

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DE UNA ESCORIA SINTÉTICA DESULFURANTE PARA EL PROCESO DE AFINO EN EL HORNO CUCHARA DE UNA ACERÍA

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA**

DAYANA ALEXANDRA GAVILANES RUIZ
dayan_kitty18@hotmail.com

DIRECTORA: ING. CATERINE DONOSO QUIMBITA
katheidq_3@yahoo.es

CO-DIRECTORA: ING. DIANA ENDARA DRANICHNIKOVA PhD.
diana.endara@epn.edu.ec

Quito, abril 2016

© Escuela Politécnica Nacional 2016
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Dayana Alexandra Gavilanes Ruiz declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Dayana Alexandra Gavilanes Ruiz

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Dayana Alexandra Gavilanes Ruiz, bajo mi supervisión.

Caterine Donoso Quimbita
DIRECTORA DE PROYECTO

Diana Endara Dranichnikova
CO-DIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la voluntad necesaria para culminar esta etapa.

A mis padres María y Mauricio, y mi hermano Alexander, que me han brindado lo mejor y todo en la vida. Gracias por su amor y confianza. A Uds. les debo mi vida entera.

A mi pequeño Herman, por ser mi compañero incondicional durante la carrera universitaria, y que de ahora en adelante será mi compañero de vida. Gracias por tanto. Te amo bonito.

A mi tía Verónica y mi prima Emilia, quiénes me alegran los fines de semana con sus locuras. Gracias por siempre brindarme y sacarme una sonrisa.

A mis amiwis Jowy, Gina y Dennise, por su compañía y apoyo en cada semestre. Siempre estuvimos juntas y lo logramos juntas.

A Catherine Donoso, una persona de gran corazón, quién confió en mí sin conocerme y me guió durante este proyecto, y que se ha convertido en una amiga muy querida y especial.

A mi viejo amigo Carlos, quién conozco desde el prepo y que ha demostrado la excelente persona que es, gracias por preocuparte siempre de mi pequeño.

A Sandrita y Lucho, los chicos Revista, quiénes me brindaron su amistad sincera pese al poco tiempo de conocernos, Peluche gracias por tus ocurrencias y Sandrita gracias por tus consejos.

A todos y cada uno de ustedes los llevaré siempre en mi corazón.

DEDICATORIA

*A mis padres María Ruiz y Mauricio Gavilanes,
que verán reflejado su amor y esfuerzo
en la culminación de esta etapa.*

*A mi pequeño “pequeño” que viene en camino,
que será la razón de mi vida.*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	ix
INTRODUCCIÓN	x
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Producción de acero	1
1.1.1 Generalidades	1
1.1.2 Horno de arco eléctrico	1
1.1.2.1 Clasificación de la materia prima	2
1.1.2.2 Fusión de la materia prima	3
1.1.3 Horno cuchara	5
1.1.3.1 Desoxidación	6
1.1.3.2 Ajuste de ferroaleaciones	6
1.1.3.3 Agitación del acero líquido	6
1.1.3.4 Desulfurización del acero líquido	7
1.1.4 Máquina de colada continua	16
1.2 Escorias sintéticas	17
1.2.1 Equilibrio con el acero	17
1.2.2 Funciones de la escoria sintética	18
1.2.2.1 Clasificación de las escorias	18
1.2.2.2 Estabilidad de los óxidos	19
2. PARTE EXPERIMENTAL	20
2.1 Caracterización física y química de las materias primas para la fabricación de la escoria sintética	22
2.1.1 Procedimiento de muestreo empleado	22
2.1.2 Caracterización física de las materias primas	23
2.1.3 Caracterización química de las materias primas	23
2.2 Evaluación de la metalurgia secundaria para la determinación de la composición química óptima de la escoria sintética	24
2.2.1 Desulfuración en el proceso de afino	24
2.2.1.1 Determinación de la composición teórica y la capacidad de sulfuro de la escoria sintética	24
2.2.1.2 Determinación de la partición de azufre y la cantidad de azufre final	26
2.3 Implementación de la escoria sintética en el proceso de afino y evaluación de su capacidad desulfurante	26
2.3.1 Esquema de la frecuencia de muestreo en el proceso de afino	26

2.3.2	Caracterización química de la palanquilla	28
2.4	Evaluación de la factibilidad económica del proceso de fabricación de la escoria sintética	28
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
3.1	Resultados de la caracterización física y química de las materias primas para la fabricación de la escoria sintética	29
3.1.1	Resultados de la caracterización física	29
3.1.2	Resultados de la caracterización química	31
3.2	Resultados de la evaluación de la metalurgia secundaria para la determinación de la composición química óptima de la escoria sintética	33
3.2.1	Resultados de la composición química de la escoria sintética probada en el proceso de afino formada por la escoria reciclada del EAF y LF, y de la escoria formada por la escoria reciclada del LF	33
3.2.2	Resultados de la temperatura y contenido de oxígeno del acero medidos en el proceso de afino durante las pruebas piloto que se realizaron con la escoria sintética formada por la escoria reciclada del EAF y LF, y la escoria formada por la escoria reciclada de LF	37
3.3	Resultados de la implementación de la escoria sintética en el proceso de afino y evaluación de su capacidad desulfurante	40
3.3.1	Resultados de la desulfuración del acero en el proceso de afino durante las pruebas piloto que se realizaron con la escoria sintética formada por escoria reciclada del EAF y LF, y con la escoria formada por la escoria reciclada del LF	40
3.3.2	Resultados de la basicidad binaria de la escoria generada en el LF durante el proceso de afino al realizar las pruebas piloto con la escoria sintética formada por la escoria reciclada el EAF y LF y la formada por la escoria del LF	54
3.4	Resultados de la evaluación de la factibilidad económica del proceso de fabricación de la escoria sintética	55
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
4.1	Conclusiones	57
4.2	Recomendaciones	58
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	ANEXOS	63

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Basicidad óptica para diferentes óxidos	15
Tabla 1.2.	Clasificación de los constituyentes de las escorias	19
Tabla 2.1.	Variación de la cantidad de escoria reciclada del EAF y/o LF y de la cal siderúrgica	25
Tabla 3.1.	Caracterización física de las materias primas que formaron la escoria	30
Tabla 3.2.	Caracterización química de las materias primas que formaron la escoria sintética	31
Tabla 3.3.	Composición química de la escoria sintética probada en el proceso de afino	33
Tabla 3.4.	Precios de la escoria sintética formada por la escoria reciclada del EAF y/o LF y de la escoria sintética importada	56
Tabla AII.1.	Método de Trabajo de la Acería “Especificación de Insumos Acería”.	65
Tabla AIII.1.	Tabla de referencia para ensayos granulométricos	68
Tabla AIV.1.	Método de Trabajo de la Acería “Manejo del Espectrómetro de Rayos X”	69
Tabla AV.1.	Método de Trabajo de la Acería “Toma de muestra de acero líquido”	73
Tabla AVII.1.	Informe del ensayo de granulometría de la cal siderúrgica	78
Tabla AVII.2.	Tamaño de partícula de las muestras caracterizadas de cal siderúrgica	78
Tabla AVII.3.	Informe del ensayo de granulometría de la escoria reciclada del EAF y/o LF	79
Tabla AVII.4.	Tamaño de partícula de las muestras caracterizadas de escoria reciclada del EAF y/o LF	79
Tabla AIX.1.	Caracterización química de las muestras caracterizadas de la cal siderúrgica	81

Tabla AIX.2.	Caracterización química de las muestras caracterizadas de la escoria reciclada del EAF y LF	82
Tabla AIX.3.	Caracterización química de las muestras caracterizadas de la escoria reciclada del LF	82
Tabla AX.1.	Composición química de la escoria reciclada del EAF y LF	83
Tabla AX.2.	Composición química de la escoria reciclada del LF	84
Tabla AXI.1.	Basicidad Binaria de las pruebas realizadas con la escoria reciclada del EAF y/o LF y de la escoria reciclada del LF	85
Tabla AXII.1.	Temperatura y oxidación del acero medidos durante las pruebas con la escoria reciclada del EAF y LF	86
Tabla AXII.2.	Temperatura y oxidación del acero medidos durante las pruebas con la escoria reciclada del LF	87
Tabla AXIII.1.	Desulfuración del acero de las pruebas con la escoria reciclada del EAF y LF	88
Tabla AXIII.2.	Desulfuración del acero de las pruebas con la escoria reciclada del LF	89
Tabla AXV.1.	Composición química de la escoria generada en el LF después de la prueba realizada con la escoria reciclada del EAF y LF	91
Tabla AXV.2.	Composición química de la escoria generada en el LF después de la prueba realizada con la escoria reciclada del LF	92
Tabla AXV.3.	Basicidad Binaria de la escoria generada en el LF después de las pruebas realizadas con la escoria reciclada del EAF y/o LF	93
Tabla XVI.1.	Precios de las escorias sintéticas probadas en planta	94

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Chatarra ligera. Tipo fragmentada y paca	2
Figura 1.2.	Chatarra semi pesada. Tipo troceada	3
Figura 1.3.	Chatarra pesada. Tipo troceada	3
Figura 1.4.	Esquema del Horno de Arco Eléctrico	4
Figura 1.5.	Esquema del Horno Cuchara	5
Figura 1.6.	Esquema de la máquina de colada continua	16
Figura 1.7.	Esquema de la estabilidad de los óxidos que forman las escorias	19
Figura 2.1.	Esquema propuesto para la evaluación de la capacidad desulfurante de la escoria sintética en el proceso de afino del horno cuchara	21
Figura 2.2.	Implementación de la escoria sintética durante el vaciado	26
Figura 2.3.	Esquema de la frecuencia de muestreo para evaluar la capacidad desulfurante de la escoria sintética	27
Figura 2.4.	Probeta analizada correctamente	28
Figura 3.1.	Determinación del d90 de la muestra 1 de cal siderúrgica	29
Figura 3.2.	Determinación del d90 de la muestra 1 de escoria reciclada del EAF y/o LF	30
Figura 3.3.	Relación CaO/SiO_2 de la escoria sintética probada en el proceso de afino36	37
Figura 3.4.	Temperatura medida del acero en el proceso de afino de cada prueba piloto	38
Figura 3.5.	Contenido de oxígeno (ppm) medido del acero en el proceso de afino de cada prueba piloto	39
Figura 3.6.	Cantidad de azufre teórico y experimental medida en el acero durante las pruebas piloto realizadas con la escoria sintética formada por la escoria reciclada del EAF y LF	41
Figura 3.7.	Cantidad de azufre teórico y experimental medida en el acero durante las pruebas piloto realizadas con la escoria sintética	47

	formada por la escoria reciclada del LF	
Figura 3.8.	Partición de azufre de la escoria sintética formada por la escoria reciclada el EAF y LF y la formada por la escoria del LF	53
Figura 3.9.	Basicidad binaria de la escoria generada en el LF durante el proceso de afino al realizar las pruebas piloto con la escoria sintética formada por la escoria reciclada el EAF y LF y la formada por la escoria del LF	54
Figura AI.1.	Procedimiento para el muestreo de cales en la industria química	64
Figura AVI.1.	Método de Trabajo de la Acería “Manejo del Espectrómetro de Emisión Óptica”	74
Figura AVIII.1.	Hoja técnica del óxido de magnesio para EBT	80
Figura AXIV.1.	Composición química del acero para varillas microaleadas	90

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Norma INEN 251 “Cales Muestreo”	64
ANEXO II Método de trabajo “Especificación de insumos acería”	65
ANEXO III Método de trabajo “Referencia para ensayos granulométricos”	68
ANEXO IV Método de trabajo “Manejo del espectrómetro de Rayos X”	69
ANEXO V Método de trabajo “Toma de muestra de acero líquido”	73
ANEXO VI Método de trabajo “Manejo del espectrómetro de emisión óptica	74
ANEXO VII Cálculo para la determinación del tamaño de partícula de las materias primas	78
ANEXO VIII Hoja técnica del óxido de magnesio para EBT	80
ANEXO IX Resultados de la composición química de las muestras caracterizadas de materias primas	81
ANEXO X Resultados de la composición química de las posibles combinaciones probadas en el proceso de afino	83
ANEXOS XI Resultados de la relación CaO/SiO_2 de las posibles combinaciones probadas en el proceso de afino	85
ANEXOS XII Resultados de las mediciones de temperatura y contenido de oxígeno (ppm) en el acero de cada prueba piloto	86
ANEXO XIII Resultados de la desulfuración del acero para cada tipo de prueba	88
ANEXOS XIV Norma INEN 2167 “Requisitos para varillas microaleadas”	90

ANEXO XV	91
Resultados de la escoria generada en LF después de las pruebas piloto realizadas con la escoria reciclada del EAF y/o LF	
ANEXO XVI	94
Resultados de la evaluación económica del proyecto	

RESUMEN

En este proyecto se evaluó la factibilidad técnica y económica del diseño de una escoria sintética desulfurante para el proceso de afino en el horno cuchara de una acería. La escoria sintética fue fabricada con cal siderúrgica, óxido de magnesio para EBT y la escoria reciclada del horno de arco eléctrico y horno cuchara. La caracterización física y química de las materias primas se realizó mediante un ensayo de granulometría y de fluorescencia de rayos X, respectivamente.

Se evaluó la metalurgia secundaria del acero a través del proceso de desulfuración y se consideraron dos tipos de mezclas: escoria sintética formada por la escoria reciclada del EAF y LF, y la escoria formada por la escoria reciclada del LF. Para determinar la composición teórica de la escoria sintética se realizaron 15 pruebas piloto de cada tipo de mezcla, las cuales constaron de: 54 kg de óxido de magnesio para EBT y 100 kg de la escoria generada en cada colada. Respecto a la cal siderúrgica y a la escoria reciclada del EAF y/o LF se consideró una masa total de mezcla de 180 kg, que fueron variados para alcanzar las especificaciones químicas deseadas respecto al porcentaje de azufre final. Para realizar las pruebas piloto en planta también se realizó la medición de dos variables críticas para la desulfuración, la temperatura y el contenido de oxígeno (ppm) durante el proceso de afino en el horno cuchara.

Una vez realizado el proceso de afino, se caracterizó el acero mediante un ensayo de espectrometría de emisión óptica para determinar la cantidad de azufre final en cada una de las pruebas piloto realizadas. De las treinta pruebas piloto, la evaluación técnica indicó, que se logró la mayor desulfuración de siete puntos de azufre en la décima quinta prueba de la primera mezcla con una partición de azufre de 35,99; mientras la evaluación de la factibilidad económica indicó, que en la quinta prueba de los dos tipos de mezcla se logró la desulfuración de al menos un punto de azufre con el menor costo, de 9,01 \$/33 ton acero.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de productos de acero de alta calidad conducen a la necesidad de realizar un estricto control de ciertos elementos químicos perjudiciales que afectan directamente a la calidad y resistencia del acero, es así como se decide llevar a cabo el diseño de una escoria sintética desulfurante para el proceso de afinado que se realizará en un horno cuchara recién implementado, con la finalidad de obtener un acero de mayor calidad para satisfacer el mercado demandante.

La obtención del acero destinado para la construcción radica en dos procesos: la metalurgia primaria y secundaria; la metalurgia primaria se realiza en el horno de arco eléctrico y consiste en convertir la chatarra en acero líquido para llevar a cabo operaciones metalúrgicas necesarias antes de la metalurgia secundaria, como: desfosforación y desoxidación del baño líquido. La metalurgia secundaria se desarrolló por la exigencia de mayor calidad en el acero. Algunas de las tareas que antiguamente se realizaban en el horno de arco eléctrico fueron desplazadas al horno cuchara permitiendo alcanzar aceros más limpios y con una composición química específica mediante la adición de escoria sintética para su tratamiento (Espinosa C, 2005, p. 11).

La escoria sintética desulfurante debe ser elaborada con la misma atención con la que se fabrica el acero, ya que de este tratamiento dependerá la calidad de las palanquillas que es el producto elaborado de la acería, y será la materia prima para la elaboración de varillas y perfiles. Entre los principales beneficios que nos brinda la escoria sintética desulfurante está la posibilidad de limitar la transferencia de calor entre el metal y la atmósfera, proteger el acero líquido de los gases atmosféricos, disminuir el desgaste del refractario, proteger la línea de escoria de la radiación del arco eléctrico y la limpieza del acero (Vidales, López y Nava, 2007, p. 219).

La reciente implementación del horno cuchara en la acería tiene como finalidad disminuir el tap to tap, término que define el tiempo que transcurre entre la carga de la chatarra y el vaciado del acero del horno cuchara a la colada continua. El

horno cuchara permite alcanzar un rápido calentamiento del baño líquido a razón de 3 °C por minuto con el fin de lograr un menor tiempo de calentamiento y por ende un menor consumo de energía; y al mismo tiempo generar mayor productividad con un menor costo de producción (SteelUniversity, 2004).

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 PRODUCCIÓN DE ACERO

1.1.1 GENERALIDADES

El acero es una aleación hierro-carbono; el hierro un metal relativamente duro y tenaz y el carbono un no metal frágil y blando, a excepción de su forma alotrópica de diamante. El acero mantiene las características metálicas del hierro, pero con las propiedades físico-químicas mejoradas mediante la adición de carbono y otros elementos metálicos y no metálicos (Gualda, 2012. P.13)

El proceso de producción de acero en el Ecuador requiere como materia prima la chatarra metálica que se recoge en las recicladoras a nivel nacional. Esta chatarra es fundida a una temperatura de 1 700 °C, de forma que el acero en estado líquido, que también se conoce como colada, se vacía sobre una cuchara de material dolomítico. En esta cuchara se afina el acero, es decir, se remueven impurezas y se ajusta la composición química deseada de acuerdo a las características del producto requerido.

1.1.2 HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

El horno de arco eléctrico o EAF (por sus siglas en inglés: *electric arc furnace*) es el equipo en el que la chatarra se funde por medio de electrodos de gran potencia, los que aportan energía eléctrica y por medio de la reacción de combustión que se origina por el ingreso de carbón y oxígeno a través de una lanza, la cual aporta energía química.

1.1.2.1 Clasificación de la materia prima

El horno de arco eléctrico opera con chatarra de acero reciclada, añadiéndose además una cantidad establecida de aleaciones de hierro para conseguir una composición determinada en el acero. De manera general, existen dos tipos de chatarra; siendo la primera, la chatarra interna que proviene de los procesos de elaboración del acero en la propia planta, pero que no forma parte del producto final obtenido, por lo que se la recicla para procesos posteriores. Por otro lado, se tiene la chatarra comercial, es decir, la que se encuentra disponible en el mercado y que habitualmente se compone de electrodomésticos, materiales de construcción, partes de automóviles, latas y demás artículos que están fuera de uso. La chatarra comercial, a su vez, ha sido subdividida de acuerdo a diversos factores; por ejemplo su composición química, tamaño, forma, homogeneidad, cantidad de impurezas presentes o densidad (Portilla, 2012, pp. 29,30).

Dentro de la clasificación por densidad existen la chatarra ligera que es procesada por la fragmentadora y la prensadora, las cuales se denominan chatarra tipo fragmentada y tipo paca respectivamente, la chatarra semi pesada es procesada por la Harrys y la tijera, las cuales se denominan chatarra tipo troceada en ambos casos, y finalmente la chatarra pesada es procesada por el oxicorte y también se denomina chatarra tipo troceada, tal como se indica en las Figuras 1.1., 1.2. y 1.3. (Görnerup y Poliakova, 2012, pp. 1,8).



Figura 1.1. Chatarra ligera. Tipo fragmentada y paca.



Figura 1.2. Chatarra semi pesada. Tipo troceada



Figura 1.3. Chatarra pesada. Tipo troceada

1.1.2.2 Fusión de la materia prima

El horno de arco eléctrico emplea un mecanismo de calefacción eléctrica de alta corriente, con un mejor control térmico respecto al proceso básico con oxígeno que se utiliza para fundir la chatarra de acero y convertirla en acero líquido.

El ciclo de funcionamiento para la producción de acero en el horno de arco eléctrico inicia con la carga de la chatarra en el horno, luego por la fundición, la refinación y el muestreo (de composición y temperatura) y finalmente se realiza el colado. Es necesario precalentar la chatarra, ya que esto reduce el requerimiento energético para la fusión de la chatarra, además de que se disminuye el “tap to tap”, es decir, el tiempo que transcurre desde que la chatarra ingresa al horno hasta que sale la colada.

La bóveda del horno está constituida externamente por una chapa metálica e internamente por una solera refractaria dolomítica, además cuenta con tres electrodos de grafito verticales, que se extienden hacia abajo desde un techo desmontable en forma de cúpula, como se muestra en la Figura 1.4. El horno puede estar inclinado hacia atrás para la eliminación de la escoria y hacia adelante para el proceso de colado. El horno también suele equiparse con quemadores de combustible con oxígeno, cuya relación puede variarse para ajustar la eficiencia energética del equipo. Adicionalmente, se añaden agentes fundentes (cal y dolomita) para promover la formación escoria, de modo que se puedan eliminar impurezas. La inyección de oxígeno y carbón dentro del horno también favorece la formación de espuma de escoria (Janke, Savov, Weddige y Schulz, 2000, pp. 387-388).



Figura 1.4. Esquema del Horno de Arco Eléctrico

La formación de espuma de escoria es común en el funcionamiento del horno de arco eléctrico. Entonces, el carbón o coque que se inyecta en el horno sirve para aumentar la eficiencia en la fundición, ya que se suministra energía adicional de la combustión con el oxígeno inyectado. La espuma de escoria además reduce el desgaste del material refractario en el horno (Durinck et al., 2008, p. 1 122).

Una vez que la chatarra de acero se funde completamente y el acero líquido cumple con las especificaciones químicas y de temperatura inicia el proceso de vaciado hacia el horno cuchara, el cual se inicia con la apertura del EBT y el vasculamiento del horno, en donde por acción de la gravedad cae dentro de la cuchara el óxido de magnesio para EBT seguido del acero líquido, el óxido de

magnesio para EBT sirve para el taponamiento o relleno de las piqueras EBT que tiene el horno de arco eléctrico.

1.1.3 HORNO CUCHARA

La segunda etapa del proceso de producción de acero se realiza en un equipo que recibe el nombre de horno cuchara, mismo que consiste en un contenedor cilíndrico abierto en la parte superior recubierto con material refractario de dolomita. Una vez que el acero líquido sale del horno de arco eléctrico, es vaciado sobre la cuchara, momento en el que se realiza el ajuste y afino del acero para ser ubicado inmediatamente bajo el techo desmontable donde se ubican los electrodos, así como se muestra en la Figura 1.5. Este equipo se ha abreviado como LF (por sus siglas en inglés: *ladle furnace*) (Adolfsson, Engström, Robinson y Björkman, 2011, p. 399).

