



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ANÁLISIS DE BASICIDAD Y CÁLCULO DE MASA DE CALES DE ADICIÓN PARA LA
CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA DE ESCORIA SATURADA DE ÓXIDOS BÁSICOS EN
EL PROCESO DE FUSIÓN DEL HORNO EAF INSTALADO EN PLANTA ACERÍA EN EL
PARQUE INDUSTRIAL SIDEGUA**

Erick Estuardo Gómez Ruano

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez

Guatemala, mayo de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE BASICIDAD Y CÁLCULO DE MASA DE CALES DE ADICIÓN PARA LA
CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA DE ESCORIA SATURADA DE ÓXIDOS BÁSICOS EN
EL PROCESO DE FUSIÓN DEL HORNO EAF INSTALADO EN PLANTA ACERÍA EN EL
PARQUE INDUSTRIAL SIDEGUA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ERICK ESTUARDO GÓMEZ RUANO
ASESORADO POR EL ING. VÍCTOR MANUEL MONZÓN VALDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Inga. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Julio Alberto Rivera Palacios
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE BASICIDAD Y CÁLCULO DE MASA DE CALES DE ADICIÓN PARA LA CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA DE ESCORIA SATURADA DE ÓXIDOS BÁSICOS EN EL PROCESO DE FUSIÓN DEL HORNO EAF INSTALADO EN PLANTA ACERÍA EN EL PARQUE INDUSTRIAL SIDEGUA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha enero de 2020.

Erick Estuardo Gómez Ruano

Guatemala 06 de noviembre del 2019

Ing. Williams G. Alvarez Mejía
Director
Escuela de Ingeniería Química
Pte.

Respetable Ing. Alvarez,

Con un cordial saludo me dirijo a su persona para informarle, que he asesorado y aprobado el del trabajo de graduación titulado:

“Análisis de basicidad y cálculo de masa de cales de adición para la conformación de un sistema de escoria saturada de óxidos básicos en el proceso de fusión del horno EAF instalado en planta acería en el parque industrial SIDEGUA”, elaborado por el estudiante de Ingeniería Química Erick Estuardo Gómez Ruano con número de registro académico 8812121 y CUI 1774 08065 0101. Considero que el informe satisface los requisitos exigidos, por lo que solicito se sirva remitirlo para su respectiva revisión.

Agradezco la atención a la presente, atentamente,



Ing. Victor Manuel Monzón Valdez
Asesor
CUI: 1633183520101

Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez
Colegiado No. 656



Guatemala, 27 de enero de 2021.
 Ref. EIQ.TG-IF.001.2021.

Ingeniero
 Williams Guillermo Álvarez Mejía
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **103-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Erick Estuardo Gómez Ruano**.
 Identificado con número de carné: **1774080650101**.
 Identificado con registro académico: **8812121**.
 Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
 En la modalidad: **Informe Final, Cierre de Pénsum sin Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

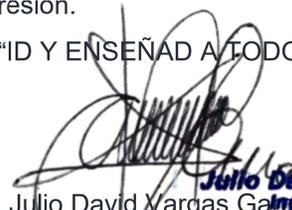
ANÁLISIS DE BASICIDAD Y CÁLCULO DE MASA DE CALES DE ADICIÓN PARA LA CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA DE ESCORIA SATURADA DE ÓXIDOS BÁSICOS EN EL PROCESO DE FUSIÓN DEL HORNO EAF INSTALADO EN PLANTA ACERÍA EN EL PARQUE INDUSTRIAL SIDEGUA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Victor Manuel Monzón Valdez, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Julio David Vargas García
 Ingeniero Químico
 Profesional de la Ingeniería Química
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación

C.c.: archivo



Guatemala, 24 de mayo de 2021.
Ref. EIQ.097.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **ANÁLISIS DE BASICIDAD Y CÁLCULO DE MASA DE CALES DE ADICIÓN PARA LA CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA DE ESCORIA SATURADA DE ÓXIDOS BÁSICOS EN EL PROCESO DE FUSIÓN DEL HORNO EAF INSTALADO EN PLANTA ACERÍA EN EL PARQUE INDUSTRIAL SIDEGUA** del(la) estudiante Erick Estuardo Gómez Ruano, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Williams C. Alvarez Mejia, M.D., M.Sc., U.S.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

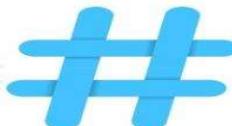
Cc. Archivo
WGAM/mpea



Agencia Certificadora de Acreditación de
Programas de Arquitectura e Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**

DTG. 229-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE BASICIDAD Y CÁLCULO DE MASA DE CALES DE ADICIÓN PARA LA CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA DE ESCORIA SATURADA DE ÓXIDOS BÁSICOS EN EL PROCESO DE FUSIÓN DEL HORNO EAF INSTALADO EN PLANTA ACERÍA EN EL PARQUE INDUSTRIAL SIDEGUA**, presentado por el estudiante universitario: **Erick Estuardo Gómez Ruano**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, mayo de 2021

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser el centro de mi vida, que con sus bendiciones me permite lograr este objetivo.
- Mis padres** Pedro José Gómez y Juliana Ruano. Su amor incondicional, esfuerzo y dedicación siempre estuvieron presentes.
- Mi esposa** Wendy Fernández. Por ser una persona importante en mi vida, por su amor y su apoyo incondicional para culminar esta carrera académica.
- Mis hijos** Diego Estuardo y Génesis Paola Gómez, mis dos tesoros, por ser inspiración e impulsores de todo lo que hago.
- Mi hermano** David Gómez, siempre pendiente de mí y por apoyarme durante toda mi etapa de estudio.
- Mi prima** Mirna Elizabeth González, por su cariño y por cuidar a mi mamá en sus últimos meses de vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Mi casa de estudios que me permitió obtener conocimiento de mi carrera.
Mis amigos	Otto Pérez y Marcos Gutiérrez, por su amistad y por su aporte con la experiencia y conocimiento en el proceso siderúrgico.
Ing. Carlos Ponce	La persona que me impulsó y me dio todo el soporte para culminar mi trabajo de tesis.
Ing. Francisco Carrillo	Su apoyo incondicional y su gran aporte en la realización de este trabajo con su enorme conocimiento en el proceso químico del acero.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	2
1.3. Determinación del problema.....	3
1.3.1. Definición	3
1.3.2. Delimitación	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Proceso de fabricación del acero	5
2.1.1. Materia prima.....	5
2.1.2. Partes principales de un horno de arco eléctrico	6
2.1.2.1. Coraza	7
2.1.2.2. Tapa	7
2.1.2.3. Mástiles	7
2.1.2.4. Cabezas portaelectrodos.....	7
2.1.3. Proceso de fusión (horno de arco eléctrico)	8
2.1.3.1. Fusión.....	8

	2.1.3.2.	Inyección de oxígeno	9
	2.1.4.	Quemadores.....	10
	2.1.5.	Escoria espumante.....	11
	2.1.6.	Refino oxidante	12
	2.1.7.	Vaciado	12
	2.1.8.	Proceso de afinación (horno olla).....	12
	2.1.9.	Solidificación del acero.....	13
2.2.		Materiales refractarios.....	14
	2.2.1.	Definición de refractarios.....	14
	2.2.2.	Tipos de materiales refractarios	15
	2.2.3.	Propiedades de los refractarios.....	17
	2.2.4.	Factores destructivos de los revestimientos refractarios	17
	2.2.4.1.	Escorias.....	17
	2.2.4.2.	Disgregación	18
	2.2.4.2.1.	Térmico	18
	2.2.4.2.2.	Estructural.....	18
	2.2.4.2.3.	Mecánico.....	18
	2.2.4.2.4.	Factores que afectan la vida del refractario	18
	2.2.5.	Zonificación del horno de arco eléctrico	19
	2.2.5.1.	Subpiso	19
	2.2.5.2.	Crisol	19
	2.2.5.3.	Línea de escoria.....	20
	2.2.5.4.	Paredes superiores	20
	2.2.5.5.	Tap hole	20
2.3.		Formación de escorias en el horno de fusión.....	20
	2.3.1.	Definición.....	21
	2.3.2.	Fuentes generadoras de óxidos	23

2.3.3.	Finalidad de las escorias	23
2.3.4.	Propiedades de las escorias.....	24
2.3.5.	Principales constituyentes	26
2.4.	Características de las escorias.....	30
2.4.1.	Escoria básica	30
2.4.2.	Escoria oxidante	31
2.4.3.	Escoria reductora.....	32
2.5.	Escoria espumante.....	33
2.5.1.	Definición.....	33
2.5.2.	Ventajas de utilizar la escoria espumante	34
2.5.3.	Características requeridas.....	34
2.5.4.	Formación de la escoria espumosa.....	35
2.5.5.	Práctica para fabricación de escoria espumante	37
2.5.6.	Inyección de magnesia o dolomita en la escoria espumante.....	39
2.6.	Análisis de rendimiento de ladrillo refractario en horno de fusión.....	39
2.6.1.	Vida del refractario.....	40
2.6.2.	Formación de escoria	40
2.6.3.	Estimación de la masa de los óxidos ácidos (SiO ₂ y Al ₂ O ₃).....	41
3.	MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MEDICIÓN	43
3.1.	Espectrómetro Thermo Scientific (OES).....	43
3.2.	Fluorescencia Rayos-X (XRF)	44
3.3.	Difracción de rayos-x (XRD)	45

4.	METODOLOGÍA	47
4.1.	Variables	47
4.1.1.	Dependientes	47
4.1.2.	Independientes.....	48
4.2.	Delimitación del campo de estudio.....	48
4.3.	Recursos humanos disponibles	49
4.4.	Recursos materiales disponibles.....	50
4.4.1.	Muestras de chatarra	50
4.4.2.	Recolección de escorias.....	50
4.5.	Técnica cuantitativa.....	52
4.6.	Recolección y ordenamiento de la información	53
4.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	54
4.8.	Análisis estadísticos	55
4.8.1.	Cálculo del índice de basicidad ternario para la escoria.....	55
4.8.2.	Análisis de error entre resultados teóricos y experimentales de índice de basicidad en la escoria.....	55
4.9.	Plan de análisis de resultados.....	56
4.9.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variable.....	56
4.9.1.1.	Variables dependientes	56
4.9.1.1.1.	Determinación de contenido teórico de óxido de silicio (SiO ₂) con base en la carga de chatarra	57

4.9.1.1.2.	Determinación de contenido teórico de óxido de aluminio (Al_2O_3) con base en la carga de chatarra.....	58
4.9.1.1.3.	Determinación de la masa de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) en la escoria.....	59
4.9.1.2.	Variables independientes	59
4.9.1.2.1.	Cálculo del índice de basicidad ternario para la escoria.....	59
4.9.1.2.2.	Cálculo de los óxidos totales representativo en la escoria analizada.....	60
4.9.1.2.3.	Despeje de ecuaciones para encontrar el % de óxido de calcio (CaO) en la escoria, a partir del valor de índice de basicidad ternario (IB_3).....	60
4.9.1.2.4.	Cantidad teórica de escoria obtenida por colada.....	60

4.9.1.2.5.	Masa de óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO) totales en la escoria	61
4.9.1.2.6.	Determinación de los kilogramos de cal cálcica y cal dolomítica que se debe aportar en la carga de materiales al horno.....	61
4.9.1.2.7.	Cantidad total de cales a adicionar por colada	62
5.	CRONOGRAMA.....	63
7.	PRESUPUESTO.....	69
8.	RESULTADOS.....	71
	CONCLUSIONES.....	81
	RECOMENDACIONES	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Carga de cestas	6
2.	Horno de fusión	6
3.	Horno de fusión	9
4.	Manipulador de oxígeno y carbón	10
5.	Arco eléctrico	11
6.	Horno de afino	13
7.	Palanquillas de acero	14
8.	Clasificación de refractarios	15
9.	Punto de fusión de refractarios	16
10.	Tipos de refractarios	16
11.	Acero líquido - Escoria	21
12.	Interfase escoria-acero	22
13.	Características de los óxidos	24
14.	Estabilidad de los óxidos	26
15.	Escoria con MgO	29
16.	Escoria espumante	33
17.	Reacción Fe y FeO	36
18.	Generación de CO	37
19.	Relación de basicidad y MgO	38
20.	Basicidad de la escoria	39
21.	Vida del refractario	40
22.	Escoria del EAF	40
23.	Balance de masa	41

24.	Espectrómetro Thermo Scientific (OES)	44
25.	X-Ray Fluorescence (XRF)	45
26.	Diagrama Causa-efecto	62
27.	Curva de distribución para los datos obtenidos para el índice de basicidad.....	75
28.	Comportamiento de los datos de oxígeno disuelto en función del índice de basicidad experimental obtenido para cada muestra de escoria analizada	75
29.	Esquema de arreglo y colocación de ladrillo refractario.....	77

TABLAS

I.	Análisis típico de escoria.....	27
II.	Variables dependientes.....	47
III.	Variables independientes.....	48
IV.	Descripción de variables para proporciones poblacionales	52
V.	Composición química e impurezas de los diferentes tipos de chatarra.....	54
VI.	Análisis de fundentes: cal calcítica y cal dolomítica	54
VII.	Análisis de óxidos presentes en la escoria	55
VIII.	Determinación por método de fluorescencia de rayos X.....	56
IX.	Perfil de desgaste del horno de arco eléctrico	57
X.	Cronograma	63
XI.	Presupuesto.....	69
XII.	Contenido de impurezas de los diferentes tipos de chatarra contenida en la carga del horno EAF.....	71
XIII.	Aporte de óxido de calcio y óxido de magnesio proveniente de las cales..	72
XIV.	Cantidad de cal cargada en el horno de fusión	72
XV.	Análisis promedio de óxidos presentes en la escoria.....	73

XVI.	Índice de basicidad ternario promedio, calculado para las muestras de escoria analizadas.....	73
XVII.	Promedio concentración en partes por millón de oxígeno disuelto en el baño de acero medido durante el proceso de afino en el horno EAF.....	73
XVIII.	Cálculo de la proporción poblacional de la composición química de escoria, considerando un nivel de confianza de 99 %, con 10 % error para una población de 600 muestras	74
XIX.	Porcentaje de error y desviación estándar calculados para el valor índice de basicidad promedio experimental	74
XX.	Perfil del material refractario del horno EAF, inicio de campaña	76
XXI.	Perfil del material refractario del horno EAF, final de campaña.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Escala de temperatura en grados centígrados
g/cm ³	Gramos por centímetro cúbico
kg	Kilogramo
kWh	Kilovatios hora
+	Más
<	Menor que
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje

GLOSARIO

Arrabio	Producto obtenido de la primera fusión del hierro en los altos hornos, contiene más carbono que el acero o que el hierro forjado.
Cal calcítica	Óxido de calcio adicionado en forma de cal quemada que permite reducir la concentración de impurezas de acero.
Cal dolomítica	Mineral compuesto de carbonato doble de calcio y magnesio.
Chatarra	Conjunto de trozos de metal de desecho, principalmente de hierro.
Colada	Nombre que se le da a un lote de acero obtenido desde la materia prima hasta los diferentes productos terminados.
Cuba	Parte inferior del horno de arco eléctrico compuesta por una coraza de acero recubierta internamente por materiales refractarios y que almacena el acero líquido durante la fusión.
EAF	Horno eléctrico, <i>electric arc furnace</i> .

