

PROPUESTA DE MEJORA EN LA FORMACIÓN DE LA ESCORIA ESPUMOSA
EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO PARA LA DISMINUCIÓN EN LOS
TIEMPOS DE AFINO Y CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

ANGELICA MARÍA LOZADA CÁRDENAS
JORGE ANDRÉS HUERTAS FERRER

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA
BOGOTÁ D.C
2019

PROPUESTA DE MEJORA EN LA FORMACIÓN DE LA ESCORIA ESPUMOSA
EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO PARA LA DISMINUCIÓN EN LOS
TIEMPOS DE AFINO Y CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

ANGELICA MARÍA LOZADA CÁRDENAS
JORGE ANDRÉS HUERTAS FERRER

Proyecto de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C

2019

Nota de Aceptación

Ing. CLAUDIO ALBERTO MORENO ARIAS.
JURADO 1

Ing. JUAN ANDRES SANDOVAL HERRERA.
JURADO 2

Bogotá, D.C, Agosto 2019.

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente institucional y Rector del Claustro.

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados.

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingenierías.

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMEDI

Director Programa de Ingeniería Química.

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestos en el presente documento. Estos corresponden a los autores.

DEDICATORIA

A Dios, por darnos la fortaleza y sabiduría para afrontar cada uno de los retos durante el recorrido y permitirnos culminar esta etapa de nuestra formación profesional.

A nuestros padres y hermanos por su amor, compañía y apoyo incondicional en cada una de las etapas de nuestras vidas, siendo parte fundamental en nuestra formación como profesionales y como personas, gracias padres por todos sus esfuerzos que gracias a ellos estamos alcanzando muchos de nuestros sueños y metas con felicidad, amor y orgullo, gracias por siempre creer en nosotros y alentarnos a seguir a pesar de los momentos difíciles.

A Luis Antonio Lozada Barinas puente fundamental entre nosotros y la empresa para poder iniciar este proyecto colaborándonos en cada una de las etapas y motivándonos para dar lo mejor.

A nuestros seres cercanos, amigos y colegas, sin ellos este camino no habría sido tan alegre e inolvidable.

A todos los profesores que de una u otra forma estuvieron presentes en nuestro proceso de formación, gracias por cada enseñanza, por brindarnos tantas herramientas técnicas y humanas para poder ser grandes ingenieros químicos y poder contribuir de una manera positiva a la sociedad.

Culminar etapas en la vida no es sencillo, requiere de muchos esfuerzos y sacrificios, pero al final se ve reflejado en lo que nos vamos convirtiendo día a día.

Angelica Lozada Cárdenas y Jorge Huertas Ferrer.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Universidad de América, por acogernos estos años y ser parte de nuestra formación como profesionales.

A la empresa GERDAU DIACO S.A, por darnos la oportunidad y abrirnos sus puertas para desarrollar este proyecto, por confiar en nosotros y en nuestro conocimiento.

Al ingeniero metalúrgico Luis Conrado Suarez Hincapié jefe de calidad y gestión, por ser el director, por el apoyo incondicional en este proyecto, por sus conocimientos y consejos brindados, y por depositar su voto de confianza en nosotros desde el inicio.

A los ingenieros metalúrgicos Alexander Beltrán Aguilar y Juan David Sandoval Páez jefe de acería e ingeniero de procesos de acería, respectivamente, por ser nuestros codirectores, por darnos la oportunidad de desarrollar este proyecto, por su apoyo y compañía en todo momento del proyecto, por sus conocimientos, consejos y paciencia para llevar acabo cada una de las etapas del mismo.

A la ingeniera Sandra Liliana Mesa por ser nuestra orientadora, por guiarnos, aconsejarnos y apoyarnos en cada una de las etapas de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. MARCO TEÓRICO	24
1.1 ACERO	24
1.1.1 Definición	24
1.1.2 Propiedades físicas y químicas	24
1.1.3 Fabricación	26
1.2 ESCORIA	27
1.2.1 Definición	27
1.2.2 Producción de la escoria.	27
2. ETAPAS Y PARAMETROS INFLUYENTES EN LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA	29
2.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL ACERO	29
2.1.1 Recepción, clasificación e industrialización de la chatarra	31
2.1.2 Procesos de adaptación y/o preparación de la chatarra	32
2.1.2.1 Procesos de corte	32
2.1.2.2 Proceso de fragmentado	33
2.1.2.3 Proceso de compactación	34
2.1.3 Carga de cestas de chatarra al HEA	34
2.1.4 Fundición. Este proceso incluye dos etapas conocidas como fusión y afino	38
2.1.4.1 Fusión	38
2.1.4.2 Afino	39
2.1.5 Refino	45
2.1.6 Desescoriado	45
2.1.7 Vuelco o sangrando de acero líquido	46
2.1.8 Horno cuchara.	47
2.1.9 Colada continua	47
2.2 EMPLEO DE OXÍGENO	48
2.3 ENERGÍA QUÍMICA	48
2.3.1 Entalpía de reacción	48
2.3.2 Energía libre de Gibbs	50
2.4 ESCORIA ESPUMOSA	52
2.4.1 Propiedades físico químicas de la escoria espumosa	52
2.4.1.1 Estructura de la escoria	52

2.4.1.2 Viscosidad.	53
2.4.1.3 Composición química de la escoria.	55
2.4.1.4 Basicidad.	56
2.4.1.5 Densidad.	57
2.4.1.6 Tensión superficial	57
2.4.1.7 Efecto del FeO en la escoria	58
2.4.1.8 Saturación del MgO.	58
2.4.1.9 Índice de espumación.	60
2.5 REQUISITOS PARA LA OBTENCIÓN DE UNA BUENA ESCORIA ESPUMOSA	61
3. ALTERNATIVA DE MEJORA	63
3.1 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS INFLUYENTES EN LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA	63
3.1.1 Basicidad binaria (B2).	64
3.1.1.1 Efecto de B2 sobre la energía eléctrica	65
3.1.2 Densidad	67
3.1.3 Saturación de MgO.	68
3.1.3.1 Efecto del FeO en la scoria	70
3.1.4 Viscosidad.	71
3.1.5. Índice de espumación (Σ).	74
3.2 PROPUESTA DE MEJORA	77
4. EVALUACIÓN ALTERNATIVAS DE MEJORA.	86
4.1 METODOLOGÍA	86
4.2 COLADAS DE PRUEBA	87
4.2.1. Análisis de resultados	89
4.3 COMPARACIÓN DE LAS COLADAS REALIZADAS CON LAS DEL AÑO 2018	90
4.3.1. Composición de la escoria	91
4.3.2. Saturación de MgO	92
4.3.3. Energía eléctrica consumida	93
4.3.4. Índice de espumación	95
5. ANÁLISIS FINANCIERO	98
5.1 COSTOS DE MATERIA PRIMA Y SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	98
5.2 COMPARACIÓN DE COSTOS DEL AÑO 2018 Y 2019	98

6. CONCLUSIONES	102
7. RECOMENDACIONES	103
BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXOS	108

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Compuestos químicos en el acero	24
Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero.	25
Tabla 3. Composiciones de cal cálcica y dolomítica usados en HEA.	37
Tabla 4. Datos para cálculos de entalpías de formación.	49
Tabla 5. Datos para cálculo de energía libre de Gibbs.	51
Tabla 6. Composición y fuentes típicas de la escoria.	56
Tabla 7. Resultado base de datos para colada número 1 del año 2018.	63
Tabla 8. Tipos de escoria según basicidad binaria de las coladas del año 2018.	64
Tabla 9. Datos de composición máscas de la escoria colada número 1 para la normalización.	72
Tabla 10. Composiciones máscas normalizadas para los compuestos de la colada número 1.	72
Tabla 11. Fracción molar para los compuestos de la colada número 1.	73
Tabla 12. Composición general de la chatarra de GERDAU DIACO S.A	79
Tabla 13. Composición de cal calcica obtenida por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.	80
Tabla 14. Composición de cal dolomítica obtenido por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.	80
Tabla 15. Composición de antracita obtenida por laboratorio externo por análisis ASTM D3180-15.	80
Tabla 16. Composición de coque obtenido por laboratorio externo por análisis ASTM D3180-15.	80
Tabla 17. Composición de acondicionador obtenido por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.	81
Tabla 18. Cantidades obtenidas de los balances de masa con cal cálcica.	83
Tabla 19. Cantidades obtenidas de los balances de masa con acondicionador.	83
Tabla 20. Propuesta de materias primas con cal dolomítica.	84
Tabla 21. Propuesta de materias primas con acondicionador.	85
Tabla 22. Comparativo de materias primas en el 2018 y las propuestas 1 y 2.	86
Tabla 23. Materias primas para coladas de prueba.	87
Tabla 24. Composición de cal cálcica obtenido por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.	87
Tabla 25. Composición de cal dolomítica obtenido por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.	87
Tabla 26. Composición de acondicionador obtenido por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.	88
Tabla 27. Composición de coque obtenido por laboratorio externo por análisis ASTM D3180-15.	88

Tabla 28. Características de las coladas de prueba.	88
Tabla 29. Composición de la escoria de las corridas de prueba.	89
Tabla 30. Propiedades calculadas de las coladas de prueba.	89
Tabla 31. Densidades de las escorias de las coladas de prueba.	90
Tabla 32. Características de las colas seleccionadas del 2018.	91
Tabla 33. Composiciones de FeO, MgO y CaO en la escoria de las coladas del 2018 seleccionadas.	91
Tabla 34. Cantidad de materia prima por colada utilizada en años 2018 y 2019 y su respectivo valor.	98
Tabla 35. Costos del año 2018 y 2019 materia prima en el HEA y servicio de energía eléctrica.	100