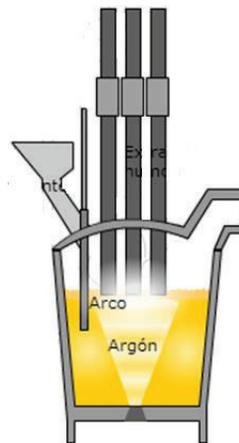


Figura 1.5. Esquema del Horno Cuchara

El proceso de refinación o también conocido como ajuste comprende las siguientes etapas:

- Desoxidación.
- Ajuste de ferroaleaciones.
- Agitación para alcanzar la temperatura necesaria y una composición homogénea del acero.
- Desulfurización.

1.1.3.1 Desoxidación

El contenido de oxígeno del acero líquido que proviene del EAF es usualmente alto, ya que se inyecta oxígeno tanto para promover la combustión, como para formar la escoria. No obstante, el acero requiere un menor contenido de oxígeno, es por esto que debe ser eliminado. Este proceso de desoxidación se consigue mediante la adición de aluminio y ferrosilicio (FeSi) durante el vaciado de la colada.

La reacción 1.1. y la reacción 1.2. indican como se da el proceso de desoxidación:



Estas reacciones son exotérmicas, por lo que se incrementa la temperatura de la colada, pero asimismo pierde calor por radiación. Entonces, con el fin de reducir dicha pérdida de calor, se suele precalentar la cuchara antes del colado (Engh, 1992, p. 87).

1.1.3.2 Ajuste de ferroaleaciones

El ajuste de la composición final del acero se realiza mediante el calentamiento y la adición de ferroaleaciones silicio, manganeso principalmente, existen algunos casos en que se emplean otras aleaciones dependiendo de la calidad y tipo de acero, entre estos tenemos vanadio, niobio, cromo, cobre.

1.1.3.3 Agitación del acero líquido

El horno cuchara puede estar equipado con agitación electromagnética o a su vez se puede inyectar un gas inerte desde la parte inferior del horno,

generalmente argón. La agitación es importante para alcanzar una buena interacción entre la fase metálica y la escoria para un mejor ajuste químico del acero. Además, contribuye a la eliminación de hidrógeno, nitrógeno y otras inclusiones no metálicas que pueden ser perjudiciales si no son eliminadas antes de solidificar el acero (Adolfsson et al., 2011, p. 399).

1.1.3.4 Desulfurización del acero líquido

En la producción de acero, el azufre debe ser reducido hasta una determinada concentración. El control de azufre no se aplica únicamente al proceso de desulfuración, sino que incluye también el proceso de selección de materias primas y la metalurgia primaria (proceso en el horno de arco eléctrico). En el proceso de desulfuración, el mecanismo de acción se fundamenta en la transferencia de azufre desde la fase metálica hacia la escoria. Generalmente se lo realiza con la adición de calcio a través de un alambre de acero que lo protege de la temperatura dentro del horno cuchara y así evitar su ebullición, ya que el punto de ebullición del calcio es de 1 491 °C, mientras que la cuchara se encuentra a una mayor temperatura. (Wondris, 2015, p. 15).

En un adecuado proceso de desulfuración se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Una escoria líquida fluida con un alto contenido disuelto de cal.
- Una temperatura alta que mejore la termodinámica y la cinética del proceso.
- Bajo contenido de oxígeno en el acero, mientras más bajo es mejor.
- Un volumen adecuado de escoria, que al ser mayor significa una mayor remoción de azufre para una misma relación de distribución de cargas fundentes.
- Agitación del acero líquido.

La desulfuración es una práctica esencial en la elaboración de productos de acero limpios, consiguiéndose aceros con alta resistencia a la fatiga que operan bajo condiciones alto impacto (Lange, 1988, p. 55). Los parámetros termodinámicos que influyen en el proceso se detallan a continuación:

a. Reacción de desulfuración y capacidad de sulfuro

La transferencia de azufre desde la fase metálica hacia la escoria se describe mediante la reacción 1.3.:



Donde [S] y [O] representan el azufre y el oxígeno disueltos en el acero respectivamente, mientras que (S^{2-}) y (O^{2-}) son el sulfuro y el oxígeno en la escoria respectivamente.

En este caso el equilibrio de la reacción no se puede evaluar directamente, ya que existe dificultad al analizar la actividad de las especies iónicas presentes en la escoria, por lo que se deben determinar experimentalmente de acuerdo a la reacción 1.4. que muestra un equilibrio gas-escoria.



De esta manera, se puede determinar la constante de equilibrio según la ecuación 1.5.:

$$k_1 = \frac{a_{S^{2-}} (a_{O_2})^{1/2}}{a_{O^{2-}} (a_{S_2})^{1/2}} \quad [1.5]$$

Entonces, las actividades tanto del oxígeno gaseoso como del azufre gaseoso pueden ser reemplazadas por sus presiones parciales, como se indica en la reacción 1.6.:

$$k_1 = \frac{a_{S^{2-}}}{a_{O^{2-}}} \left(\frac{p_{O_2}}{p_{S_2}} \right)^{1/2} \quad [1.6]$$

Por otro lado, la especie S^{2-} se puede expresar en términos de su coeficiente de actividad y el porcentaje de azufre en la escoria, según la ecuación 1.7.:

$$k_1 = \frac{f_{S^{2-}} (\%S)}{a_{O^{2-}}} \left(\frac{p_{O_2}}{p_{S_2}} \right)^{1/2} \quad [1.7]$$

De esta expresión se puede definir la capacidad de sulfuro C_S de acuerdo a la ecuación 1.8, la cual es una propiedad de la escoria que depende únicamente de la temperatura y la composición de la escoria. La capacidad de sulfuro describe la capacidad potencial de una determinada escoria fundida para eliminar el azufre, y que a su vez podría ser utilizada para comparar las características de desulfuración de una escoria diferente (Andersson, Jönsson y Nzotta, 1999, p. 1 141).

$$C_S = \left(\frac{p_{O_2}}{p_{S_2}} \right)^{1/2} \cdot (\%S) \quad [1.8]$$

Por tanto, de la ecuaciones 1.7. y 1.8., la capacidad de sulfuro se puede expresar según la ecuación 1.9.:

$$C_S = \frac{k_1 a_{O^{2-}}}{f_{S^{2-}}} \quad [1.9]$$

Dado que las actividades de los óxidos y la presión parcial de las fases gaseosas no se encuentran fácilmente disponibles como parámetros del proceso, la capacidad de sulfuro se suele expresar en términos de temperatura y composición como se dijo anteriormente, y de esta forma se emplean como herramientas de control de procesos.

La ecuación 1.10. muestra uno de los modelos planteados para obtener la capacidad de sulfuro en función de la temperatura en un rango entre 1 400 °C y

1 700 °C y un nuevo término que se conoce como basicidad óptica (Λ) (Sosinsky y Sommerville, 1986, p. 336).

$$\log C_S = \frac{[22\,690 - (54\,640 \Lambda)]}{T} + (43,6 - 25,2) \quad [1.10]$$

b. Partición de azufre

Así como se estudió el equilibrio gas-escoria, de igual forma se debe tomar en cuenta el equilibrio metal-escoria del proceso. Para lo que se muestra la ecuación 1.11. que indica dicho equilibrio:



Donde [S] y [O] representan el azufre y el oxígeno respectivamente, en la fase metálica, tal como se indicó anteriormente. Asimismo, se puede expresar la constante de equilibrio de acuerdo a la ecuación 1.12.:

$$k_2 = \frac{a_O}{a_S} \left(\frac{p_{S_2}}{p_{O_2}} \right)^{1/2} \quad [1.12]$$

Si se introduce en la ecuación anterior la definición de capacidad de sulfuro y si se expresa la actividad del azufre en función del coeficiente de actividad y el porcentaje de azufre en la fase metálica, se consigue la ecuación 1.13.:

$$k_2 = \frac{(\%S)}{[\%S]} \frac{a_O}{f_S \cdot C_S} \quad [1.13]$$

La relación entre el porcentaje de azufre en la escoria y en la fase metálica se conoce como partición de azufre (L_S), tal como se visualiza en la ecuación 1.14.:

$$L_S = \frac{(\%S)}{[\%S]} \quad [1.14]$$

Además la constante de equilibrio, en términos de temperatura queda expresada tal como indica la ecuación 1.15.:

$$\log k_2 = -\frac{935}{T} + 1,375 \quad [1.15]$$

Al combinar las ecuaciones 1.13., 1.14. y 1.15. se obtiene la ecuación 1.16. que presenta a la partición de azufre en términos de la capacidad de sulfuro (Görnerup, 1997, p. 14).

$$\log L_S = -\frac{935}{T} + 1,375 + \log C_S + \log f_S - \log a_O \quad [1.16]$$

El coeficiente de actividad f_S en la fase metálica puede ser calculado con base en la composición del acero. Por ejemplo, para aceros al carbón comunes, el coeficiente de actividad es cercano a 1, por tanto el logaritmo del coeficiente tiende a cero, por lo que se puede despreciar sin variar significativamente el valor calculado de la partición de azufre. Por el contrario, la actividad del oxígeno, en este caso, el coeficiente de actividad varía de tal modo que no puede ser despreciado. (Famurewa, 2009, p. 10, 11).

Si la capacidad de sulfuro es conocida para una determinada escoria, entonces la partición de azufre puede ser calculada para un sistema específico escoria-metal, en donde los valores tanto del coeficiente de actividad del azufre como la actividad del oxígeno son conocidos. Para una mejor desulfuración del acero, se requiere un valor alto de partición de azufre, mismo que se puede conseguir con una alta temperatura, además se debe procurar obtener una alta capacidad de sulfuro y una baja actividad de oxígeno. A su vez el coeficiente de actividad f_S se corrige por la composición en la fase metálica, por lo que no se la considera como una variable controlable. En consecuencia, se puede notar que la partición de azufre no depende de la masa en el sistema escoria-metal ni del contenido inicial de azufre (Pretorius y Oltman, 2008, p. 9).

Una vez conocido el valor de partición de azufre, y a partir de la ecuación 1.16 se obtiene la cantidad de azufre final en el metal con la ecuación 1.17.

$$[\%S]_f = \frac{[\%S]_o \cdot W_m}{W_m + L_S \cdot W_{slag}} \quad [1.17]$$

Donde W_m y W_{slag} representan el peso del metal y escoria respectivamente.

c. Actividad de oxígeno

La actividad de oxígeno tiene un gran impacto sobre la partición de azufre. Generalmente para la desoxidación del metal en la cuchara, en este sentido, mientras más alta sea la concentración del agente desoxidante (Al o FeSi) en el metal, habrá una menor actividad de oxígeno. Dependiendo del agente desoxidante, usualmente cuando se usa aluminio la actividad de oxígeno es menor que cuando se usa ferrosilicio. De la misma manera, mientras menor sea la actividad del óxido correspondiente (en la escoria, o en el metal como inclusiones) habrá una menor actividad de oxígeno. Tal como se menciona anteriormente, un valor bajo en la actividad de oxígeno implica una mayor partición de azufre, por consiguiente, existirá una mayor remoción de azufre en el acero.

De este modo se puede determinar la actividad de oxígeno para el proceso de desulfuración de dos formas diferentes:

Una medición real de la actividad de oxígeno y la temperatura en la cuchara mediante una lanza, misma que produce una fuerza electro motriz (emf) y que se mide en voltios de forma relativa a una celda de referencia con un potencial de oxígeno conocido. Dicha fuerza electro motriz es recalculada o convertida en una señal que indica el contenido de oxígeno en partes por millón (ppm), y en algunas ocasiones como contenido de carbono.

La otra forma de calcular la actividad de oxígeno se realiza con base en la reacción de equilibrio escoria-metal tomando en cuenta al agente desoxidante. No obstante, existe una dificultad al realizar este cálculo al estimar la actividad del óxido correspondiente que se forma de acuerdo al agente desoxidante, sea óxido de aluminio (Al_2O_3) o dióxido de silicio (SiO_2). Sea cual sea el agente

empleado, se debe estimar su actividad mediante una correlación determinada experimentalmente en sistemas similares o con modelos que permitan establecer una actividad aproximada.

Nótese que la actividad de oxígeno en la fase metálica se mide con una lanza, pero dicho valor puede variar de acuerdo a las condiciones de la interfase escoria-metal, por lo que se debe considerar el equilibrio de la reacción. Cuando el contenido de oxígeno se ha determinado, junto con el coeficiente de actividad, se puede determinar la actividad de oxígeno. En la mayoría de aceros con bajo contenido de carbono, el efecto del aluminio, del silicio y el carbono presentes en la fase metálica, es muy importante cuando se trata de determinar el coeficiente de actividad de oxígeno.

La precisión en la medición y el posterior cálculo de la actividad de oxígeno que determina la partición de azufre es crítica, especialmente cuando existe una baja actividad o bajo contenido de oxígeno en el acero. Por lo tanto, el cálculo de la partición de azufre se vuelve muy sensible a dichas condiciones. Entonces, una leve desviación entre la partición de azufre determinada por el valor real de actividad de oxígeno y un valor estimado o calculado, puede desembocar en una gran desviación del valor real de azufre presente en el acero. Para el cálculo del contenido de oxígeno en el acero, se ha considerado un coeficiente de actividad igual a 1, por lo que el porcentaje de oxígeno en la fase metálica se puede determinar según la ecuación 1.18.

$$[O\%] = \frac{ppm [O]}{10\ 000} \quad [1.18]$$

Para una cantidad muy baja de oxígeno, existe la posibilidad de que las condiciones en la interfase escoria-metal varíen respecto a la fase metálica, debido a los gradientes de concentración y a la actividad del óxido formado. La actividad del Al_2O_3 o del SiO_2 son más bajas en la interfase, debido a su solubilidad en la escoria, mientras que en la fase metálica, los óxidos se pueden encontrar como inclusiones, y su actividad puede aproximarse a 1.

d. Temperatura

Otro parámetro esencial en el proceso de desulfuración es la temperatura, misma que influye sobre la viscosidad y la capacidad de sulfuro en la escoria, consecuentemente influye sobre la partición de azufre en la fase metálica y en la escoria. La viscosidad interviene en la cinética de la reacción de la cuchara. Tanto la viscosidad del acero como de la escoria afecta la transferencia de masa durante la refinación del acero en el horno cuchara. Entonces, si se tiene una escoria con una baja viscosidad, existe una mejor dispersión del sistema en la fase metálica y además al área interfacial se aumenta, por ende, existe una mayor transferencia de masa de azufre de la fase metálica hacia la escoria.

En cuanto a la capacidad de sulfuro, se han desarrollado varios modelos que permiten evaluar esta propiedad como función de la temperatura y de su composición. La mayoría de estos modelos coinciden en que la capacidad de sulfuro se mejora conforme aumenta la temperatura, y que cuando existe una caída de temperatura considerable puede afectar a la capacidad de sulfuro, reduciendo la desulfuración.

e. Basicidad óptica

La basicidad óptica se emplea para clasificar a los óxidos en una escala de acidez. Este concepto proviene entre otros principios, de la teoría de ácidos y bases de Lewis, en donde se indican que sustancias como las bases pueden ser consideradas como donantes de electrones, respecto a los ácidos que poseen su octeto de electrones incompleto y que como resultado puede existir una reacción de adición entre una base y un ácido de Lewis.

En este contexto, los científicos Duffy e Ingram en 1976, se dedicaron a estudiar el comportamiento de materiales vítreos y de escorias bajo radiación ultravioleta y se dieron cuenta de que existen cambios de frecuencia en su banda de absorción. Estos cambios se pueden expresar en términos de la basicidad óptica, la cual es una relación de la capacidad para donar electrones de las sustancias

que componen la escoria respecto a la de un patrón (óxido de calcio) que posee un valor de basicidad óptica de 1. En definitiva, este valor es una medida de la concentración de las diferentes especies de oxígeno (O^0 , O^- y O_2 libre) en mezclas fundidas de alúmino-silicatos (Ghosh, Krishnamurthy y Sankaranarayanan, 2010).

La ecuación 1.19. muestra dicha relación:

$$\Lambda = \frac{\text{capacidad de donar electrones de la escoria}}{\text{capacidad de donar electrones del CaO}} \quad [1.19]$$

La Tabla 1.1. muestra los valores teóricos de basicidad óptica para algunos óxidos. Nótese que dichos valores son adimensionales.

Tabla 1.1. Basicidad óptica para diferentes óxidos

Óxido	Basicidad óptica
Na ₂ O	1,15
CaO	1,0
MgO	0,78
CaF ₂	0,67
TiO ₂	0,61
Al ₂ O ₃	0,61
MnO	0,59
Cr ₂ O ₃	0,55
FeO	0,51
Fe ₂ O ₃	0,48
SiO ₂	0,48

(Quintana, Gómez, Cruz y Perdomo, 2011, p. 140)

Asimismo, en estudios previos se han determinado varios modelos para realizar el cálculo de la basicidad óptica. Uno de ellos es el de la ecuación 1.20.

$$\sum_{i=1}^n \frac{x_i n_i \Lambda_i}{x_i n_i} \quad [1.20]$$

Donde x es la fracción molar de cada óxido, n el número de átomos de oxígeno presente en una molécula de óxido y Λ_i la basicidad óptica de cada óxido.

1.1.4 MÁQUINA DE COLADA CONTINUA

La tercera etapa del proceso de producción de acero se realiza en la máquina de colada continua, generalmente abreviada por las siglas MCC que consta de un distribuidor y un sistema de enfriamiento. Una vez que el acero líquido ha alcanzado la composición química deseada y la temperatura necesaria para colar es trasladado hacia la MCC mediante un puente grúa, el cual vacía el acero líquido en el distribuidor de líneas de producción, las cuales constan de moldes donde adoptan la geometría de la palanquilla o planchones e inmediatamente inicia el sistema de enfriamiento en la parte curva de la máquina donde es enfriada por chorros de agua. Posteriormente la palanquilla de acero inicia el camino de rodillos por una zona recta de la MCC hasta alcanzar la longitud deseada y es cortada mediante sopletes de corte (Fernández, 2013, pp. 18, 20).

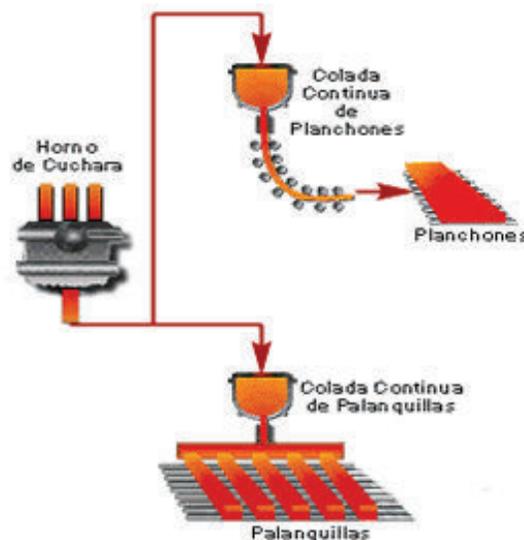


Figura 1.6. Esquema de la máquina de colada continua

1.2 ESCORIAS SINTÉTICAS

Varios recursos como los diagramas de fase o modelos de escoria líquida, pueden ser usados para el diseño de escorias de acuerdo a un requerimiento metalúrgico en específico. La selección de sustancias que reduzcan la viscosidad de la escoria, es decir, que permitan una mayor fluidez de la misma (SiO_2 , Al_2O_3 o incluso CaF_2), es muy importante, ya que la solubilidad del CaO y del MgO son altamente dependientes del tipo de sustancia que se use, así como para el cálculo de la viabilidad del desgaste del refractario que está en contacto con la escoria (Heput, Ardelean, Socalici, Maksay y Gavanescu, 2006, p. 42).

Debido a que el CaO posee una gran basicidad óptica respecto al resto de sustancias que conforman la escoria, se lo debe tener muy presente por su alto impacto en dicha propiedad, lo que significa que permitirá una mayor capacidad de sulfuro. Tal como se muestra en la Tabla 1.1., en orden decreciente, las sustancias de acuerdo a la basicidad óptica se muestran de la siguiente manera: CaO , MgO , Al_2O_3 y SiO_2 . Por tanto, si se reemplaza al Al_2O_3 con SiO_2 como sustancia fluidizante, provocará una disminución en la capacidad de sulfuro, puesto que su basicidad óptica es menor evidentemente, y además porque la solubilidad de la cal disminuye. En otras palabras, no se puede usar una composición de la escoria al azar o mucho menos a una temperatura cualquiera, además se debe tomar en cuenta la fluidez de la escoria y su compatibilidad con el material refractario de la cuchara. Para lograr diferenciar la escoria y el refractario en cuanto a su composición química, se establece el siguiente concepto:

Refractario: Mezcla de óxidos sólidos a la temperatura del proceso.

Escorias: Mezcla de óxidos fundidos a la temperatura del proceso.

1.2.1. EQUILIBRIO CON EL ACERO

Los elementos disueltos en el acero tienden a un equilibrio con el mismo elemento en la escoria. Este equilibrio se puede representar con M/\underline{M} , donde M

indica el porcentaje del elemento en la escoria y M el porcentaje del elemento en el acero; esta relación se denomina coeficiente de partición y se lo representa L_M . El valor de equilibrio de este coeficiente depende de factores como el grado de oxidación del baño, la basicidad de la escoria y la temperatura; si estos factores cambian, el coeficiente de partición también, de esta forma, se modifica la composición del acero y de la escoria.

1.2.2. FUNCIONES DE LA ESCORIA SINTÉTICA

- Cubrir el arco eléctrico en el EAF y LF protegiendo los refractarios contra la radiación de la misma.
- Mejorar la calidad del acero absorbiendo los productos de la desoxidación e inclusiones.
- Participar en los procesos de desfosforación y desulfuración.
- Proteger la superficie del acero contra la oxidación
- Proteger la superficie del acero contra absorción de hidrógeno y nitrógeno.
- Funciona como fase aislante minimizando las pérdidas térmicas del baño metálico.
- Ser completamente compatible con los materiales refractarios.

Cuando existe la presencia de una “mala escoria” en el proceso de afino, se presenta las siguientes características:

- No es compatible con los refractarios con los que está en contacto, disolviéndolos hasta su saturación.
- Contiene grandes cantidades de óxidos oxidantes FeO y MnO, que actúan en la reducción de los rendimientos de las ferroaleaciones.