EBT	Vaciado con boca excéntrica.
Electrodo	Extremo de un conductor en contacto con un medio, al que lleva o del que recibe una corriente eléctrica.
Escoria	Solución o mezcla no metálica formada por óxidos, menos densa que el acero.
Fierro esponja	Material obtenido de la reducción directa del mineral de hierro. Se le denomina fierro esponja porque al extraerle el oxígeno al mineral de hierro se obtiene como resultado un producto metálico poroso y relativamente liviano.
Olla	Recipiente de acero en forma de cacerola recubierto de material refractario, que le permite recibir, refinar y colar el acero líquido.
Revestimiento	Capa o cubierta con que se resguarda o adorna una superficie.
Vaciado	Acción de verter o depositar un material sobre una superficie o cavidad.

RESUMEN

El trabajo de investigación se realizará en el complejo siderúrgico SIDEGUA, específicamente en la Planta Acería, que cuenta con un horno de arco eléctrico (EAF) de tecnología alemana con una capacidad de 70 toneladas de acero. Una de las partes principales y críticas que conforman un horno de arco eléctrico es su coraza, que es una pieza metálica cilíndrica con piso esferoidal hecha de placas de acero y revestida interiormente con ladrillo refractario, el cual retiene tanto el acero líquido como la escoria, debe mantenerse en buenas condiciones, ya que un desgaste fuera de su plan de mantenimiento puede ocasionar una perforación y poner en riesgo tanto al equipo como al personal operativo.

En este trabajo de investigación se determinará la cantidad de cal calcítica y dolomítica que se debe cargar al horno para neutralizar la acidez que contenga la escoria formada, para mantener las condiciones operativas del ladrillo refractario hasta su cambio de revestimiento.

Para poder determinar la cantidad de las cales, se determinará la composición química de la escoria que se produce en la fabricación de acero en cada colada, la cantidad y la composición química de la chatarra que es cargada al horno de arco eléctrico, para determinar a través de un balance de masa la cantidad de los óxidos ácidos y la masa total de escoria. Por último, con la composición química que tiene tanto la cal calcítica como la dolomítica, se determinará la cantidad que debemos agregar al horno en cada colada para mantener una basicidad mayor a 1,8 y que la escoria tenga propiedades

básicas como las del ladrillo refractario, y asegurar la vida útil del refractario hasta su cambio de revestimiento.

OBJETIVOS

General

Determinar la cantidad teórica de cal calcítica y dolomítica que se debe agregar en la etapa de fusión de la chatarra, necesarias para formar una escoria apropiada para no atacar al material refractario básico colocado para la operación del horno EAF utilizado en la planta de acería SIDEGUA.

Específicos

1. Analizar la composición química de cada tipo de chatarra que se utiliza como parte de la carga al horno de fusión, por medio de espectrometría de emisión óptica (EOS), para determinar la cantidad de óxidos ácidos sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) que se incorporan al baño de acero líquido como aporte de esta durante la fusión.
2. Medir la cantidad de impurezas (tierra) que trae cada tipo de chatarra y que son cargadas al horno de arco eléctrico.
3. Establecer un modelo empírico para determinar la carga de cal calcítica y dolomítica que se debe aportar para mantener una escoria con un índice de basicidad ternario igual a 1,8 que mantenga una escoria saturada y compatible con la composición química del material refractario.

4. Describir la tendencia del comportamiento de la concentración de oxígeno presente en el baño de acero líquido, medido durante la etapa de afino de la colada en el proceso de fusión.

5. Determinar el estado del ladrillo refractario a través de su perfil de desgaste, midiendo su espesor inicial cuando se coloca el ladrillo nuevo y compararlo con el espesor final que tendrá el ladrillo refractario al finalizar la prueba experimental en el cambio de revestimiento refractario.

HIPÓTESIS

Se puede alcanzar una escoria con saturación en óxido de magnesio (MgO) y con índice de basicidad ternario igual o mayor a 1,8, partiendo de la adición de cal cálcica y cal dolomítica calculada teóricamente, en función de su aporte de óxidos en la carga del horno de EAF para cada colada.

- **Hipótesis estadísticas**

- H1. Es posible alcanzar un sistema de escoria saturada de óxido de magnesio utilizando como indicador un índice de basicidad ternario mayor o igual a 1,8, partiendo de carga de cales calculadas teóricamente por su aporte químico de óxidos al sistema de escoria.
- H0. No es posible alcanzar un sistema de escoria saturada de óxido de magnesio utilizando como indicador un índice de basicidad ternario mayor o igual a 1,8, partiendo de carga de cales calculadas teóricamente por su aporte químico de óxidos al sistema de escoria.

INTRODUCCIÓN

El acero es una aleación ampliamente utilizada, con características únicas de resistencia y versatilidad que se adaptan a una gran variedad de aplicaciones y usos, su composición química con alto contenido de hierro permite que sea un material altamente reciclable. Los miles de productos hechos de acero que son utilizados en la actualidad hacen que la industria siderúrgica mundial dedique la máxima atención al grado de calidad que ofrece, los procesos de fusión y refinación son de vital importancia para cumplir este objetivo.

La planta SIDEGUA ubicada en el departamento de Escuintla cuenta con un horno de arco eléctrico que permite fundir todo el material ferroso reciclable y convertirlo en acero líquido a través de energía eléctrica y una menor parte de energía química. El horno de arco eléctrico consiste en un recipiente de chapa gruesa recubierto con material refractario tanto para piso como paredes que le protegen y logran contener en su interior el baño de acero líquido y la escoria resultante del proceso. En este tipo de hornos es de vital importancia mantener las condiciones del material refractario para una segura y adecuada operación, evitar perforaciones y no poner en riesgo al personal operativo y los equipos que complementan la operación del horno.

Es importante conocer el proceso de fabricación del acero, los materiales refractarios que se utilizan para recubrir la coraza, el origen de formación de las escorias y sus características o propiedades que deben ser compatibles con la composición química que tiene el ladrillo refractario y, por último, la formación de escoria espumosa que protege el ladrillo refractario del arco eléctrico

generado por los electrodos donde circula la corriente eléctrica y voltaje requerido para fundir y calentar el metal.

La escoria generada en el proceso de fabricación puede tener una influencia grande en el desgaste del ladrillo refractario si no tiene una composición química compatible con las propiedades químicas del refractario del horno, por lo cual es importante determinar la cantidad de cal calcítica y dolomítica necesaria para neutralizar la acidez que contenga la escoria formada, tener una basicidad ternaria mayor o igual a 1,8 y garantizar la operación del horno hasta que el ladrillo refractario llegue a su vida útil y realizar el cambio de revestimiento. Con ello obtendremos su máximo rendimiento y su óptima disponibilidad para la operación.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

Siderúrgica de Guatemala es una empresa que se dedica a la producción de productos de acero para la construcción, entre sus plantas productoras se tiene el proceso de la fabricación de palanquilla de acero a partir de chatarra a través de un horno de arco eléctrico. La primera etapa de este proceso es la fusión de la chatarra, que consiste básicamente en la transformación de la carga metálica sólida al estado líquido, esta etapa siempre va acompañada por la fusión de una determinada cantidad de escoria.

La escoria es una solución o mezcla no metálica formada por óxidos producto de la fusión de la ganga o impurezas que trae la chatarra aunados a los fundentes propios de la operación, tales como cal calcítica, cal dolomítica, carbón, entre otros. Por ser insoluble y menos densa que el acero, flota en el baño metálico.

El origen de la escoria está en el proceso de fabricación y en la composición química del acero que se desea vaciar. El proceso de fabricación de acero es un generador de óxidos. Estos son provenientes de la reacción llamada de oxidación de elementos químicos con el oxígeno que existe en el acero líquido. Este oxígeno puede ser introducido a través de la carga o a través de los equipamientos de soplo de oxígeno existente en el horno.

La utilización de escoria en los hornos de fusión tiene los siguientes objetivos: transferencia térmica, recibir óxidos del baño metálico, reducir pérdidas de hierro en la escoria y evitar desgaste excesivo del refractario.

El trabajo de investigación estará enfocado en la ingeniería de las escorias con el objetivo de aumentar la vida del refractario del horno de fusión. Hasta hace un par de años en la empresa no se contaba con un equipo que midiera la composición química de las escorias y esto traía como consecuencia un mayor desgaste en el ladrillo refractario, ya que no podíamos determinar la cantidad necesaria de cal calcítica y dolomita que debíamos cargar como fundentes para obtener una escoria básica compatible con el refractario básico.

1.2. Justificación

Una de las partes principales y críticas que conforman un horno de arco eléctrico es su coraza, que es una pieza metálica cilíndrica con piso esferoidal hecha de placas de acero y revestida interiormente con ladrillo refractario, que son materiales no metálicos que pueden ser sometidos a elevadas temperaturas, capaces de resistir calentamientos y enfriamientos rápidos y soportar cargas metálicas elevadas sin modificar su estructura.

El ladrillo refractario que se utiliza en el horno de arco eléctrico es un material con propiedades químicas básicas que retienen el acero líquido y la escoria dentro del horno, su mayor desgaste es provocado por el ataque químico de la escoria, siendo importante en todo momento lograr conformar una escoria con propiedades químicas compatibles con las del material refractario, para evitar desgastes prematuros y de gran magnitud del ladrillo que puedan comprometer la integridad de la coraza del horno al darse una perforación que

provocaría un derrame de acero líquido, poniendo en riesgo al personal operativo como el paro de la planta afectando costos y productividad.

En el análisis de escoria, el % de MgO es un indicativo de si la escoria está aportando MgO al refractario o el refractario está cediendo su MgO a la escoria, por lo cual recomiendan un % de MgO mínimo de 8. Actualmente el cambio del ladrillo refractario del horno se lleva a cabo a las 1 000 coladas y el objetivo es llegar a ese número de colada con las condiciones operativas del ladrillo refractario.

Al conocer el comportamiento de la composición química de la escoria se puede hacer un balance de masa y determinar la cantidad de cal calcítica y dolomítica necesaria para la cantidad de chatarra cargada en el horno y mantener en condiciones operativas el ladrillo refractario básico y la basicidad ternaria objetivo.

1.3. Determinación del problema

Es necesario observar los siguientes incisos:

1.3.1. Definición

Para mantener la operación del horno de fusión es necesario que el ladrillo refractario se mantenga en condiciones normales de desgaste hasta que se realice el cambio del revestimiento de ladrillo cuando haya llegado a su vida útil, por lo cual es necesario determinar la cantidad de cal calcítica y dolomítica para mantener la composición química de la escoria en parámetros compatibles con la composición química del refractario que es básico.

A través de la composición química de la chatarra, la cantidad de chatarra a utilizar, y el porcentaje de impurezas que lleva la chatarra, se puede determinar la masa de óxidos ácidos (sílice y alúmina). Luego a través de la composición química de la escoria y su basicidad ternaria se obtendrá la cantidad total de escoria. Por último, con la composición química (contenido de CaO y MgO) de la cal calcítica y dolomítica se determinará la cantidad a cargar de cada una de las cales en el horno de arco eléctrico.

1.3.2. Delimitación

El trabajo de investigación se desarrollará únicamente en la primera etapa del proceso de fabricación de palanquillas de acero, la fusión de la chatarra que se lleva a cabo en el horno de arco eléctrico, para lo cual durante un mes se extraerán muestras de escoria, una por cada turno de operación, y se analizarán para determinar su composición química en forma de óxidos, a través del equipo ARL Optimix, X-Ray Spectrometers.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Proceso de fabricación del acero

Son importantes los siguientes puntos:

2.1.1. Materia prima

En las diferentes acerías para el logro de sus objetivos que incluyen la producción de palanquillas de acero, deben contar con diferentes secciones de servicio a la operación, siendo una de estas la sección de materiales y materias primas. La chatarra que se utiliza para la fabricación de los diferentes tipos de acero se clasifica de acuerdo con su densidad y contenido de residuales.

Una vez lista la chatarra que va a ser consumida en el horno de arco eléctrico se realiza la preparación de la carga de acuerdo al programa de estratificación de la chatarra, esto se realiza en una cesta (un enorme recipiente de acero ultrarresistente) por medio de una grúa que tiene adaptada una garra (un dispositivo que atrapa la chatarra por medio de unas almejas de acero a través de un sistema hidráulico), hasta completar la carga de los diferentes tipos de chatarra que pide la receta para luego ser cargado al horno de arco eléctrico.

Figura 1. Carga de cestas

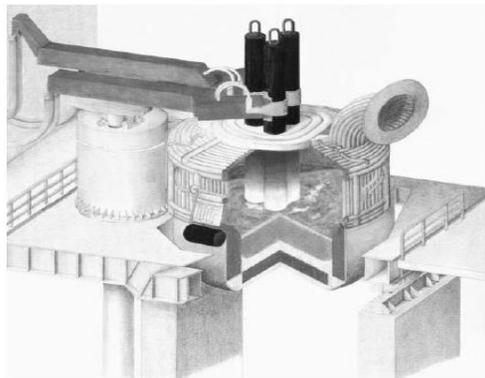


Fuente: Aceros de Guatemala. *Manual de chatarra*. p. 3.

2.1.2. Partes principales de un horno de arco eléctrico

Son las siguientes partes:

Figura 2. Horno de fusión



Fuente: Gerdau. *Operación básica de fusión y refinado en hornos eléctricos. Chatarra y gusa sólido*. p. 5.

2.1.2.1. Coraza

Esta es comúnmente cilíndrica con piso esferoidal, hecha de placas de acero, con refuerzos en la mayor parte del cuerpo y revestida con ladrillo refractario, el cual es básico. La coraza está montada sobre una cremallera, la cual permite bascular el horno hacia ambos lados. Dichos movimientos de báscula se obtienen mediante dos pistones hidráulicos. La coraza tiene algunas aberturas tales como el orificio para vaciar el acero, puerta de trabajo y escoriado.