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Elaboración de acero y diferentes líneas de producción.	26
Figura 2. Oxidación de los diferentes compuestos en el acero.	28
Figura 3. Partes de un horno de arco eléctrico.	30
Figura 4. Proceso de producción de acero en un horno de arco eléctrico.	30
Figura 5. Patios de chatarra planta Tuta GERDAU DIACO S.A y camiones de carga larga.	31
Figura 6. Imán para separación mecánica de chatarra planta Tuta GERDAU DIACO S.A	32
Figura 7. Sección de oxicorte en patios planta Tuta GERDAU DIACO S.A	33
Figura 8. Fragmentadora planta Tuta GERDAU DIACO S.A	34
Figura 9. Carga de cestas al HEA.	35
Figura 10. Arco eléctrico.	36
Figura 11. a) Puntos calientes y fríos en el HEA. B) Los puntos fríos son calentados por la inyección de oxígeno y gas.	39
Figura 12. Espectrofotómetro de emisión óptica	40
Figura 13. Muestra de acero por medio del muestreador CELOX.	41
Figura 14. Espectrómetro ARL OPTIM'X WDXRF	42
Figura 15. Muestra de escoria (ferroaleaciones).	44
Figura 16. Muestra tamizada de escoria	44
Figura 17. Prensa para pastillas y pastilla	45
Figura 18. Proceso de desescoriado.	46
Figura 19. Etapa de vuelco en el HEA.	46
Figura 20. Colada continua.	47
Figura 21. Arrastre y corte de palanquillas.	48
Figura 22. Estructura de la sílice tetraédrica fundida.	52
Figura 23. Diagramas de estabilidad isotérmica (ISD) para basicidades binarias de 1.5, 2.0 y 2.5 a una temperatura de 1600 °C.	59
Figura 24. Diagrama de estabilidad isotérmica. Donde $C_2S:Ca_2SiO_4$	60
Figura 25. Diagrama de caja y bigotes de energía eléctrica por tonelada de chatarra (kWh/ton).	66
Figura 26. Datos 2018 ubicados en ISD de $B_2=1.5$ a 1600 °C.	68
Figura 27. Datos 2018 ubicados en ISD de $B_2=2$ a 1600°C.	69
Figura 28. Datos 2018 ubicados en ISD de $B_2=2.5$ a 1600°C.	69
Figura 29. Composición de MgO en la escoria ubicado en ISD con %FeO de 26%	78
Figura 30. Diagrama para balances de masa.	79
Figura 31. Datos del 2019 ubicados en ISD de $B_2=2$ a 1600 °C.	93

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfica 1. Entalpía de reacciones a diferentes temperaturas.	50
Gráfica 2. Variación de Gibbs a diferentes temperaturas.	51
Gráfica 3. Energía eléctrica por tonelada de chatarra (kWh/ton) vs basicidad binaria (B_2) para los datos del 2018.	66
Gráfica 4. Energía eléctrica por tonelada de chatarra (kWh/ton) vs basicidad binaria para la acería Mobarake.	67
Gráfica 5. Energía eléctrica (kWh/ton) vs %FeO en la escoria para los datos del 2018.	70
Gráfica 6. Energía eléctrica (kWh/ton) vs %FeO en la escoria para la acería Mobarake	71
Gráfica 7. Índice de espumación (Σ) vs Basicidad Binaria (B_2).	75
Gráfica 8. Índice de espumación (Σ) vs Basicidad Binaria (B_2) en la empresa Mabarake.	76
Gráfica 9. Índice de espumación (Σ) vs %FeO.	76
Gráfica 10. Índice de espumación (Σ) vs %FeO para la acería Mabarake	77
Gráfica 11. Comparación de las composiciones de las escorias del 2018 y de la propuesta.	92
Gráfica 12. Energía eléctrica vs B_2 de las escorias del 2019.	94
Gráfica 13. Energía eléctrica vs %FeO de las escorias del 2019.	94
Gráfica 14. Índice de espumación (Σ) vs Basicidad Binaria B_2	95
Gráfica 15. Índice de espumación (Σ) vs %FeO.	96

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Entalpía de reacción.	48
Ecuación 2. Energía libre de Gibbs para la reacción.	50
Ecuación 3. Modelo de Urbain para el cálculo de la viscosidad	53
Ecuación 4. Cálculo del parámetro A del modelo de Urbain	54
Ecuación 5. Cálculo de la fracción molar de los formadores de vidrio XG	54
Ecuación 6. Cálculo de la fracción molar de los modificadores XM	54
Ecuación 7. Cálculo de la fracción molar de los anfoterós XA	54
Ecuación 8. Cálculo del parámetro B del modelo de Urbain	54
Ecuación 9. Cálculo Parámetro Ba del modelo de Urbain	55
Ecuación 10. Cálculo Parámetro Bb del modelo de Urbain	55
Ecuación 11. Cálculo Parámetro Bc del modelo de Urbain.	55
Ecuación 12. Cálculo Parámetro Bd del modelo de Urbain.	55
Ecuación 13. Cálculo α utilizado en los parámetros de Urbain	55
Ecuación 14. Basicidad binaria (B2)	56
Ecuación 15. Basicidad ternaria (B3)	56
Ecuación 16. Basicidad cuaternaria (B4)	57
Ecuación 17. Densidad de la escoria (ρ)	57
Ecuación 18. Tensión superficial en la escoria γ	58
Ecuación 19. Índice de espumación según Dicker	61
Ecuación 20. Índice de espumación según Ito y Fruehan	61
Ecuación 21. Normalización de %Wi	72
Ecuación 22. Fracción molar de los compuestos en la escoria	73
Ecuación 23. Cantidad de cal dolomítica en kg	81
Ecuación 24. Cantidad de CaO en la escoria (kg)	81
Ecuación 25. Cantidad de SiO ₂ en la escoria (kg)	82
Ecuación 26. Cantidad de cal cálcica	82
Ecuación 27. Cantidad de escoria producida (kg)	82
Ecuación 28. Cantidad de oxígeno a inyectar Nm ³	83
Ecuación 29. Cantidad de coque (kg).	84
Ecuación 30. Cálculo de precio de chatarra	99
Ecuación 31. Cálculo de precio de cal cálcica, dolomítica, acondicionador, coque y antracita	99
Ecuación 32. Cálculo del precio de energía eléctrica	99

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Memoria de cálculos	109
Anexo B. Resultados de entalpía de reacción para reacciones formadoras de óxidos	115
Anexo C. Resultados de la energía libre de gibbs para las reacciones formadoras de óxidos	117
Anexo D. Parámetros físico químicos de las escorias obtenidas en el 2018	119
Anexo E. Parámetros físico químicos de las escorias obtenidas en el 2019	120

LISTA DE ABREVIATURAS

HEA	Horno de Arco Eléctrico
BOF	Horno Básico de Oxígeno
TTT	Tiempo tap-to-tap
ISD	Diagrama de estabilidad isotérmico
XRF	Fuorescencia de rayos X
WDXRF	Dispersión por longitud de onda
OES	Espectroscopía de Emisión óptica
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales)
ppm	Partes por millón
s	Segundos
n_i	Coeficiente estequiométrico
ΔH_i	Entalpía de reacción del componente i (J/mol)
ΔG_i	Energía libre de Gibbs del componente i (J/mol)
η	Viscosidad de la escoria (Ns/m ²)
B_2	Basicidad binaria
ρ	Densidad de escoria (kg/m ³)
γ	Tensión superficial de escoria (N/m)
Σ	Índice de espumación (s)
%W_i	Composición másica del componente i en la escoria
X_i	Fracción molar del componente i en la escoria
M_i	Peso molecular del compuesto i (g/mol)
m_i	Masa del componente i (kg)
V_i	Volumen del componente i (Nm ³)
ec	Ecuación

GLOSARIO

HORNO DE ARCO ELÉCTRICO: horno donde se utiliza principalmente como fuente de hierro la chatarra. En este el calor es suministrado por electricidad en forma de arco que proviene de los electrodos de grafito hacia el baño metálico¹

TIEMPO TAP TO TAP (TTT): tiempo de un ciclo de trabajo entre dos sangrías, tiempo entre coladas.²

ESCORIA: llamada también slag, materiales no metálicos e impurezas presentes en los procesos de fundición y refino.³

VACIADO: vertimiento del metal fundido desde el horno a la cuchara o al molde.⁴

PALANQUILLA: forma de acero semi terminado que se utiliza para productos largos como: barras, canales u otras formas estructurales.⁵

CHATARRA: material ferroso (que contiene hierro) que por lo general es refundido y vaciado para formar acero nuevo.⁶

FUNDENTE: agente limpiador del hierro. Se utiliza cal para que reaccione con las impurezas del acero formando escoria que flota⁷

ESCORIA ESPUMOSA: se caracteriza por tener un volumen nueve veces mayor a las escorias normales debido a la existencia de burbujas de gas dentro de la masa líquida y se caracteriza por tener una consistencia cremosa⁸.

¹ CAP S.A. glosario de terminos siderurgicos. [en línea]. Santiago de Chile: la entidad. 10-18 p. [consultado 5, mayo, 2019]. disponible en: https://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/glosario_de_terminos_siderurgicos.pdf

² ALAS, Cesar y PÉREZ, Rafael. Diccionario de siderurgia: español-inglés, inglés- español. [en línea]. Oviedo: Universidad de Oviedo, 2003. 655 p. [consultado 5, mayo, 2019]. ISBN 8483173921. Disponible en: https://books.google.com.co/books?id=ErtcbG6RLWAC&pg=PA655&lpg=PA655&dq=Tiempo+tap+to+tap+metalurgia&source=bl&ots=syCvYvboso&sig=I_S9lozqXp0ooIWqaZocTxpjfuA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiT3lymt6TdAhUGyIMKHdXyCP0Q6AEwAXoECAkQAQ#v=onepage&q=Tiempo%20tap%20to%20tap%20metalurgia&f=false

³ Ibíid. p. 625.

⁴ Ibíid. p. 656.

⁵ CAP S.A. Op. Cit., p. 18

⁶ CAP S.A. Op. Cit., p. 10

⁷ CAP S.A. Op. Cit., p. 13

⁸ PAEZ, Juan, et al. Cap 1-5. En: Escuela técnica acería Gerdau. Escoria del horno de arco eléctrico. 2017. Cod. AC-226. p. 12-13. [Modulo]. [Consulta el 01 de agosto de 2018]. Disponible en: GERDAU DIACO S.A.

COLADA: se denomina al proceso que va a partir del material fundido en los hornos, luego se pasa a una cuchara y de esta a moldes llamados lingoteras⁹.

HORNO CUCHARA: el horno cuchara es un pequeño horno de arco eléctrico con un transformador, tres electrodos para calentar el arco y el cucharón que actúa como el almacén del horno. La operación ejecutada en el horno cuchara es una parte esencial del tratamiento de metalurgia secundaria, como el refinado, el ajuste de la temperatura del acero líquido y la composición química con el objetivo de aumentar la calidad del acero¹⁰.

REFRACTARIOS: los materiales resistentes al calor son refractarios cuando la temperatura de ablandamiento es igual o superior a 1500°C. Los más empleados en hornos de arco eléctrico son la dolomita y la magnesita pues son buenos resistentes al ataque de materiales básicos y son inertes al acero fundido¹¹.