1.2.2.1. Clasificación de las escorias

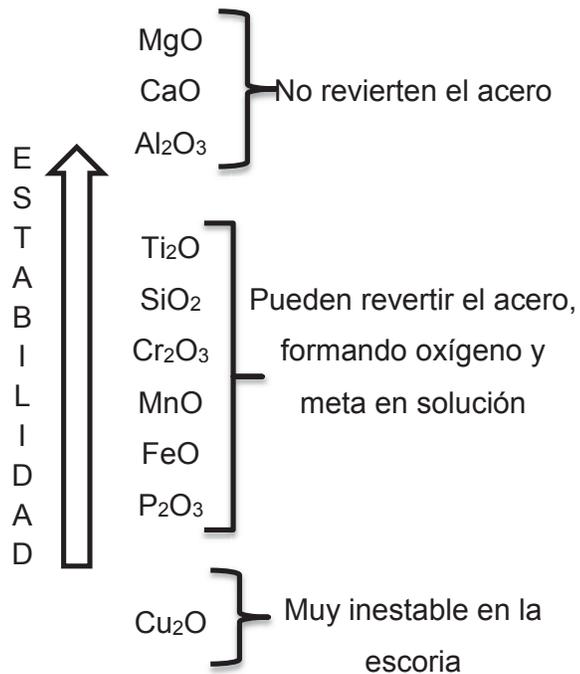
En la Tabla 1.2. se muestra la clasificación de los constituyentes que pueden estar conformando las escorias que son usadas para la industria del acero.

Tabla 1.2. Clasificación de los constituyentes de las escorias

	Oxidantes	Neutros	Reductores
Básicos	FeO MnO	CaO MgO FeO MnO	
Neutros		ZrO CaF ₂	C Grafito
Ácidos	Fe ₂ O ₃ P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃ Cr ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ SiO ₂ P ₂ O ₅	

1.2.2.2. Estabilidad de los óxidos

En la Figura 1.7. se muestra la estabilidad de los óxidos que pueden estar conformando las escorias que son usadas para la industria del acero.

**Figura 1.7.** Esquema de la estabilidad de los óxidos que forman las escorias

2. PARTE EXPERIMENTAL

En el presente proyecto se evaluó la capacidad desulfurante de una escoria sintética para el proceso de afino del horno cuchara, para ello se realizó la caracterización física y química de las materias primas que formaron la escoria sintética, mediante un ensayo de granulometría y un análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X respectivamente. Una vez caracterizadas las materias primas se identificó los componentes que constituirían la escoria sintética.

Para evaluar los porcentajes de cada componente se realizó iteraciones en base a la cinética de desulfuración correspondiente a la metalurgia secundaria del acero, la iteración se detiene cuando el porcentaje de azufre final corresponde al porcentaje de azufre deseado. Se evaluó la capacidad desulfurante de dicha composición mediante pruebas piloto que se realizaron en el proceso de afino del horno cuchara, con lo cual queda definida la composición experimental óptima de la escoria sintética. El porcentaje de azufre final se determinó mediante probetas de acero tomadas una vez finalizado el proceso de afino del horno cuchara, estas muestras fueron llevadas al laboratorio para el análisis químico mediante espectrometría de emisión óptica.

Finalmente se evaluó la factibilidad económica mediante en estudio comparativo entre el costo de fabricación de la escoria sintética probada en planta con respecto al precio de la escoria sintética importada.

La parte experimental se resume en la Figura 2.1.

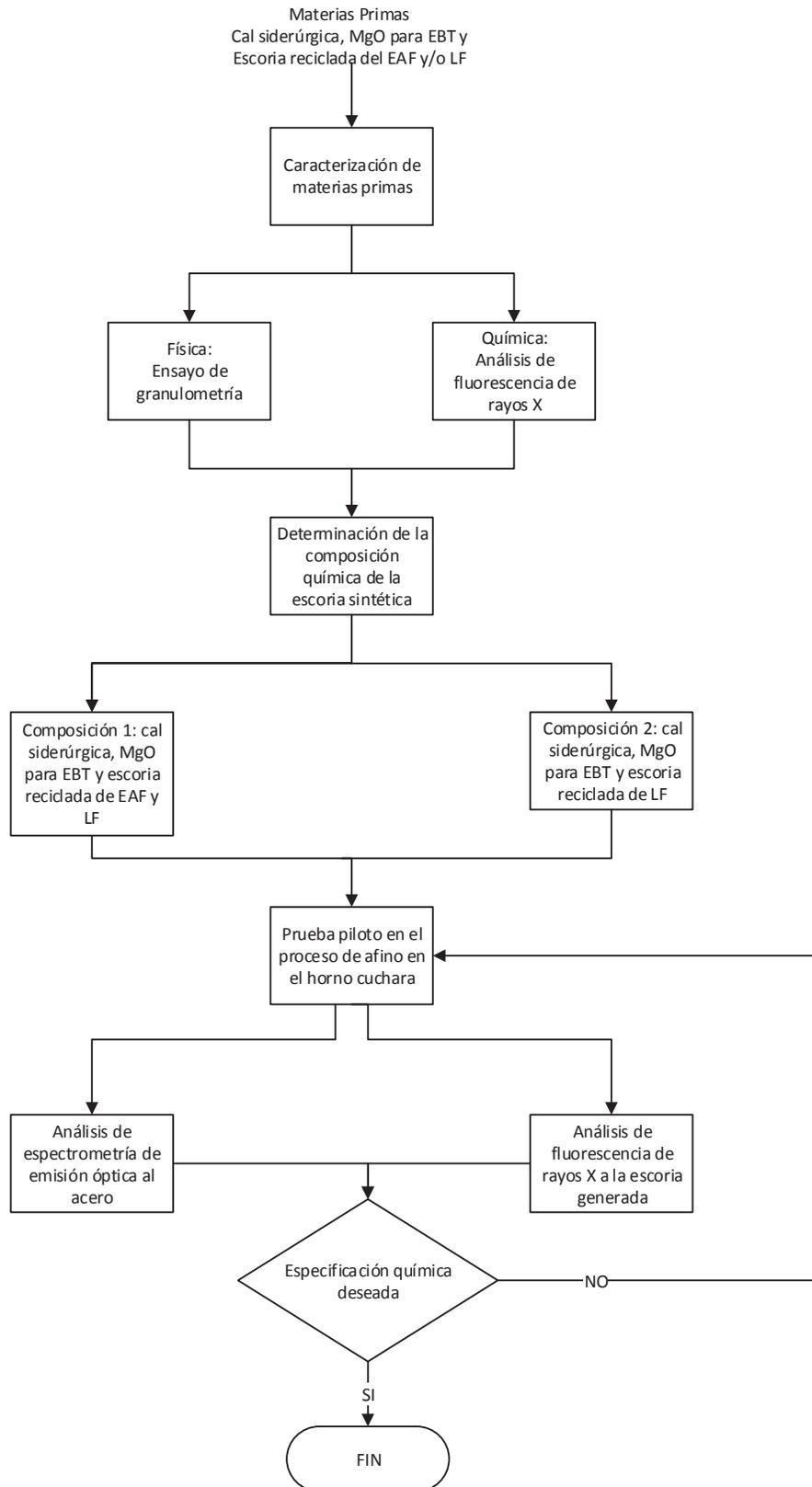


Figura 2.1. Esquema propuesto para la evaluación de la capacidad desulfurante de la escoria sintética en el proceso de afino del horno cuchara

2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE LA ESCORIA SINTÉTICA

2.1.1 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO EMPLEADO

Las materias primas utilizadas en este proyecto fueron: cal siderúrgica, óxido de magnesio para EBT y escoria reciclada tanto del horno de arco eléctrico como del horno cuchara. La cal siderúrgica registra su llegada diaria al área de bodega de la acería en presentaciones de “big bags” de una tonelada. El óxido de magnesio para EBT no fue caracterizado porque no formó parte directa de la escoria sintética, es decir esta no fue adicionada al momento del vaciado del EAF, sino más bien es usada como cierre del EBT como se explica en el apartado 1.1.2.2. La escoria reciclada del EAF y/o LF se acumulaba en el área de reciclaje, donde se realizó la reducción de tamaño de la misma y se tomó “big bags” de muestra para el muestreo y caracterización.

La norma INEN 251 que se muestra en el Anexo I, establece el muestreo para cales usadas en la industria química, y fue usada como referencia y adaptada a las condiciones de operación de las materias primas de la acería que se resumen en el Método de Trabajo MT-PRL.68 “Especificación de insumos acería”, que se indica en el Anexo II (INEN, 1977, p. 3).

El muestreo y la preparación de la cal siderúrgica, se realizó inmediatamente después de su arribo a planta, para no alterar los resultados debido a la hidratación de las mismas a causa de la humedad ambiental. Se escogió al azar un mínimo de cinco “big bags” por cada arribo de cal siderúrgica y de la escoria reciclada del EAF y/o LF, de acuerdo a lo indicado en el método MT-PRL.68. De cada “big bag” escogido se extrajo una cantidad no menor de 500 g y se colocó en un recipiente común para ser mezclado completamente y llevado al laboratorio (MT-PRL.68, 2010).

2.1.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS MATERIAS PRIMAS

Una vez que se realizó el muestreo de las materias primas y estas fueron llevadas al laboratorio, se verificó el arreglo de tamices establecidos para cada una de ellas en el Método de Trabajo MT-CC.36.01 “Tabla de referencia para ensayos granulométricos” que se indica en el Anexo III. Para el ensayo de granulometría de la cal siderúrgica se dispuso el siguiente arreglo de tamices de manera descendente: malla #2 (50,8 mm), malla #1 1/2 (38,1 mm), malla #1 (25,4 mm) y malla #5/8 (15,875 mm) con un tiempo de agitación de 50 segundos en la tamizadora. Para la escoria reciclada del horno de arco eléctrico y del horno cuchara se dispuso el siguiente arreglo de tamices de manera descendente: malla #3/8 (9,525 mm), malla #6 (3,353 mm), malla #10 (1,999 mm) y malla #12 (1,001 mm) con un tiempo de agitación de 30 s en la tamizadora. Transcurrido el tiempo de agitación se retiró el arreglo de tamices y se cuantificó el peso del material retenido en cada uno de ellos y se determinó el d90 de cada materia prima usada (MT-CC.36, 2010).

2.1.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS MATERIAS PRIMAS

Una vez terminado el ensayo de granulometría de las materias primas, se reunió el material retenido de cada tamiz en un recipiente y se mezcló completamente para tomarse una muestra representativa de cada materia prima por separado, aplicando la técnica de cuarteo para realizar el análisis químico.

Según el Método de Trabajo MT-CC.21 “Manejo del espectrómetro de rayos X” que se indica en el Anexo IV, la muestra obtenida se pulverizó en el molino de anillos e inmediatamente se tamizó empleando el tamiz de 53 micras antes de colocar en el portamuestras. En el caso de la escoria del horno de arco eléctrico y del horno cuchara se pasó un imán por la muestra pulverizada para remover el exceso de hierro de la misma. Con los portamuestras preparados con las materias primas necesarias se escogió el canal correcto para cada análisis, en el caso de la cal siderúrgica se seleccionó el canal “CAL 2014” y para el caso de las escorias se seleccionó el canal “ESCORIA 2014”. Inmediatamente, las

muestras son colocadas en la torreta y se inicializó el espectrómetro EDX-720 disponible en el laboratorio de control de calidad de la acería. Cuando el ensayo finalizó se identificó los componentes que constituirían la escoria sintética (MT-CC.21, 2013).

2.2 EVALUACIÓN DE LA METALURGIA SECUNDARIA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA ÓPTIMA DE LA ESCORIA SINTÉTICA

La metalurgia secundaria del acero describe el proceso de afinado del mismo en el horno cuchara y es necesario evaluar las reacciones que se llevan a cabo en dicho proceso, en este proyecto en particular se evaluó la metalurgia secundaria de la desulfuración del acero mediante las ecuaciones, tal como se indicó en el apartado 1.1.3.4.

2.2.1 DESULFURACIÓN EN EL PROCESO DE AFINO

2.2.1.1 Determinación de la composición teórica y la capacidad de sulfuro de la escoria sintética

Para determinar la composición teórica de la escoria sintética se consideraron dos tipos de mezclas: la primera corresponde a una mezcla de cal siderúrgica, óxido de magnesio para EBT y la escoria reciclada de los dos hornos, EAF y LF. La segunda mezcla está formada por cal siderúrgica, óxido de magnesio para EBT y únicamente la escoria reciclada del LF.

Para cada uno de los dos tipos de mezclas, se determinó 15 posibles combinaciones. Cada posible combinación tuvo las siguientes consideraciones: durante el vaciado de 33 000 kg de acero líquido desde el EAF al horno cuchara siempre existe el paso de 54 kg de óxido de magnesio para EBT y 100 kg de la escoria generada en cada colada, como parte del proceso normal de producción.

Respecto a la cal siderúrgica y a la escoria reciclada del EAF y/o LF se consideró una masa total de mezcla de 180 kg, sin embargo los porcentajes de estos componentes fueron variando como se muestra en la Tabla 2.1. en función de alcanzar las especificaciones químicas deseadas respecto al porcentaje de azufre final, es decir de la capacidad de sulfuro deseada. Dentro del análisis de la capacidad de sulfuro, se determinó la basicidad óptica de la mezcla propuesta, empleando la ecuación 1.19 y la información que se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 2.1. Variación de la cantidad de escoria reciclada del EAF y/o LF y de la cal siderúrgica

Posible Combinación	Escoria Reciclada	Cal Siderúrgica
1	170	10
2	160	20
3	150	30
4	140	40
5	130	50
6	120	60
7	110	70
8	100	80
9	90	90
10	80	100
11	70	110
12	60	120
13	50	130
14	40	140
15	30	150

2.2.1.2 Determinación de la partición de azufre y la cantidad de azufre final

Para determinar la partición de azufre fue necesario conocer la temperatura y oxidación del acero líquido, dichos valores dependen de cada prueba piloto y fueron medidos durante el proceso de afino como se explicará más adelante en el apartado 2.3.1.

2.3 IMPLEMENTACIÓN DE LA ESCORIA SINTÉTICA EN EL PROCESO DE AFINO Y EVALUACIÓN DE SU CAPACIDAD DESULFURANTE

Se implementó las 30 posibilidades de mezcla, para posteriormente evaluar cuál de ellas es óptima para el proceso de producción y económicamente factible. La escoria sintética fue incorporada durante el vaciado del acero del horno de arco eléctrico al horno cuchara, como se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Implementación de la escoria sintética durante el vaciado

2.3.1 ESQUEMA DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO EN EL PROCESO DE AFINO

Para evaluar la capacidad desulfurante de la escoria sintética en el proceso de afino del horno cuchara se elaboró un esquema de frecuencia de muestreo que se describe en el Figura 2.3., y que se basa en las diferentes etapas que constituyen el proceso de fusión, afino y solidificación del acero.

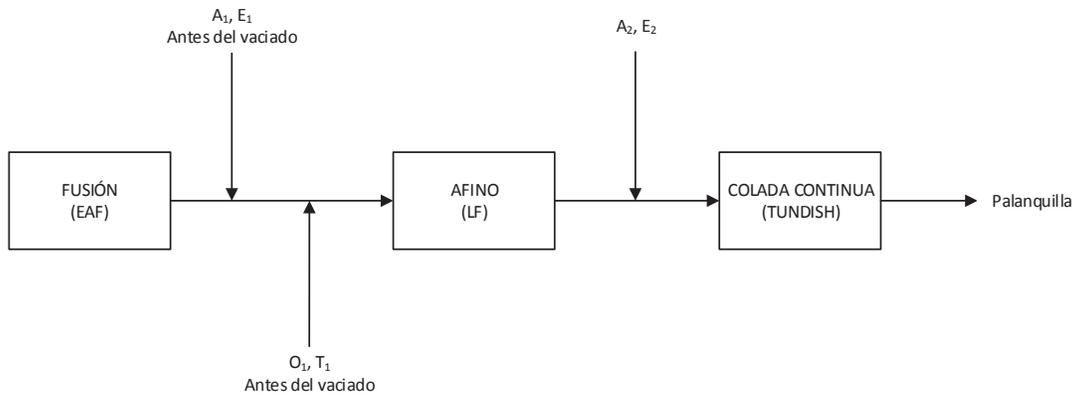


Figura 2.3. Esquema de la frecuencia de muestreo para evaluar la capacidad desulfurante de la escoria sintética

En el diagrama de la Figura 2.3. se indican las muestras y propiedades que fueron medidas durante el proceso, en donde:

A: probeta de acero

E: muestra de escoria

O: medición del contenido de oxígeno (ppm)

T: medición temperatura

Las etapas del proceso de producción en las que se realizó el muestreo son explicadas a continuación:

1. A_1 y E_1 : probeta de acero y muestra de escoria antes del vaciado del EAF en el LF
2. O_1 y T_1 : medición del contenido de oxígeno (ppm) y temperatura después del vaciado
3. A_2 y E_2 : probeta de acero y muestra de escoria antes del vaciado en el tundish

La probeta de acero fue tomada con una lanza tomamuestras. La muestra de escoria fue tomada con un tubo hueco. La medición del contenido de oxígeno (ppm) y temperatura fueron tomadas con una lanza binaria conocida como Celox (Ayerve, 2007, p.27).

2.3.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA PALANQUILLA

El proceso de toma de muestras de acero se realizó según el método de trabajo MT-PRL.64 que se indica en el Anexo V. Las probetas de acero son enviadas al laboratorio a través de dos ductos que unen el mismo con el horno de arco eléctrico y el horno cuchara respectivamente, y son tomadas mediante una lanza tomamuestras aproximadamente a 1 600 °C, inmediatamente llegada la probeta al laboratorio es enfriada con agua a temperatura ambiente y secada con aire a presión, según el método de trabajo MT-CC.14 que se indica en el Anexo VI. La muestra debe tener una superficie completamente lisa y se la consiguió con una lija de zirconio grano z80. Una vez terminado el lijado la probeta es colocada en el plato de muestras con la superficie pulida hacia abajo. Se inicializó el equipo PDA 7000 y se realizaron mínimo cuatro quemas en los extremos de la probeta para que los resultados del análisis sean representativos, como se indica en la Figura 2.4. (MT-PRL.64, 2012 y MT-CC.14, 2012).



Figura 2.4. Probeta analizada correctamente

2.4 EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA ESCORIA SINTÉTICA

Para evaluar la factibilidad económica del proyecto se realizó un estudio económico comparativo entre el precio de la escoria sintética importada y el costo de producción de la escoria sintética fabricada a partir de la escoria reciclada del EAF y LF. Para ello fue necesario conocer los precios de la cal siderúrgica y del óxido de magnesio para EBT, y el costo de procesamiento para reducir la granulometría de las escorias recicladas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE LA ESCORIA SINTÉTICA

3.1.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA

En las Figuras 3.1. y 3.2. se muestran un ejemplo de la determinación del d90 de las muestras caracterizadas de la cal siderúrgica y de la escoria reciclada del EAF y/o LF.

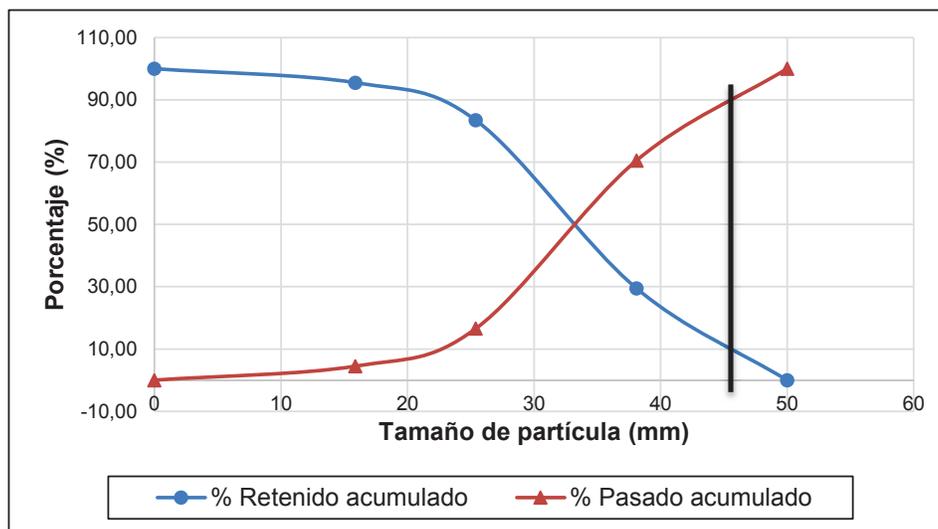


Figura 3.1. Determinación del d90 de la muestra 1 de cal siderúrgica

Los resultados de la cal siderúrgica y de la escoria reciclada del EAF y/o LF que se muestra en la Tabla 3.1. reflejan un promedio del tamaño de partícula de las muestras que se caracterizaron para la elaboración de la escoria sintética, durante las pruebas piloto que se realizaron en el proceso de afino del horno cuchara. Los ejemplos de cálculo del d90 de la cal siderúrgica y escoria reciclada del EAF y/o LF que se emplearon durante el tiempo mencionado se indican en el Anexo VII.

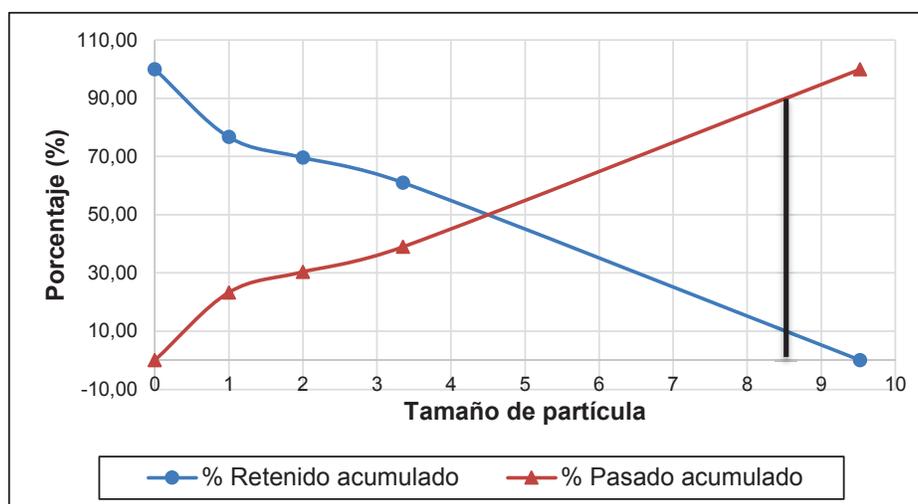


Figura 3.2. Determinación del d_{90} de la muestra 1 de escoria reciclada del EAF y/o LF

En la Tabla 3.1. se muestran los resultados del tamaño de partícula de las materias primas que formaron la escoria sintética desulfurante probada en el proceso de afino.

Tabla 3.1. Caracterización física de las materias primas que formaron la escoria sintética

Materias Primas	Tamaño promedio de partícula (d_{90})	Unidad
Cal Siderúrgica	40	mm
Escoria Reciclada del EAF y LF	8,4	mm
Escoria Reciclada del LF	8,4	mm

La cal siderúrgica tuvo un tamaño de partícula de 40 mm, esta granulometría se encuentra dentro del rango esperado ya que la especificación de ésta indica que mínimo el 90 % de la muestra representativa debe entrar en el rango de 20-50 mm (MT-PRL.68, 2010).