2.1.2.2. Tapa

La tapa del horno consiste en una estructura de placa de acero cilíndrica y enfriada con agua. El centro de esta es de ladrillo o monolíticos de alta alúmina.

2.1.2.3. Mástiles

El horno tiene un mástil por fase (3 fases). Este consiste en una estructura de acero que soporta los brazos de extensión, los tubos conductores y las cabezas portaelectrodos. El movimiento del mástil es en sentido vertical, en ambos sentidos dicho movimiento debe ser accionado tanto eléctrica como hidráulicamente.

2.1.2.4. Cabezas portaelectrodos

Estas están colocadas en el extremo del brazo de extensión. La función de los portaelectrodos es soportar mecánicamente los electrodos para lo cual tienen una zapata que es de acero inoxidable. Dicha zapata mediante presión

de aire sujeta el electrodo. Los portaelectrodos transmiten la corriente al electrodo por contacto.

2.1.3. Proceso de fusión (horno de arco eléctrico)

En el proceso de fusión se maneja el término colada, la cual consta de:

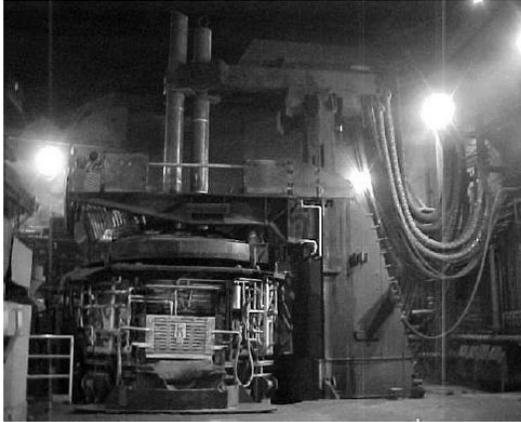
2.1.3.1. Fusión

La fusión es la etapa inicial de una colada, que consiste básicamente en la transformación de la carga metálica sólida al estado líquido, esta etapa va acompañada por la fusión de una determinada cantidad de escoria. Dicha fusión se divide en dos partes: la carga de chatarra y la fusión propiamente dicha.

La chatarra es cargada en el horno a través de un cesto, obedeciendo a una orden de cargamento. La cal dolomítica y calcítica es cargada en el horno a través de la cesta después de las chatarras mayores o pesadas. El objetivo de esto es que la cal penetre en la chatarra de mayor tamaño y que ya exista una determinada cantidad de chatarra fundida, reduciendo las posibilidades de aislamiento en los electrodos.

La fusión significa que por medio de calor se transforme un material sólido al estado líquido. Cada material tiene una cierta temperatura en la cual pasa del estado sólido al estado líquido al aplicarle calor. En el horno de arco eléctrico la energía es transferida para la carga metálica bajo la forma de calor por conducción, convección y radiación, provocando la fusión de la carga sólida y la elevación de temperatura del acero líquido.

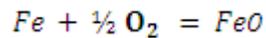
Figura 3. **Horno de fusión**



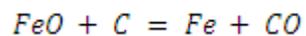
Fuente: Aceros de Guatemala. *Manual de chatarra*. p. 12.

2.1.3.2. **Inyección de oxígeno**

La carga para ser fundida necesita ser calentada hasta su temperatura de fusión. Esto es hecho en el horno a través de calor generado por la energía eléctrica y de la inyección de oxígeno. La reacción de oxígeno inyectado con el fierro es mostrada en la ecuación 1:

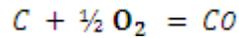


A pesar de generar mucha energía, el inconveniente de esta reacción es la generación de Fe O. Esto significa decir que existen pérdidas de fierro del baño para la escoria en la forma de Fe O. Revisando la reducción de estas pérdidas, se utiliza carbono, pues reduce el Fe O conforme muestra la ecuación 2:



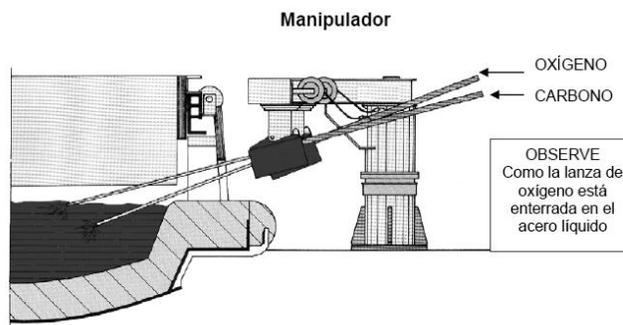
La sumatoria de las ecuaciones es la siguiente:

Ecuación 3:



Por lo tanto, el Fe O es un excelente indicador del nivel de oxidación del baño. Con relación a la cantidad de oxígeno inyectado en el horno, es importante que se conozca principalmente la cantidad de carburante en la carga, para que se sepa el nivel óptimo de oxígeno a ser colocado. La cantidad de oxígeno a ser inyectada en el horno depende del tenor de carbón, silicio y manganeso que exista en la carga.

Figura 4. **Manipulador de oxígeno y carbón**



Fuente: Gerdau. *Operación básica de fusión y refinado en hornos eléctricos. Chatarra y gusa sólido.* p. 54.

2.1.4. Quemadores

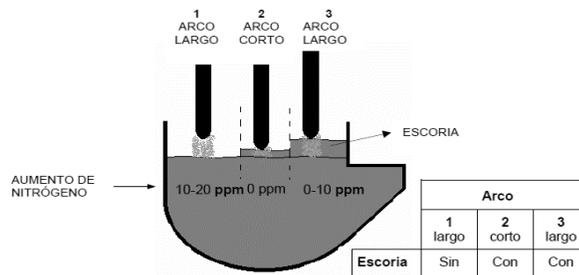
Son usados en muchas acerías, siendo la transferencia de calor para la carga metálica hecha de tres maneras:

- Convección: oriunda de los gases provenientes de la combustión.
- Conducción: por la oxidación de los elementos contenidos en la carga. Esta ocurre después que se ligan los quemadores, cuando se tiene chatarra junto a los mismos.
- Radiación: por la temperatura de la llama y será tan mayor a la trasferencia como mayor sea la diferencia de temperatura entre la llama y la carga metálica. Esta es, en realidad, el gran medio de transferencia de calor que debe ser observado para obtener la máxima eficiencia.

2.1.5. Escoria espumante

Es formada a partir del hinchamiento de la escoria, principalmente por burbujas de CO. La escoria espumante es obtenida a través de lanzas o a través de módulos de inyección combinada de oxígeno y carbono. Así, controlando el oxígeno inyectado con relación al C inyectado, se tiene una buena escoria espumante, con la cantidad de Fe O constante. Esta operación debe ser ejecutada cuantas veces sea necesario hasta el vaciado.

Figura 5. Arco eléctrico



Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refino primario*. p. 69.

2.1.6. Refino oxidante

Es la operación de retirada de algunos elementos del acero a través de su oxidación por intermedio de una escoria llamada de oxidante. La escoria debe ser oxidante para que ayude en la retirada de algunos elementos del acero en la forma de óxidos. Esto significa que la presencia de oxígeno en el acero es necesaria para que ocurra esta reacción.

Después de la descarga de la primera cesta se utiliza oxígeno para cortar la chatarra, facilitando su fusión. Este es el primer oxígeno responsable por tornar la escoria oxidante, visto que ya comienza a oxidar algunos elementos. Posteriormente, el acero ya está líquido, el oxígeno es inyectado en el horno, creando condiciones oxidantes en el baño.

2.1.7. Vaciado

El vaciado del horno es hecho a través del EBT (vaciado con boca excéntrica). La principal ventaja del EBT es que reduce la pasada de escoria para la cuchara a niveles muy bajos, evitando la influencia del Fe O contenido en la escoria.

2.1.8. Proceso de afinación (horno olla)

El horno de afinación o también llamado horno cuchara es donde se lleva a cabo la metalurgia secundaria del acero. Podemos definir la metalurgia secundaria como aquella serie de procesos que tiene como propósito modificar la composición química del acero para acomodarla a determinadas necesidades.

Los procesos de la metalurgia secundaria se han establecido para lograr diversos objetivos, que van desde el control de gases hasta la formulación de la composición química.

Figura 6. **Horno de afinó**

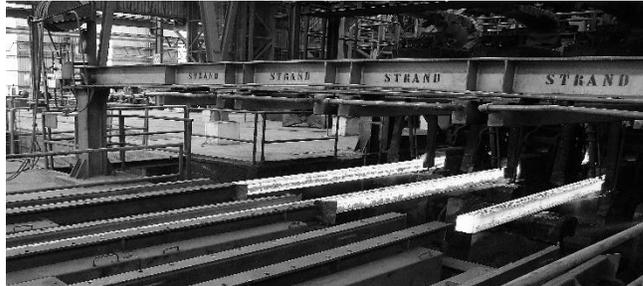


Fuente: Aceros de Guatemala. *Manual de chatarra*. p. 16.

2.1.9. Solidificación del acero

Finalizado el proceso de afinación, el acero es transportado hacia el último proceso que es la máquina de colado continuo. La máquina de colado continuo es un procedimiento siderúrgico en que el acero líquido es convertido en acero sólido (cambio de fase), por medio de agua de enfriamiento previamente tratada hasta la conformación de la palanquilla.

Figura 7. **Palanquillas de acero**



Fuente: Aceros de Guatemala. *Manual de chatarra*. p. 24.

2.2. Materiales refractarios

Son los siguientes:

2.2.1. Definición de refractarios

Por definición los refractarios son materiales que pueden ser sometidos a elevadas temperaturas, capaces de resistir calentamientos y enfriamientos rápidos y soportar cargas mecánicas elevadas sin modificar su estructura. Su principal característica es su resistencia al calor. Para su estudio teórico, cualquier refractario comercial se define químicamente como un sistema heterogéneo multicomponente oxidado y, físicamente como un agregado de partículas policristalinas ligadas entre sí.

Refractabilidad es la capacidad de mantener la identidad física y química a altas temperaturas en el medio ambiente y condiciones de uso. La definición implica que el material refractario puede estar sujeto no solamente a altas temperaturas sino a una variedad de otras fuerzas destructivas, esto incluye

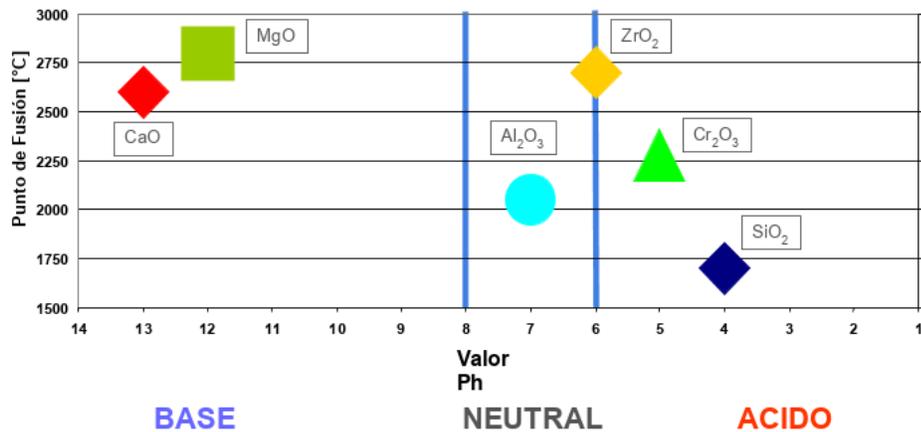
abrasión, impacto, choque térmico, ataque químico y altos niveles de carga a altas temperaturas.

2.2.2. Tipos de materiales refractarios

Los refractarios en la industria con pocas excepciones son óxidos o combinaciones de óxidos de elementos químicos, los cuales ofrecen una base para su clasificación de acuerdo con sus constituyentes químicos.

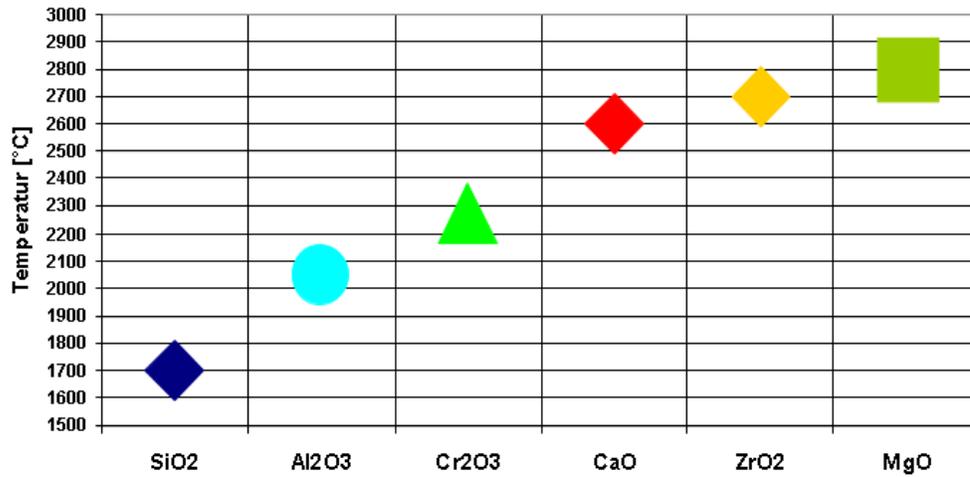
Clasificación de los óxidos refractarios de acuerdo con su punto de fusión y basicidad:

Figura 8. Clasificación de refractarios



Fuente: REFMEEX. *Magnesita refractarios*. p. 5.

Figura 9. Punto de fusión de refractarios



Fuente: REFMEEX. *Magnesita refractarios*. p. 6.

Figura 10. Tipos de refractarios



Fuente: REFMEEX. *Magnesita refractarios*. p. 7.

2.2.3. Propiedades de los refractarios

Las propiedades físicas y químicas de los refractarios son fundamentales para el desarrollo, mejoramiento y control de calidad, y se emplean como criterio para la selección de revestimiento para procesos de alta temperatura. Estas pruebas de caracterización térmicas, mecánicas y otras se realizan a temperatura ambiente y a alta temperatura.