⁹ ECURED. Colada del acero. [sitio web] Ecured: 2016. [consultado 5, mayo, 2019]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Colada_del_acero

¹⁰ STEEL UNIVERSITY. Horno cuchara. [sitio web]. Bruselas: World Steel Association. [Consultado 5, mayo, 2019]. Disponible en: <https://www.emaze.com/@AOFZTIWCW/ntc-6166>

¹¹ ENRÍQUEZ BERCIANO, José, et al. Tecnología del hacero parte I. [en línea]. Monografía. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid: 2009. [consultado 5, mayo, 2019]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/115195467/Berciano-Temps-Monografias-sobre-Tecnologia-del-Acero-Pt-I-Aceria-Elctrica>

RESUMEN

La escoria espumosa juega un papel importante en la producción del acero, específicamente durante el afino en el horno de arco eléctrico, donde se utiliza el arco generado por los electrodos para aumentar la temperatura hasta 1600 °C con el fin de hacer el vuelco del acero al horno cuchara. La escoria espumosa se encarga no solo de atrapar las impurezas en forma de óxidos que afectan la calidad del acero sino también permite que la energía del arco eléctrico pase directamente al acero fundido al cubrir los electrodos impidiendo además, el desgaste físico y químico excesivo de los refractarios. Por tal motivo se realiza un estudio de los componentes del proceso en el cual se afecta la generación de la escoria espumosa como la calidad de la materia prima, la disposición de la chatarra en el patio, y el afino en el HEA. Así mismo, se determinan las propiedades físicoquímicas que afectan la espumación de la escoria como la basicidad binaria, la densidad, la viscosidad, la composición de FeO en la escoria y la saturación de MgO.

Para encontrar las propiedades (basicidad binaria y porcentaje de FeO que mejoren la espumación de la escoria y disminuya el consumo de energía eléctrica, se realizan unas curvas que relacionan estas propiedades con el consumo de energía eléctrica y el índice de espumación, encontrándose un punto mínimo de consumo de energía eléctrica y un punto máximo para la espumación para valores de 26% para el FeO y una basicidad binaria de 1.91. Con estos se obtiene que el MgO se satura con un porcentaje de MgO del 7% para la planta en Tuta de GERDAU DIACO SA.

Con estos valores se hace una propuesta respecto a las cantidades de materias primas a utilizar en el horno de cal cálcica y acondicionador que cumplan con las propiedades mencionadas y que disminuyan el consumo de energía eléctrica y aumente la espumación de la escoria haciendo la comparación de las coladas del 2018 y 2019 en donde se realiza la propuesta. Al comparar los dos años se obtiene una disminución de 3 kWh/ton de energía y un aumento del índice de espumación de 3s, probando la mejora realizada en el proceso no solo con los beneficios de la escoria sino en la disminución de costos anuales del proceso.

Palabras clave: horno de arco eléctrico; escoria espumosa; afino; propiedades físico químicas; energía eléctrica.

INTRODUCCIÓN

El acero es uno de los productos más usados en el mundo gracias a sus propiedades y variedad de aplicaciones, la fabricación del acero se realiza en acerías al oxígeno y eléctricas, por medio de altos hornos y hornos de arco eléctrico (HEA) respectivamente. Según Paez, Juan, et al.¹² el funcionamiento del HEA es más flexible y genera un impacto ambiental menor, la competitividad mundial en la producción de acero conlleva al desarrollo continuo con el fin de tener mayor control y eficiencia de las materias primas e insumos, la escoria es una mezcla no metálica formada por óxidos, fluoratos, sulfatos y fosfatos, líquidas o parcialmente sólidas a la temperatura de fundición, presente en las etapas de producción del acero, afectando las características del producto y el desgaste de los equipos. La escoria espumosa es casi nueve veces mayor en volumen que una escoria convencional por la gran cantidad de burbujas de gas formadas en su interior.

De acuerdo con lo dicho por Chirivi, E y Garcia, D¹³ la industria siderúrgica tiene altos costos fijos y requiere de un intensivo capital. Su proceso productivo implica un gran impacto ambiental y mano de obra con alto nivel; motivo por el cual se convierte en un renglón importante en el espectro económico nacional. La eficiencia energética es de gran impacto en todo el sector industrial, especialmente, en las empresas del país que más gastan energía. Según XM, filial de ISA y encargada de la operación del Sistema Interconectado Nacional colombiano y de la Administración del Mercado de Energía¹⁴ las industrias que más energía eléctrica demandan en el país son la minera, siderúrgica, cementera, hidrocarburos y textil, la mina de níquel Cerro Matoso es la mayor consumidora, le siguen Occidental de Colombia (Oxy), Rubiales Meta, Diaco S.A., El Cerrejón y Acerías Paz del Río. En medio del gran impacto ambiental actual de las industrias y la necesidad de ahorrar energía, las empresas están tomando medidas para hacer sus industrias más eficientes. Según GJ comunicaciones¹⁵ en Colombia, en

¹² PAEZ, Op. Cit., p. 5.

¹³ CHIRIVI, Edwin y GARCIA, David. Industria siderúrgica y mercado del acero: caracterización y perspectivas. En: Informe económico para aceros ferrasa. octubre-diciembre del 2009. no 20. p. 2 párr 1. [Sitio web]. [Consulta el 19 de agosto de 2018]. Disponible en: https://camacol.co/sites/default/files/secciones_internas/EE_Coy20091222044525.pdf

¹⁴ Revista Dinero. La industria le apuesta al ahorro eléctrico En: REVISTA DINERO. Mayo, 2014 párr 5. [Sitio web]. [Consulta el 19 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.dinero.com/empresas/articulo/proyectos-eficiencia-energetica/196567>

¹⁵ GJ, comunicaciones. Gerdau Diaco contribuye a los esfuerzos del país para lograr una mayor eficiencia energética. En: CONSTRUDATA. Octubre, 2017. [Sitio web]. [Consulta el 20 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://www.construdata.com/Bc/Construccion/Noticias/gerdau-diaco-eficiencia-energetica-27-10-17.asp>

el 2015 la proporción y pérdida de energía útil del país fue de 48% y 52% respectivamente, conforme al Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética 2017-2022 del Ministerio de Minas y Energía, indica que hay muchas y diversas oportunidades de mejora en la transformación energética del país, especialmente desde el sector siderúrgico, que según el Balance Energético Colombiano consume aproximadamente el 30% de la energía final del país. Años atrás en la fabricación del acero solo se garantizaba la producción demandada de cantidad de acero por colada o día, actualmente con las nuevas técnicas además se busca eliminar del metal las impurezas nocivas indeseables del acero llevándolas a la escoria e impidiendo su paso inverso al metal con el fin que actué en la transferencia térmica del baño, es decir, que ayude a mantener la temperatura del baño y la transferencia uniforme del electrodo, evitar un desgaste excesivo de los refractarios, ayudar al control químico del acero por medio de la contención de óxidos provenientes del baño metálico y reducir las pérdidas de Fe del acero. Con todo lo anterior se busca bajar costos en refractarios, pues la incidencia del arco eléctrico sobre ellos es menor; disminuir pérdidas térmicas en las paredes del horno y mejorar transferencia de calor del arco hacia el acero, teniendo una disminución en el tiempo de fusión y aumentando la eficiencia eléctrica del horno, pues el arco queda cubierto por escoria y de esta manera principalmente tener un menor consumo energético ya que este representa el mayor gasto en la transformación de la chatarra en acero.

De acuerdo con la redacción GERDAU DIACO¹⁶ el ahorro de energía se transformó en un asunto fundamental para la empresa. Luego de la crisis energética que se presentó en Colombia el año 2016, para mejorar la grave situación que puso en amenaza de racionamiento eléctrico, empezando a marcar diferencia en la tendencia de industria inteligente cuyo objetivo es la digitalización de la industria a través de formas de producción mejor organizadas para obtener mayor capacidad de adaptación ante las necesidades y eficiencia en la asignación de recursos, optimización de tiempos empleados y la combinación de varias áreas de trabajo para así alcanzar puntos óptimos y hacer más productivo cada proceso.

El objetivo de este proyecto es determinar las etapas y parámetros fisicoquímicos influyentes en el proceso de espumación para realizar su análisis y así determinar su influencia o efecto sobre el consumo de la energía eléctrica y espumación; se realiza un estudio al histórico de las coladas del 2018 como punto de partida para plantear las mejoras operacionales y posteriormente evaluarlas y establecer el beneficio financiero.

¹⁶ GERDAU DIACO. Gerdau Diaco ha reducido en un 2,4% su consumo energético en el laminador de su planta de Tuta. En: ACIS. 2017. [Sitio web]. [Consulta el 20 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://acis.org.co/portal/content/gerdau-diaco-ha-reducido-en-un-24-su-consumo-energetico-en-el-laminador-de-su-planta-de-tuta>

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de mejora en el proceso de formación de la escoria espumosa en el horno de arco eléctrico para la reducción en los tiempos de afino y consumo de energía eléctrica en la acería GERDAU DIACO S.A en Tuta.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar las etapas y parámetros fisicoquímicos influyentes del proceso actual de espumación.
- Seleccionar las alternativas de mejora para la formación de escoria espumosa.
- Evaluar las alternativas seleccionadas mediante un desarrollo experimental.
- Realizar el análisis financiero asociado a la propuesta de mejora.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 ACERO

1.1.1 Definición. Con base en lo dicho por Brizuela, P y Garay, H ¹⁷ el acero es una aleación de hierro, carbono y pequeñas cantidades de silicio, manganeso, fósforo y azufre con diferentes proporciones, aunque la mayoría de aceros contienen menos del 0.5% de carbono, este puede llegar a tener un 2%, el azufre y fósforo son considerados impurezas.

1.1.2 Propiedades físicas y químicas. Según Vásquez A.¹⁸ la densidad media es de 7850 kg/m³, se puede contraer, dilatar o fundir en función a la temperatura, sus puntos de fusión y ebullición son aproximadamente 1375°C y 3000°C aunque estos puede variar de acuerdo con la aleación presentada siendo mayor en proporción al aumento en porcentaje de carbono.