El óxido de magnesio para EBT tuvo un tamaño de partícula de 2 mm, dicha materia prima no fue caracterizada físicamente porque no formó parte directa de la escoria sintética, es decir esta no fue adicionada al momento del vaciado del

EAF, sino más bien es usada como cierre del EBT como se explica en el apartado 1.1.2.2., y la hoja técnica de esta materia prima se indica en el Anexo VIII.

Tanto la escoria reciclada del EAF y LF como solo la escoria reciclada del LF tuvieron un tamaño de partícula de 8,4 mm, esta granulometría corresponde a los procesos previos de reducción de tamaño a los que fueron sometidas en planta, proceso normal que se realiza a la escoria generada por los hornos después del enfriado de la misma, ya que ésta escoria tiene un destino de reciclaje específico con dicha granulometría.

3.1.2 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

En la Tabla 3.2. se muestran los resultados de la composición química de las materias primas que formaron la escoria sintética desulfurante probada en el proceso de afino.

Tabla 3.2. Caracterización química de las materias primas que formaron la escoria sintética

Materia Prima	Composición Química									
	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
Cal Siderúrgica	-	-	-	2,612	-	6,786	-	90,601	-	-
Escoria Reciclada del EAF y LF	6,735	25,178	-	14,656	6,481	16,485	0,235	28,475	0,700	1,055
Escoria Reciclada del LF	3,004	5,927	-	26,468	5,682	25,327	0,905	32,031	0,387	0,269

Los resultados de la cal siderúrgica y de la escoria reciclada del EAF y/o LF que se muestra en la Tabla 3.2. reflejan un promedio de la composición química de las muestras que se caracterizaron para la elaboración de la escoria sintética, durante las pruebas piloto que se realizaron en el proceso de afino del horno cuchara. La recopilación de los resultados de estas muestras se indica en el Anexo IX.

La cal siderúrgica presenta un alto contenido de óxido de calcio que corresponde al 90,601 % en peso, valor esperado ya que la especificación de dicha materia prima exige un contenido mínimo de 90 % para su uso en planta. Se puede asegurar que dicho contenido es netamente óxido de calcio mas no hidróxido, ya que diariamente llega a planta la cantidad exacta a usarse en los hornos EAF y LF, para evitar su hidratación y de esta manera asegurar su composición (MT-PRL.68, 2010).

El óxido de magnesio para EBT presenta 81 % de óxido de magnesio como compuesto principal, sin embargo es necesario recalcar el 15 % de óxido de calcio que, a pesar de considerarse un bajo contenido, éste aporta a la acción desulfurante de la escoria sintética en el proceso de afino, dicha información se muestra en el Anexo VIII, en la hoja técnica de esta materia prima.

En cuanto a las escorias recicladas es necesario comparar la cantidad de óxido de calcio y óxido de hierro de la reciclada del EAF y LF con respecto a la reciclada del LF. La cantidad de óxido de calcio es inferior en la escoria reciclada del EAF y LF con un contenido de 28,475 % con respecto a un 32,031 % de la escoria reciclada del LF, a pesar de no ser significativa la diferencia, ésta última aporta mayor eficiencia desulfurante en el proceso de afino. Por el contrario la cantidad de óxido de hierro en la escoria reciclada del EAF y LF es superior con un contenido de 25,178 % con respecto a 5,927 % de la escoria reciclada del LF, esta diferencia es realmente representativa y afecta directamente en la eficiencia de la remoción del azufre, ya que es indispensable un acero con baja oxidación para realizar el proceso de afino, como se explicó en el apartado 1.1.3.4.

3.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA METALURGIA SECUNDARIA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA ÓPTIMA DE LA ESCORIA SINTÉTICA

3.2.1 RESULTADOS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ESCORIA SINTÉTICA PROBADA EN EL PROCESO DE AFINO FORMADA POR LA ESCORIA RECICLADA DEL EAF Y LF, Y DE LA ESCORIA FORMADA POR LA ESCORIA RECICLADA DEL LF

En la Tabla 3.3. se muestran los resultados de la composición química de la escoria sintética probada en el proceso de afino formada por la escoria reciclada del EAF y LF, y de la escoria sintética formada únicamente por la escoria reciclada del LF. Los resultados que se presentan en dicha tabla corresponden a los compuestos mayoritarios de cada tipo de mezcla, es decir los de mayor interés, la composición química completa de las posibles combinaciones de cada tipo de mezcla se muestra en el Anexo X.

En las 15 posibles combinaciones planteadas de cada tipo de mezcla se realizó una variación entre la cantidad de cal siderúrgica y de escoria reciclada del EAF y/o LF, empezando con una cantidad de 10 kg de cal y 170 kg de escoria reciclada en la combinación N°1, hasta obtener 150 kg de cal y 30 kg de escoria reciclada en la combinación N°15; como se mostró en el apartado 2.2.1.1.

Tabla 3.3. Composición química de la escoria sintética probada en el proceso de afino

Posibles Combinaciones	Prueba con la escoria reciclada del EAF y LF				Prueba con la escoria reciclada del LF			
	FeO	MgO	SiO ₂	CaO	FeO	MgO	SiO ₂	CaO
1	17,812	26,857	13,998	29,735	8,013	32,870	18,499	31,545
2	17,058	26,497	13,708	31,595	7,835	32,155	17,944	33,299

Tabla 3.3. Composición química de la escoria sintética probada en el proceso de afino (continuación)

Posibles Combinaciones	Prueba con la escoria reciclada del EAF y LF				Prueba con la escoria reciclada del LF			
	FeO	MgO	SiO ₂	CaO	FeO	MgO	SiO ₂	CaO
3	16,304	26,136	13,417	33,455	7,658	31,441	17,388	35,052
4	15,550	25,776	13,127	35,315	7,481	30,727	16,833	36,806
5	14,796	25,415	12,837	37,175	7,303	30,013	16,278	38,560
6	14,042	25,054	12,546	39,035	7,126	29,298	15,723	40,313
7	13,288	24,694	12,256	40,895	6,948	28,584	15,168	42,067
8	12,535	24,333	11,966	42,756	6,771	27,870	14,613	43,820
9	11,781	23,973	11,675	44,616	6,593	27,156	14,058	45,574
10	11,027	23,612	11,385	46,476	6,416	26,441	13,503	47,328
11	10,273	23,251	11,094	48,336	6,238	25,727	12,948	49,081
12	9,519	22,891	10,804	50,196	6,061	25,013	12,392	50,835
13	8,765	22,530	10,514	52,056	5,883	24,299	11,837	52,588
14	8,012	22,170	10,223	53,916	5,706	23,584	11,282	54,342
15	7,258	21,809	9,933	55,776	5,529	22,870	10,727	56,096

El contenido de óxido de calcio entre las dos tipos de escorias probadas inicia con 29,735 % de CaO de la primera mezcla, y 31,545 % de CaO de la segunda mezcla, sin embargo el contenido de este compuesto va aumentando en cada posible combinación siguiente, hasta finalizar con un contenido de 55,776 % y 56,096 % de CaO en la primera y segunda mezcla respectivamente, en

consecuencia se verifica que la cantidad de óxido de calcio que contiene la escoria sintética formada por la escoria reciclada del LF es superior a la formada por la escoria reciclada del EAF y LF, por consiguiente la segunda mezcla de escoria sintética poseerá mayor eficiencia en la desulfuración del acero en el proceso de afino.

El óxido de calcio a pesar de ser el compuesto responsable de la desulfuración del acero líquido, no es recomendable implementar una excesiva cantidad en el proceso de afino, ya que generaría una escoria pastosa y espesa, contrario a las condiciones necesarias para el proceso, es decir una escoria espumosa y fluida para una adecuada distribución de la misma en el acero líquido.

El contenido de óxido de magnesio entre las dos tipos de escorias probadas inicia con 26,857 % de MgO de la primera mezcla, y 32,870 % de MgO de la segunda mezcla, sin embargo el contenido de este compuesto va disminuyendo en cada posible combinación siguiente, hasta finalizar con un contenido de 21,809 % y 22,870 % de MgO en la primera y segunda mezcla respectivamente; el óxido de magnesio no aporta beneficio al proceso de desulfuración, sin embargo éste tampoco lo perjudica, ya que al trabajar con cucharas dolomíticas en el proceso de afino se requiere un ambiente básico, y éste es creado gracias a la presencia del óxido de magnesio.

El contenido de óxido de silicio entre las dos tipos de escorias probadas inicia con 13,998 % de SiO₂ de la primera mezcla, y 18,499 % de SiO₂ de la segunda mezcla, sin embargo el contenido de este compuesto va disminuyendo en cada posible combinación siguiente, hasta finalizar con un contenido de 9,933 % y 10,727 % de SiO₂ en la primera y segunda mezcla respectivamente; el óxido de silicio no aporta ningún beneficio al proceso de desulfuración, por lo que la alta cantidad de éste perjudica el ambiente de trabajo en el proceso de afino al disminuir la basicidad binaria.

El contenido de óxido de hierro entre las dos tipos de escorias probadas inicia con 17,812 % de FeO de la primera mezcla, y 8,013 % de FeO de la segunda mezcla, sin embargo el contenido de este compuesto va disminuyendo en cada

posible combinación siguiente, hasta finalizar con un contenido de 7,258 % y 5,529 % de FeO en la primera y segunda mezcla respectivamente; el óxido de hierro no aporta beneficio alguno al proceso de afino, al contrario una gran cantidad del mismo perjudica este proceso ya que es necesario que el acero se encuentre desoxidado, es decir se requiere menor cantidad de óxido de hierro disuelto en el acero para asegurar una adecuada desulfuración.

Por consiguiente, al comparar la composición química de las dos mezclas, se justifica que el uso de la segunda mezcla, es decir la de la escoria reciclada del LF, aporta mayor beneficio en la desulfuración del acero en el proceso de afino; puesto que presenta mayor cantidad de óxido de calcio y magnesio, y menor cantidad de óxido de silicio y hierro, con respecto a la mezcla de la escoria reciclada del EAF y/o LF, que son necesarias para el proceso.

Resultados de la relación CaO/SiO₂ de la escoria sintética probada en el proceso de afino formada por la escoria reciclada del EAF y LF, y de la escoria sintética formada por escoria reciclada del LF

En la Figura 3.3. se presenta la relación CaO/SiO₂ de la escoria sintética probada en el proceso de afino formada por la escoria reciclada del EAF y LF, y de la escoria sintética formada únicamente por escoria reciclada del LF, los resultados con los que se realizó la Figura 3.3. se encuentran en el Anexo XI.

La relación que existe entre el óxido de calcio y el óxido de silicio debe ser mayor a 1,8 para evitar el desgaste del refractario de la cuchara y lograr una adecuada desulfuración del acero líquido; como se mencionó en el apartado 1.1.2.2. se trabajó con cucharas dolomíticas, es decir cucharas de carácter básico, por lo que es necesario agregar una escoria sintética de carácter similar. Puesto que, la desulfuración cuando se trabaja con escorias de basicidad ≥ 2 ocurre naturalmente pues se tiene un medio básico y altamente reductor.

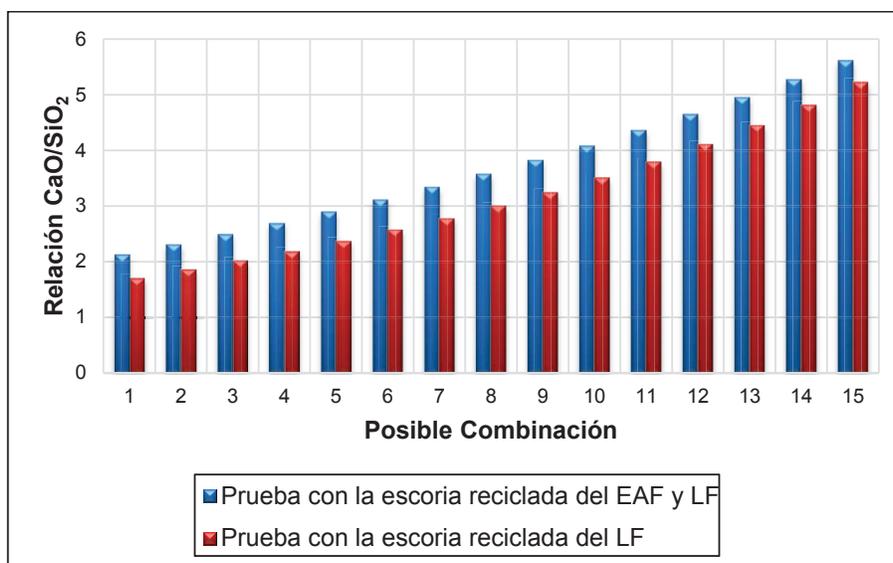


Figura 3.3. Relación CaO/SiO₂ de la escoria sintética probada en el proceso de afino

Como se observa en la Figura 3.3. la relación CaO/SiO₂ de la escoria sintética formada por la escoria reciclada del EAF y LF es mayor con respecto a la formada por la escoria reciclada del LF, ya que esta última presenta mayor cantidad de óxido de silicio, y por ende menor relación de óxidos; sin embargo los dos tipos de escorias sintéticas inician y cumplen con el valor mínimo de relación CaO/SiO₂, y este valor va en aumento ya que en cada posible combinación siguiente la cantidad de óxido de calcio es mayor.

3.2.2 RESULTADOS DE LA TEMPERATURA Y CONTENIDO DE OXÍGENO DEL ACERO MEDIDOS EN EL PROCESO DE AFINO DURANTE LAS PRUEBAS PILOTO QUE SE REALIZARON CON LA ESCORIA SINTÉTICA FORMADA POR LA ESCORIA RECICLADA DEL EAF Y LF, Y LA ESCORIA FORMADA POR LA ESCORIA RECICLADA DE LF

En la Figura 3.4. se presenta la temperatura del acero medida en el proceso de afino durante las pruebas piloto que se realizaron con la escoria sintética formada por escoria reciclada del EAF y LF, y las pruebas piloto con la escoria formada por escoria reciclada del LF.

En el Anexo XII se encuentran los resultados con los que se realizaron las Figuras 3.4. y 3.5. correspondientes a la temperatura y contenido de oxígeno (ppm) medidos en el acero durante el proceso de afino.

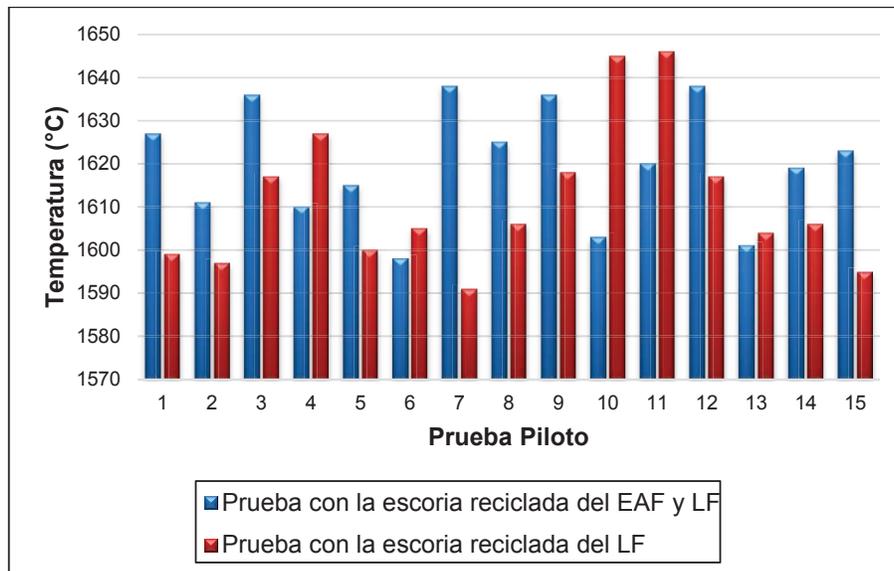


Figura 3.4. Temperatura medida del acero en el proceso de afino de cada prueba piloto

El acero líquido requiere que sea calentado aproximadamente a los 1 640 °C en el EAF para ser vaciado sobre la cuchara, en este momento se mide la temperatura del acero, la cual sufre una disminución debido al tiempo que tardó la cuchara en llegar a su destino, esta disminución no puede ser menor de los 1 600 °C ya que es la temperatura mínima necesaria para realizar la desulfuración del acero, no obstante se tiene un rango de variación inferior de – 10 °C por situaciones externas al proceso que puedan presentarse.

En la Figura 3.4. se observa un amplio rango de temperaturas, en el cual se evidencia que la temperatura de la sexta prueba piloto con la escoria reciclada del EAF y LF; y que las temperaturas de la primera, segunda, séptima y décimo quinta pruebas piloto con la escoria reciclada del LF se encuentran bajo los 1 600 °C, esto se atribuye a fallas presentadas al momento del vaciado, ya sea retrasos en la apertura del EBT para vaciar el acero sobre la cuchara o retrasos en el traslado de la cuchara hacia el LF, ésta baja de temperatura entra dentro del rango de variación establecida, por lo que no influye significativamente a la

desulfuración. Sin embargo la desulfuración no depende solamente de la composición de la escoria sintética y de la temperatura sino también del contenido de oxígeno (ppm) en el acero al momento del vaciado, que será analizado a continuación.

En la Figura 3.5. se presenta el contenido de oxígeno (ppm) en el acero medido en el proceso de afino, durante las pruebas piloto que se realizaron con la escoria sintética formada por escoria reciclada del EAF y LF, y la escoria formada por la escoria reciclada del LF.

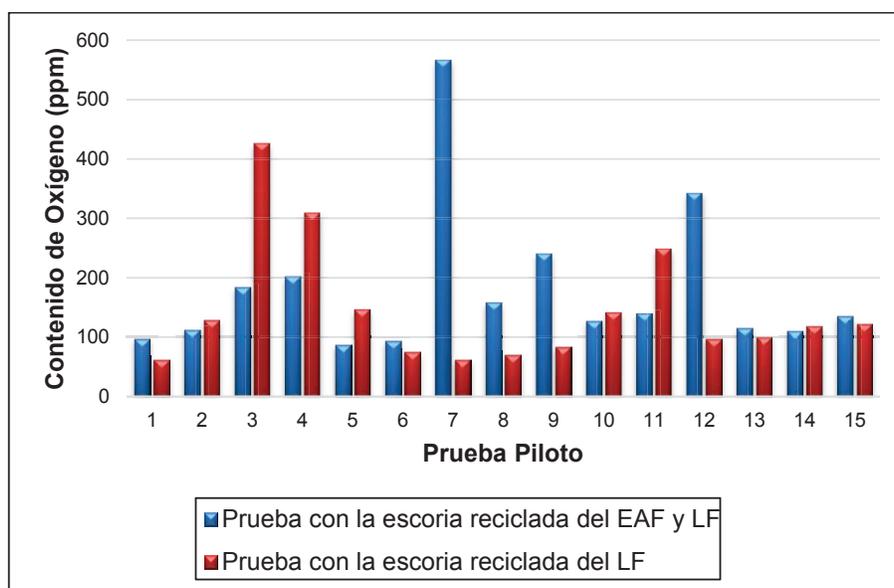


Figura 3.5. Contenido de oxígeno (ppm) medido del acero en el proceso de afino de cada prueba piloto

En el apartado 1.1.3.4. se mencionó que era necesario vaciar el acero en la cuchara con un bajo contenido de oxígeno (ppm), a pesar de no existir una cantidad máxima establecida es necesario que ésta se encuentre alrededor de los 100 ppm O_2 para el proceso actual en la acería, no obstante se tiene un rango de variación superior de +50 ppm O_2 por situaciones externas al proceso que puedan presentarse.

Como se puede observar en la Figura 3.5. la mayoría de las pruebas piloto se mantiene en dicho valor, a excepción de la séptima, novena y décimo segunda

pruebas piloto que se realizaron con la escoria reciclada del EAF y LF, y de la tercera, cuarta y décimo primera pruebas piloto que se realizaron con la escoria reciclada del LF, estas pruebas superaron los 200 ppm O₂ y en consecuencia presentaron mayor actividad de oxígeno, lo cual influyó negativamente en la capacidad de desulfuración de la escoria sintética. El alto contenido de oxígeno (ppm) en el acero al ser vaciado en la cuchara se debe a retrasos que pudieron existir al momento de trasladar la cuchara al LF, es decir mayor exposición del acero líquido con el ambiente, lo que causa una mayor oxidación del mismo.

3.3 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ESCORIA SINTÉTICA EN EL PROCESO DE AFINO Y EVALUACIÓN DE SU CAPACIDAD DESULFURANTE

En esta sección se muestran los resultados de la implementación de la escoria sintética en el proceso de afino, tanto para la escoria sintética formada por la escoria reciclada del EAF y LF, como para la escoria formada por la escoria reciclada del LF. En el Anexo XIII se encuentran los resultados con los que se realizaron las Figuras 3.6., 3.7. y 3.8. correspondientes a la desulfuración del acero y a la partición de azufre de la escoria sintética.

3.3.1 RESULTADOS DE LA DESULFURACIÓN DEL ACERO EN EL PROCESO DE AFINO DURANTE LAS PRUEBAS PILOTO QUE SE REALIZARON CON LA ESCORIA SINTÉTICA FORMADA POR ESCORIA RECICLADA DEL EAF Y LF, Y CON LA ESCORIA FORMADA POR LA ESCORIA RECICLADA DEL LF

En la Figura 3.6. se presenta la desulfuración teórica y experimental del acero medidos en el proceso de afino durante las pruebas piloto con la escoria sintética formada por escoria reciclada del EAF y LF.