2.2.4. Factores destructivos de los revestimientos refractarios

Se pueden mencionar los siguientes:

2.2.4.1. Escorias

Reacción química entre algún material en el horno y el revestimiento refractario para formar un nuevo material con un menor punto de fusión que el refractario, resultando en la formación de líquidos a la temperatura de operación. El material fundido deslava el revestimiento, o el movimiento de la carga se lo lleva dejando expuestas nuevas y frescas superficies del refractario al ataque destructivo. Factores que afectan:

- A mayor temperatura mayor ataque
- Mayor concentración del material destructivo
- Velocidad de movimiento de la escoria y carga
- Viscosidad del material fundido
- Naturaleza de los materiales en el horno

2.2.4.2. Disgregación

Se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

2.2.4.2.1. Térmico

Calentamiento, paralelas a la carga caliente y en las esquinas rotas a 45°.
Enfriamiento, grietas perpendiculares a la cara caliente y en esquinas rotas a 45°

2.2.4.2.2. Estructural

Cambios en la estructura del ladrillo, vitrificación de alta temperatura, cambios químicos/estructura del refractario y fases con diferentes coeficientes de expansión.

2.2.4.2.3. Mecánico

Fuerza mecánica impuesta al refractario, expansión, contracción, rango crítico entre 800 y 900 °C, y estructuras rígidas.

2.2.4.2.4. Factores que afectan la vida del refractario

A continuación, se enumeran los diversos factores que pueden disminuir la vida del refractario y poner en riesgo la operación, el equipo y al personal de planta.

- Calentamientos y enfriamientos rápidos térmicos.

- Temperatura demasiado alta, la cual favorece la vitrificación estructural.
- A mayor reacción química (carga o impurezas) con el refractario, mayor será el cambio estructural.
- Calentamiento del horno demasiado rápido (la primera vez mecánico).
- Juntas de expansión inadecuadas e insuficientes (mecánico).
- Enfriamiento de la coraza muy rápido (mecánico).

2.2.5. Zonificación del horno de arco eléctrico

Son importantes los siguientes aspectos:

2.2.5.1. Subpiso

Gran variedad de materiales y tipos de construcción se emplean para esta zona del horno. Sin embargo, el material para usar debe ser capaz de contener el baño de acero en caso de que la solera se desgaste o presentará penetraciones. Ladrillo de magnesita quemado es el material adecuado para este propósito, ya que tiene un punto de fusión en su forma pura de 2 750 grados centígrados, presentando además baja solubilidad en escorias ricas en cal.

2.2.5.2. Crisol

El crisol o solera se usa para contener el baño de acero a temperaturas de 1 550 a 1 750 grados centígrados, pero en ocasiones tan altas como 1 800 grados centígrados y resistir el ataque de escoria y desgaste sobre esta zona dependiendo principalmente de las temperaturas y abuso mecánico. El tipo de material empleado es un refractario básico monolítico de alto contenido de MgO, instalado con humedad y últimamente en forma seca.

2.2.5.3. Línea de escoria

Los materiales en la línea de escoria y en el orificio de descarga sufren ataques por disolución de la escoria del horno. Por lo anterior, materiales de alta refractabilidad, alta densidad, baja porosidad y buena resistencia a escoria, ricas en CaO y FeO, son características fundamentales. Tradicionalmente se han venido utilizando ladrillos de magnesita de alta pureza (95-98 %), posteriormente se presentó el desarrollo y materiales básicos ligados con alquitrán y/o impregnados y últimamente ladrillos de magnesita carbón ligados con resina y contenidos de carbón del orden de 10-20 % de carbón.

2.2.5.4. Paredes superiores

Actualmente la tendencia ha sido el empleo de ladrillos de magnesita-carbón. Los puntos calientes se zonifican con magnesita-carbón sustituyendo la magnesita sintetizada con electro fundida en porcentajes variables. Se dispone además de refractarios básicos granulares para dar protección al revestimiento contra la erosión por escoria y arco eléctrico.

2.2.5.5. Tap hole

El orificio de descarga sufre ataque por disolución de escoria y erosión causada por el paso del metal líquido. La práctica refractaria que se sigue en algunos hornos es la aplicación de magnesita de alta pureza con la introducción de un tubo metálico para la salida del metal líquido.

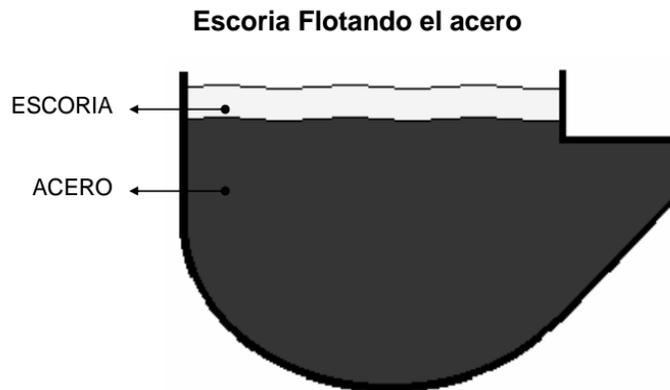
2.3. Formación de escorias en el horno de fusión

Es importante leer los siguientes incisos:

2.3.1. Definición

La escoria es una solución o mezcla no metálica formada por óxidos, como por ejemplo cal (CaO) y sílica (SiO₂), puede ser totalmente líquida o parte líquida, parte sólida. Por ser insoluble y menos densa que el acero, la escoria flota en el baño metálico.

Figura 11. Acero líquido - Escoria



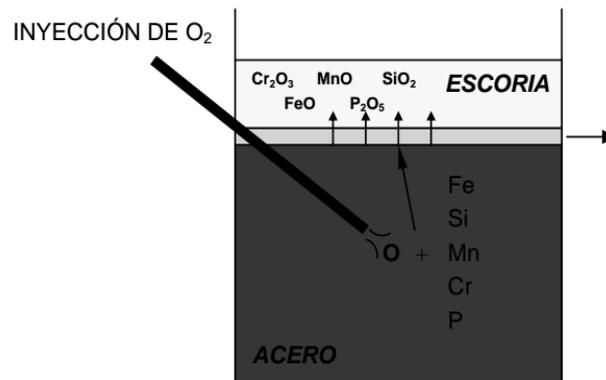
Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refino primario*. p. 6.

El origen de la escoria está en el proceso de fabricación y en la composición química del acero que desea vaciar del horno para la cuchara. El proceso de fabricación de acero es un generador de óxidos, estos son provenientes de la reacción llamada de oxidación de elementos químicos con el oxígeno que existe en el acero líquido. Este oxígeno puede ser introducido a través de la carga, o a través de los equipamientos de soplo de oxígeno existentes en el horno. La escoria debe incorporar estos óxidos formados, revisando:

- Que el acero alcance la composición química especificada.
- Que estos óxidos sirvan como protección al arco eléctrico y no provoquen desgaste en los refractarios.

Para la incorporación de elementos oxidados por la escoria debe observarse la siguiente figura:

Figura 12. **Interfase escoria-acero**



Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refino primario*. p. 7.

El Fe presente en el acero líquido reacciona con el oxígeno inyectado en el horno, siendo oxidado y formando FeO. Este FeO estará presente en el baño, en equilibrio con una determinada cantidad de oxígeno disuelto en el acero. Esta cantidad de oxígeno puede ser medida y se llama oxígeno activo.

De la misma forma que el hierro es oxidado, otros elementos también son oxidados (Mn, Si, Al) yendo para la escoria. Así, si tuviéramos un baño que contenga, además de hierro (Fe), manganeso (Mn), silicio (Si), aluminio (Al) y carbono (C), la escoria será formada por óxidos de estos elementos químicos.

2.3.2. Fuentes generadoras de óxidos

Los óxidos que forman la escoria no son generados solo por la oxidación de los elementos existentes en el acero, conforme lo visto. Otras fuentes son el cargamento de carga con óxidos y su adición intencional. Por lo tanto, la escoria está formada por diversos óxidos con diferentes orígenes.

En cargas ejecutadas con chatarra pueden existir principalmente óxido de hierro y tierra (rica en SiO_2) mezcladas con chatarra. En cargas con arrabio puede existir mucha arena mezclada (rica en SiO_2). En cargas de fierro esponja existe FeO , SiO_2 y Al_2O_3 .

Finalmente, los óxidos pueden aún ser adicionados intencionalmente a la escoria, revisando que esta tenga determinadas propiedades. Un ejemplo de esto es la adición de cal en la carga, buscando aumentar su basicidad.

2.3.3. Finalidad de las escorias

La utilización de escoria en los hornos de arco eléctrico tiene los siguientes objetivos:

- Actuar en la transferencia térmica en el baño

Mantener la temperatura del baño, transferencia térmica uniforme del electrodo para el baño proporcionando cobertura para el arco eléctrico proveniente de los electrodos y reducir el aumento de nitrógeno en el baño.

- Evitar desgaste excesivo de los refractarios

Protección del refractario contra el arco, ser compatible con el refractario para minimizar su desgaste y mantener los niveles de óxidos bajo control, para evitar pérdidas excesivas.

- Tener características que reduzcan pérdidas

2.3.4. Propiedades de las escorias

- Basicidad

La escoria está constituida de diversos óxidos, siendo que cada uno de ellos posee una determinada característica fisicoquímica, siendo divididos como básicos y como ácidos. Los principales óxidos tienen las siguientes características:

Figura 13. Características de los óxidos

Óxidos Básicos	Óxidos Ácidos
CaO	SiO ₂
MgO	Al ₂ O ₃
FeO	P ₂ O ₅
MnO	Cr ₂ O ₃

Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refino primario*. p. 14.

La basicidad es uno de los conceptos más importantes para entender el comportamiento de la escoria. Ella fue creada para verificar si las mezclas de estos óxidos tienen características ácidas o básicas. Para el caso práctico de operación de escorias en los hornos de arco eléctrico, las relaciones más

usadas para expresar la basicidad de la escoria, también llamadas de índice de basicidad, son:

- Basicidad binaria o simple (B2): relación entre el tenor de cal y sílice de la escoria. Ecuación 4:

$$B2 = \frac{\% CaO}{\% SiO_2}$$

- Basicidad ternaria (B3): relación entre el tenor de cal, sílice y alúmina de la escoria. Ecuación 5:

$$B3 = \frac{\% CaO}{\% SiO_2 + Al_2O_3}$$

- Viscosidad

La viscosidad puede ser definida como la resistencia de la escoria al flujo, en el estado líquido. Cuanto mayor es la viscosidad de una escoria, menor es su fluidez y viceversa. La viscosidad de la escoria en el horno eléctrico influye en el procesamiento del acero, principalmente en la velocidad de las reacciones químicas en el acero, aumentando, también, el desgaste de refractarios. Lo ideal es que la escoria que queda junto a la pared refractaria del horno sea de alta viscosidad y el centro del horno sea de baja viscosidad.

- Densidad

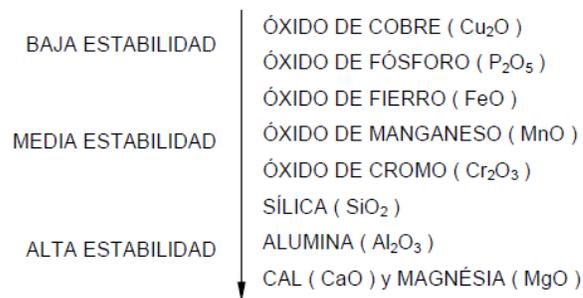
La densidad es definida como la relación de masa ocupada en un determinado volumen. Las escorias poseen densidad entre 2-4 g/cm³, mientras que el acero posee densidad de 7 gr/cm³. Es por eso por lo que la escoria flota

en el acero. El número exacto de la densidad es obtenido en función de la composición química de la escoria. Por ejemplo, una escoria con aproximadamente 40 % CaO, 30 % FeO y 30 % SiO₂, tendrá una densidad de aproximadamente de 3,3 g/cm³.

- Estabilidad

La estabilidad indica la tendencia de remoción de un óxido del acero para la escoria. Cuanto mayor sea la estabilidad del compuesto, más fácilmente es absorbido por la escoria. El diagrama a continuación muestra la clasificación:

Figura 14. **Estabilidad de los óxidos**



Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refino primario*. p. 18.

2.3.5. Principales constituyentes

La escoria es formada por compuestos adicionados en el horno por elementos oxidados en el baño metálico. En la tabla a continuación vemos la composición química típica de una escoria empleada en un horno eléctrico de fusión para acero de bajo-medio carbón, como también su principal fuente de origen.

Tabla I. **Análisis típico de escoria**

COMPUESTO	(%)	ORIGEN
CaO	35-50	Adicionado como cal calcítica
SiO ₂	10-25	Oxidación del Si en el acero o como tierra
FeO	20-45	Oxidación del Fe en el acero o como capa
MgO	5-15	Adicionado como cal dolomítica
Al ₂ O ₃	4-12	Adicionado
MnO	4-10	Oxidación del Mn en el acero
P ₂ O ₅	<1	Oxidación del P en el acero
CaF ₂	<1	Adicionado

Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refino primario*. p. 19.

- **Cal Calcítica (CaO)**

La CaO es un óxido de calcio adicionado al horno en la forma de cal quemada (tratada) o calcáreo (mineral en estado bruto), revisando tomar la escoria básica. La cal es el principal elemento escorificante, pues además de formador de escoria aumenta su basicidad y estabiliza el fósforo, impidiendo su retorno al baño. La cal tiene algunas ventajas:

- Posee gran porosidad, siendo rápidamente disuelta en la escoria del horno.
- No necesita energía para disociarla ya que fue ejecutada fuera del horno.
- Rápida formación de la escoria es fundamental para una buena estabilidad del arco eléctrico.

Principales características de la cal calcítica: la cal, por ser higroscópica, absorbe con facilidad la humedad del aire, lo cual requiere cuidados especiales en su manipulación y almacenaje. Así, se recomienda que ella sea

transportada y estocada en recipientes cerrados, evitando contacto con el aire.

La cal húmeda:

- Aumenta la cantidad de hidrógeno en el acero.
 - Causa defectos en el acero, llamados de copos o piñones, que afectan el acero en las etapas posteriores de utilización, causando pérdidas.
 - Puede causar explosiones en el horno durante la fusión de la carga.
-
- Sílice (SiO_2)

La sílice es un óxido existente en gran cantidad en la tierra. Algunas fuentes de sílice son:

- Tierra en la chatarra (chatarra sucia).
- Impurezas en la cal calcítica y dolomítica.
- Oxidación de silicio presente en el fierro gusa.
- Oxidación de silicio disuelto en el acero líquido, proveniente principalmente de tierra cargada junto con los metálicos.

Se debe tratar siempre de trabajar con la basicidad de la escoria correcta, colocando en el horno la cantidad de cal especificada en el padrón operacional y controlar la carga adicionada, para que esta no tenga sílice en exceso. Si hubiese mucha sílice en la escoria, para acertar la basicidad es preciso adicionar más cal, que necesitará de una energía de fusión extra.