Las propiedades químicas dependen de la composición química de los elementos como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Compuestos químicos en el acero

COMPUESTO	PROPIEDAD
Carbono	Al aumentarlo favorece la resistencia mecánica y dureza, pero, disminuye ductilidad.
Fosforo	Al aumentar el contenido de este adquiere características anticorrosivas y dureza, pero, baja la soldabilidad y la ductilidad.
Azufre	Afecta la soldabilidad y ductilidad.
Nitrógeno	Disminuye la tenacidad y soldabilidad y apresura el envejecimiento del material.
Oxígeno	

¹⁷BRIZUELA, P y GARAY H. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Hierro y acero. En: REVISTA VIRTUAL PRO. 2011. No. 110 Vol. 3, Cap. 73, p. 5. [Sitio web]. [Consulta 26 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.revistavirtualpro.com/revista/industria-del-acero/5>

¹⁸ VÁSQUEZ, Alberto. Trazabilidad de la Varilla de Acero para Construcción #3 como base para la elaboración de la Declaratoria Ambiental del Producto en ArcelorMittal Costa Rica. Proyecto final de graduación licenciado en ingeniería ambiental. Cartago.: Tecnológico de Costa Rica Ingeniería Ambiental. 2016. p. 19. [Sitio web]. [Consulta 12 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6798/trazabilidad-varilla-acero-construccion-base.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Tabla 1. (continuación)

Silicio	Usados como desoxidantes y desulfurantes.
Magnesio	

Fuente: elaboración propia, con base en: VÁSQUEZ, Alberto. Trazabilidad de la Varilla de Acero para Construcción #3 como base para la elaboración de la Declaratoria Ambiental del Producto en ArcelorMittal Costa Rica. Proyecto final de graduación licenciado en Ingeniería Ambiental. Cartago: Tecnológico de Costa Rica Ingeniería Ambiental. 2016. p. 19. Disponible en: <https://repositorio.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6798/trazabilidad-varilla-acero-construccion-base.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

De acuerdo al ingeniero Víctor Gómez¹⁹ las propiedades mecánicas del acero son las mostradas en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero.

PROPIEDAD	DEFINICIÓN
Dureza	Resistencia a la penetración realizada por otro material sobre la superficie.
Resistencia a la tracción	Es la fuerza máxima por unidad de área que soporta el material al ser estirado.
Ductilidad	Capacidad para deformarse sin romperse cuando se somete a esfuerzos de tracción.
Maleabilidad	Capacidad para soportar deformación sin rotura.
Fragilidad	Lo opuesto a la ductilidad, es decir, no tiene resistencia a cargas de impacto y se fractura aun en cargas estáticas sin previo aviso.
Tenacidad	Es la energía absorbida por el material durante el proceso de deformación y ruptura.
Elasticidad	Capacidad para regresar a su estado y tamaño original, cuando cesa la acción que ha producido la deformación.
Plasticidad	Capacidad de tomar nuevas formas y de quedarse en ellas.

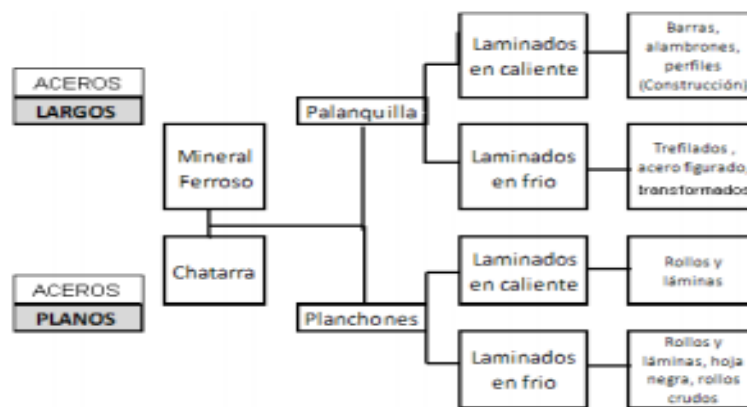
Fuente: elaboración propia, con base en: GOMEZ, Víctor. Clasificación de los aceros [diapositivas]. Facultad Regional Tucumán, el conjunto de guías de estudio de la materia materiales metálicos. Disponible en: <http://www.frt.utn.edu.ar/tecnoweb/imagenes/file/mecanica/Acero,%20Clasificaci%C3%B3n,%20Alumnos.pdf>

¹⁹ GOMEZ, Víctor. Clasificación de los aceros [diapositivas]. Facultad Regional Tucumán, el conjunto de guías de estudio de la materia materiales metálicos 13 diapositivas. [Sitio web]. [Consulta 26 agosto de 2018]. Disponible en: <http://www.frt.utn.edu.ar/tecnoweb/imagenes/file/mecanica/Acero,%20Clasificaci%C3%B3n,%20Alumnos.pdf>

1.1.3 Fabricación. “La fabricación de acero se desarrolló básicamente en el siglo XIX, al inventarse los procesos de fusión; el Bessemer (1855), el horno de hogar abierto, normalmente calentado a base de gas pobre (1864); y el horno eléctrico (1900). Desde mediados del siglo XX, el tratamiento con oxígeno — principalmente el proceso Linz-Donowitz (LD) de lanza de oxígeno— hizo posible la fabricación de aceros de alta calidad con unos costes de producción relativamente bajos.”²⁰

De acuerdo con Chirivi, E y Garcia, D.²¹ la industria siderúrgica abarca desde la obtención del acero hasta las líneas de producción como se muestra en la figura 1, en la obtención del acero hay dos procesos conocidos como siderurgia integrada y la semi-integrada, que parte del mineral ferroso y de chatarra ferrosa y ferroaleaciones respectivamente y las líneas productivas para la fabricación de productos largos (palanquilla) y planos (planchones), los cuales son enviados a laminación para la elaboración de los productos finales por procesos en caliente donde se obtienen barras, varillas, láminas y alambros para la actividad de edificación e infraestructura y frío donde se elaboran productos intermedios para las industrias metalmeccánica y automotriz, entre otras.

Figura 1. Elaboración de acero y diferentes líneas de producción.



Fuente: CAMACOL; COLOMBIA, COMITÉ SIDERÚRGICO COLOMBIANO “industria del acero en Colombia-2007”. Industria siderúrgica y mercado del hacer: características y perspectivas; 2009. Disponible en: https://camacol.co/sites/default/files/secciones_internas/EE_Coy20091222044525.pdf.

Actualmente la producción de acero se lleva a cabo por dos vías: en el horno básico de oxígeno (BOF) y en el horno de arco eléctrico (HEA) el cual según

²⁰ BRIZUELA y GARAY. *Op. cit.*, p.5

²¹ CHIRIVI, E y GARCIA, D. *Op. cit.*, p. 2.

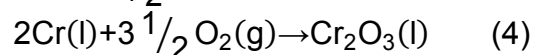
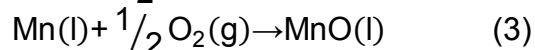
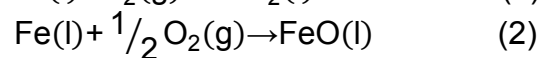
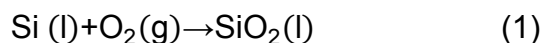
Unamuno²² tiene una participación de un tercio de la producción mundial y del 80% de la producción de GERDAU DIACO S.A y su participación en el mercado se debe principalmente a la posibilidad de trabajar con chatarra como punto de partida, siendo más económico y amigable con el medio ambiente.

1.2 ESCORIA

En la producción de acero es indispensable conocer las propiedades físicas y químicas de la escoria, así como las reacciones y los mecanismos que conlleva a su formación pues cumple un papel importante a la hora de disminuir los costos del proceso. En la industria siderúrgica hay un dicho muy famoso “cuida la escoria y el metal se cuidara solo” ya que esta, según Vieira²³ permite una transferencia térmica uniforme al baño líquido disminuyendo los tiempos de operación, proteger al refractario del arco y disminuir su desgaste por su compatibilidad, mantener controlado los niveles de óxidos evitando pérdidas excesivas, desfosforar el acero, y proteger al acero de la absorción del hidrógeno y el nitrógeno los cuales disminuyen la tenacidad del acero y son difíciles de remover del acero.

1.2.1 Definición. “La escoria es una mezcla no metálica formada por óxidos, fluoratos, sulfatos y fosfatos estando en fase líquida o parcialmente sólida a la temperatura de procesamiento de los metales, y está presente durante todas las etapas de fabricación del acero influyendo en las reacciones de afinado y desgaste de los equipos”²⁴.

1.2.2 Producción de la escoria. Al momento de inyectar oxígeno a la carga reacciona con Fe, Mn, Cr, Si, Al y otros compuestos en la carga, que de acuerdo con Unamuno²⁵ forman los correspondientes óxidos de cada elemento como se muestra a continuación:

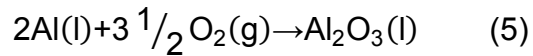


²² UNAMUNO, I. En: Escuela técnica acería Gerdau. Procesos HEA fusión y refinado. 2013. Cod. AC-210, AC-512. p. 7. [Consulta el 01 de agosto de 2018]. Disponible en: GERDAU DIACO S.A.

²³VIEIRA, Deisi, Análise comparativa da composição química de aço e escória e rendimento metálico de um fea entre parâmetros de carregamento e injeções distintos. Dissertação para obtenção do título de mestre em Engenharia. Porto Alegre. Universidade federal do rio grande do sul escola de engenharia. 2017. p. 42-43. [PDF]. [Consulta el 26 de agosto de 2018].

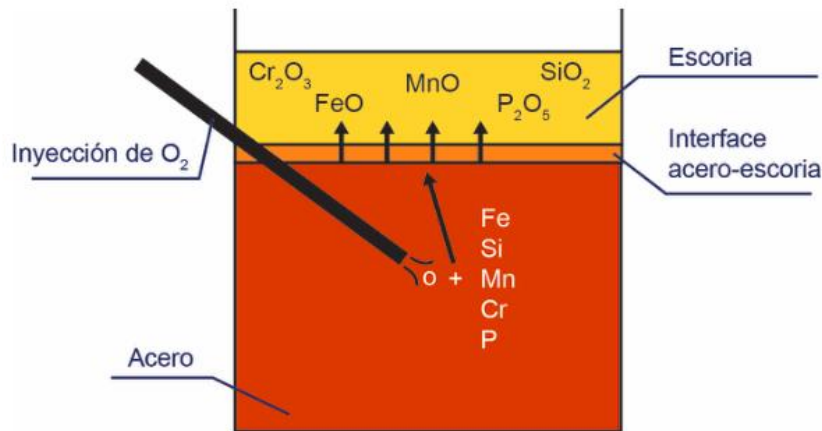
²⁴ PAEZ. Op. Cit., p. 6-63.

²⁵ UNAMUNO. Op. Cit., p. 50.