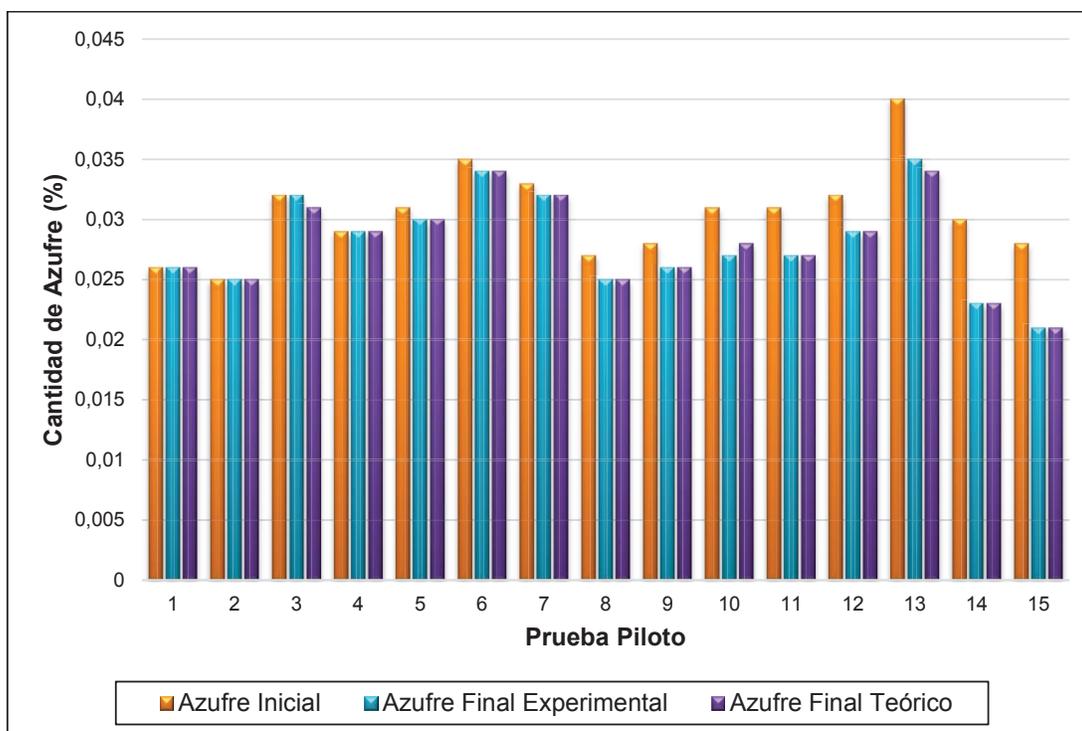


Figura 3.6. Cantidad de azufre teórico y experimental medida en el acero durante las pruebas piloto realizadas con la escoria sintética formada por la escoria reciclada del EAF y LF

El contenido máximo de azufre en el análisis de cuchara debe ser 0,045 % según la norma INEN 2167, dicha norma se muestra en el Anexo XIV, sin embargo en planta se estableció un contenido máximo de 0,040 %, valor que sería considerado para la desulfuración en el proceso de afino, no obstante en la Figura 3.6. se muestra que en ningún caso se tuvo un valor de azufre inicial en el LF mayor a 0,040 %, debido a que este depende de la cantidad de azufre en el acero con la que fue vaciado del EAF y de la chatarra con este elemento que ingresó al mismo; por esto a pesar de no tener un valor inicial de azufre de 0,040 % en ninguna prueba piloto, se realizaron las pruebas para mostrar la desulfuración planteada en este proyecto (INEN, 2011, p. 5).

En la primera prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 170 kg de escoria reciclada del EAF Y LF, 10 kg de cal siderúrgica, 1 627 °C, 97 ppm O₂ y 0,026 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,026 % de azufre final experimental y teórico; como era de esperarse en el proceso de afino no se logró

bajar el contenido experimental de azufre así como lo indicó el contenido teórico de la iteración, puesto que 29,735 % de óxido de calcio fue poco representativo para la escoria sintética, a pesar que se trabajó con la temperatura y el contenido de oxígeno (ppm) adecuados para el proceso, sin embargo en esta prueba piloto no era necesario bajar el contenido de azufre en el acero ya que éste se encontraba bajo la especificación de planta y de la norma INEN 2167.

En la segunda prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 160 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 20 kg de cal siderúrgica, 1 611 °C, 112 ppm O₂ y 0,025 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,025 % de azufre final experimental y teórico; al igual que la primera prueba piloto se esperaba que el contenido experimental de azufre no baje ya que fue lo que indicó el contenido teórico en la iteración, en esta prueba se tuvo una temperatura y contenido de oxígeno (ppm) adecuados para el proceso, sin embargo la cantidad de óxido de calcio de 31,595 %, no fue la suficiente para lograr la desulfuración del acero.

En la tercera prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 150 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 30 kg de cal siderúrgica, 1 636 °C, 184 ppm O₂ y 0,032 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo un azufre final de 0,032% experimental y 0,031 % teórico, en esta prueba se esperaba una disminución de un punto de azufre ya que así lo indicaba la iteración teórica, sin embargo en la práctica no se obtuvo dicha disminución ya que 33,455 % de óxido de calcio no era cantidad suficiente para lograr desulfurar el acero, y tampoco se contó con un adecuado contenido de oxígeno (ppm), y por ende presentó una disminución en la capacidad desulfurante de la escoria sintética; la disminución de azufre registrada en la iteración teórica se atribuye a la alta temperatura con la que se trabajó en esta prueba.

En la cuarta prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 140 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 40 kg de cal siderúrgica, 1 610 °C, 202 ppm O₂ y 0,029 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,029 % de azufre final experimental y teórico; como se analizó en las pruebas anteriores no se logró bajar el contenido de azufre a pesar de haber incrementado a 35,315 % la cantidad de óxido de calcio, y mantener una buena temperatura, ya que se

trabajó con un alto contenido de oxígeno (ppm) lo que afecta directamente la capacidad desulfurante de la escoria sintética.

En la quinta prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 130 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 50 kg de cal siderúrgica, 1 615 °C, 87 ppm O₂ y 0,031 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,030 % de azufre final experimental y teórico, en esta prueba se logró la disminución de un punto de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica, ya que se contó con un adecuado contenido de oxígeno (ppm) y de temperatura, y de igual manera el incremento en la cantidad de cal siderúrgica lo que aumentó el contenido de óxido de calcio a 37,175 % y por ende la capacidad desulfurante de la escoria sintética.

En la sexta prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 120 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 60 kg de cal siderúrgica, 1 598 °C, 94 ppm O₂ y 0,035 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,034 % de azufre final experimental y teórico, al ser comparado con la prueba anterior las condiciones de trabajo son similares, es decir temperatura y contenido de oxígeno (ppm) dentro del especificación, y 39,035 % de óxido de calcio, por lo tanto se esperaba la disminución de un punto de azufre en la práctica como lo indicaba la iteración teórica.

En la séptima prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 110 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 70 kg de cal siderúrgica, 1 638 °C, 566 ppm O₂ y 0,033 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,032 % de azufre final experimental y teórico; en esta prueba el acero presentó un contenido excesivamente alto de oxígeno (ppm), como se analizó en el apartado 3.2.2. esto se debe a la larga exposición que pudo haber tenido el acero líquido con el ambiente durante el traslado de la cuchara al LF, en consecuencia disminuyó la capacidad desulfurante de la escoria sintética, sin embargo se logró la disminución de un punto de azufre gracias a la buena temperatura de trabajo que se tuvo durante el proceso de afino y la cantidad de óxido de calcio presente en la escoria sintética de 40,895 %.

En la octava prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 100 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 80 kg de cal siderúrgica, 1 625 °C, 158 ppm O₂ y 0,027 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,025 % de azufre final experimental y teórico; en esta prueba se logró la disminución de dos puntos de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica, debido a que el proceso trabajó con la temperatura adecuada y con un incremento en la cantidad de óxido de calcio a 42,756 % de la escoria sintética, con lo que se logró la desulfuración del acero a pesar de que se trabajó con un alto contenido de oxígeno (ppm).

En la novena prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 90 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 90 kg de cal siderúrgica, 1 636 °C, 240 ppm O₂ y 0,028 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,026 % de azufre final experimental y teórico; esta prueba presentó una adecuada temperatura de trabajo y 44,616 % de óxido de calcio, sin embargo también se presentó un mayor contenido de oxígeno (ppm) el acero con respecto a la anterior, y a pesar de ello se logró la disminución de dos puntos de azufre gracias a la alta temperatura de trabajo.

En la décima prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 80 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 100 kg de cal siderúrgica, 1 603 °C, 127 ppm O₂ y 0,031 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo un azufre final de 0,027 % experimental y 0,028 % teórico; en esta prueba se alcanzó buenas condiciones de trabajo, es decir se trabajó con la temperatura y contenido de oxígeno (ppm) propicios para la desulfuración, adicional a esto se trabajó con mayor cantidad de cal, 46,476 % de óxido de calcio, con respecto a la prueba anterior, con lo que se consiguió la disminución de cuatro puntos de azufre en la práctica, a pesar de que la iteración teórica nos indicó una disminución de tres puntos, esto se atribuye a fallas externas al proceso como fallas operativas, en la que el operador quizás no peso la cantidad de cal siderúrgica correspondiente a esta prueba.

En la décima primera prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 70 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 110 kg de cal siderúrgica, 1 620 °C, 139 ppm

O₂ y 0,031 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,027 % de azufre final experimental y teórico, esta prueba presentó adecuadas condiciones de trabajo, es decir se contó con una apropiada cantidad de óxido de calcio de 48,336 %, temperatura y contenido de oxígeno disuelto en el acero. Y al igual que la anterior prueba se logró una disminución de cuatro puntos de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica.

En la décima segunda prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 60 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 120 kg de cal siderúrgica, 1 638 °C, 342 ppm O₂ y 0,032 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,029 % de azufre final experimental y teórico, en esta prueba se consiguió una disminución de tres puntos de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica, ya que la cantidad de cal siderúrgica que se añadió para formar la escoria sintética es el doble de la cantidad de escoria reciclada, lo que incrementa el contenido de óxido de calcio a 50,196 % y por ende favorece la desulfuración del acero. En esta prueba a pesar de que se trabajó con mayor cantidad de cal siderúrgica con respecto a la anterior se consiguió una menor disminución de azufre, debido al alto contenido de oxígeno (ppm) en el acero.

En la décima tercera prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 50 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 130 kg de cal siderúrgica, 1 601 °C, 115 ppm O₂ y 0,040 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo un azufre final de 0,035 % experimental y 0,034 % teórico, en esta prueba las condiciones de trabajo fueron favorables para la desulfuración en el proceso de afino, se trabajó con una adecuada temperatura y contenido de oxígeno (ppm) en el acero, con lo que se consiguió una disminución de 5 puntos de azufre en la práctica, y seis puntos en la iteración teórica, esta diferencia se atribuye a fallas externas al proceso, es decir ya sea falla en la calidad de la cal siderúrgica o falla del operador que quizás no peso la cantidad de cal siderúrgica correspondiente a esta prueba, ya que se contaba con 52,056 % de óxido de calcio en la escoria sintética.

En la décima cuarta prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 40 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 140 kg de cal siderúrgica, 1 619 °C, 110 ppm O₂ y 0,030 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,023 % de azufre final

experimental y teórico, en esta prueba se logró una disminución de siete puntos de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica, y como se analizó en las pruebas anteriores se contó con condiciones favorables para el proceso, es decir temperatura y contenido de oxígeno (ppm) dentro de lo establecido y 53,916 % de óxido de calcio, con lo que se llevó a cabo un adecuado proceso de desulfuración del acero.

En la décima quinta prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 30 kg de escoria reciclada del EAF y LF, 150 kg de cal siderúrgica, 1 623 °C, 135 ppm O₂ y 0,028 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,021 % de azufre final experimental y teórico, esta prueba se consiguió una disminución de siete puntos de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica, ya que se trabajó con condiciones de trabajo favorables para una adecuada desulfuración, no obstante en esta prueba se esperaba una mayor disminución de azufre ya que se trabajó con una mayor temperatura y con la máxima cantidad de cal siderúrgica que se estableció para el proceso de afino, 55,776 % de óxido de calcio.

En la Figura 3.7. se presenta la desulfuración teórica y experimental del acero medidos en el proceso de afino durante los ensayos con la escoria sintética formada por escoria reciclada del LF.

En la Figura 3.7. se observa que el contenido de azufre inicial es superior a 0,040 % únicamente en la décima cuarta prueba piloto de las pruebas realizadas con la escoria reciclada del LF, y como se indicó en el análisis de las pruebas realizadas con la escoria reciclada del EAF y LF el contenido máximo de azufre que se estableció en planta es de 0,040 %, por consiguiente las pruebas se realizaron para mostrar la desulfuración planteada en este proyecto, a pesar de que se haya tenido contenidos de azufre bajo la especificación de la norma INEN 2167.

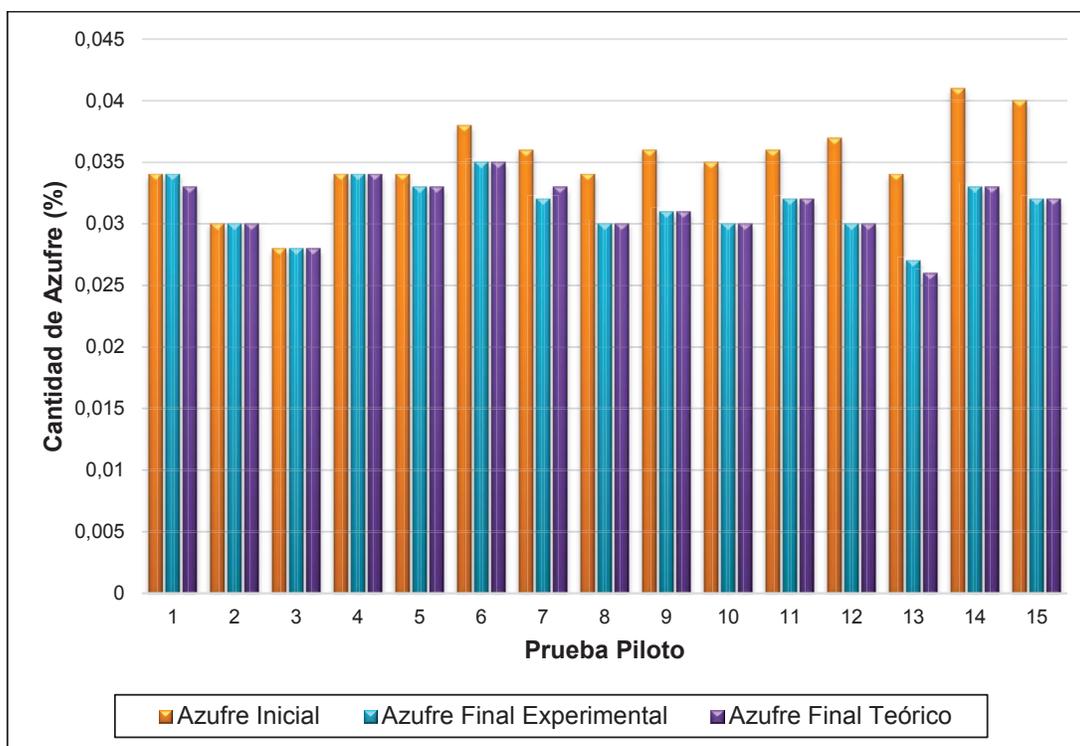


Figura 3.7. Cantidad de azufre teórico y experimental medida en el acero durante las pruebas piloto realizadas con la escoria sintética formada por la escoria reciclada del LF

En la primera prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 170 kg de escoria reciclada del LF, 10 kg de cal siderúrgica, 1 599 °C, 62 ppm O₂ y 0,034 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo un azufre final de 0,034 % experimental y 0,033 % teórico, en esta prueba se esperaba la disminución de un punto de azufre como lo indicó la iteración teórica, sin embargo en la práctica no se logró dicha disminución, debido a que se contaba con 31,545 % de óxido de calcio, cantidad no representativa para lograr la desulfuración del acero, a pesar de que se trabajó con una adecuada temperatura y un bajo contenido de oxígeno (ppm) en el acero.

En la segunda prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 160 kg de escoria reciclada del LF, 20 kg de cal siderúrgica, 1 597 °C, 129 ppm O₂ y 0,030 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,030 % de azufre final experimental y teórico, como era de esperarse en el proceso de afino no se logró bajar el contenido experimental de azufre así como lo indicó el contenido teórico de la iteración, puesto que 32,299 % de óxido de calcio sigue siendo una

cantidad poco representativa para lograr la desulfuración del acero, a pesar de que se trabajó con la temperatura y el contenido de oxígeno (ppm) adecuados para el proceso.

En la tercera prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 150 kg de escoria reciclada del LF, 30 kg de cal siderúrgica, 1 617 °C, 426 ppm O₂ y 0,028 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo de azufre final 0,028 % experimental y teórico, en esta prueba el acero presentó un contenido excesivamente alto de oxígeno (ppm), debido a la larga exposición que pudo haber tenido el acero líquido con el ambiente durante el traslado de la cuchara al LF, por lo que disminuyó la capacidad desulfurante de la escoria sintética, en consecuencia no se logró la disminución de azufre a pesar de contar con la temperatura adecuada y con 35,052 % de óxido de calcio, un mayor contenido de éste en la escoria sintética con respecto a la prueba anterior.

En la cuarta prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 140 kg de escoria reciclada del LF, 40 kg de cal siderúrgica, 1 627 °C, 309 ppm O₂ y 0,034 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,034 % de azufre final experimental y teórico, en esta prueba se trabajó con mayor temperatura y mayor cantidad de óxido de calcio de 36,806 % con respecto a la anterior, sin embargo no se logró la disminución de azufre, puesto que se trabajó con un contenido alto de oxígeno (ppm) en el acero, debido a la larga exposición del mismo con el ambiente, lo que disminuyó la capacidad desulfurante de la escoria sintética.

En la quinta prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 130 kg de escoria reciclada del LF, 50 kg de cal siderúrgica, 1 600 °C, 146 ppm O₂ y 0,034 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,033 % de azufre final experimental y teórico, en esta prueba se consiguió la disminución de un punto de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica, puesto que se trabajó con las condiciones adecuadas para el proceso de desulfuración, es decir se alcanzó una buena temperatura y contenido de oxígeno (ppm), asimismo se contó con 38,560 % de óxido de calcio, mayor cantidad del mismo con respecto a la prueba anterior, con lo que se logró la disminución de al menos un punto de azufre.

En la sexta prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 120 kg de escoria reciclada del LF, 60 kg de cal siderúrgica, 1 605 °C, 74 ppm O₂ y 0,038 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,035 % de azufre final experimental y teórico, en esta prueba se trabajó con la temperatura y contenido de oxígeno (ppm) en el acero favorables para la desulfuración, adicional a esto se trabajó con mayor cantidad de cal con respecto a la prueba anterior, 40,313 % de óxido de calcio, con lo que se consiguió la disminución de tres puntos de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica; en esta prueba se logró evidenciar claramente la influencia del contenido de oxígeno en el proceso de desulfuración, ya que esta prueba presentó similares condiciones de trabajo que la anterior, a excepción del contenido de oxígeno (ppm), siendo éste la mitad que el anterior, con lo que se logró la disminución de tres puntos más de azufre en el acero con respecto a la prueba anterior.

En la séptima prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 110 kg de escoria reciclada del LF, 70 kg de cal siderúrgica, 1 591 °C, 62 ppm O₂ y 0,036 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo un azufre final de 0,032 % experimental y 0,033 % teórico, en esta prueba se alcanzó favorables condiciones de trabajo, es decir se trabajó con la temperatura y contenido de oxígeno (ppm) en el acero propicias para la desulfuración, adicional a esto se trabajó con mayor cantidad de cal con respecto a la prueba anterior, con lo que se consiguió la disminución de cuatro puntos de azufre en la práctica, a pesar de que la iteración teórica nos indicó una disminución de tres puntos, esto se atribuye a fallas externas al proceso como fallas operativas, en la que el operador quizás no peso la cantidad de cal siderúrgica correspondiente a esta prueba, ya que se contaba con 42,067 % de óxido de calcio en la escoria sintética.

En la octava prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 100 kg de escoria reciclada el LF, 80 kg de cal siderúrgica, 1 606 °C, 70 ppm O₂ y 0,034 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,030 % de azufre final experimental y teórico, en esta prueba se consiguió la disminución de cuatro puntos de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica, puesto que en esta prueba se alcanzó buenas condiciones de trabajo, es decir se trabajó con la temperatura y contenido de oxígeno (ppm) en el acero adecuados para la desulfuración,

adicional a esto se trabajó con mayor cantidad de cal siderúrgica con respecto a la prueba anterior, 43,820 % de óxido de calcio en la escoria sintética.

En la novena prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 90 kg de escoria reciclada del LF, 90 kg de cal siderúrgica, 1 618 °C, 82 ppm O₂ y 0,036 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,031 % de azufre final experimental y teórico, en esta prueba se consiguió la disminución de cinco puntos de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica, en esta prueba se logró la disminución de un punto más de azufre con respecto a la anterior, ya que se contó con una mayor temperatura de trabajo y mayor cantidad de cal siderúrgica, 45,574 % de óxido de calcio, lo que contribuye a la capacidad desulfurante de la escoria sintética.

En la décima prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 80 kg de escoria reciclada del LF, 100 kg de cal siderúrgica, 1 645 °C, 141 ppm O₂ y 0,035 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo de azufre final 0,030 % experimental y teórico, en esta prueba se logró una disminución de cinco puntos de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica al igual que la prueba anterior, a pesar de que en ésta se trabajó con mayor contenido de oxígeno (ppm), lo que disminuye la capacidad desulfurante de la escoria sintética con respecto a la prueba anterior, sin embargo esta disminución de azufre se atribuye a la alta temperatura de trabajo con la que se contó al contenido de óxido de calcio que fue 47,328 %.

En la décima primera prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 70 kg de escoria reciclada del LF, 110 kg de cal siderúrgica, 1 646 °C, 248 ppm O₂ y 0,036 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,032 % de azufre final experimental y teórico, en esta prueba se consiguió una disminución de cuatro puntos de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica, puesto que se trabajó con 49,081 % de óxido de calcio, mayor cantidad del mismo con respecto al anterior, no obstante se presentó un alto contenido de oxígeno (ppm) en el acero, lo que disminuyó la capacidad desulfurante de la escoria sintética, sin embargo la disminución de azufre que se logró se atribuye a la alta temperatura de trabajo.

En la décima segunda prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 60 kg de escoria reciclada del LF, 120 kg de cal siderúrgica, 1 617 °C, 96 ppm O₂ y 0,037 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,030 % de azufre final experimental y teórico, en esta prueba se consiguió una disminución de siete puntos de azufre tanto en la práctica como en la iteración teórica, ya que la cantidad de cal siderúrgica que se añadió para formar la escoria sintética es el doble de la cantidad de escoria reciclada, lo que incrementa el contenido de óxido de calcio a 50,835 % y por ende favorece la desulfuración del acero, adicional a esto se contó con una adecuada temperatura y un bajo contenido de oxígeno (ppm) en el acero, con lo que se consiguió una disminución mayor de azufre con respecto a la anterior.

En la décima tercera prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 50 kg de escoria reciclada del LF, 130 kg de cal siderúrgica, 1 604 °C, 100 ppm O₂ y 0,034 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo un azufre final de 0,027 % experimental y 0,026 % teórico, en esta prueba las condiciones de trabajo fueron favorables para la desulfuración en el proceso de afino, se trabajó con una adecuada temperatura y contenido de oxígeno (ppm) en el acero, con lo que se consiguió una disminución de siete puntos de azufre en la práctica, y ocho puntos en la iteración teórica, esta diferencia se atribuye a fallas externas al proceso, es decir ya sea falla en la calidad de la cal siderúrgica o falla del operador que quizás no peso la cantidad de cal siderúrgica correspondiente a esta prueba, ya que se contaba con 52,588 % de óxido de calcio en la escoria sintética.