- Óxido de fierro (FeO)

Es originado por la oxidación del hierro del acero debido al oxígeno inyectado en el horno, conforme la reacción de la ecuación 1.

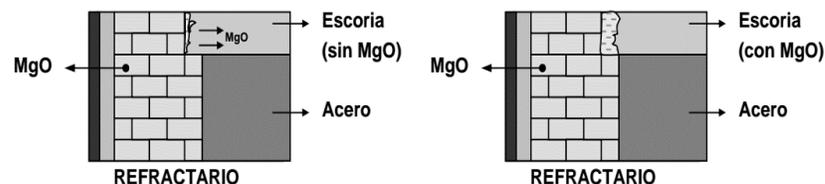
Como la cantidad de FeO en la escoria aumenta proporcionalmente la cantidad de oxígeno en el acero, es un excelente indicador del grado de oxidación del acero. La presencia de FeO promueve:

- Una disminución en el punto de fusión y viscosidad de la escoria
- Condiciones oxidantes
- Óxido de magnesio o magnesia (MgO)

El MgO es adicionado en la escoria, en la forma de cal dolomítica. Su principal función es proteger el refractario de la línea de escoria, retardando su desgaste durante la producción de acero. Ventajas de la utilización de MgO en la escoria espumante:

- Queda disperso como partículas en la escoria
- Ayuda en su absorción de burbujas de gas
- Aumenta su volumen y luego su eficiencia

Figura 15. **Escoria con MgO**



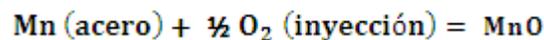
Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refino primario*. p. 24.

- Alúmina (Al₂O₃)

La alúmina es un óxido ácido que fluye, que tiende a tornar más fluida la escoria. Presente en la chatarra y en la cal, aún puede aumentar un poco en la escoria debido al desgaste de determinados tipos de refractarios.

- Óxido de manganeso

Es originado por la oxidación del manganeso presente en la chatarra o gusa en el momento de la inyección de oxígeno, conforme la reacción de la ecuación 6:



2.4. Características de las escorias

La escoria debe tener dos características en los hornos de arco eléctrico:

- Ser básica
- Ser oxidante

2.4.1. Escoria básica

La escoria debe ser básica, para que haya una mejor remoción de impurezas del acero, principalmente el fósforo, ya que el Cao es usado para fijarlo en la escoria.

Por otro lado, la basicidad y la viscosidad de la escoria también tienen una influencia muy grande en el consumo de refractarios. Escorias de baja

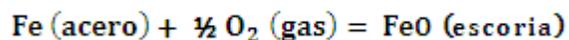
basicidad y viscosidad atacan más el revestimiento, acelerando su desgaste. De ahí viene la preocupación con el revestimiento del refractario en la línea de escoria, que debe resistir a la erosión química causada por la escoria. La utilización de refractarios MgO-C presenta algunas ventajas, como la mayor resistencia al ataque de la escoria y choque térmico. Por eso han sido empleados en las zonas más críticas del horno, como en la línea de escoria.

2.4.2. Escoria oxidante

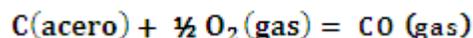
La escoria debe ser oxidante para que ayude en la retirada de algunos elementos del acero en la forma de óxidos. Esto significa que la presencia de oxígeno en el acero es necesaria para que ocurra esta reacción. Después de la descarga de la primera cesta, se utiliza oxígeno para cortar la chatarra, facilitando su fusión. Este es el primer oxígeno responsable por tomar la escoria oxidante, visto que ya comienza a oxidar algunos elementos.

Principales reacciones y óxidos absorbidos por la escoria son:

Ecuación 7:



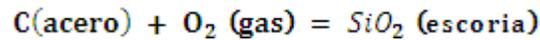
Ecuación 8:



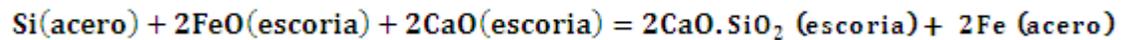
Ecuación 9:



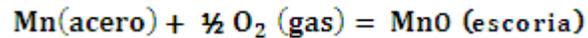
Ecuación 10:



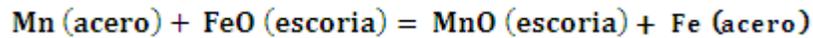
Ecuación 11:



Ecuación 12:



Ecuación 13:



2.4.3. Escoria reductora

En acerías que no poseen horno cuchara, la escoria, además de ser oxidante, debe ser posteriormente reductora. Los objetivos de esto son:

- Desoxidación del acero.
- Remoción del azufre del acero (desulfuración).
- Ajuste de la composición química del acero para dentro de la especificación.
- Control de la temperatura del acero.

2.5. Escoria espumante

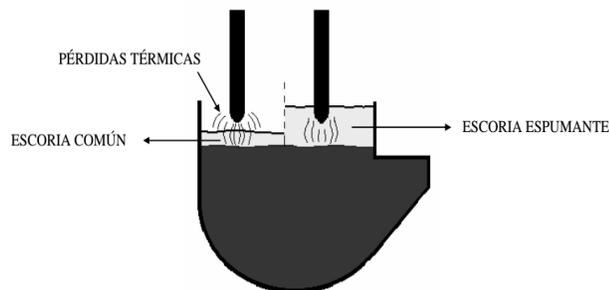
Es necesario observar los siguientes puntos:

2.5.1. Definición

La escoria espumante se caracteriza básicamente por tener un mayor volumen (el espesor de la camada de escoria llega a ser nueve veces mayor que escorias convencionales) debido a la existencia de burbujas de gas dentro de la masa líquida de escoria. Las mayores ventajas de esta práctica son:

- Bajar costos con refractarios, pues la incidencia del arco eléctrico sobre ellos es menor.
- Mejorar en la eficiencia térmica del horno.

Figura 16. Escoria espumante



Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refino primario*. p. 48.

- Mantener el nivel de oxidación de la escoria, evitando la pérdida de hierro del acero en la forma de óxidos (FeO).

- Disminuir el ruido del horno, pues la escoria espumante sofoca gran parte del ruido generado por el arco eléctrico.
- Evitar absorción de nitrógeno por el baño.

2.5.2. Ventajas de utilizar la escoria espumante

- Menor consumo de refractarios
- Mejor consumo térmico
- Reducir las pérdidas metálicas
- Disminución del ruido
- Evitar absorción de nitrógeno

La principal característica de la escoria espumante es la presencia de burbujas de gas, que hinchan la misma, aumentando su volumen, causando los beneficios anteriormente citados.

2.5.3. Características requeridas

La escoria, para ser espumante, debe tener una consistencia cremosa. Esto significa que ella no puede tener una viscosidad muy baja (consistencia líquida) ni muy alta (consistencia dura). Otra característica debe ser la presencia de pequeñas partículas sólidas en la escoria líquida. Esto significa que ella debe estar con un pequeño exceso (o saturada) de MgO (principalmente) y/o CaO.

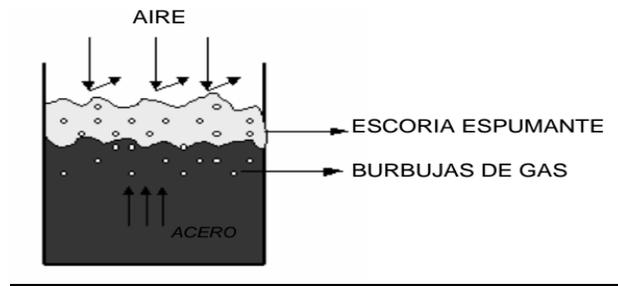
Por otro lado, conforme lo ya mencionado, la presencia de partículas de MgO o CaO en la escoria también es positiva en cuanto al desgaste de refractarios. Como el horno eléctrico tiene revestimiento refractario básico en la

línea de escoria, la saturación de la escoria con MgO o CaO disminuye el ataque químico de la misma en los refractarios, aumentando su vida útil.

2.5.4. Formación de la escoria espumosa

La generación de gases es fundamental para que la escoria quede espumante. El gas responsable por eso es el CO, teniendo el CO₂ un efecto minoritario, ya que es formado en pequeña cantidad a través de la calcinación de carbonatos existentes en la cal o dolomita.

Figura 17. Escoria espumante

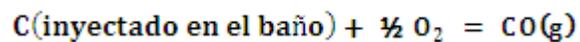


Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refinado primario*. p. 51.

El CO es producido de dos maneras:

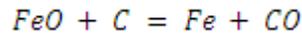
- A través de carbono inyectado en el acero que reacciona con el oxígeno

Ecuación 14:



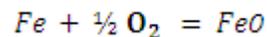
- A través del FeO, que reacciona con el carbono, siendo reducido

Ecuación 15:



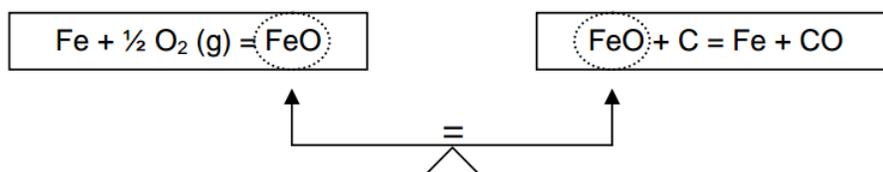
Por tanto, el control del FeO de la escoria es esencial para conseguir una buena escoria espumante. El FeO es generado a través de la inyección de oxígeno (vía varas de inyección o lanzas supersónicas), que oxida el Fe:

Ecuación 16:



Por tanto, se debe tener un equilibrio entre la cantidad de FeO generado debido a la inyección de oxígeno (ecuación 16) y la cantidad de FeO reducido por el carbono inyectado (ecuación 15).

Figura 18. **Reacción Fe y FeO**



Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refinado primario*. p. 52.

Resumiendo, la escoria espumante es obtenida a través de la inyección simultánea de oxígeno y carbono, o a través de lanzas o a través de módulos de inyección combinada de oxígeno y carbono. Así controlando el oxígeno

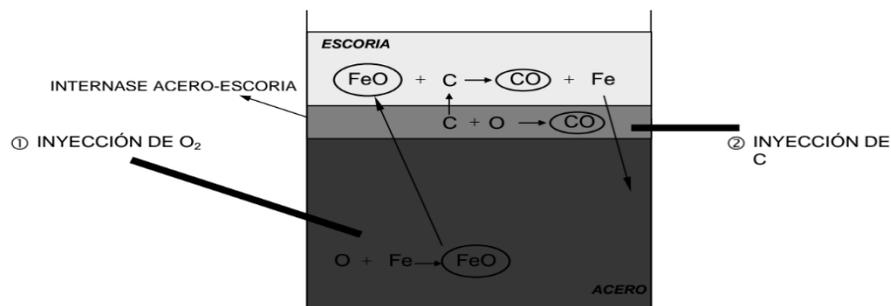
inyectado con relación al C inyectado, se tiene una buena escoria espumante, con la cantidad de FeO constante.

2.5.5. Práctica para fabricación de escoria espumante

Como ya fue mencionado, la práctica para la fabricación de escoria espumante consiste en la inyección de carbono y oxígeno en el acero y escoria, a través de dos pasos:

- Inyección de oxígeno en el acero: producción de FeO que va a pasar a la escoria.
- Inyección de carbono:
 - Reacción del carbono con el oxígeno, formando CO.
 - Reducción del FeO por el C, habiendo formación de CO y reversión de Fe para el baño metálico.

Figura 19. Generación de CO

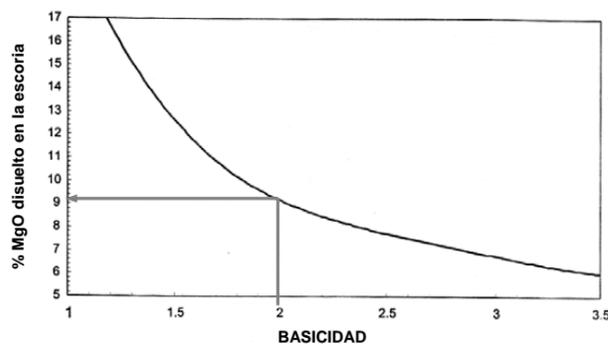


Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refino primario*. p. 53.

Debe haber un equilibrio entre la cantidad de C y oxígeno inyectado, con el fin de controlar la formación de FeO, buscando:

- Una franja óptima de FeO, que venía de 25 % a 35 % en la escoria.
- Una temperatura controlada, que no sea mayor a 1 600 °C.
- Una escoria con basicidad binaria mayor que 2,0 o sea una escoria básica.

Figura 20. **Relación de basicidad y MgO**

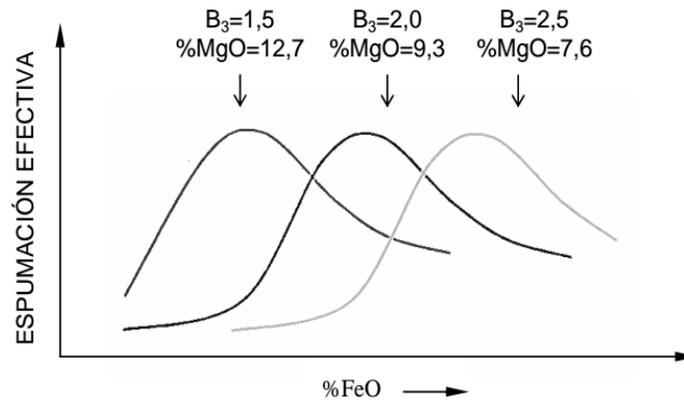


Fuente: Gerdau. *Formación de escorias en hornos de fusión y refino primario*. p. 54.

- Una cantidad de partículas sólidas en la escoria óptima, principalmente con relación al MgO. Existen diagramas específicos indicando los tenores más adecuados, pues esta franja es generalmente larga, dependiendo principalmente de la cantidad de FeO de la escoria. Generalmente, el % MgO varía de 8 a 12 %. Cuanto mayor es la basicidad de la escoria, menor es la cantidad de partículas (MgO) necesarias para la espumación.

La línea del gráfico a continuación indica la relación entre FeO de la escoria y la espumación, con basicidades variando de 1,5 a 2,5. También se puede ver que el % FeO en la escoria no puede ser ni muy alto ni muy bajo, para alcanzar una escoria espumante óptima. Además de eso, cuanto mayor es la basicidad de la escoria, mayor debe ser el tenor de FeO en la misma.