La cantidad de estos óxidos depende de la cantidad de los elementos químicos en el baño y la existencia de oxígeno. Al ser los óxidos menos densos que el hierro fundido, suben y son absorbidos por la escoria abriendo camino a que más hierro se oxide con la condición de que haya abastecimiento de oxígeno, lo suficientemente caliente para disolverse (ver Figura 2). Por ejemplo, “a 1600°C el acero puede disolver un máximo de 0.23% de O₂”²⁶. El acero también contiene carbono el cual también se oxida produciendo burbujas de monóxido de carbono. Otros óxidos que forman la escoria son agregados como el CaO y el MgO en forma de Cal cálcica y Cal dolomítica (o proveniente del desgaste de los refractarios básicos compuestos principalmente de MgO) respectivamente, otros están mezclados con la chatarra como la herrumbre (FeO) y tierra rica en SiO₂.

Figura 2. Oxidación de los diferentes compuestos en el acero.



Fuente: PAEZ, Juan, En: Escuela técnica acería Gerdau. Escoria del horno de arco eléctrico.

²⁶ PAEZ. Op. Cit., p. 8.

2. ETAPAS Y PARÁMETROS INFLUYENTES EN LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA

En este capítulo se encuentra el proceso de producción del acero en horno de arco eléctrico en la empresa GERDAU DIACO S.A y se menciona las características en la formación de la escoria espumosa, como sus componentes habituales y propiedades físicas influyentes en la espumación de escoria (viscosidad, densidad, basicidad, tensión superficial). Del mismo modo, se nombran los beneficios de tener una buena escoria espumosa. Todo lo anterior con el objetivo de entender mejor el proceso de producción del acero en HEA e ir encontrando criterios importantes que afecten el proceso.

2.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL ACERO

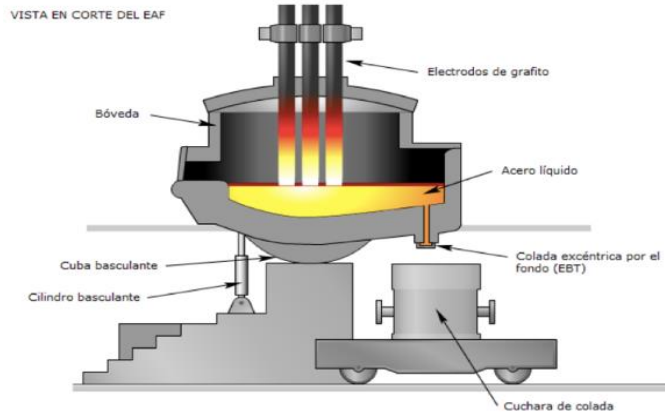
GERDAU DIACO S.A es uno de los principales proveedores de aceros largos en el mundo y productor del más amplio portafolio en Colombia, en la planta Tuta ubicada en la carretera central del norte kilómetro 27 vía Tunja-Paipa, cuya producción es de 29.000 ton de acero al mes a partir de chatarra, su producto final son las palanquillas que sirven de materia prima para la línea de productos como el acero figurado, alambrones lisos y barra corrugada que son elaborados en diferentes plantas.

Actualmente GERDAU DIACO S.A produce acero en horno de arco eléctrico (HEA) el cual es un cilindro recubierto por un refractario básico, tiene una bóveda por donde se alimentan las materias primas, una puerta que sirve para desescoriar y un compartimiento en la parte inferior para vaciar el acero líquido como lo muestra la figura 3, “es considerado un reactor electro-químico en el que se transforma los metales sólidos en acero líquido mediante las reacciones químicas exotérmicas y la energía eléctrica suministrada por un transformador trifásico”²⁷. La corriente eléctrica permite el calentamiento del metal debido al efecto Joule hasta fundir el material. Acorde con Unamuno²⁸ La producción de acero en horno de arco eléctrico consta de las etapas de fundición y de afino.

²⁷ MENDEZ, Sylvia Leonor. Control para la formación de escoria espumosa en hornos de arco eléctrico basado en la medición de armónicas. Informe final de cursos en cooperación técnica y desarrollo social como requisito parcial para optar al título de ingeniero electrónico. Sartenejas. Universidad Simón Bolívar. 2007. p. 4. [PDF]. [Consulta el 26 de septiembre de 2018].

²⁸ UNAMUNO. Op. Cit., p. 17.

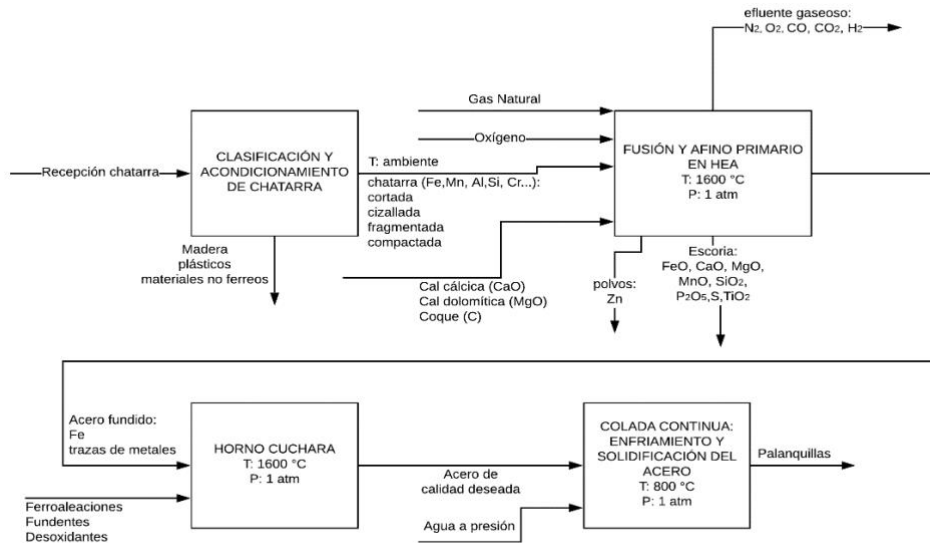
Figura 3. Partes de un horno de arco eléctrico.



Fuente: GILES, Alejandro Industrias I – FIUBA EAF. [Diapositivas], p. 14. CUAT 01-2014. [Consulta 12 de febrero de 2019]. Disponible en: <http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/Antiguo/2016%20-%20C/26%20Presentacion%20EAF.pdf>

La producción de acero consta de diferentes etapas como se muestran en la figura 4.

Figura 4. Proceso de producción de acero en un horno de arco eléctrico.



Fuente: elaboración propia.

2.1.1 Recepción, clasificación e industrialización de la chatarra. En GERDAU DIACO S.A la chatarra proviene de distintos centros de acopio del país o es llevada directamente a la planta por asociaciones de transportadores.

Figura 5. Patios de chatarra planta Tuta GERDAU DIACO S.A y camiones de carga larga.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se observa como la chatarra llega en camiones de carga a la Planta Tuta (Boyacá), donde deben ser registrados y dirigidos a una báscula para ser pesados con el fin de determinar la cantidad de chatarra ingresada gracias a la diferencia de pesos entre el inicial y después de realizar la descarga del total de la chatarra; se realiza una inspección visual del contenido y características del material ferroso ingresado con el fin de evitar elementos que representen peligro alguno en el proceso o hacia los trabajadores (ej: material no deseado en grandes cantidades o tanques presurizados, etc..) y a su vez se establece de acuerdo a su tamaño, proveniencia y composición el lugar de almacenamiento en los patios de chatarra existentes dentro de la planta; la clasificación se realiza mediante separación mecánica con ayuda de un imán tal como lo muestra la figura 6 y la chatarra pasa por diferentes procesos de adaptación o preparación por un proceso físico para llevarlo a las dimensiones, composiciones y especificaciones que son requeridas para poder ingresar al HEA mediante las diferentes cestas de carga.

Figura 6. Imán para separación mecánica de chatarra planta Tuta GERDAU DIACO S.A



Fuente: elaboración propia.

2.1.2 Procesos de adaptación y/o preparación de la chatarra. Existen tres procesos para la preparación de la chatarra como corte, compactación y fragmentación.

2.1.2.1 Procesos de corte. Se utilizan cuatro tipos de corte para disminuir el tamaño de la chatarra.

- **Oxicorte.** Utilizado para material denso y espeso, realizado de forma manual como se observa en la figura 7. Conforme a Rodríguez²⁹ inicia con el precalentamiento de la pieza con soplete o lanza utilizando parte del oxígeno y el gas combustible para generar una llama, la pieza se debe calentar hasta alcanzar la temperatura de combustión (donde adquiere tonalidad naranja brillante). Una vez alcanzada la temperatura de ignición en la pieza, se opera sobre el soplete o lanza para permitir la salida oxígeno puro, para enriquecer la atmósfera circundante de la pieza (ya precalentada), y así, utilizar la llama de precalentamiento como agente iniciador, dando lugar a la combustión (reacción altamente exotérmica) donde se desprende grandes cantidades de energía que actúa para hacer el proceso de corte. El óxido resultante de la combustión fluye por el corte, a la vez que sube la temperatura ayudando a mantener el proceso hasta realizar el corte deseado en las piezas.

²⁹ RODRIGUEZ, Hermenegildo. Los fundamentos de la técnica del oxicorte. En: Ingemecanica. 2. El proceso de oxicorte Tutorial n° 44. [Sitio web]. [Consulta 01 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn44.html>.

Figura 7. Sección de oxicorte en patios planta Tuta GERDAU DIACO S.A



Fuente: elaboración propia.

- **Tijeras.** Utilizada para elementos grandes, livianos de baja densidad y espesor, con el fin de reducir el tamaño de las piezas de chatarra.
- **Cizalla.** Disminuye la chatarra a un menor tamaño, debido a que el metal es sometido a dos bordes cortantes sin producción de residuos, ni empleo de soplete u otro método de fusión. La cizalla es utilizado para cortar y compactar.

2.1.2.2 Proceso de fragmentado: De acuerdo con Parra, L. y Sánchez, G³⁰ permite reducir el tamaño de la chatarra en pequeños trozos y separar sus componentes. Como lo muestra la figura 8 la fragmentadora consta de una tolva de alimentación. Un rotor donde se origina una aspiración que separa el polvo o restos de suciedad y donde se ubican los martillos que giran y trituran chatarra; después de ser triturado, es llevado por una cinta transportadora hasta una estación separadora. Además, esta tiene una alta capacidad ya que rompe y separa magnéticamente elementos ferrosos y no ferrosos.