En el décima cuarta prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 40 kg de escoria reciclada del LF, 140 kg de cal siderúrgica, 1 606 °C, 118 ppm O₂ y 0,041 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,033 % de azufre final experimental y teórico, en esta prueba se logró una disminución de ocho puntos de azufre, y como se analizó en las pruebas anteriores se contó con las condiciones favorables, es decir una adecuada temperatura y contenido de oxígeno (ppm), y se trabajó con 54,342 % de óxido de calcio en la escoria sintética, con lo que llevó a cabo un adecuado proceso de desulfuración del acero.

En la décima quinta prueba piloto se probaron las siguientes condiciones: 30 kg de escoria reciclada del LF, 150 kg de cal siderúrgica, 1 595 °C, 122 ppm O₂ y 0,040 % de azufre inicial; con lo que se obtuvo 0,032 % de azufre final experimental y teórico, esta prueba al ser comparada con la anterior presenta similares condiciones de trabajo, es decir favorables para un adecuado proceso de desulfuración, no obstante en esta prueba se logró la misma disminución de azufre, es decir ocho puntos tanto en la práctica como en la iteración teórica, ya que se trabajó con una menor temperatura, a pesar de alcanzar la máxima cantidad de cal siderúrgica que se estableció para el proceso de afino, 56,096 % óxido de calcio en la escoria sintética.

En las pruebas piloto se registra un bajo contenido de oxígeno (ppm) en el acero, puesto que dicho contenido disminuye en el EAF debido a la adición de cal siderúrgica. En este sentido, se debe recalcar que en el EAF se adiciona una cantidad de cal mayor a la necesaria para acondicionar el horno.

Por consiguiente, al analizar cada una de las pruebas piloto de las dos mezclas, se evidenció que todas las pruebas presentaron distintas condiciones de trabajo, si bien algunas eran similares en temperatura y contenido de oxígeno (ppm), las diferenciaba la cantidad de escoria sintética reciclada y la de cal siderúrgica que se usó en el proceso de afino, con lo que se logró desulfuraciones específicas para cada prueba. Con ello se comprobó que para lograr una adecuada desulfuración es necesario que existan las tres condiciones favorables a la vez.

Resultados de la partición de Azufre de la escoria sintética probada en el proceso de afino formada por la escoria reciclada del EAF y LF, y de la escoria sintética formada por escoria reciclada del LF

En la Figura 3.8. se presenta la partición de azufre tanto para las pruebas piloto realizadas con la escoria sintética formada por escoria reciclada del EAF y LF, como para la escoria formada por la escoria reciclada del LF.

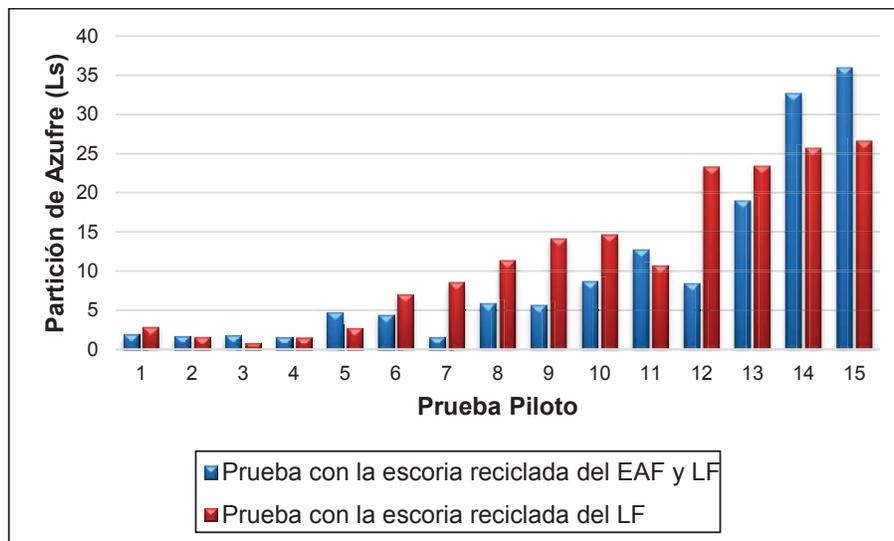


Figura 3.8. Partición de azufre de la escoria sintética formada por la escoria reciclada el EAF y LF y la formada por la escoria del LF

La partición de azufre como se indicó en la sección b. del apartado 1.1.3.4. para una mejor desulfuración del acero, requiere un valor alto, mismo que se puede conseguir con una alta temperatura y una baja actividad de oxígeno. En la Figura 3.8. se observa que la décima cuarta y décima quinta pruebas piloto de la primera mezcla presentan los mayores valores, sin embargo al analizar la desulfuración de estas pruebas piloto, presentan menor desulfuración con respecto a la décima cuarta y décima quinta pruebas piloto de la segunda mezcla, a pesar de presentar condiciones de trabajo similares y favorables para la desulfuración. Por lo tanto, esta discordancia se presenta cuando existen fallas operativas, es decir cuando el operador agregó mayor cantidad de cal siderúrgica de la establecida en las pruebas piloto de la segunda mezcla.

3.3.2 RESULTADOS DE LA BASICIDAD BINARIA DE LA ESCORIA GENERADA EN EL LF DURANTE EL PROCESO DE AFINO AL REALIZAR LAS PRUEBAS PILOTO CON LA ESCORIA SINTÉTICA FORMADA POR LA ESCORIA RECICLADA EL EAF Y LF Y LA FORMADA POR LA ESCORIA DEL LF

En la Figura 3.9. se presenta la basicidad binaria de la escoria generada en el LF, tanto para las pruebas piloto realizadas con la escoria sintética formada por escoria reciclada del EAF y LF, como para la escoria formada por la escoria reciclada del LF. En el Anexo XV se encuentran los resultados con los que se realizó dicha figura.

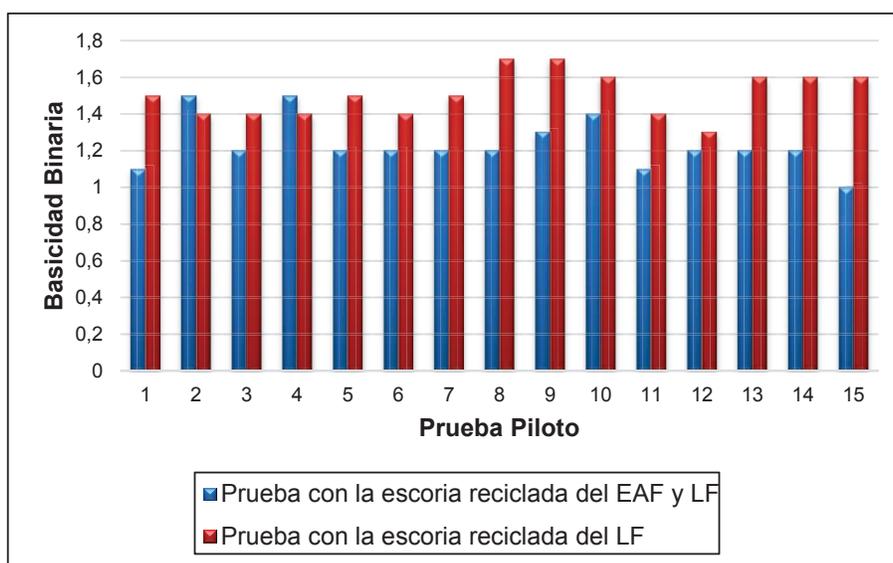


Figura 3.9. Basicidad binaria de la escoria generada en el LF durante el proceso de afino al realizar las pruebas piloto con la escoria sintética formada por la escoria reciclada el EAF y LF y la formada por la escoria del LF

La basicidad binaria de la escoria generada en el horno cuchara durante el proceso de afino debe estar en el rango de 1,4 a 1,8. Como se muestra en la Figura 3.9. la basicidad binaria de las pruebas realizadas con la escoria reciclada del LF caen dentro del rango establecido a excepción de la décima segunda prueba piloto que tiene un valor de 1,3. Por el contrario, la basicidad binaria de la segunda, cuarta y décima pruebas realizadas con la escoria reciclada del EAF y LF entran dentro del rango establecido, es decir las demás pruebas presentan

valores inferiores a 1,3; esto se debe a que dichas pruebas presentaron mayor contenido de SiO_2 en la escoria generada y por ende menor basicidad binaria.

Es necesario recalcar que en la Figura 3.9. se presenta un control de la escoria generada en el LF, a diferencia de la Figura 3.3. en la que se presenta la relación óxido de calcio y óxido de silicio, a pesar de que el cálculo sea el mismo, ya que el control en el rango de basicidad binaria de las pruebas realizadas es para asegurar la protección de la cuchara dolomítica, es decir para prevenir el rápido desgaste en la línea de escoria del refractario (Pascual V, 2009, p. 2).

3.4 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA ESCORIA SINTÉTICA

Una vez que se ha realizado la implementación de la escoria sintética formada por la escoria reciclada del EAF y/o LF en el proceso de afino, se evalúa la factibilidad económica del proyecto. Para esto se ha tomado en cuenta los costos de las materias primas para la elaboración de la escoria sintética y el precio de la escoria sintética importada.

En la Tabla 3.4. se presenta los precios de la escoria sintética fabricada en planta y de la escoria sintética importada. En el Anexo XVI se encuentran los resultados con los que se realizó dicha tabla.

Como se observa en la Tabla 3.4. el precio de la primera prueba piloto realizada inicia con 3,47 \$/33 ton acero, ya que en dicha prueba se utilizó la menor cantidad de cal siderúrgica que fue de 10 kg, que es la materia prima con un precio de 150 \$/ton, mientras que el costo de la escoria reciclada es de 11,6 \$/ton, dicho valor refleja lo que le cuesta a la acería la reducción de tamaño de la escoria generada por los hornos EAF y/o LF para ser reciclada. El precio de cada prueba piloto consiguiente va aumentando con respecto a la anterior, ya que la cantidad de escoria reciclada fue disminuyendo, al mismo tiempo que la cantidad de cal

siderúrgica fue aumentando, hasta culminar con un precio de 22.85 \$/33 ton acero en la décima quinta prueba.

Tabla 3.4. Precios de la escoria sintética formada por la escoria reciclada del EAF y/o LF y de la escoria sintética importada.

Prueba Piloto	Precio de las escorias sintéticas (\$/ton acero)	
	Escoria reciclada del EAF y/o LF	Escoria Sintética Importada
1	3,47	36,9
5	9,01	
15	22,85	

La primera prueba con la escoria reciclada presentó el menor precio de 3,47 \$/33 ton acero, mas no se logró la desulfuración del acero. Por el contrario, en la décima quinta prueba con la escoria reciclada presentó el mayor precio de 22,85 \$/33 ton acero, y asimismo la mayor desulfuración del acero, sin embargo la quinta prueba de los dos tipos de mezcla logró la desulfuración de al menos un punto de azufre con el menor costo, de 9,01 \$/33 ton acero.

En cuanto al precio de la escoria sintética importada fue de 36,9 \$/33 ton acero, precio que fue comparado con cada una de las pruebas piloto realizadas, donde se evidenció que el precio de la escoria sintética importada fue mayor con respecto al precio de escoria sintética formada por la escoria reciclada del EAF y/o LF en cada una de las pruebas, por ello es necesario recalcar el ahorro que se genera usando la escoria reciclada del EAF y/o LF, puesto que incluso al comparar el costo de la décima quinta prueba piloto con escoria reciclada genera un ahorro de 14,05 \$/33 ton acero con respecto al precio de la escoria sintética importada.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. De las treinta posibilidades de mezclas analizadas, la evaluación de la metalurgia secundaria indica que la décima quinta prueba piloto de la escoria sintética formada por la escoria reciclada del EAF y LF presentó el mayor coeficiente de partición de 35,99; con lo que permitió disminuir siete puntos de azufre en el proceso de afino.
2. De las treinta posibilidades de mezclas analizadas, la evaluación de la factibilidad económica del proyecto indica que la quinta prueba de los dos tipos de mezclas logró la desulfuración de al menos un punto de azufre, a un menor costo de 9,01 \$/33 ton acero.
3. La metodología utilizada en el proyecto fue validada con las pruebas piloto realizadas en planta, ya que se obtuvo los resultados que indicaban las iteraciones teóricas, en las pruebas que no se logró lo esperado se atribuye a una falla operativa externa al proceso, en las condiciones de trabajo o en la calidad de las materias primas.
4. El proceso actual con el que se trabaja la acería no necesita una escoria para realizar un proceso de desulfuración, sino más bien una escoria de acondicionamiento que proteja el refractario del horno cuchara, disminuyendo la cantidad de cal siderúrgica usada.
5. Las condiciones de trabajo que presenta el acero líquido al llegar al horno cuchara son favorables para el proceso de afino, por lo que se concluye que en el horno de arco eléctrico está siendo sobredimensionado y usando una cantidad de cal siderúrgica en exceso para acondicionar el mismo.

6. Un análisis global del criterio técnico y económico permitió concluir que la mezcla óptima para el proceso de producción es la primera ya que para todos los casos la cantidad de azufre inicial es menor al 40 %, lo que cumple con la norma técnica INEN y resultaría innecesario en este proceso incrementar un costo por desulfuración.
7. El ahorro generado mediante el uso de la escoria reciclada en el proceso de afino fue de 14,05 \$/33 ton acero correspondiente a la décima quinta prueba piloto realizada con la escoria reciclada del EAF y/o LF comparada con el precio de la escoria sintética importada de 36,9 \$/33 ton acero; en consecuencia los costos por desulfuración podrían ser reducidos al usar la escoria reciclada de los hornos EAF y/o LF usados en el proceso de afino.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Disminuir la cantidad de cal siderúrgica usada en el horno de arco eléctrico para acondicionar el mismo.
2. Disminuir la exposición del acero líquido con el ambiente para evitar la oxidación del mismo.
3. Verificar que la cantidad de materias primas colocada para la desulfuración sea la correcta para evitar fallas operativas en el proceso de afino.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adolfsson, D., Engström, F., Robinson, R. y Björkman, B. (2011). Cementitious phases in ladle slag. *Steel Research International*, 82(4), 398–403. <http://doi.org/10.1002/srin.201000176>
2. Andersson, M. A., Jönsson, P. G. y Nzotta, M. M. (1999). Application of the sulphide capacity concept on high-basicity ladle slags used in bearing-steel production. *ISIJ International*, 39(11), 1140–1149. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.39.1140>
3. Ayerve, H. (2007). Optimización del proceso de desoxidación y mejora de la calidad superficial en los aceros calidad 1008A 2 de la Corporación Aceros Arequipa. (Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Metalurgista). Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. Lima. Perú.
4. Duffy, J. A. y Ingram, M. D. (1976). An interpretation of glass chemistry in terms of the optical basicity concept. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 21(3), 373–410. [http://doi.org/10.1016/0022-3093\(76\)90027-2](http://doi.org/10.1016/0022-3093(76)90027-2)
5. Durinck, D., Engström, F., Arnout, S., Heulens, J., Jones, P. T., Björkman, B. y Wollants, P. (2008). Hot stage processing of metallurgical slags. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1121–1131. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.001>
6. Engh, T. A. (1992). *Principles of Metal Refining*. (1era. ed.). Nueva York, Estados Unidos: Oxford University Press
7. Espinosa, C. (2005). *Evolución de las inclusiones no metálicas en el proceso de elaboración del acero*. (Tesis previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. Argentina.

8. Famurewa, S. (2009). *Improvement of the Desulphurization Process by Slag Composition Control in the Ladle Furnace*. (Master's Thesis). Luleå University of Technology. Luleå. Suecia.
9. Fernández, M. (2013). *Operación y mantenimiento de una olla de refinación para el proceso de fundición de acero al carbón por medio de horno de arco eléctrico en siderúrgica de Guatemala*. (Trabajo de Graduación). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
10. Gualda, I. (2012). *Mejoras en el proceso de desoxidación de acero en Horno de Inducción*. (Proyecto fin de carrera para acceder al título de Ingeniero Industrial). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Madrid. España.
11. Ghosh, D., Krishnamurthy, V. A. y Sankaranarayanan, S. R. (2010). Application of optical basicity to viscosity of high alumina blast furnace slags. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 46(1), 41–49. <http://doi.org/10.2298/JMMB1001041G>
12. Görnerup, M. (1997). *Studies of slag metallurgy in stainless steelmaking*. (Disertación doctoral no publicada). KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia.
13. Görnerup y Poliakova. (2012). *Horno de arco eléctrico*. Recuperado de <http://steelx.org/content/html/spa/default.asp?catid=25&pageid=2081271928> (Marzo, 2015)
14. Heput, T., Ardelean, E., Socalici, A., Maksay, S. y Gavanescu, A. (2006). Steel desulphurization with synthetic slag. *Revista de Metalurgia*, 43(1), 42-49. doi: 10.3989/revmetalm.2007.v43.i1.50
15. INEN 251. (1977). Cales. Muestreo. Ecuador.

16. INEN 2167. (2011). Varillas de acero con resaltes, laminadas en caliente soldables, microaleadas o termotratadas, para hormigón armado. Requisitos. Ecuador.
17. Janke D., Savov L., Weddige H. L. y Schulz E. (2000). Scrap-based steel production and recycling of steel. *Materiali in Tehnologije*, 34(6), 387.
18. Lange, K. W. (1988). Thermodynamic and kinetic aspects of secondary steelmaking processes. *International Materials Reviews*, 33(1), 53–89. [http://doi.org/ 10.1179/095066088790324120](http://doi.org/10.1179/095066088790324120)
19. MT-CC.14. (2012). Manejo del Espectrómetro de Emisión Óptica. NOVACERO S.A.
20. MT-CC.21. (2013). Manual de Operaciones del Espectrómetro de Rayos X EDX-720. NOVACERO S.A.
21. MT-CC.36.01. (2011). Tabla de referencia para ensayos granulométricos. NOVACERO S.A.
22. MT-PRL.64. (2010). Toma de muestra de acero líquido. NOVACERO S.A.
23. MT-PRL.68. (2010). Especificación de Insumos Acería. NOVACERO S.A.
24. Pascual, V. (2009). Uso de escoria sólida reciclada en la refinación de arrabio de bajo silicio. (Memoria de experiencia laboral para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Química). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.
25. Portilla, M. (2012). *Elaboración de un procedimiento para fundir acero de medio carbono en el horno de inducción para el laboratorio de fundición*. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

26. Pretorius, E. y Oltmann, H. (2008). *Desulfurization*, Recuperado de <http://etech.lwbref.com/Downloads/Theory/Desulphurization%20by%20slag%20treatment.pdf>
27. Quintana, R., Gómez, C. R., Cruz, A. y Perdomo, L. (2011). Vitreous matrices evaluation of the SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO system for agglomerate fluxes across the optic basicity and structural-chemical criteria. *Soldagem & Inspeção*, 16(2), 137–145. <http://doi.org/10.1590/S0104-92242011000200006>
28. Sosinsky, D J. y Sommerville, I. D. (1986). The composition and temperature dependence of the sulfide capacity of metallurgical slags. *Metallurgical Transactions B*, 17(2), 331–337. <http://doi.org/10.1007/BF02655080>
29. SteelUniversity.org. (2004). *Simulación de la metalurgia secundaria, versión 2. Guía del Usuario*. Recuperado de: http://www.steeluniversity.org/content/html/spa/SSM_UserGuide.pdf. (Febrero, 2014).
30. Vidales, B., López, E. y Nava, E. (2007). Escoria sintética experimental para desulfurar el metal líquido. En *4° Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales* (pp. 219-224). Morelia, México: Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH.
31. Wondris, E. F. (2015). *Secondary Steelmaking*, Recuperado de <http://www.britannica.com/technology/steel/Secondary-steelmaking#toc81396> (Marzo 2015)

ANEXOS

ANEXO I

NORMA INEN 251 “CALES MUESTREO”

NTE INEN 251

1977-02

6. PROCEDIMIENTO

6.1 Materiales a granel en terrones y granos.**6.1.1 De pilas de almacenamiento a carros de transporte.**

6.1.1.1 El material deberá seleccionarse de tal manera que represente un promedio de varias partes de la pila o del carro, y no solamente de las capas superiores o inferiores.

6.1.1.2 El material seleccionado deberá comprender por lo menos diez paladas, tomadas de diferentes partes de la pila o del carro, haciendo hoyos de profundidad no menor de 30 cm bajo su superficie exterior.

6.1.1.3 La cantidad total no deberá pesar menos de 25 kg por cada 30 toneladas de material, o la cantidad correspondiente a los múltiplos; pero, en ningún caso podrá ser menor de 25 kg.

6.1.1.4 Las muestras triples deberán pesar 2,5 kg y se obtendrán removiendo y mezclando el total de las muestras. Si no se van a realizar ensayos de tamices, se podrán moler las muestras. Si se van a realizar ensayos de tamices, debe precederse de acuerdo a las especificaciones de la Tabla 1,

6.1.2 De las bandas transportadoras a los silos, pilas de almacenamiento o carros.

6.1.2.1 La muestra deberá tomarse a intervalos regulares durante el movimiento de la masa del material que se está examinando. La cantidad tomada en cada intervalo y el número de intervalos deberán determinarse de tal modo que la cantidad final corresponda a los requisitos especificados en el numeral 6.1.1.

6.2 Materiales ensacados en terrones y granos.

6.2.1 Para el muestreo de estos materiales, deberá emplearse por lo menos el 1% de los sacos con un mínimo de cinco sacos. Los sacos deberán escogerse de varias partes de la unidad considerada. De cada saco escogido se extraerá una cantidad no menor de 500 g y se colocará en un recipiente común.

6.2.2 El material extraído se removerá y mezclará completamente. De aquí se tomarán muestras triples de 2,5 kg para los ensayos, siempre que no se hayan especificado ensayos de tamices, y si se especifican ensayos de tamices, las cantidades indicadas en el numeral 4.2.1 y la Tabla 1.

6.3 Materiales a granel en polvo.**6.3.1 En silos, pilas de almacenamiento y carros.**

6.3.1.1 Las muestras se tomarán con el tubo sacamuestras especificado en el numeral 5.2 de esta norma. El tubo deberá penetrar desde la parte superior a la base de la masa cuya muestra se toma.

6.3.1.2 Las muestras así tomadas deberán ser completamente reunidas y mezcladas, y las muestras triples para ensayos deberán extraerse del material así preparado.

6.3.1.3 La cantidad total no deberá pesar menos de 25 kg por cada 30 toneladas de material, o la cantidad correspondiente a los múltiplos; pero, en ningún caso ser menor de 25 kg.