Figura 21. **Basicidad de la escoria**



Fuente: Gerda. *Formación de escorias en hornos de fusión y refino primario*. p. 55.

2.5.6. **Inyección de magnesia o dolomita en la escoria espumante**

Conforme ya fue bastante citado hasta ahora, la existencia de partículas sólidas (principalmente MgO) en la escoria es muy importante para su espumación. Pensando en eso, algunas acerías inyectan estas partículas en la escoria con el fin de prolongar la espumación en el horno. En verdad, la efectividad tanto de la inyección de magnesia o dolomita depende de la cantidad inicial de MgO en la escoria. Escorias con MgO inicial muy bajo tendrán apenas una pequeña mejora en su espumación.

2.6. **Análisis de rendimiento de ladrillo refractario en horno de fusión**

Es necesario observar la siguiente información:

2.6.1. Vida del refractario

La vida del refractario depende de muchos factores:

Figura 22. Vida del refractario

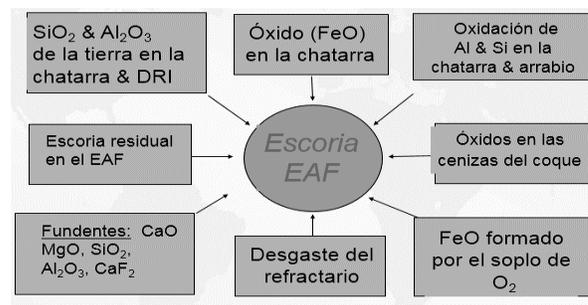


Fuente: Magnesita. *Escorias de acería*. p. 2.

2.6.2. Formación de escoria

La escoria en el horno de arco eléctrico se genera principalmente debido a los factores que a continuación se describen:

Figura 23. Escoria del EAF

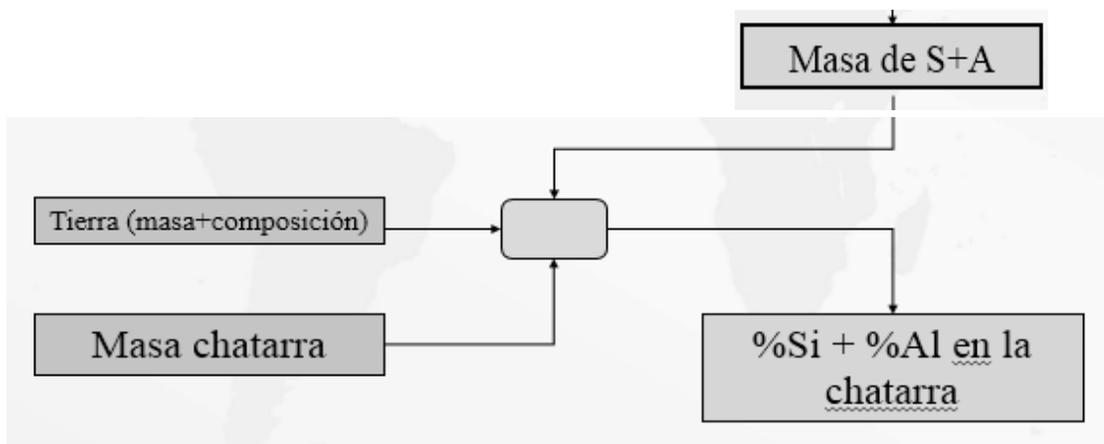


Fuente: Magnesita. *Escorias de acería*. p. 6.

2.6.3. Estimación de la masa de los óxidos ácidos (SiO_2 y Al_2O_3)

Se estima la masa de los óxidos ácidos por balance de los materiales cargados.

Figura 24. Balance de masa



Fuente: Magnesita. *Escorias de acería*. p. 15.

3. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MEDICIÓN

3.1. Espectrómetro Thermo Scientific (OES)

Es un instrumento que está especialmente diseñado para fundiciones y procesadores de metales que necesitan un análisis de metal fiable. Esta técnica satisface las necesidades de análisis más exigentes de la industria de los metales, desde la inspección de materiales entrantes hasta la clasificación de chatarra.

La muestra previamente preparada es colocada arriba de un electrodo, el cual hace un arco eléctrico sobre una cara pulida de la muestra emitiendo luz, que es conducida por un tubo al vacío hasta un prisma en donde dicha luz es descompuesta y la intensidad de esa luz es medida por fotoceldas especiales para transformarla en información por comparación contra la calibración que posee el aparato, realizada con patrones certificados y procesada por el computador para ser traducida a concentración de cada uno de los elementos químicos analizados.

Los elementos químicos que pueden ser detectados son: C, Mn, Si, S, P, Ni, Cr, V, Mo, Cu, Sn, Al, Co, Nb, Pb, Ti, W, Ca y Fe.

Figura 25. **Espectrómetro Thermo Scientific (OES)**



Fuente: elaboración propia.

3.2. Fluorescencia Rayos-X (XRF)

La fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica popular aplicada a determinaciones de elementos múltiples en una amplia variedad de materiales. Se utiliza para el análisis elemental no destructivo de muestras sólidas y líquidas. Las muestras típicas incluyen vidrios, plásticos, aceites, todos los metales, minerales, refractarios, cemento y materiales geológicos. Con los años, se ha convertido en una técnica estándar para el análisis de rutina de la metalurgia y muestras minerales. Las aleaciones ferrosas y no ferrosas, el cemento y los materiales geológicos son algunos de las áreas industriales más comunes en las que XRF se usa para control de calidad y control de procesos.

El ARL optim'x es un espectrómetro basado en fluorescencia de rayos X dispersa de longitud de onda, la cual emplea una fuente de rayos X para excitar la muestra. Los espectros emitidos por la muestra se dispersan en longitudes de onda discretas utilizando un dispositivo de dispersión (un cristal), que luego se detectan utilizando un contador de gas proporcional o de centello. El

instrumento permite la medición de hasta 79 elementos en un rango de flúor a uranio.

Figura 26. X-Ray Fluorescence (XRF)



Fuente: elaboración propia.

3.3. Difracción de rayos-x (XRD)

El análisis XRD proporciona resultados de alto rendimiento en una amplia gama de aplicaciones industriales y de investigación, incluida la investigación académica, química, farmacéutica, polímeros, metales y minerales. Se obtiene rápidamente información estructural y de fase detallada de los materiales utilizando difracción de rayos x, una técnica versátil y no destructiva.

4. METODOLOGÍA

4.1. Variables

Se tomaron en cuenta las siguientes variables:

4.1.1. Dependientes

Debe observarse la siguiente tabla:

Tabla II. **Variables dependientes**

Método de ensayo o proceso	variable	Dimensionales
Fluorescencia de rayos X	SiO ₂	%
	Al ₂ O ₃	%
	MgO	%
	CaO	%
	FeO	%
Carga al horno de fundentes	cal dolomítica	Kg
	cal calcítica	Kg

Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Independientes

Debe observarse la siguiente tabla:

Tabla III. **Variables independientes**

Método de ensayo o proceso	Variable	Dimensionales
Carga al horno de materia prima	Cantidad de chatarra	kg
Basicidad ternaria	IB3	-
Impurezas	Cantidad de tierra	Kg

Fuente: elaboración propia.

4.2. Delimitación del campo de estudio

El proyecto se desarrollará dentro de las instalaciones de la planta de acería del parque industrial SIDEGUA, ubicado en el Km 65,5 de la antigua ruta que conduce al puerto de San José, municipio de Masagua, departamento de Escuintla.

El análisis de desgaste y generación del modelo teórico de carga de cales se realizará únicamente considerando el proceso de fusión de chatarra que es la primera etapa de producción del acero que se realiza en el horno de tipo EAF (arco eléctrico) instalado en la planta acería y que tiene una capacidad de 60 toneladas de volumen de pie líquido de acero. Se realizará análisis de fluorescencia de rayos X y de espectrometría de emisión óptica, para conocer la

química promedio de la chatarra que se carga al horno de fusión. También serán analizadas las muestras de cal calcítica y cal dolomítica que se utilizan en el proceso de fusión y cuyos análisis se utilizarán para conocer el aporte de óxidos básicos para el trabajo de escoria.

Las muestras de escoria se extraerán durante cada colada sin modificar las condiciones de carga de chatarra y las mismas también serán analizadas por el método de difracción de rayos X para conocer el aporte de óxidos ácidos y básicos que aporta dicha carga.

Se establecerá un índice de basicidad ternario igual a 1,8, el cual no será modificado, ya que según las referencias teóricas con este valor de basicidad se espera tener una escoria adecuada para reducir el ataque químico hacia el material refractario.

Los análisis de fluorescencia de rayos X y de emisión óptica se realizarán en las instalaciones de laboratorio de acería ubicadas dentro de la misma planta, con los equipos de la marca Thermo OptimX y Thermo ARL 3460, respectivamente.

4.3. Recursos humanos disponibles

- Ingenieros del horno eléctrico de fusión
- Operadores del horno eléctrico de fusión
- Operador de servicios generales
- Analistas de control de calidad
- Jefe de control de calidad

4.4. Recursos materiales disponibles

Fueron los siguientes:

4.4.1. Muestras de chatarra

Se tomarán 5 muestras de chatarra de cada tipo en los silos de la nave de chatarra para determinar la cantidad de tierra que trae y el % de Si y AL según análisis por espectrometría. Luego se trasladará al área de análisis para separar material ferroso y material no ferroso (solo tierra) y luego se pesará cada uno para determinar su porcentaje de acuerdo con el peso total previamente pesado.

- Montacargas
- Botes de plástico
- Guantes
- Mesa de trabajo
- Brocha
- Imán
- Malla para cernir
- Balanza
- Alicates
- Espectrómetro de emisión óptica

4.4.2. Recolección de escorias

El horno de arco eléctrico opera durante 20 horas por día, dejando libre el intervalo que comprende de las 18:00 a las 22:00 horas, que corresponde al

horario de mayor demanda de consumo eléctrico en la red nacional y en donde el costo de esta alcanza su mayor valor.

Se producen 22 coladas diarias, para un total de 660 coladas al mes y para objetos de este trabajo de investigación se estableció arbitrariamente que el comportamiento de las escorias de las coladas, correspondientes a un mes de operación, son representativas para modelar la composición química y el aporte de óxidos analizados.

La recolección de muestras de escoria se realizará durante un mes durante la etapa de fusión de la colada a través de un cartucho que ingresará al horno por medio de un robot (CATFIS) que recogerá la muestra y luego será enfriada para ser almacenada en sobres de papel manila. Las muestras serán enviadas al laboratorio de control de calidad para ser analizadas por fluorescencia de rayos X. Se utiliza la siguiente ecuación estadística para proporciones poblacionales con el 10 % de error, 99 % de confianza y una población de 600 muestras.

Ecuación 17:

$$n = \frac{z^2(pq)}{e^2 + \frac{(z^2(pq))}{N}}$$

Tabla IV. **Descripción de variables para proporciones poblacionales**

N	Tamaño de la muestra
Z	Nivel de confianza deseado
P	Proporción de la población con la característica deseada (éxito)
Q	Proporción de la población sin la característica deseada (fracaso)
E	Nivel de error dispuesto a cometer
N	Tamaño de la población

Fuente: elaboración propia.

El tamaño de la muestra será de 130.

- Cartucho de muestra
- Robot CATFIS
- Sobres de papel manila media carta
- Guantes
- Fluorescencia de rayos X (analizador de escoria)
- Equipo de protección personal

4.5. Técnica cuantitativa

El desarrollo del presente trabajo de graduación involucrará 2 técnicas de análisis cuantitativo:

- Espectrometría de emisión óptica, utilizando el espectrómetro Thermo ARL 3460, con la cual se analizará una muestra representativa de cada tipo de chatarra que se carga al horno de fusión para conocer el porcentaje en peso de óxidos principales y que, multiplicado por la cantidad de chatarra cargada dentro del horno, servirá para estimar el aporte finar de óxidos en la escoria.

- Espectrometría de fluorescencia de rayos X, utilizando el espectrómetro Thermo OptimX, con el cual se analizarán las muestras de cal calcítica y cal dolomítica, lo que servirá para cuantificar la cantidad de Kg que se deberán cargar de ambos materiales partiendo del índice de basicidad establecido, también se analizarán las distintas muestras de escoria del proceso de fusión para determinar el porcentaje en peso de óxidos ácidos presentes.

Los valores de óxidos ácidos cuantificados en las escorias y la química de cal calcítica y cal dolomita se utilizarán para sustituir en la ecuación de basicidad y determinar la carga óptima de ambas cales en el proceso de fusión.

4.6. Recolección y ordenamiento de la información

Se tomarán 4 muestras de cada tipo de chatarra, una por semana durante un mes, de la nave de almacenamiento de chatarra, que se utiliza como materia prima en el horno de arco eléctrico. Luego se pesará cada muestra y se determinará la cantidad de impurezas (tierra) que trae cada una. De la misma muestra se analizará el porcentaje de Si y Al que tiene la chatarra a través del espectrómetro de emisión óptica.

Al mismo tiempo se tomarán 4 muestras de cal calcítica y cal dolomítica, una por semana durante un mes, para determinar el % de CaO y MgO teórico que trae como composición química dicho fundente.

Se sacarán 130 muestras de escoria del horno de arco eléctrico de la etapa de fusión, 4 por día durante un mes, las cuales serán almacenadas en sobres de papel manila y enviadas a control de calidad para su análisis por fluorescencia de rayos X.

Teniendo todos estos resultados de las distintas muestras, a través del modelo teórico se determinará la cantidad de cal calcítica y cal dolomítica que debe ser adicionada como fundente en el horno de arco eléctrico

4.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Es importante observar la siguiente tabla:

Tabla V. **Composición química e impurezas de los diferentes tipos de chatarra**

Tipo de chatarra	% Si	% Al	% de impurezas
Fragmentado nacional			
Fragmentado importado			
Menudo			
Fragmentable			
Oxicorte			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Análisis de fundentes: cal calcítica y cal dolomítica**

Tipo de fundente	% CaO	% MgO	
Cal calcítica			
Cal dolomítica			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Análisis de óxidos presentes en la escoria**

Escoria analizada	% P/P análisis de XRF						ppm
Colada	CaO	MgO	FeO	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	O ₂

Fuente: elaboración propia.

4.8. Análisis estadísticos

Se evaluará el porcentaje de error del método propuesto comparando el resultado con el valor teórico del índice de basicidad ternario de 1,8, contra el resultado de índice de basicidad experimental obtenido partiendo del análisis de óxidos en la escoria cuantificados por fluorescencia de rayos X.