³⁰ PARRA, L. y SÁNCHEZ, G. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica diaco. Municipio tuta boyacá. Programa de ingeniería Ambiental y sanitaria. Universidad de la Salle. Facultad de ingeniería. 2010. p. 30. [Sitio web]. [Consulta el 16 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/15030/T41.10%20P247a.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Figura 8. Fragmentadora planta Tuta GERDAU DIACO S.A



Fuente: elaboración propia.

2.1.2.3 Proceso de compactación: Es llevado a cabo con prensas móviles para facilitar el transporte y la ubicación, a la vez que se disminuye el volumen o espacio que ocupa la chatarra; se compactan materiales pequeños de metal para aumentar su densidad al momento de cargarla al horno.

Posterior al proceso de preparación la chatarra es almacenada de acuerdo a cada una de sus clasificaciones en el parque de metálicos para poder hacer la carga de la cesta según el requerimiento para la producción de acero en el horno de arco eléctrico.

2.1.3 Carga de cestas de chatarra al HEA. Las cestas de carga transportan el material metálico hacia el HEA a través de grúas. La capacidad aproximada es de 27 m³; actualmente se lleva acabo 4 procesos de carga al horno, el número de cestas que se cargan por colada es principalmente en función de la densidad de la mezcla de materiales ferrosos. Cada procedimiento de carga adicional tiene el potencial de aumentar el consumo total de energía de 3 a 6 kWh / ton debido a las pérdidas que se asocian al cierre y la apertura del HEA y la bóveda.

Figura 9. Carga de cestas al HEA.



Fuente: UNAMUNO, I. En: Escuela técnica acería Gerdau. Procesos HEA fusión y refino. 2013. Cod. AC-210, AC-512. Disponible en: GERDAU DIACO S.A.

La mezcla de materiales ferrosos, de acuerdo a Unamuno³¹ es diseñada bajo el supuesto de que los materiales permanecerán en la misma posición tal como fueron colocados en la cesta como lo muestra la figura 9.

- **Capa del fondo:** Es la primera que se descarga, está compuesta de materiales ferrosos livianos para amortiguar el impacto de materiales pesados y que al entrar en contacto con el líquido remanente presente en el HEA después de cada colada se funde velozmente permitiendo la rápida oxidación del carbono y la generación de calor.
- **Segunda capa:** Los materiales ferrosos pesados se deben colocar inmediatamente sobre la capa del fondo para evitar roturas de los electrodos y aumentar la densidad combinada de la carga.
- **Tercera capa:** Los materiales ferrosos semipesados debido a que no es probable que originen roturas en los electrodos. Es decir, no se debe cargar chatarra empaquetada en la parte superior puesto que puede provocar roturas en electrodos.
- **Capa superior:** Materiales ferrosos con una alta proporción superficie-peso para una rápida fusión durante la perforación en las columnas de electrodos.

Cuando el arco entra en contacto con la chatarra de la capa superior la bóveda queda expuesta y se utiliza un arco corto de bajo consumo para protegerla, los electrodos empiezan a realizar el proceso de perforación hasta terminar dicha

³¹ UNAMUNO. Op. Cit., p. 30-31.

capa y esta sirve como una barrera de protección a la bóveda y así, la longitud del arco puede acrecentar (ver Figura 10). Por lo general se coloca los formadores de escoria sobre la capa del fondo para que lleguen al baño líquido y se disuelvan más rápido. La carga del HEA puede tener 20% de materiales livianos, 50% de materiales semipesados y 30% de materiales pesados, donde, esta distribución es un referente y puede estar sujeta a algunas variaciones con el fin de mejorar económicamente el proceso HEA.

Figura 10. Arco eléctrico.



Fuente: elaboración propia.

Cuando se carga el HEA con una mezcla de diferentes grados de materiales ferrosos, la densidad de la carga varía de acuerdo con la mezcla. Por lo tanto, la carga del HEA tiene una densidad promedio que puede variar entre 0.75 ton/m³ y 1.30 ton/m³. A la mezcla requerida de chatarra en la primera cesta es adicionado cal cálcica, cal dolomítica, antracita gruesa, coque y/o acondicionador (óxidos de magnesio).

La cal cálcica y dolomítica son los principales formadores de escoria ya que dentro de sus funciones está la de retener las impurezas que se liberan durante el proceso (como por ejemplo los óxidos) y protege los refractarios pues al contener MgO evita su inclusión excesiva en la escoria. Las cales se clasifican en dolomítica si contiene entre el 5% al 30% de MgO y en cálcica si el contenido de MgO es inferior al 5%. En general, según UNAMUNO³² la cal es el agente formador de escoria más importante en la fabricación de acero en HEA y su tamaño de partícula debe ser de 3 a 15 mm y con la mínima cantidad de piezas finas (menores a 3 mm) ya que estas absorben el calor más rápido por tener un área superficial mayor causando la incineración del material. Esta debe contener más del 90 % de óxido de calcio para impedir que se gaste energía extra en la incineración de la cal. Otros factores a tener en cuenta al momento de escoger una buena cal para el HEA son el contenido de azufre el cual debe ser mínimo para evitar perjuicios en la calidad del acero, y la pérdida por ignición en donde se elimina el dióxido de carbono remanente en el material y el agua que absorbe el material del ambiente. La pérdida por ignición debe ser bajo pues durante el

³² UNAMUNO. Op. Cit., p.27-29.

proceso en el HEA se utilizará energía adicional para liberar el dióxido de carbono e hidrógeno que afectará al acero fundido. Tanto la cal cálcica como la dolomítica, se llevan a un laboratorio externo para conocer su composición mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos x sobre perla.

En la tabla 3 se muestra la composición en porcentaje en masa de una buena cal cálcica y dolomítica.

Tabla 3. Composiciones de cal cálcica y dolomítica usados en HEA.

Compuesto	Cálcica	Dolomítica
CaO (%)	95-96	56.4
MgO (%)	0.4 – 0.8	32.4
S (%)	0.01 – 0.04	0.009
Si (%)	0.3 – 0.8	0.11
CO ₂ (%)	1.5 – 3	9.2
H ₂ O (%)	0.5 – 0.8	0.77

Fuente: elaboración propia, con base en: UNAMUNO, I. En: Escuela técnica acería Gerdau. Procesos HEA fusión y refino. 2013. Cod. AC-210, AC-512. Disponible en: GERDAU DIACO S.A.

Los agentes carbonáceos tienen como función formar la escoria espumosa mediante la producción de CO que se da en la reacción entre el oxígeno y el carbono. Para este propósito se suele cargar a la cesta coque grueso o antracita gruesa la cual es la que más facilita la espumación de la escoria ya que las burbujas emergen desde el acero líquido. Por otro lado, durante el afino en el HEA se inyecta junto al oxígeno antracita fina por medio de unas lanzas que se apuntan manualmente encima de la escoria. Entre mayor contenido de carbono en la materia prima habrá mayor cantidad de carbono que reaccione con el oxígeno. El coque según Unamuno³³ tiene entre 90% a 95 % de C, pero tiene el problema de contener compuestos nocivos para el acero como azufre (2 – 3.5%), fósforo e hidrógeno. La antracita por el contrario, contiene menor cantidad de C (75 – 78 %) pero tiene menos contenido de azufre (0.2 – 0.5%).

La cantidad de carbono que se inyecta corresponde principalmente a una relación entre oxígeno/carbono que según Páez³⁴ es de 0.85, aunque también cobra importancia el porcentaje de carbono que se quiere obtener en el vuelco del acero a la cuchara y el contenido inicial porcentaje de carbono en la chatarra.

³³ UNAMUNO. Op. Cit., p.29.

³⁴ PAEZ. Op. Cit., p. 55.

Agregar carbono al proceso ayuda incluso a disminuir el consumo de energía ya que su reacción aporta energía química a la mezcla.

Para conocer la calidad de la antracita y coque se envía una muestra a un laboratorio externo en donde se determina humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo por medio del método ASTM D3180-15 el cual es una práctica estándar para el análisis de carbón y coque.

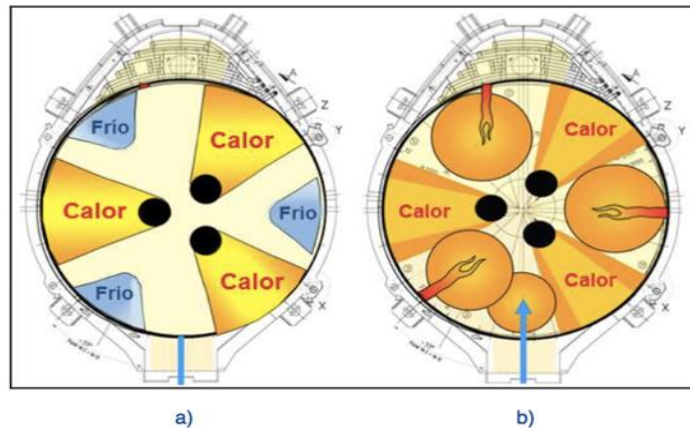
2.1.4 Fundición. Este proceso incluye dos etapas conocidas como fusión y afino.

2.1.4.1 Fusión. En esta etapa ocurren fases como la oxidación, desfosforación y formación de la escoria por lo que al finalizar se obtiene acero líquido y escoria.

- **Oxidación:** Se produce la oxidación del hierro contenido en la chatarra y el óxido de hierro a su vez oxida compuestos como el silicio y el magnesio, dando lugar a fuertes reacciones exotérmicas, donde se tiene un gran aporte de energía química; se alcanzan temperaturas de 1600°C. Se adiciona carbón con el fin de reducir el óxido de hierro presente en la escoria para lograr el paso del monóxido de carbono para formar la escoria espumosa.
- **Desfosforación:** El fósforo disuelto en la fundición provoca gran fragilidad en el acero sólido, por lo cual se le adiciona óxido de calcio removiéndolo de la fundición y pasándolo a la escoria.