(Continua)

Figura AI.1. Procedimiento para el muestreo de cales en la industria química

ANEXO II

MÉTODO DE TRABAJO “ESPECIFICACIÓN DE INSUMOS ACERÍA”

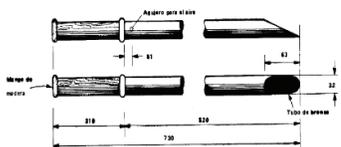
Tabla AII.1. Método de Trabajo de la Acería “Especificación de Insumos Acería”

	MÉTODO DE TRABAJO	MT-PRL.68
	<i>PLANTA LASSO</i>	Edición: Quinta
		Página 65 de 112
ESPECIFICACIÓN DE INSUMOS ACERÍA		
Cal Dolomítica 	MgO: 40 % mín CaO: 50 % mín Azufre: <0.03 % Fósforo: <0.03 % Granulometría: 20 – 50 mm (90 % mín) Porcentaje de polvo: 10 % máx.	Almacenar en un lugar seco, en contacto con agua generará calor y vapor, eventualmente desprendimiento de partículas a gran velocidad y temperatura (alrededor de 180 °C). Para su manipulación el operador debe utilizar los EPI's básicos como: Guantes de cuero, casco, mascarilla, protección auditiva, zapatos punta de acero, terno antiplama, gafas claras.
Cal Siderúrgica 	CaO: 90 % mín Azufre: <0.03 % Fósforo: <0.03 % Granulometría: 20 – 50 mm (90 % mín) Porcentaje de polvo: 10 % máx.	

Tabla AII.1. Método de Trabajo de la Acería “Especificación de Insumos Acería”
(continuación)

		MÉTODO DE TRABAJO <i>PLANTA LASSO</i>		MT-PRL.68										
				Edición: Quinta										
				Página 66 de 112										
ESPECIFICACIÓN DE INSUMOS ACERÍA														
ACTIVIDAD	¿CÓMO?	RIESGO	PLAN DE ACCIÓN											
Muestreo Responsable: Despachador de Insumos	<p>El muestreo se realizará con una frecuencia correspondiente a cada número de guía existente. Se deberá emplear por lo menos el 1 % de los sacos con un mínimo de cinco sacos, también se puede determinar el número de sacos a muestrear empleando la Tabla de AQL. Los sacos deberán escogerse de varias partes de la unidad considerada. De cada saco escogido se extraerá una cantidad no menor de 500g y se colocará en un recipiente en común. El material extraído se removerá y mezclará completamente.</p> <p>Cantidad y masa de las muestras</p> <p>Del material extraído se tomarán tres muestras dependiendo de la granulometría a analizar.</p> <p>Para ensayos de tamices, la masa de las muestras triples será la siguiente:</p> <p>Tabla 1: Masa de las muestras triples</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Abertura de mallas (mm)</th> <th style="text-align: center;">Masa mínima de la muestra (kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">2,5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">5,0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">15,0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">50</td> <td style="text-align: center;">35,0</td> </tr> </tbody> </table>	Abertura de mallas (mm)	Masa mínima de la muestra (kg)	20	2,5	25	5,0	40	15,0	50	35,0	Muestra no representativa	Tomar una nueva muestra de acuerdo al procedimiento establecido Respetar la Tabla de cantidad y masa de las muestras en función de la granulometría a ensayar	
Abertura de mallas (mm)	Masa mínima de la muestra (kg)													
20	2,5													
25	5,0													
40	15,0													
50	35,0													

Tabla AII.1. Método de Trabajo de la Acería “Especificación de Insumos Acería”
(continuación)

		MÉTODO DE TRABAJO		MT-PRL.68
		PLANTA LASSO		Edición: Quinta
				Página 7 de 112
ESPECIFICACIÓN DE INSUMOS ACERÍA				
ACTIVIDAD	¿CÓMO?	RIESGO	PLAN DE ACCIÓN	
<p>Identificación</p> <p>Responsables:</p> <p>Proveedor y Bodeguero de Turno</p> <p>Disposiciones Generales</p> <p>Responsable:</p> <p>Bodeguero de Turno y Laboratorista</p>	<p>Sacamuestras para sacos</p>  <p>FIGURA 2 Tubo para muestreo de cal ensacada</p> <p>El proveedor deberá enviar con una adecuada identificación los insumos de tal manera que sean trazables, en el caso de la cal siderúrgica el proveedor debe enviar en los big-bag una etiqueta con la siguiente información:</p> <p>Nombre del Proveedor N° guía Fecha de calcinación Horno Mina La muestra del insumo entregada por el personal de bodega deberá contener la siguiente información:</p> <p>Nombre del Insumo Fecha de arribo Proveedor N° de Orden de Compra N° de Guía de Remisión N° Factura De ser posible el muestreo de la cal siderúrgica debe realizarse dentro de las 24 horas de realizada la calcinación.</p> <p>El muestreo y la preparación de las muestras deberán hacerse con la mayor rapidez posible, para evitar una prolongada e indebida exposición del material al aire y a la humedad.</p>	<p>No se puede dar trazabilidad a un insumo</p> <p>Muestra no representativa</p>	<p>Tomar una muestra inmediatamente llegado el insumo, colocar la respectiva identificación y marcar manualmente los big-bag con el número de orden de compra y la fecha de arribo.</p> <p>Tomar una nueva muestra de acuerdo al procedimiento establecido</p>	

ANEXO III

MÉTODO DE TRABAJO “REFERENCIA PARA ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS”

Tabla AIII.1. Tabla de referencia para ensayos granulométricos

	REGISTRO				F-MTCC.36.01 Edición: Primera
TABLA DE REFERENCIA PARA ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS					
INSUMO	JUEGO DE TAMICES (mm)				TIEMPO ÓPTIMO, (s)
Antracita de carga	25,400	15,875	9,525	NA	60
Antracita de ajuste	3,353	1,999	1,001	0,594	30
Antracita de insuflar	1,001	0,594	0,249	0,097	30
Ferro silicio	50,800	38,100	25,400	9,525	50
Ferro Si-Mn	50,800	38,100	25,400	9,525	50
Cal dolomítica	50,800	38,100	25,400	15,875	50
Cal siderúrgica	50,800	38,100	25,400	15,875	50
Carburo de calcio	3,988	3,353	1,999	NA	50
Carburo de silicio	3,988	3,353	1,999	NA	50
Espumante HAE DQ-700	3,988	3,353	1,999	1,001	5
Ferro vanadio	50,800	38,100	25,400	9,525	50
Ferro Mn	50,800	38,100	25,400	9,525	50
Polvo aislante	9,525	3,353	1,999	1,001	5
Arenas de cromita	0,594	0,249	0,097	NA	5
Briquetas de MgO	38,100	31,750	NA	NA	50
Fluorita	25,400	15,875	9,525	NA	50

ANEXO IV

MÉTODO DE TRABAJO “MANEJO DEL ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X”

Tabla AIV.1. Método de Trabajo de la Acería “Manejo del Espectrómetro de Rayos X”

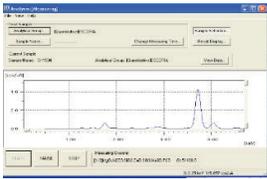
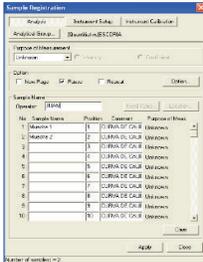
	MÉTODO DE TRABAJO	F-MTCC.21
	Planta Lasso	Edición: 2
		Página 69 de 26
MANEJO DEL ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X		
<p>1.4.2.- Análisis de la muestra Responsable: Laboratorista</p>  <p>Fig. 12</p> <p>1.4.3 Registrar las muestras en el equipo. Responsable: Laboratorista</p> <p>Bodeguero de insumos de la acería.</p>  <p>Fig. 13</p>  <p>Fig. 14</p>	<p>Pulsar “<i>Analysis</i>” que se encuentra en el “<i>MainMenu</i>”.(fig.12)</p> <p>En el menú de análisis, dar clic sobre el botón “<i>Sample Schedule</i>”.</p> <p>En la pantalla de “<i>Sample Schedule</i>” dar clic sobre el botón “<i>SampleRegistration</i>”.(fig.13)</p> <p>Llenar los datos de nombre de muestras “<i>SampleName</i>”, nombre del operador “<i>Operator</i>” y algún comentario en especial de cada muestra “<i>Comment</i>”.(fig.14)</p> <p>El bodeguero de insumos de la acería debe entregar la muestra correctamente identificada al laboratorio.</p>	<p>Pérdida de trazabilidad.</p> <p>Ingreso incorrecto de información en el programa EDX(C).</p> <p>Verificar que las muestras estén correctamente identificadas, e ingresada la información al equipo.</p>

Tabla AIV.1. Método de Trabajo de la Acería “Manejo del Espectrómetro de Rayos X”
(continuación)

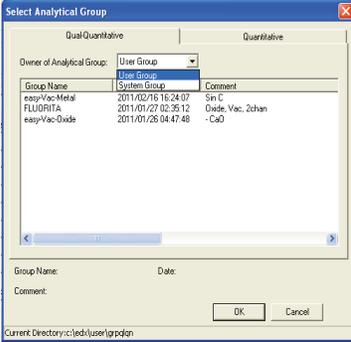
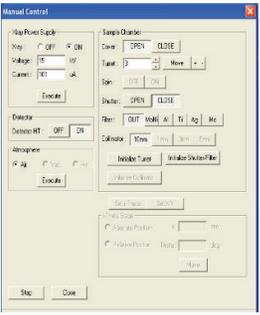
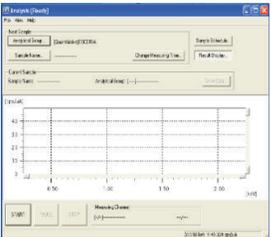
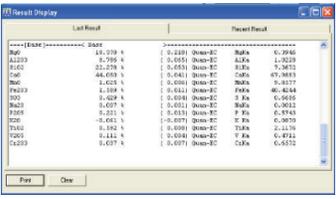
	MÉTODO DE TRABAJO		F-MTCC.21
	Planta Lasso		Edición: 2
			Página 70 de 26
MANEJO DEL ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X			
<p>1.4.4.- Seleccionar el grupo para un análisis cualitativo o cuantitativo.</p> <p>Responsable: Laboratorista</p>  <p>Fig. 15</p>	<p>Dar clic sobre el botón “<i>AnalyticalGroup</i>” del menú “<i>SampleRegistration</i>”, (fig.15) aparecerá la siguiente pantalla: Pulsar “<i>Qual-Quantitative</i>”.</p> <p>Seleccionar el autor del método. Si se desea utilizar los métodos creados por el usuario, dar clic sobre la pestaña de “<i>Owner of AnalyticalGroup</i>” y seleccionar “<i>UserGroup</i>”, si se desea utilizar un método predeterminado por el programa, seleccionar “<i>SystemGroup</i>”. (fig.15)</p> <p>Una vez seleccionado el autor, de la lista que se despliegue seleccionar el método que se va a utilizar. Dar clic en el botón “<i>OK</i>”. Dar clic sobre el botón “<i>AnalyticalGroup</i>” del menú “<i>SampleRegistration</i>”.</p> <p>Dar clic sobre la pestaña “<i>Quantitative</i>”.</p> <p>De la lista que se despliegue seleccionar el método que se va a utilizar. Dar clic en el botón “<i>OK</i>”.</p> <p>Los métodos de análisis cuantitativo, muestran resultados aproximados de elementos que no están dentro del rango de medición.</p>	<p>Elección incorrecta del método.</p> <p>Resultados de las propiedades químicas incorrectas(C)</p>	<p>Verificar que material se va a analizar y si existe curva de calibración para el mismo.</p> <p>Si se desea medir algún elemento que no se encuentre en este rango se lo puede hacer mediante balance creando un grupo de análisis como se muestra en el MT-CC.22.</p>

Tabla AIV.1. Método de Trabajo de la Acería “Manejo del Espectrómetro de Rayos X”
(continuación)

	MÉTODO DE TRABAJO		F-MTCC.21
	Planta Lasso		Edición: 2
			Página 71 de 26
MANEJO DEL ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X			
<p>1.4.5.- Preparación de las muestras sólidas o líquidas.</p> <p>Responsable: Laboratorista</p>  <p>Fig. 16</p>	<p>Para muestras en polvo, colocar la muestra evitando su contaminación en el triturador hasta obtener un polvo fino, tamizar en el tamiz de 5 μm.</p> <p>En caso de ser escoria pasar un imán por la muestra en polvo para remover el exceso de hierro de la muestra.</p> <p>Desarmar el porta muestras como se muestra en la (fig.16) quitando todos los anillos:</p> <p>Colocar un pedazo de filme de polipropileno de 5μm., sobre el porta muestras, ajustarlo colocando el anillo delgado y el anillo superior. Colocar la muestra en polvo o líquida dentro del porta muestras. (fig.16)</p> <p>Colocar un pedazo de plástico como tapa y asegurarlo con el anillo de seguridad.</p> <p>Realizar unos pequeños agujeros en el plástico de la tapa.</p> <p>Una vez terminado el ensayo desechar las muestras.</p>	<p>Polvo de insumos.</p> <p>Afecciones respiratoria y visual(S).</p> <p>Disposición final del desecho inadecuada.</p> <p>(A).</p> <p>Resultados erróneos por rugosidad en la base del porta-muestra.</p> <p>Polypropylene mal templado.(C)</p>	<p>Lavar con abundante agua en caso de contacto.</p> <p>Utilizar obligatoriamente los EPI'S</p> <p>Clasificar adecuadamente los desechos:</p> <p>Insumos: Entregar a la acería.</p> <p>Escoria: botar en el lugar destinado para este desecho.</p> <p>Plásticos: Recipiente color Blanco.</p> <p>Es muy importante al momento de preparar el porta muestra que el polipropileno que se coloca en la parte inferior del porta muestras quede totalmente estirado.</p>

Tabla AIV.1. Método de Trabajo de la Acería “Manejo del Espectrómetro de Rayos X”
(continuación)

		MÉTODO DE TRABAJO		F-MTCC.21	
		Planta Lasso		Edición: 2	
				Página 72 de 26	
MANEJO DEL ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X					
<p>1.4.6.-Análisis de muestra.</p> <p>Responsable: Laboratorista</p>   <p>Fig. 17</p>  <p>Fig. 18</p>  <p>Fig. 19</p>	<p>Dar clic sobre el botón “Apply” del menú de “SampleRegistration”.</p> <p>Abrir la compuerta del equipo, manteniendo aplastado el botón “Open” que se encuentra en la parte frontal del equipo, o utilizando el botón “OPEN” de la opción “Cover” del menú “Manual Control”.(fig.17)</p> <p>Para abrir el menú “Manual Control” se da clic sobre el botón “Manual Control” del menú “Maintenance”.</p> <p>Se colocan las muestras en el orden en que se las ingresó en el programa y se cierra la compuerta manteniendo aplastado el botón “Close” que se encuentra en la parte frontal del equipo o aplastando el botón “Close” del menú “Manual Control”.(fig.17)</p> <p>Aplastar el botón “Start” que se encuentra en la parte frontal del equipo, o el botón en el menú “Analysis” como se muestra en la (fig.18).</p> <p>Los resultados se mostrarán de la siguiente manera (fig.19)</p>	<p>Quemaduras.</p> <p>Emissiones radiactivas(S)</p>	<p>No colocarse frente al equipo durante el análisis.</p> <p>Verificar que no exista exceso de emisión en las mediciones bimestrales realizadas con el dosímetro.</p>		

ANEXO V

MÉTODO DE TRABAJO “TOMA DE MUESTRA DE ACERO LÍQUIDO”

Tabla AV.1. Método de Trabajo de la Acería “Toma de muestra de acero líquido”

		MÉTODO DE TRABAJO <i>PLANTA LASSO</i>		MT-PRL.64
				Edición: Tercera
				Página 73 de 112
TOMA DE MUESTRA DE ACERO LÍQUIDO				
ACTIVIDAD	¿CÓMO?	RIESGO	PLAN DE ACCIÓN	
<p>1.4.1.- Colocar el cartucho en el tubo.</p> <p>Responsable: Horneros</p> 	<p>El cartucho de muestra debe colocarse en un extremo del tubo, asegurándose que el cartucho esté firme.</p>	<p>Quemaduras por radiación calórica</p> <p>Caída del cartucho y pérdida de la muestra</p>	<p>El tubo que se va a utilizar debe ser largo</p> <p>Tomar inmediatamente otra muestra</p>	
<p>1.4.2.- Tomar muestra del acero líquido</p> <p>Responsable: Horneros</p> 	<p>Se realiza la toma de muestra, para ello se debe introducir el cartucho 30 cm en la colada, en posición perpendicular al acero, de tal forma que la muestra contenga únicamente acero y no se contamine con escoria. El tiempo que el cartucho debe mantenerse en el interior del acero líquido es de 5 segundos.</p>	<p>Quemaduras por contacto con partículas calientes</p> <p>Muestra no representativa del proceso</p>	<p>Uso de EPI's apropiados (uso de escafandra), no pararse frente a la puerta de escoria mientras se realiza esta actividad. Protegerse tras las pantallas de protección colocadas en los pasamanos junto a la piquera del horno.</p>	

ANEXO VI

MÉTODO DE TRABAJO “MANEJO DEL ESPECTRÓMETRO DE EMISIÓN ÓPTICA”

	MÉTODO DE TRABAJO		MT-CC.14
	Planta Lasso		Edición: Tercera Página 1 de 16
MANEJO DEL ESPECTROMETRO			
Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	Fecha:
Jefe de Laboratorio de Control de Calidad.	Jefe de Laminación/Jefe de Acería	Ing. Guillermo Miño Gerente de Planta	2012-03-30

1. INSTRUCCIÓN:
El siguiente método resume en detalle el correcto uso y aplicación del espectrómetro de emisión óptica

1.1 CONDICIONES INICIALES DE OPERACIÓN.
Preparación de las muestras.

ACTIVIDAD	¿COMO?	RIESGO	PLAN DE ACCIÓN
<p>1.1.1 Preparación de la probeta. Responsable: Laboratorista Inspector de Calidad Acería/Laminación.</p>  <p style="text-align: right;"><i>Fig.1 Lijadora Yodogawa</i></p>	<p>a) Utilizar una lija especial de zirconio grano Z80, para que no exista contaminación de la probeta. Todas las muestras deben ser de diámetros mayores al agujero del equipo es decir de 12 mm.</p> <p>b) La probeta debe tener una superficie completamente plana, se recomienda maquinarla en la limadora o en un torno, dependiendo de la forma la superficie posterior a la refrentada, debe ser paralela a la misma.</p>	<p>Si se utiliza otro tipo de lija, se tiene variación en porcentaje de Composición Química Ej.: en C y Si.</p>	<p>Verificar antes de colocar la lija en la máquina la especificación de la lija.</p>

Figura AVI.1. Método de Trabajo de la Acería “Manejo del Espectrómetro de Emisión Óptica”

	<h2>MÉTODO DE TRABAJO</h2> <p>Planta Lasso</p>	MT-CC.14 Edición: Tercera Página 2 de 10
	<h3>MANEJO DEL ESPECTROMETRO</h3>	

<p>1.1.2 Recepción de la Probeta: Responsable: Laboratorista</p>  <p style="text-align: center;"><i>Fig.2 Muestra defectuosa.</i></p>	<p>a) Se debe enfriar la muestra 20 a 26 (s) para facilitar la manipulación ya que llega a elevadas temperaturas. Se debe secar la muestra, completamente sin dejar gotas de agua.</p> <p>b) La probeta luego de enfriarse bruscamente se debe pasar por la lijadora para analizarla en el espectrómetro.</p> <p>c) Analizar muestras libres de imperfecciones en la superficie, como por ejemplo, porosidades profundas, restos de escoria, grietas en la muestra, etc.,.</p>	<p>Resultados no confiables, retraso en emisión de los mismos</p> <p>No se analizarán muestras que no cumplan con los requerimientos. No se realizará el ensayo de muestras que no estén registradas en el F- MTCC.14.01 para producto terminado. Para remuestreo y muestras varias se deberá registrar en el formato F-MTCC.14.02 Para muestras con imperfecciones solicitar otra muestra.</p>
--	--	---

Figura A.VI.1. Método de Trabajo de la Acería “Manejo del Espectrómetro de Emisión Óptica” (continuación)

	MÉTODO DE TRABAJO Planta Lasso		MT-CC.14 Edición: Tercera Página 3 de 16
	MANEJO DEL ESPECTROMETRO		

ACTIVIDAD	¿COMO?	RIESGO	PLAN DE ACCIÓN
<p>1.2.1 Pulido de Muestra.</p> <p>Responsable: Laboratorista Inspector calidad Acería/Laminación. Operadores máquina de tracción.</p>  <p><i>Fig. 3 Sistema de encendido</i></p>	<p>a) Conectar a una toma de energía eléctrica de 220V la lijadora semi-automática, encender pulsando en el botón ON situado en la parte posterior de la máquina junto al motor. Pulsar el botón OFF ubicado en el mismo lugar para apagar la máquina.</p>	<p>Incorrecta operación de la máquina.</p>	<p>Regirse al método MT-CC.18</p>
 <p><i>Fig. 4 Sentido de movimiento de la lijadora</i></p>	<p>d) Tomar firmemente la probeta a ser ensayada y colocar la superficie refrentada en la lija en movimiento (Figura 4), realizar algunos movimientos paralelos a la banda lijadora con el fin de gastar la superficie de la lija uniformemente (Figura 5 y 6). Es importante anotar que no se debe girar la probeta con respecto al sentido inicial de lijado que se dio, ya que como se mencionó las líneas del lijado deben ser paralelas entre sí, para que el arco que incida sobre la superficie lijada sea mayor y así obtener los resultados esperados (Figura 7). e) La superficie de la probeta a ser analizada debe ser de rugosidad uniforme sin defectos como restos de escoria, poros, líneas de lijado en varios sentidos.</p>	<p>Cambio en la Composición Química, fugas de argón por mal sellado de la muestra con la placa en la cámara del espectrómetro. Incorrecta recalibración del equipo,</p>	<p>Identificar correctamente el número de muestra en la probeta para remuestreo si fuese necesario.</p>

Figura AVI.1. Método de Trabajo de la Acería “Manejo del Espectrómetro de Emisión Óptica” (continuación)

	MÉTODO DE TRABAJO Planta Lasso	MT-CC.14
		Edición: Tercera Página 8 de 16
MANEJO DEL ESPECTROMETRO		

 <p style="text-align: center;"><i>Fig.12 Análisis defectuoso.</i></p>	<p>Las quemas deben realizarse utilizando las cuartas partes de la muestra (figura 13).</p> <p>Presionamos con la varilla de contacto y remitirse al manual del software del equipo.</p>	<p>Remitirse al manual de manejo del software del espectrómetro. MT-CC.15</p>
 <p style="text-align: center;"><i>Fig.13 Análisis correcto.</i></p>		

Figura A VI.1. Método de Trabajo de la Acería “Manejo del Espectrómetro de Emisión Óptica” (continuación)