4.8.1. Cálculo del índice de basicidad ternario para la escoria

Es necesario observar la siguiente información:

Ecuación 18:

$$IB3 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$$

4.8.2. Análisis de error entre resultados teóricos y experimentales de índice de basicidad en la escoria

Debe observarse la ecuación 19:

$$\% \text{ error} = \left| \frac{IB3_{teo} - IB3_{real}}{IB3_{teo}} \right| * 100$$

4.9. Plan de análisis de resultados

Se desarrolla el plan de la siguiente manera:

4.9.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variable

Son los siguientes métodos y modelos:

4.9.1.1. Variables dependientes

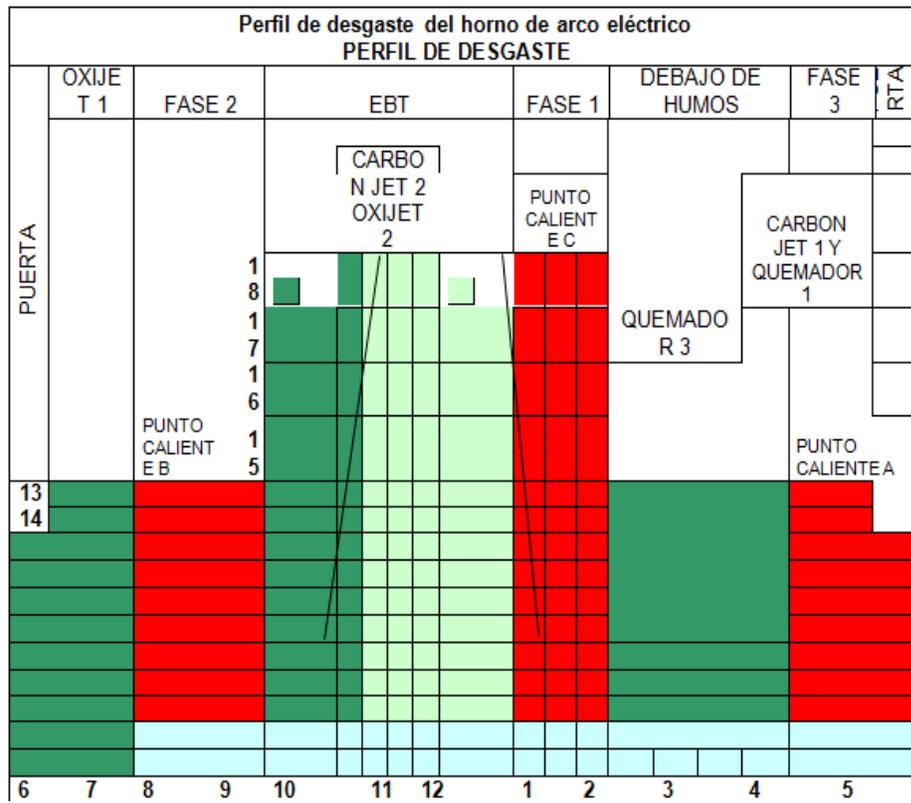
Debe observarse la siguiente tabla:

Tabla VIII. **Determinación por método de fluorescencia de rayos X**

Escoria analizada	% P/P análisis de XRF					
Colada	CaO	MgO	FeO	MnO	SiO2	Al2O3

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Perfil de desgaste del horno de arco eléctrico



Fuente: elaboración propia.

4.9.1.1.1. Determinación de contenido teórico de óxido de silicio (SiO₂) con base en la carga de chatarra

Se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuación 20:

$$kg \text{ de chatarra} * \left(\frac{\% Si}{100}\right) = kg \text{ de Si colada}$$

Ecuación 21:

$$kg \text{ Si colada} * \left(1 \text{ mol} \frac{Si}{pm} Si\right) * \left(1 \text{ mol} \frac{SiO_2}{1 \text{ mol}} Si\right) * \left(1 \text{ pm} \frac{SiO_2}{1 \text{ mol}} SiO_2\right) = kg \text{ SiO}_2$$

4.9.1.1.2. Determinación de contenido teórico de óxido de aluminio (Al₂O₃) con base en la carga de chatarra

Se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuación 22:

$$kg \text{ chatarra} * \left(\frac{\% Al}{100}\right) = kg \text{ Al colada}$$

Ecuación 23:

$$kg \text{ Al colada} * \left(1 \text{ mol} \frac{Al}{pm} Al\right) * \left(1 \text{ mol} \frac{Al_2O_3}{1 \text{ mol}} Al\right) * \left(1 \text{ pm} \frac{Al_2O_3}{1 \text{ mol}} Al_2O_3\right) = kg \text{ Al}_2O_3$$

4.9.1.1.3. Determinación de la masa de sílice (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃) en la escoria

Se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuación 24:

$$\text{masa de SiO}_2 \text{ escoria} + (\% \text{ de SiO}_2 \text{ aportada por la tierra}) = \text{masa de SiO}_2 \text{ escoria}$$

Ecuación 25:

$$\text{masa de Al}_2\text{O}_3 \text{ escoria} + (\% \text{ de Al}_2\text{O}_3 \text{ aportada por la tierra}) = \text{masa de Al}_2\text{O}_3 \text{ escoria}$$

4.9.1.2. Variables independientes

Son las siguientes:

4.9.1.2.1. Cálculo del índice de basicidad ternario para la escoria

Se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 26:

$$IB3 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$$

4.9.1.2.2. Cálculo de los óxidos totales representativo en la escoria analizada

Se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 27:

$$100 = \%CaO + \%MgO + \%FeO + \%SiO_2 + \%Al_2O_3$$

4.9.1.2.3. Despeje de ecuaciones para encontrar el % de óxido de calcio (CaO) en la escoria, a partir del valor de índice de basicidad ternario (IB3)

Se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 28:

$$\%CaO = (\%SiO_2 + \%Al_2O_3) * IB3$$

4.9.1.2.4. Cantidad teórica de escoria obtenida por colada

Se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 29:

$$masa\ escoria = \frac{Kg\ SiO_2 + Kg\ Al_2O_3}{\frac{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}{100}}$$

4.9.1.2.5. Masa de óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO) totales en la escoria

Se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuación 30:

$$kgCaO = masaescoria * (\%CaOenlaescoria)$$

Ecuación 31:

$$kgMgO = masaescoria * (\%MgOenlaescoria)$$

4.9.1.2.6. Determinación de los kilogramos de cal cálcica y cal dolomítica que se debe aportar en la carga de materiales al horno

Se utiliza las siguientes ecuaciones:

Ecuación 32:

$$Kg\ Cal\ dolomítica = \frac{(masa\ de\ escoria * \%MgO\ en\ la\ escoria)}{\%MgO\ cal}$$

Ecuación 33:

$$Kg \text{ Cal calcica} = \frac{((Kg \text{ CaO}) - ((Kg \text{ cal dolomitica}) * (\% \text{ CaO en cal calcitica})))}{\% \text{ CaO en cal calcitica}}$$

4.9.1.2.7. Cantidad total de cales a adicionar por colada

Se utiliza las siguientes ecuaciones:

Ecuación 34:

$$Kg \text{ totales de Cales} = Kg \text{ cal dolomítica} + Kg \text{ cal cálcica}$$

5. CRONOGRAMA

En este capítulo se presenta el cronograma:

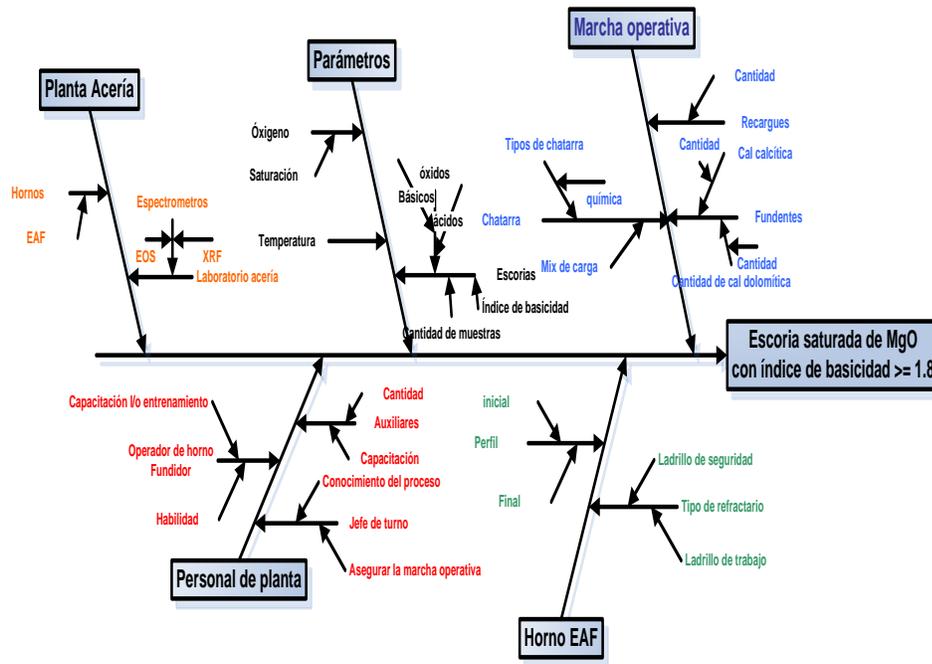
Tabla X. **Cronograma**

Actividad	Año 2019																Año 2020															
	jul-19				ago-19				sep-19				oct-19				nov-19				dic-19				ene-20				feb-20			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Reunión con Ing. Víctor Monzón para plantear tema de diseño de investigación																																
Elaboración de diseño de investigación de acuerdo con EIQD-ES-P-TG (35%)																																
Primera revisión de avance de diseño de investigación con Ing. Víctor Monzón																																

6. DIAGRAMA DE CAUSA-EFECTO

En este capítulo se presenta el diagrama de causa y efecto:

Figura 26. Diagrama de causa-efecto



Fuente: elaboración propia.

7. PRESUPUESTO

En este capítulo se presenta el presupuesto:

Tabla XI. **Presupuesto**

TRABAJO DE GRADUACIÓN		
	CARNÉ	88-12121
Proyecto: TESIS	ESTUDIANTE	ERICK GÓMEZ
	Fecha:	11/6/2019
ÍTEM DEL PRESUPUESTO	PRESUPUESTO	
	EN QUETZALES	% TOTAL
Honorarios de asesor	Q5 000.00	31,25 %
Horas hombre	Q2 000.00	12,50 %
Equipo de medición	Q500.00	3,13 %
Equipo para muestreo de chatarra	Q300.00	1,88 %
Análisis de muestreo de escorias	Q6 000.00	37,50 %
Análisis de muestreo de cal	Q1 000.00	6,25 %
Artículos de oficina	Q200.00	1,25 %
Equipo de protección personal	Q1 000.00	6,25 %
TOTAL	Q16 000.00	100,00 %

Fuente: elaboración propia.

8. RESULTADOS

Se presentan en las siguientes tablas:

Tabla XII. **Contenido de impurezas de los diferentes tipos de chatarra contenida en la carga del horno EAF**

Tipo de Chatarra	Semana 1			Semana 2		
	Impurezas	% Si	% Al	Impurezas	% Si	% Al
chicharrón nacional	0,86%	0,01	0,019	1,71%	0,004	0,011
chicharrón importado	1,66%	0,017	0,025	1,98%	0,019	0,021
menudo	3,68%	0,004	0,021	0,96%	0,008	0,026
oxicorte	1,19%	0,015	0,023	0,94%	0,012	0,019
fragmentable	1,77%	0,011	0,008	1,88%	0,009	0,012
Promedio	1,78%	0,011	0,019	1,53%	0,010	0,018

Tipo de Chatarra	Semana 3			Semana 4		
	Impurezas	% Si	% Al	Impurezas	% Si	% Al
chicharrón nacional	0,97%	0,01	0,019	2,28%	0,016	0,025
chicharrón importado	0,83%	0,012	0,017	1,71%	0,018	0,021
menudo	4,15%	0,009	0,021	0,91%	0,007	0,019
oxicorte	1,58%	0,014	0,016	1,12%	0,014	0,012
fragmentable	3,58%	0,011	0,013	2,24%	0,009	0,011
Promedio	2,04%	0,011	0,017	1,66%	0,013	0,018

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Aporte de óxido de calcio y óxido de magnesio proveniente de las cales**

Fundentes	Semana 1		Semana 2	
	% CaO	% MgO	% CaO	% MgO
Cal Dolomítica	70,86	28,36	64,65	28,71
Cal Calcítica	98,17	0,587	97,51	0,383

Fundentes	Semana 3		Semana 4	
	% CaO	% MgO	% CaO	% MgO
Cal Dolomítica	66,55	32,33	71,63	28,04
Cal Calcítica	98,16	0,518	97,18	0,749

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Cantidad de cal cargada en el horno de fusión**

Fundentes	Semana 1	Semana 1
	Kg/colada	Kg/colada
Cal Dolomítica	1 600	1 300
Cal Calcítica	700	800

Fundentes	Semana 3	Semana 4
	Kg/colada	Kg/colada
Cal Dolomítica	1 300	1 300
Cal Calcítica	1200	800

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Análisis promedio de óxidos presentes en la escoria**

PROMEDIOS	Al₂O₃	CaO	FeO	MgO	MnO	SiO₂
30 coladas	6,42	28,83	36,61	8,31	5,45	9,59
30 coladas	7,04	29,52	32,49	7,99	6,17	9,24
33 coladas	7,09	30,62	32,98	8,17	5,68	9,89
37 coladas	7,09	29,58	36,31	8,21	5,62	9,38

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Índice de basicidad ternario promedio, calculado para las muestras de escoria analizadas**

PROMEDIOS	IB₃ =CaO/(SiO₂+Al₂O₃)
30 coladas	1,801
30 coladas	1,814
33 coladas	1,804
37 coladas	1,796

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Promedio concentración en partes por millón de oxígeno disuelto en el baño de acero medido durante el proceso de afino en el horno EAF**

PROMEDIOS	PPM OXÍGENO
30 coladas	807
30 coladas	659
33 coladas	587
37 coladas	675

Fuente: elaboración propia.