Esta es la etapa en la que la chatarra pasa de estado sólido a líquido. El ciclo tap-to-tap inicia con la carga de la chatarra la cual debe ser la más densa posible con el fin de evitar varias cargas en el proceso, estar lo más limpia y libre de impurezas (Cu, Ni, Cr, Sn, Mo, P, S), pinturas y aceites pues afectan fuertemente las propiedades mecánicas del acero, pero materiales como el magnesio y el silicio son bienvenidos ya que ayudan a la formación de escoria y determinan la cantidad de reacciones que ocurrirán en el proceso. Para cargar el material, la bóveda y los electrodos del horno se levantan para vaciar la cesta por la parte inferior, luego se cierra la bóveda y los electrodos bajan y se encienden para formar un arco eléctrico con la carga metálica cediendo la energía calórica suficiente para alcanzar la temperatura de fusión del acero que es de 1,530 °C. Se suele dejar un sobrante de acero líquido de la colada anterior conocido como remanente con el fin de disminuir el tiempo de operación, el periodo de fusión es el que más consumo de energía presenta pues los electrodos están en su máximo y por lo tanto es el más costoso de todo el proceso, por lo cual se suele utilizar inyección de oxígeno y gas natural añadiendo energía química a través de las reacciones de combustión calentando los puntos fríos que no alcanza los electrodos de grafito (ver Figura 11). Los inyectores de oxígeno también tienen el propósito de cortar trozos de chatarra.

Figura 11. a) Puntos calientes y fríos en el HEA. B) Los puntos fríos son calentados por la inyección de oxígeno y gas.



Fuente: UNAMUNO, I. En: Escuela técnica acería Gerdau. Procesos HEA fusión y refinado. 2013. Cod. AC-210, AC-512. Disponible en: GERDAU DIACO S.A.

2.1.4.2 Afino. Luego de que la chatarra es fundida se inyecta oxígeno y antracita por lanzas supersónicas con el fin de formar la escoria espumosa la cual captura las impurezas con la oxidación de fósforo, silicio magnesio y otros elementos. Después se da la descarburación entre el carbono y el oxígeno inyectado con el de la atmósfera.

En la última fase en el horno de arco eléctrico, se toma una muestra por medio del CELOX para determinar los ajustes de ferroaleaciones para obtener la composición química adecuada de la escoria y del acero, el cual debe contener un máximo de 0.05% de carbono y 200 ppm de oxígeno, mientras que la escoria debe contener entre un 20-30% de FeO. De acuerdo con Chambergo³⁵ la composición química se controla variando la cantidad de cal, oxígeno y carbón (antracita o coque). Por otra parte, se eleva la temperatura del acero hasta 1630 °C para que este no se solidifique en el proceso de vaciado a la cuchara.

El muestreador CELOX es un instrumento que permite tomar la muestra del acero líquido y obtener información como la temperatura y la concentración de O₂ en

³⁵ CHAMBERGO, Jorge. Balance termodinámico en la fabricación del acero y optimización del patrón de carga metálica para minimizar costos de producción en el horno eléctrico de la corporación aceros AREQUIPA S.A. Trabajo de grado ingeniero químico. Trujillo- Perú. Universidad nacional de Trujillo. 2012. p. 20. [Sitio web]. [Consulta el 25 de agosto de 2018]. Disponible en: http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3422/ChambergoVargas_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ppm en el acero antes del vuelco hacia la cuchara. De acuerdo con Maes³⁶ el muestreador CELOX se introduce a través de la escoria a una profundidad de 30 a 40 cm y se debe esperar 8 a 10 segundos para obtener buenos resultados; sirve para un rango de temperatura desde 1570 °C hasta 1740 °C. El sensor CELOX desechable incluye una celda electroquímica para medir la fuerza electromotriz (FEM) y un termopar Pt/PtRh para medir la temperatura. Este puede medir desde 50 ppm y más de 1000 ppm de O₂ y también puede medir el contenido de carbono.

El análisis del acero y de la escoria es realizado por espectroscopia de emisión óptica (OES) y de fluorescencia de rayos X (XRF) respectivamente.

La espectroscopía de emisión óptica (OES) es una técnica analítica que se utiliza para determinar la composición de varios metales. El espectrofotómetro de emisión óptica, que se ve en la figura 12, requiere que la temperatura ambiente este entre 16 y 30 °C con un cambio mínimo de ± 5 °C por hora y una humedad relativa entre 20% y 80%.

Figura 12. Espectrofotómetro de emisión óptica



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con Sanders³⁷ el equipo utiliza un espectro visible y parte del espectro ultravioleta que va desde 120 nm hasta 800 nm y cuenta con tres partes fundamentales: fuente eléctrica, sistema óptico y un sistema informático. La fuente

³⁶ MAES, R. Celox for on-line process control in modern steelmaking. Heraeus Electro-Nite. p. 13. [Sitio web]. [Consulta el 05 marzo de 2019]. Disponible en: https://www.heraeus.com/media/media/hen/doc_hen/steel_applications/steelmaking/Celox_for_on-line_process_control_in_modern_steelmaking_-_Rudi_Maes.pdf

³⁷ SANDERS, Willy. What is optical emission spectroscopy (OES). Hitachi [sitio web]. 26 de octubre del 2017. [Sitio web]. [Consulta el 10 marzo de 2019]. Disponible en: [https://hha.hitachi-hightech.com/pt/blogs-events/blogs/2017/10/25/optical-emission-spectroscopy-\(oes\)/](https://hha.hitachi-hightech.com/pt/blogs-events/blogs/2017/10/25/optical-emission-spectroscopy-(oes)/)

eléctrica es usada para excitar los átomos de la muestra emitiendo una luz característica o líneas de emisión óptica a través de una chispa la cual es una serie de descargas múltiples en la que el voltaje del electrodo se conecta y desconecta. La diferencia potencial entre el electrodo y la muestra produce un descargue eléctrico el cual pasa a través de la muestra calentándola y vaporizándola para excitar los átomos del material con el fin de emitir las líneas de emisión característica del material. Estas líneas o plasma pasan al espectrofotómetro donde un difractor separa la luz entrante en longitudes de onda específicas del elemento y un detector mide la intensidad de luz para cada longitud de onda. La intensidad de luz es proporcional a la concentración del elemento en la muestra. Esto hace parte del sistema óptico. A través del sistema informático procesa las intensidades medidas a partir de una calibración con una muestra de referencia para obtener las composiciones elementales.

Para conocer la composición del acero que se obtiene en el HEA se realiza los siguientes pasos: primero se obtiene la muestra del acero fundido por medio del muestreador CELOX, en forma de pastilla de 1 cm de grosor, 3 cm del eje menor y 3.5 cm del eje mayor, como la que se muestra en la figura 13.

Figura 13. Muestra de acero por medio del muestreador CELOX.



Fuente: elaboración propia.

Según Thermo Electron Corporation³⁸ gracias a estas dimensiones la chispa del espectrofotómetro puede incidir sobre la muestra sin que exista insuficiencia por falta del material, además sus dimensiones permiten lijar la muestra sin que haya fractura. Para obtener una superficie plana y limpia sin partículas superficiales se utiliza una lijadora de disco la cual utiliza un papel abrasivo a base de aluminio y óxido de silicio mezclado con resina con grano “60” el cual es recomendado para desbastar la superficie. Luego se coloca la muestra en la cámara para la muestra evitando colocar los dedos sobre la superficie lijada y se ubica de tal forma que la chispa no incida sobre el centro de la muestra (alejado a uno 3 mm del centro) ya que la muestra es más homogénea en los bordes. Se cierra la cámara de muestra, se cargan los componentes en el computador (C, Mn, P, S, Si, Cr, Ni, Mo, Cu, Sn,

³⁸ THERMO ELECTRON CORPORATION. ARL 3460 metals analyzer Optical Emission Spectrometer. p. 15 [Sitio web]. [Consulta 10 de mayo de 2019]. Disponible en: <http://inotech.com.vn/manager/VanBan/ARL%203460%20Technical%20Description20176173494.pdf>

Al, Nb, V, W, Ti, As, Co, Pb, B, Ca, y Fe) y se corre en el computador el análisis el cual tarda aproximadamente 1 minuto.

La espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica analítica no destructiva usada para obtener información de distintos tipos de materiales ya que realiza un análisis de los elementos con concentración desde el 100% hasta el subnivel de ppm en cualquier tipo de muestra (sólidos, polvos sueltos o líquidos). Tiene diferentes aplicaciones como cemento, vidrio, acero y metales no ferrosos, entre otros. Esta técnica se divide en los sistemas de dispersión por longitud de onda (WDXRF) la cual es utilizada en la planta Tuta de GERDAU DIACO S.A y los sistemas de dispersión de energía (EDXRF), cuya diferencia radica en el sistema de detección.

- **Dispersión por longitud de onda (WDXRF).** según la empresa ThermoFisher scientific³⁹ en la técnica el tubo de rayos X funciona como fuente irradiando la muestra directamente y la fluorescencia originaria de la muestra se mide con un sistema de detección de dispersión por longitud de onda. Cada elemento tiene una radiación característica (propia o particular) que se puede identificar mediante el análisis de los cristales que separan los rayos X en función de la longitud de onda, una tras otra o en posiciones fijas, todas al mismo tiempo.

Figura 14. Espectrómetro ARL OPTIM'X WDXRF



Fuente: elaboración propia.

En la figura 14 se muestra el espectrómetro ARL OPTIM'X WDXRF el cual analiza elementos de carbono a uranio en una amplia variedad de muestras con precisión y confiabilidad, WDXRF es un método de prueba estándar para laboratorios analíticos (por ejemplo, normas ASTM e ISO).

³⁹ THERMO FISHER SCIENTIFIC, Thermo Scientific ARL OPTIM'X Series WDXRF Spectrometer. p. 2-7. [Sitio web]. [Consulta 10 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/brochures/XRF-BR41146-arl-optimx-wdxf-spectrometer.pdf>

De acuerdo con Servicios Alicante⁴⁰ tiene un principio básico, donde, utiliza la emisión fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X y dicha radiación desaloja electrones de capas interiores del átomo, los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes y el exceso energético resultante se disipa en forma de radiación X fluorescente, con una longitud de onda característica y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra. De acuerdo con la facultad de ciencias de la Universidad Nacional de educación a distancia⁴¹ la excitación es el choque de un electrón o fotón X incidente con un electrón de la capa interna del átomo que produce la expulsión de dicho electrón quedando el átomo en estado excitado y en la emisión este átomo tiende a volver inmediatamente a su estado fundamental, para lo cual se producen saltos de electrones de niveles más externos para cubrir el hueco producido. En este proceso hay un desprendimiento de energía, igual a la diferencia de energía de los niveles entre los que se produce el salto electrónico, en forma de radiación electromagnética correspondiente a la región de rayos X.

Para realizar el alistamiento para determinar composición química según Sandoval⁴² se hace la recepción de la muestra de ferroaleaciones, luego se procede a llevar a cabo un proceso de molienda aproximadamente por 180 segundos, donde, es muy importante que la cámara y los cuerpos moledores del molino estén perfectamente limpios como se ve en la figura 15.