ANEXO VII

CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LAS MATERIAS PRIMAS

Tabla AVII.1. Informe del ensayo de granulometría de la cal siderúrgica

		REGISTRO				F-MTCC.36.02 Edición: Primera	
INFORME DE ENSAYO DE GRANULOMETRÍA							
Fecha de análisis:		11/08/2014					
Tipo de insumo:		CAL-SIDERURGICA(NARANJO) # GUIA 1344					
Tamiz	Abertura						
Malla #	mm	Retenido,(g)	%Retenido	% R. Acumulado	% min	Tiempo, s	
MALLA	50	0	0,00	0,00	90,00	50	
MALLA	38,1	527,9	29,48	29,48			
MALLA	25,4	966,2	53,96	83,44			
MALLA	15,875	216,2	12,07	95,51			
FONDO	0	80,4	4,49	100,00			
Masa Total (Inicial/Final)		1790,7	1790,7	0,00	d90	46 mm	

Tabla AVII.2. Tamaño de partícula de las muestras caracterizadas de cal siderúrgica

Cal Siderúrgica	Tamaño de partícula (mm)	Cal Siderúrgica	Tamaño de partícula (mm)
Muestra 1	46	Muestra 18	37
Muestra 2	42	Muestra 19	32
Muestra 3	39	Muestra 20	40
Muestra 4	44	Muestra 21	44
Muestra 5	37	Muestra 22	41
Muestra 6	43	Muestra 23	39
Muestra 7	44	Muestra 24	35
Muestra 8	38	Muestra 25	43
Muestra 9	46	Muestra 26	47
Muestra 10	40	Muestra 27	42
Muestra 11	39	Muestra 28	38
Muestra 12	35	Muestra 29	35
Muestra 13	47	Muestra 30	41
Muestra 14	45	Muestra 31	46
Muestra 15	30	Muestra 32	35

Tabla AVII.2. Tamaño de partícula de las muestras caracterizadas de cal siderúrgica
(continuación)

Cal Siderúrgica	Tamaño de partícula (mm)	Cal Siderúrgica	Tamaño de partícula (mm)
Muestra 16	33	Muestra 33	31
Muestra 17	40	Muestra 34	45

Tabla AVII.3. Informe del ensayo de granulometría de la escoria reciclada del EAF y/o LF

		REGISTRO				F-MTCC.36.02 Edición: Primera	
INFORME DE ENSAYO DE GRANULOMETRÍA							
Fecha de análisis:		04/2014					
Tipo de insumo:		ESCORIA # GUIA 1					
Tamiz	Abertura						
Malla #	mm	Retenido,(g)	%Retenido	% R. Acumulado	% min	Tiempo, s	
MALLA	9,525	1,6	0,04	0,04	90,00	30	
MALLA	3,353	2312,8	60,98	61,02			
MALLA	1,999	325,5	8,58	69,61			
MALLA	1,001	268,5	7,08	76,69			
FONDO	0	884,2	23,31	100,00			
Masa Total (Inicial/Final)		3792,6	3792,6	0,00	d90	8,5 mm	

Tabla AVII.4. Tamaño de partícula de las muestras caracterizadas de escoria reciclada del EAF y/o LF

Escoria Reciclada del EAF y/o LF	Tamaño de partícula (mm)
Muestra 1	8,5
Muestra 2	7,6
Muestra 3	9,2
Muestra 4	8,8
Muestra 5	7,9

ANEXO VIII

HOJA TÉCNICA DEL ÓXIDO DE MAGNESIO PARA EBT

Praça Louis Ensck, 240
CEP: 32210-902
Cidade Industrial | Contagem | MG | Brasil

Telefone: +55 31 3368-1147
qualidade@magnesita.com.br
www.magnesita.com.br

HOJA DE DADOS TECNICOS

RISAMIX-EBT-GSP

EDICIÓN: 30/03/2012

CÓDIGOS DE MARCA 3092**DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO** Mezcla refractaria con base en MgO sinterizado y material reciclado básico.**APLICACIONES PRINCIPALES** Boca de colada de hornos eléctricos trifásicos de cano excéntrica.**PROPIEDADES QUÍMICAS (%)**

MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO
81	2	0,5	1,5	15

TAMAÑO DE PARTÍCULA (mm)

1 - 3

NOTAS

- 1 Los ensayos son realizados de acuerdo a normas: ABNT, ASTM, EN, DIN y procedimientos internos.
- 2 Para informaciones adicionales sobre seguridad, se recomienda consultar La hoja informativa de Seguridad de Productos Químicos - FISPO de La marca correspondiente.
- 3 Los ensayos químicos son realizados conforme metodología de Magnesita Refractarios, utilizando la muestra base calcinada.
- 4 El análisis químico y ensayos especiales siguen el plan de muestreo de La Gerencia de Processos.
- 5 Los datos técnicos se obtenidos a partir de cuerpos de prueba de esta marca, proveniente de producciones industriales.
- 6 Valores típicos se procesaron estadísticamente según la base de datos que caracterizan a la marca.
- 7 Las informaciones contenidas en esta hoja podran sufrir alteraciones sin aviso prévio. Al ser confirmada La orden de venta, deberá ser verificado com nuestra área comercial si esta FDT se encuentra em su ultima revisión.

Figura AVIII.1. Hoja técnica del óxido de magnesio para EBT

ANEXO IX

**RESULTADOS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS
MUESTRAS CARACTERIZADAS DE LAS MATERIAS PRIMAS**

Tabla AIX.1. Caracterización química de las muestras caracterizadas de la cal siderúrgica

Cal Siderúrgica	Composición Química			Cal Siderúrgica	Composición Química		
	MgO	SiO ₂	CaO		MgO	SiO ₂	CaO
Muestra 1	0,405	6,690	92,905	Muestra 18	6,367	7,103	86,530
Muestra 2	0,555	6,596	92,849	Muestra 19	5,774	6,286	87,940
Muestra 3	0,240	6,220	93,540	Muestra 20	1,101	6,549	92,350
Muestra 4	0,855	9,661	89,484	Muestra 21	2,228	6,846	90,926
Muestra 5	3,460	6,596	89,944	Muestra 22	5,731	6,359	87,910
Muestra 6	5,551	6,819	87,630	Muestra 23	5,574	6,214	88,212
Muestra 7	4,622	6,791	88,587	Muestra 24	6,345	6,265	87,360
Muestra 8	1,876	7,393	90,731	Muestra 25	3,275	7,517	89,208
Muestra 9	5,255	7,868	86,877	Muestra 26	1,854	8,659	89,487
Muestra 10	1,617	7,071	91,312	Muestra 27	1,415	6,375	92,210
Muestra 11	3,673	6,536	89,791	Muestra 28	6,512	6,326	87,162
Muestra 12	0,446	6,217	93,337	Muestra 29	0,642	6,548	92,810
Muestra 13	0,226	6,214	93,560	Muestra 30	1,150	7,419	91,431
Muestra 14	0,899	6,397	92,704	Muestra 31	0,275	6,997	92,728
Muestra 15	4,920	6,390	88,690	Muestra 32	1,265	6,313	92,422
Muestra 16	1,158	6,231	92,611	Muestra 33	0,745	6,689	92,566
Muestra 17	1,940	6,330	91,730	Muestra 34	0,864	6,226	92,910

Tabla AIX.2. Caracterización química de las muestras caracterizadas de la escoria reciclada del EAF y LF

Escoria reciclada del EAF y LF	Composición Química								
	MnO	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
Muestra 1	7,073	26,130	14,799	6,245	15,617	0,230	28,915	0,594	0,873
Muestra 2	7,212	26,933	14,701	6,372	15,733	0,263	29,204	0,659	0,878
Muestra 3	7,252	26,523	15,591	6,484	16,103	0,278	29,316	0,626	0,914
Muestra 4	6,415	24,402	14,569	7,217	18,229	0,214	28,798	0,862	1,360
Muestra 5	6,289	24,026	14,856	6,633	18,130	0,212	28,541	0,820	1,337

Tabla AIX.3. Caracterización química de las muestras caracterizadas de la escoria reciclada del LF

Escoria reciclada del EAF y LF	Composición Química								
	MnO	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
Muestra 1	2,742	4,802	26,073	5,603	21,536	0,749	26,758	0,372	0,233
Muestra 2	3,081	7,377	26,547	5,568	21,137	0,704	26,526	0,381	0,255
Muestra 3	2,833	5,716	22,477	4,994	23,664	0,966	31,438	0,331	0,320
Muestra 4	2,534	3,171	22,645	5,071	26,684	0,936	33,375	0,342	0,159
Muestra 5	2,765	6,471	25,231	5,162	24,649	0,852	30,723	0,371	0,283

ANEXO X

**RESULTADOS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS
POSIBLES COMBINACIONES PROBADAS EN EL PROCESO DE
AFINO**

Tabla AX.1. Composición química de la escoria reciclada del EAF y LF

Posible Combinación	Composición Química									
	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
1	4,934	17,812	0,323	26,857	5,252	13,998	0,196	29,735	0,356	0,537
2	4,732	17,058	0,323	26,497	5,058	13,708	0,189	31,595	0,336	0,505
3	4,530	16,304	0,323	26,136	4,864	13,417	0,182	33,455	0,315	0,474
4	4,329	15,550	0,323	25,776	4,670	13,127	0,175	35,315	0,294	0,442
5	4,127	14,796	0,323	25,415	4,476	12,837	0,168	37,175	0,273	0,410
6	3,925	14,042	0,323	25,054	4,282	12,546	0,161	39,035	0,252	0,379
7	3,724	13,288	0,323	24,694	4,088	12,256	0,154	40,895	0,231	0,347
8	3,522	12,535	0,323	24,333	3,894	11,966	0,147	42,756	0,210	0,316
9	3,321	11,781	0,323	23,973	3,700	11,675	0,140	44,616	0,189	0,284
10	3,119	11,027	0,323	23,612	3,505	11,385	0,133	46,476	0,168	0,253
11	2,917	10,273	0,323	23,251	3,311	11,094	0,125	48,336	0,147	0,221
12	2,716	9,519	0,323	22,891	3,117	10,804	0,118	50,196	0,126	0,189
13	2,514	8,765	0,323	22,530	2,923	10,514	0,111	52,056	0,105	0,158
14	2,312	8,012	0,323	22,170	2,729	10,223	0,104	53,916	0,084	0,126
15	2,111	7,258	0,323	21,809	2,535	9,933	0,097	55,776	0,063	0,095

Tabla AX.2. Composición química de la escoria reciclada del LF

Posible Combinación	Composición Química									
	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
1	3,035	8,013	0,323	32,870	4,845	18,499	0,537	31,545	0,197	0,137
2	2,945	7,835	0,323	32,155	4,675	17,944	0,510	33,299	0,185	0,129
3	2,885	7,658	0,323	31,441	4,505	17,388	0,483	35,052	0,174	0,121
4	2,765	7,481	0,323	30,727	4,335	16,833	0,456	36,806	0,162	0,113
5	2,675	7,303	0,323	30,013	4,165	16,278	0,429	38,560	0,151	0,105
6	2,585	7,126	0,323	29,298	3,995	15,723	0,401	40,313	0,139	0,097
7	2,495	6,948	0,323	28,584	3,824	15,168	0,374	42,067	0,127	0,089
8	2,405	6,771	0,323	27,870	3,654	14,613	0,347	43,820	0,116	0,081
9	2,315	6,593	0,323	27,156	3,484	14,058	0,320	45,574	0,104	0,072
10	2,225	6,416	0,323	26,441	3,314	13,503	0,293	47,328	0,093	0,064
11	2,135	6,238	0,323	25,727	3,144	12,948	0,266	49,081	0,081	0,056
12	2,045	6,061	0,323	25,013	2,974	12,392	0,239	50,835	0,069	0,048
13	1,955	5,883	0,323	24,299	2,804	11,837	0,212	52,588	0,058	0,040
14	1,865	5,706	0,323	23,584	2,634	11,282	0,185	54,342	0,046	0,032
15	1,776	5,529	0,323	22,870	2,463	10,727	0,157	56,096	0,035	0,024

ANEXO XI

**RESULTADOS DE LA RELACIÓN CaO/SiO_2 DE LAS POSIBLES
COMBINACIONES PRBADAS EN EL PROCESO DE AFINO**

Tabla AXI.1. Basicidad Binaria de las pruebas realizadas con la escoria reciclada del EAF y/o LF y de la escoria reciclada del LF

Posible Combinación	Basicidad Binaria	
	Prueba con la escoria reciclada del EAF y LF	Prueba con la escoria reciclada del LF
1	2,124	1,705
2	2,305	1,856
3	2,493	2,016
4	2,690	2,186
5	2,896	2,369
6	3,111	2,564
7	3,337	2,773
8	3,573	2,999
9	3,821	3,242
10	4,082	3,505
11	4,357	3,791
12	4,646	4,102
13	4,951	4,443
14	5,274	4,817
15	5,615	5,229

ANEXO XII

**RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE TEMPERATURA Y
CONTENIDO DE OXÍGENO (ppm) EN EL ACERO DE CADA
PRUEBA PILOTO**

Tabla AXII.1. Temperatura y contenido de oxígeno (ppm) del acero medidos durante las pruebas con la escoria reciclada del EAF y LF

Prueba Piloto	Variables Críticas	
	Temperatura (°C)	Oxidación (ppm O)
1	1627	97
2	1611	112
3	1636	184
4	1610	202
5	1615	87
6	1598	94
7	1638	566
8	1625	158
9	1636	240
10	1603	127
11	1620	139
12	1638	342
13	1601	115
14	1619	110
15	1623	135

Tabla AXII.2. Temperatura y oxidación del acero medidos durante las pruebas con la escoria reciclada del LF

Prueba Piloto	Variables Críticas	
	Temperatura (°C)	Oxidación (ppm O)
1	1599	62
2	1597	129
3	1617	426
4	1627	309
5	1600	146
6	1605	74
7	1591	62
8	1606	70
9	1618	82
10	1645	141
11	1646	248
12	1617	96
13	1604	100
14	1606	118
15	1595	122

ANEXO XIII

RESULTADOS DE LA DESULFURACIÓN DEL ACERO PARA CADA TIPO DE PRUEBA

Tabla AXIII.1. Desulfuración del acero de las pruebas con la escoria reciclada del EAF y LF

Prueba Piloto	Cantidad de Azufre			Partición de Azufre
	Azufre Inicial	Azufre Final Experimental	Azufre Final Teórico	
1	0,026	0,026	0,026	1,929
2	0,025	0,025	0,025	1,748
3	0,032	0,032	0,031	1,784
4	0,029	0,029	0,029	1,507
5	0,031	0,030	0,030	4,674
6	0,035	0,034	0,034	4,400
7	0,033	0,032	0,032	1,523
8	0,027	0,025	0,025	5,870
9	0,028	0,026	0,026	5,650
10	0,031	0,027	0,028	8,736
11	0,031	0,027	0,027	12,740
12	0,032	0,029	0,029	8,423
13	0,040	0,035	0,034	18,980
14	0,030	0,023	0,023	32,670
15	0,028	0,021	0,021	35,99

Tabla AXIII.2. Desulfuración del acero de las pruebas con la escoria reciclada del LF

Prueba Piloto	Cantidad de Azufre			Partición de Azufre
	Azufre Inicial	Azufre Final Experimental	Azufre Final Teórico	
1	0,034	0,034	0,033	2,835
2	0,030	0,030	0,030	1,618
3	0,028	0,028	0,028	0,760
4	0,034	0,034	0,034	1,450
5	0,034	0,033	0,033	2,705
6	0,038	0,035	0,035	6,987
7	0,036	0,032	0,033	8,565
8	0,034	0,030	0,030	11,408
9	0,036	0,031	0,031	14,169
10	0,035	0,030	0,030	14,701
11	0,036	0,032	0,032	10,657
12	0,037	0,030	0,030	23,340
13	0,034	0,027	0,026	23,401
14	0,041	0,033	0,033	25,677
15	0,040	0,032	0,032	26,592

ANEXO XIV

NORMA INEN 2167 “REQUISITOS PARA VARILLAS MICROALEADAS”

NTE INEN 2167

2011-08

5.1.4 Químicos

5.1.4.1 Un análisis de cuchara de cada colada debe realizar el fabricante con muestras de ensayo tomadas preferiblemente durante el vertido de las coladas.

5.1.4.2 El contenido de carbono, manganeso, fósforo, azufre y silicio en el acero de que estarán constituidas las varillas, se determinará de acuerdo a las NTE INEN correspondientes o mediante análisis espectrométrico en equipo calibrado. Los contenidos de carbono, manganeso, fósforo, azufre y silicio deberán cumplir con lo establecido en la tabla 3.

TABLA 3. Composición química

Elemento	Análisis de cuchara Máximo	Análisis de comprobación Máximo	ENSAYO
Carbono	0,30%	0,33%	NTE INEN 120
Manganeso	1,50%	1,56%	NTE INEN 118
Fósforo	0,035%	0,043%	NTE INEN 107
Azufre	0,045%	0,053%	NTE INEN 108
Silicio	0,50%	0,55%	NTE INEN 119

5.1.4.3 Se debe garantizar para el análisis de colada que el carbono equivalente máximo sea de 0,55 %, cuando se determine de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ C.E.} = \% \text{ C} + \% \text{ Mn}/6 + \% \text{ Cu}/40 + \% \text{ Ni}/20 + \% \text{ Cr}/10 - \% \text{ Mo}/50 - \% \text{ V}/10$$

5.1.4.4 La composición química determinada debe ser informada a pedido del comprador o su representante.

5.1.4.5 Soldabilidad. Esta norma, mediante las restricciones en la composición química (ver numeral 5.1.4.2) y la fórmula de carbono equivalente (ver numeral 5.1.4.3) suministra un control de la composición química para aplicaciones en soldadura, cumpliendo lo dispuesto en AWS D1.4.

5.2 Requisitos complementarios

5.2.1 Después de la laminación, las varillas deben quedar libres de defectos superficiales que puedan afectar su uso específico.

6. INSPECCIÓN

6.1 La inspección y recepción del producto se efectuará en el lugar en que éste se encuentre almacenado.

6.2 Muestreo**6.2.1 Tamaño de la muestra**

6.2.1.1 Lote de muestreo. Las partidas o los lotes serán divididos en lotes de muestreo de 20 toneladas; lotes o partidas inferiores a 20 toneladas deben considerarse como nuevos lotes de muestreo.

6.2.1.2 Muestra

- a) De cada lote de muestreo se extraerá al azar una varilla.
- b) El conjunto de varillas (unidad de muestreo) constituirá la muestra del lote o partida.
- c) El número mínimo de unidades de muestreo representativo de una partida o de un lote será de dos.

(Continúa)

Figura AXIV.1. Composición Química del acero para varillas microaleadas

ANEXO XV

**RESULTADOS DE LA ESCORIA GENERADA EN LF DEPUÉS DE
LAS PRUEBAS PILOTO REALIZADAS CON LA ESCORIA
RECICLADA DEL EAF Y/O LF**

Tabla AXV.1. Composición química de la escoria generada en el LF después de la prueba realizada con la escoria reciclada del EAF y LF

Prueba Piloto	Composición Química						
	MnO	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO
1	1,989	3,017	27,457	4,387	30,896	0,192	35,471
2	1,915	4,294	30,645	5,195	22,818	0,322	33,763
3	0,847	1,918	33,628	4,976	29,926	0,424	34,847
4	1,315	1,914	20,655	8,593	23,505	0,278	34,259
5	0,796	2,429	24,822	4,755	29,451	0,450	36,671
6	0,847	2,514	30,181	5,401	30,382	0,448	36,171
7	1,666	2,331	19,179	3,089	34,142	0,245	40,752
8	1,383	3,217	27,480	5,027	30,471	0,209	36,456
9	0,424	1,325	23,515	4,711	30,120	0,592	38,316
10	1,590	9,474	26,298	4,903	24,312	0,392	34,061
11	1,299	2,363	26,566	4,443	30,477	0,188	34,805
12	0,921	2,037	25,589	5,370	31,149	0,393	35,843
13	0,651	1,735	25,794	6,008	29,508	0,459	34,995
14	0,806	2,071	30,106	5,931	29,412	0,391	36,216
15	1,541	2,512	25,892	4,716	34,242	0,180	35,942

Tabla AXV.2. Composición química de la escoria generada en el LF después de la prueba realizada con la escoria reciclada del LF

Prueba Piloto	Composición Química						
	MnO	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO
16	1,835	1,492	17,941	4,670	23,188	0,655	34,901
17	1,361	2,000	20,031	4,019	25,357	0,666	34,925
18	1,837	1,750	17,147	3,720	25,858	0,504	35,046
19	1,374	2,008	19,717	4,141	24,829	0,667	34,684
20	1,579	1,336	24,980	5,450	23,427	0,648	34,630
21	1,358	1,633	25,002	4,663	24,553	0,861	35,304
22	1,664	1,901	18,947	5,110	24,255	0,714	35,456
23	0,919	1,040	19,584	4,951	24,040	1,424	40,001
24	1,476	2,263	20,559	5,189	22,210	0,958	36,898
25	0,813	0,842	18,658	4,680	23,471	1,320	36,870
26	2,027	2,544	21,373	4,318	25,132	0,487	34,425
27	1,500	3,416	20,509	4,018	25,622	0,682	34,446
28	0,879	0,564	21,246	5,466	23,381	1,464	38,430
29	2,476	6,364	18,175	4,597	22,572	0,615	35,179
30	0,963	0,533	20,880	4,714	24,712	1,428	39,715

Tabla AXV.3. Basicidad Binaria de la escoria generada en el LF después de las pruebas realizadas con la escoria reciclada del EAF y/o LF

Prueba Piloto	Basicidad Binaria	
	Prueba con la escoria reciclada del EAF y LF	Prueba con la escoria reciclada del LF
1	1,1	1,5
2	1,5	1,4
3	1,2	1,4
4	1,5	1,4
5	1,2	1,5
6	1,2	1,4
7	1,2	1,5
8	1,2	1,7
9	1,3	1,7
10	1,4	1,6
11	1,1	1,4
12	1,2	1,3
13	1,2	1,6
14	1,2	1,6
15	1,0	1,6

ANEXO XVI

RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

Costo de la escoria reciclada: 11,6 \$/ton

Precio de la cal siderúrgica: 150 \$/ton

Precio de la escoria sintética importada: 480 \$/ton

Tabla XVI.1. Precios de las escorias sintéticas probadas en planta

Prueba Piloto	Precio de las escorias sintéticas (\$/ton acero)	
	Escoria reciclada del EAF y/o LF	Escoria Sintética Importada
1	3,47	36,9
2	4,86	
3	6,24	
4	7,62	
5	9,01	
6	10,39	
7	11,78	
8	13,16	
9	14,54	
10	15,93	
11	17,31	
12	18,70	
13	20,08	
14	21,46	
15	22,85	