Para el análisis estadístico, por su parte, se utilizaron las siguientes tablas:

Tabla XVIII. **Cálculo de la proporción poblacional de la composición química de escoria, considerando un nivel de confianza de 99 %, con 10 % error para una población de 600 muestras**

$$n = \frac{Z^2(pq)}{e^2 + \frac{(Z^2(pq))}{N}}$$

n = tamaño de la muestra	130
e = Error	10 %
Z = Nivel de confianza	99 %
p = porción de población éxitos	90 %
q= porción de población fracaso.	10 %
Tamaño de la población	600

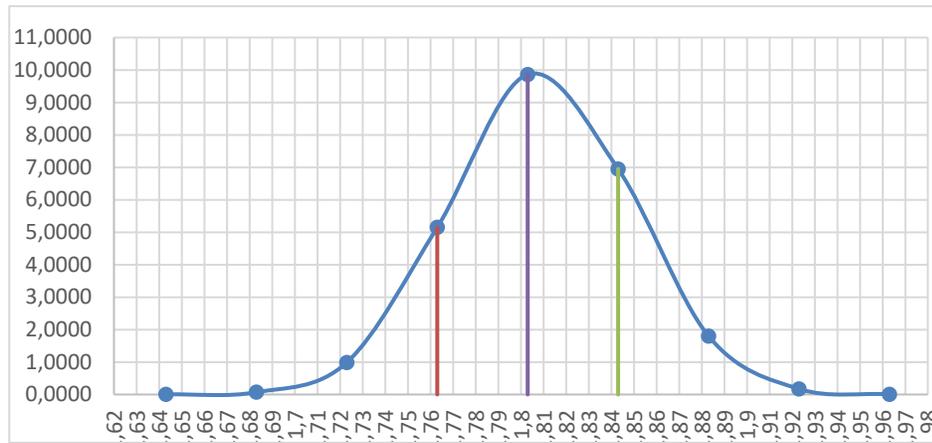
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Porcentaje de error y desviación estándar calculados para el valor índice de basicidad promedio experimental**

	IB3 = CaO/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	PPM OXÍGENO	% Error
Promedio	1,803	680,11	1,50
Desviación estándar	0,04	211,51	1,41

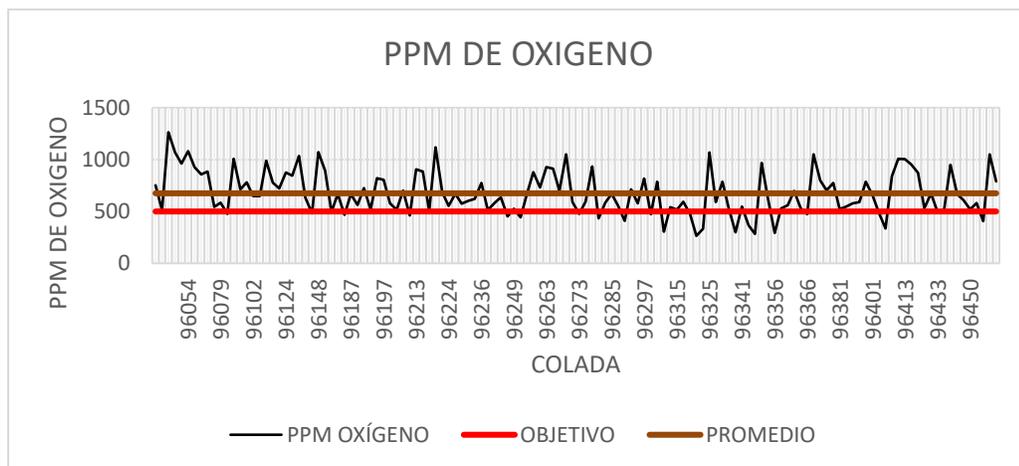
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Curva de distribución para los datos obtenidos para el índice de basicidad**



Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Comportamiento de los datos de oxígeno disuelto en función del índice de basicidad experimental obtenido para cada muestra de escoria analizada**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Perfil del material refractario del horno EAF, inicio de campaña

Coladas	950					Fecha de Reparación	31-1-2-2020						
Tipo de R	mayor					Prueba Material	NO						
Material	\ F3T14/F8T10					Material Nuevo	F3T14						
Proveedo	RHI					Proveedor Nuevo	RHI						
PERFIL ANTES DE LA PRUEBA													
LOCALIZACION DE PUNTOS EN EL EAF													
HILADAS	6	5	4	3	2	1	12	11	10	9	8	7	
1						10	10	10					
2						10	10	10					
3						6	6	6			31-1-2-2020		
4						4	4	4					
5						4	4	4					
6		5	5	6	4	4	4	2.5	4	4	4	4	
7		5	6	6	6	6	6	2.5	4	4	4	4	
8	6	6	6	6	8	8	8	4	6	6	6	6	
9	6	6	8	8	8	8	8	6	8	8	8	8	
10	8	8	8	8	8	10	10	8	10	10	10	10	
11	10	8	10	10	10	10	10	10	12	12	12	12	
12	11.5	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
14	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
15	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
16	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
17	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	
18	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	
18	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	

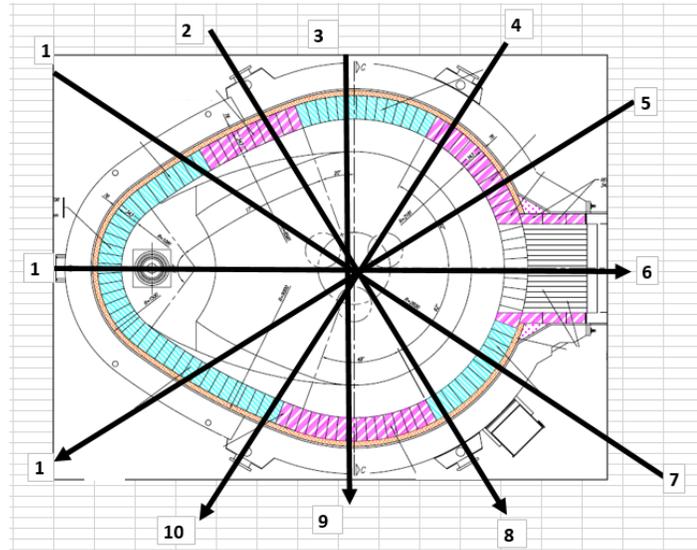
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Perfil del material refractario del horno EAF, final de campaña

Coladas	1150					Fecha de Reparación	1-4 ABRIL						
Tipo de R	MAYOR					Prueba Material	NO						
Material	\ F3T14/GMAG/F8T10					Material Nuevo	F3T14						
Proveedo	RHI					Proveedor Nuevo	RHI						
PERFIL DESPUES DE LA PRUEBA													
LOCALIZACION DE PUNTOS EN EL EAF													
HILADAS	6	5	4	3	2	1	12	11	10	9	8	7	
1						10	10	10					
2						10	10	10					
3						6	6	6					
4						6	6	6					
5						6	6	6					
6		5	5	6	6	6	6	6	6	6	5	5	
7		6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	
8	7	7	8	6	8	8	8	6	6	6	6	6	
9	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
10	8	8	8	8	8	10	10	8	8	8	10	10	
11	10	8	10	10	10	10	10	10	12	12	12	12	
12	11.5	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
14	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
15	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
16	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
17	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	
18	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Esquema de arreglo y colocación de ladrillo refractario**



Fuente: elaboración propia.

8.1 Interpretación de resultados

El modelo propuesto funciona considerando todos los posibles aportes que modifican la condición de la escoria en general, fue imperativo determinar la composición química de cada tipo de chatarra, composición química promedio de los dos tipos de cal utilizados, y finalmente estimar el aporte de impurezas en el baño de acero líquido producto de esta carga.

Siendo el índice de basicidad ternario (IB3) la medida de la solubilidad del óxido de magnesio (MgO) en el sistema de escoria, se definió que debía alcanzar un valor igual a 1,8, que por definición supone que el trabajo de la escoria es adecuado para proteger la pared de material refractario neutralizando el efecto de la sílice (SO₃) y alúmina (Al₂O₃), en un baño

saturado de óxido de magnesio aportado por la cantidad de cal utilizada y no por efecto de la solubilización de material refractario, como ya se mencionó.

Utilizando la función de proporción poblacional con un intervalo de confianza de 99 % y un error máximo permitido de 10 %, se estableció que 130 muestras de escoria de un total por campaña de 600 coladas, debían ser las analizadas para tener un comportamiento representativo del éxito del modelo en alcanzar la basicidad igual a 1,8, el promedio general resultante fue de $IB3 = 1,803$ con una desviación estándar 0,04, que confirma que el modelo utilizado fue preciso y se permitió calcular adecuadamente la cantidad de cales para alcanzar las condiciones esperadas, con un error porcentual menor al 5 %.

Al evaluar la condición del ladrillo refractario al cabo de 1 100 coladas, tiempo promedio en el cual se requiere revisión y reparación de ladrillo refractario, se observó que las paredes presentaron adecuada protección con menos desgaste, lo que se demostró al realizar la medición en los puntos de referencia establecidos para cada hilera de ladrillo según matriz de arreglo del horno (ver tabla IX) y comparándola con el arreglo inicial (ver tabla VIII).

La mejora en el trabajo de la escoria con las cantidades aportadas de cal calcítica y dolomítica calculadas con base en el modelo propuesto demostraron ser de gran beneficio en el adecuado resguardo del ladrillo dentro del horno EAF en la etapa de fusión, lo que se traduce en campañas más largas de trabajo y menores costos por reparación o cambio de ladrillos refractarios.

Finalmente, durante la toma de muestra de escoria, se procedió a medir la cantidad de oxígeno disuelto en el baño de acero líquido, para determinar si este parámetro podría utilizarse como un indicador de que la escoria alcanzó la basicidad esperada. El comportamiento gráfico muestra la variación en los

datos sin poder ajustarse a una tendencia con una variación estándar superior a 200 ppm, descartando que esta medición pueda ser un buen indicador de la condición de la escoria respecto a lo que basicidad se refiere.

CONCLUSIONES

1. Sí es posible calcular la masa teórica de cal requerida para la carga de fusión en el horno EAF, partiendo de condiciones conocidas en lo que a cantidades y composiciones químicas de la chatarra se refiere.
2. Determinar la composición química de la chatarra y los aportes que la misma genera en el baño de acero líquido es primordial para desarrollar el cálculo adecuado de la masa de cal en el método propuesto.
3. El valor de 0,16 % de error calculado para la basicidad ternaria promedio respecto al objetivo establecido de 1,8 demostró que el procedimiento propuesto para calcular la cantidad de cal calcítica y dolomítica que se debe aportar en la etapa de fusión es exacto.
4. La desviación estándar igual 0,04 % respalda la funcionalidad del método propuesto con más del 95 % de los datos de basicidad ternaria que se apegan al objetivo de 1,8 establecido, donde se conoce que el equilibrio favorece la protección del material refractario colocado en las paredes del horno de fusión.
5. El oxígeno disuelto medido en la etapa de fusión al momento de extraer las muestras de escoria no presentó ningún comportamiento válido para definir esta variable como un indicador cuantitativo de que se alcanzó la condición de escoria adecuada para la protección del material refractario.

6. La medición final del perfil de horno EAF, al cabo de las 1 100 coladas trabajadas para la campaña, evidenció un adecuado trabajo de la escoria, alcanzando condiciones que favorecieron la protección del material refractario colocado, registrando valores de menos desgaste.

RECOMENDACIONES

1. Caracterizar adecuadamente todos los materiales que se utilizan en la carga de horno en el proceso de fusión, para cuantificar la cantidad y la naturaleza de los óxidos que aportan, y que principalmente puedan afectar la saturación en el sistema de escoria de fusión.
2. Continuar con el estudio del modelo propuesto a lo largos de otra campaña, para conocer más a fondo si la variación en los tipos de chatarra que se clasifican para uso en el horno, puedan cambiar radicalmente la efectividad del modelo propuesto.
3. Profundizar en el impacto a nivel de costos, que tiene el uso sostenido de la cantidad de cales utilizadas, calculadas con el modelo propuesto, para el impacto a largo plazo.
4. Mantener la caracterización constante de los fundentes y otros materiales utilizados en el proceso de fusión del horno.
5. Continuar el estudio de la efectividad del modelo propuesto, estableciendo como objetivo distintos valores en el índice de basicidad ternario.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABN. *Tecnología de fabricación del acero líquido*. Brasil: Belo Horizonte. 1980. 164 p.
2. Asociación Española de Ingeniería Estructural. *5º Congreso Europeo de Acero. Producción de hornos eléctricos*. Barcelona, España: 1995. s/p.
3. BOZA, Maile. *Ciencia y futuro: utilización de las escorias de acería como material de construcción*. La Habana, Cuba: Universidad de Holguín, 2011. 40 p.
4. CASTRO, Madelaine. *La importancia de definir la muestra para las encuestas de satisfacción*. [en línea]. <<http://madeopina.blogspot.com/2017/12/la-importancia-de-definir-la-muestra.html>>. [Consulta: 10 de diciembre de 2020].
5. DA SILVEIRA, Rubens. *Fabricación de aceros en hornos eléctricos*. México D.F., México: Refractarios Mexicanos, 1997. 67 p.
6. DE LEÓN, Miguel Ángel. *La fabricación de acero en hornos eléctricos de arco en planta Sidegua*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1999. 127 p.

7. FALCONI, Vicente. *Tecnología de fabricación del acero líquido*. México D.F., México: Refractarios Mexicanos, 1980. 56 p.
8. GUTIÉRREZ, Daniel. *Reducción de los niveles de óxido ferroso de las escorias de hornos de arco eléctricos de Siderur-Casima*. Trabajo de graduación de Ing. de Materiales. Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2007. 87 p.
9. IISI. *Tecnología de inyección en la fabricación de fierro y acero*. Estados Unidos: Pittsburg, 1996. 23. p
10. _____. *Tecnología de los hornos eléctricos a arco*. Estados Unidos: Pittsburg, 1996. 660. p
11. JELLINHAUS, Manfred. *Fabricación de acero en hornos eléctricos*. México D.F., México: Oficina de Investigación y Diseño de Mecanismos, 1989. X p.
12. MAGNESITA. *Refractarios para siderurgia*. México D.F., México: Aciaria Eléctrica, 2000. 60 p.
13. MARTÍNEZ, Juan. *Refractarios*. México D.F., México: Refractarios Mexicanos, S.A. de C.V., 1970. 40 p.
14. MCLEAN, Ashley; COLEY, Komark. *Curso de escorias*. Nueva York, Estados Unidos: IAS, 1998. X p.

15. PLOCKINGER, Edward; ETTERICH, Osmar. *Electric furnace steel production*. New York, United States: Editorial John Wiley & Sons Ltd, 1985. 650 p.
16. PRETORIUS, Edmond; CARLISLE, Rysle. *Foamy slag fundamentals and their application to electric furnace steelmaking*. Chicago, United States: FEA, 1998. 88 p.

