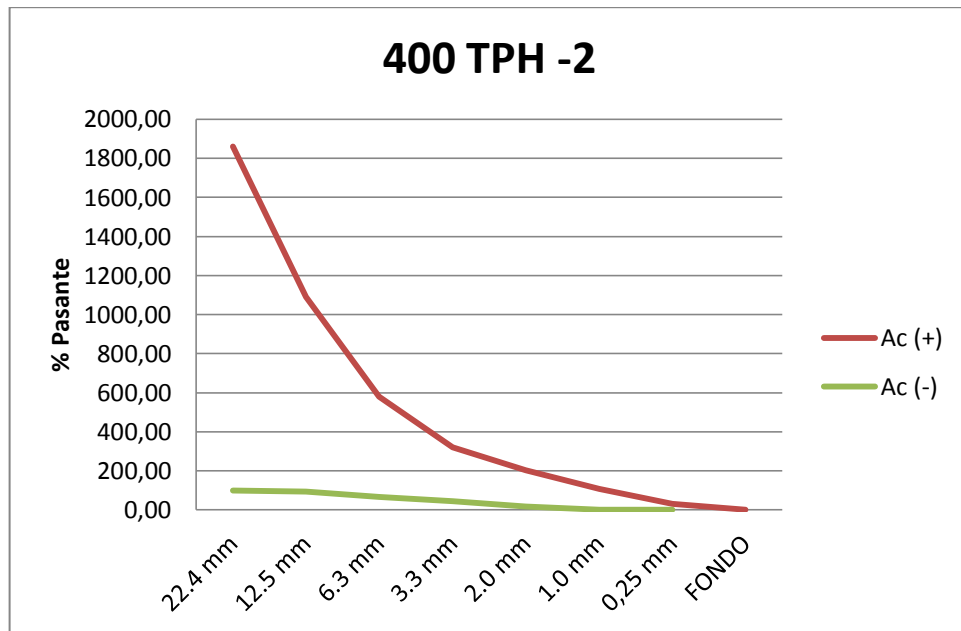
. Fuente. Autor

Figura 35. Distribución de tamaño, escoria granulada, piquera sur, flujo de sangría
400 tph, muestra 1



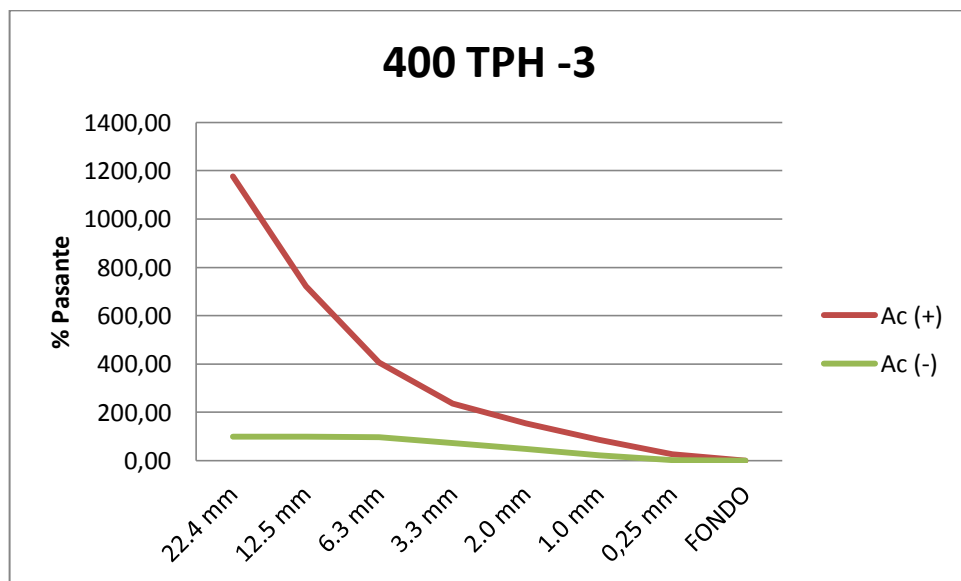
. Fuente. Autor

Figura 36. Distribución de tamaño, escoria granulada, piquera sur, flujo de sangría
400 tph, muestra 2



Fuente. Autor

Figura 37. Distribución de tamaño, escoria granulada, piquera sur, flujo de sangría
400 tph, muestra 3.



Fuente. Autor