⁴⁰ UNIVERSIDAD DE ALICANTE, servicios técnicos de investigación: Espectroscopia de fluorescencia de rayos x. [Sitio web]. [Consulta el 01 de diciembre de 2018]. Disponible en: <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/espectroscopia-de-fluorescencia-de-rayos-x.html>

⁴¹ UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACION A DISTANCIA. Espectrometría de fluorescencia de rayos X. p. 1-4. [Sitio web]. [Consulta el 05 de diciembre de 2018]. Disponible en: http://www.usc.es/export9/sites/webinstitucional/gl/investigacion/riaidt/raiosx/descargas/UNED_Curso_Fluorescencia.pdf

⁴² SANDOVAL, Juan. Preparación de muestras de ferroaleaciones para análisis por fluorescencia de rayos x. [diapositivas]. Aceros GERDAU DIACO SA. [Consulta 15 marzo de 2019] Disponible en: GERDAU DIACO S.A

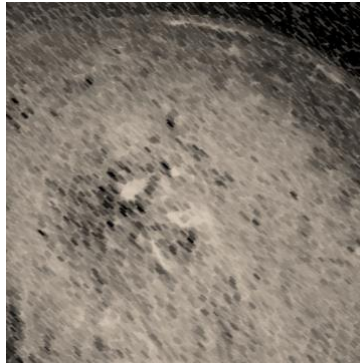
Figura 15. Muestra de escoria (ferroaleaciones).



Fuente: Elaboración propia.

Posterior a ello se verifica que el tamiz este completamente limpio asegurando que no contenga materiales indeseados o de muestras anteriores y se tamiza la muestra con el fin de obtener la escoria pulverizada fina como se muestra en la figura 16.

Figura 16. Muestra tamizada de escoria



Fuente: elaboración propia.

Se debe armar una pastilla con el aglomerante ácido bórico, para ello se deposita la mezcla en el anillo porta muestras y se lleva a la prensa (figura 17) para aplicarle 10 kN por 6-8 segundos luego se retira la presión y se extrae la pastilla formada.

Figura 17. Prensa para pastillas y pastilla



Fuente: elaboración propia.

Se debe efectuar un golpe suave contra el mesón para verificar la estabilidad de la pastilla, si se observa agrietamiento se debe repetir el procedimiento ya que esta pastilla no sirve, por último se retira la pastilla formada para seguir procedimiento operacional de análisis de escorias en espectrómetro.

2.1.5 Refino. El principal objetivo es extraer fósforo y carbono hasta un nivel inferior del indicado para el producto final ya que el fósforo se disuelve en fase ferrita de hierro. En esta fase, actúa como un potente endurecedor de solución sólida, y puede dar lugar a fragilidad en el acero. La oxidación de los elementos Si y Mn que están presentes en la fase metálica se produce durante la inyección de oxígeno y son incorporados en la escoria. El nitrógeno y el hidrógeno pueden ser liberados durante la fase de gas o a veces pueden ser absorbidos y disueltos en la fase de metal.

2.1.6 Desescoriado. Proceso de retirar la escoria como se ve en la figura 18 con el fin de eliminar las impurezas recogidas durante la fusión y refino. El horno se ladea hacia atrás 6° y se vierte la escoria fuera del mismo a través de la puerta de escoria. Este proceso se realiza con el fin de evitar la reversión de dichas impurezas al baño. Durante la formación de escoria espumosa, la escoria puede desbordarse por encima del nivel de acero a través de la puerta de escoria del HEA.

La escoria retirada del HEA se enfría con agua en el patio y se procesa para fabricar ladrillos que están en pruebas para su comercialización.

Figura 18. Proceso de desescoriado.



Fuente: elaboración propia.

2.1.7 Vuelco o sangrando de acero líquido. Una vez que se alcanza en el horno el contenido de carbón, oxígeno disuelto y la temperatura del acero líquido deseada para la colada, se abre la buza de vuelco del HEA y se inclina el horno 16° de manera que el acero se pueda verter a una cuchara y ser trasladado al horno cuchara como se ve en la figura 19. Se debe minimizar el paso de escoria del HEA a la cuchara ya que contiene elementos oxidados y puede disminuir el rendimiento del producto final, aumentar el consumo del refractario y el acero en la cuchara puede sufrir una refosforación.

Figura 19. Etapa de vuelco en el HEA.



Fuente: UNAMUNO, I. En: Escuela técnica acería Gerdau. Procesos HEA fusión y refino. 2013. Cod. AC-210, AC-512. Disponible en: GERDAU DIACO S.A.

Se realiza adiciones de aleaciones a la colada, basadas en el análisis de composición del baño y en la calidad de acero deseado. Se suelen agregar desoxidantes (comúnmente Al y Si) al acero para disminuir el contenido de oxígeno del baño para los procesos siguientes. Durante el vuelco se genera una nueva cobertura de escoria blanca, que a diferencia de la escoria negra del HEA, permite la desulfuración del acero y a reducción de los óxidos metálicos. Los escorificantes que forman la escoria blanca se agregan a la cuchara durante el vuelco de manera que la cobertura de la escoria se forme antes del traslado al horno cuchara. Además, en el proceso en el horno cuchara se pueden agregar escorificantes adicionales en caso de que la cobertura de la escoria sea insuficiente.

2.1.8 Horno cuchara. El acero líquido es transportado hacia el horno cuchara donde se realiza el afino secundario consiguiendo las características del acero deseado, adicionando ferroaleaciones, desoxidantes y fundentes que colaboran con la desoxidación y desulfuración del metal.

2.1.9 Colada continua. Se vierte el acero líquido sobre un molde cuya sección transversal tiene la forma geométrica de la palanquilla sin ninguna interrupción como se ve en la figura 20, la palanquilla sale continuamente hasta que la cuchara ha vaciado todo el acero líquido.

Figura 20. Colada continua.



Fuente: elaboración propia.

La solidificación inicia en el exterior y no es completa en el interior, esta solidificación se completa por la acción de chorros de agua a presión y suele terminar poco antes que todo el acero se solidifique y termina con enfriamiento al aire.

Según Enríquez Berciano, Jose⁴³ La barra no se pone en contacto con el mecanismo de arrastre formado por rodillos hasta que la solidificación en el interior es completa. Después, el semiproducto se corta a la longitud prevista y se traslada a los lugares de almacenamiento como lo muestra la figura 21.

⁴³ ENRÍQUEZ BERCIANO, monografías sobre tecnología del acero: colada del acero Parte II. Madrid, 2009. p. 36-37. [Sitio web]. [Consulta el 25 de noviembre de 2018]. Disponible en: http://oa.upm.es/1669/1/MONO_TREMPES_2009_01.pdf

Figura 21. Arrastre y corte de palanquillas.



Fuente: elaboración propia.

2.2 EMPLEO DE OXÍGENO

El oxígeno es adicionado con la finalidad de generar reacciones de oxidación en el interior del horno con los metales presentes, adquiriendo energía química y aprovechando el calor generado de llas reacciones exotérmicas y espontaneas. Esta oxidación tiene lugar en la fusión del acero y en el afino primario. Del mismo modo, el oxígeno inyectado por lanzas en utilizado para el corte de chatarra (oxicorte).

2.3 ENERGÍA QUÍMICA

La oxidación de los diferentes metales involucrados en el proceso desprenden calor a las temperaturas en las que trabaja el HEA. A continuación se aprecia el carácter exotérmico con la entalpía de cada reacción y si se dan de manera espontánea a las temeperaturas alcanzadas en el HEA.

2.3.1 Entalpía de reacción. Calor absorbido o desprendido de dicha reacción, para esto se debe tener la reacción correctamente ajustada y con los estados de agregación de todos los compuestos.

Ecuación 1. Entalpía de reacción.

$$\Delta H_r^\circ = \sum n_P \cdot \Delta H_{f,p}^\circ - \sum n_R \cdot \Delta H_{f,R}^\circ$$

Donde,

n_P : Coeficiente estequiométrico de los productos.

n_R : Coeficiente estequiométrico de los reactivos.

$\Delta H_{f,p}^\circ$: Entalpía de formación de los productos.

$\Delta H_{f,R}^\circ$: Entalpía de formación de los reactivos.

$\Delta H_r^\circ < 0$: Reacción exotérmica, valor negativo, es decir, la reacción o sistema desprende o libera calor al entorno.

$\Delta H_r^\circ > 0$: Reacción endotérmica, valor positivo, es decir, la reacción o sistema que absorbe calor del entorno.

De tal manera que para la reacción $\text{Si (l)} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{SiO}_2(\text{l})$ (1) en la tabla 4 se muestra los datos para cálculos de las entalpías de formación a una temperatura de 900K los cuales se obtienen de la base de datos Fact-Web que tiene un recopilados de propiedades termodinámicas de diferentes elementos comunes en la industrial siderúrgica y de materiales.

Tabla 4. Datos para cálculos de entalpías de formación.

Propiedad	Valor
T(K)	900
ΔH_{Si} (J/mol)	64531.6
ΔH_{O_2} (J/mol)	19240
ΔH_{SiO_2} (J/mol)	-860179.8

Fuente: elaboración propia, con base en: FactWeb, Compound-Web.

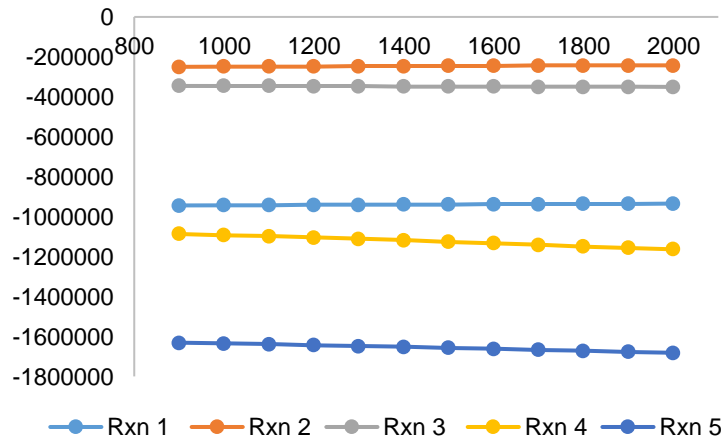
Usando la ecuación 1 y la información suministrada de la tabla 4 se calcula $\Delta H_{r(1)}^\circ$ de la siguiente forma:

$$\Delta H_{r(1)}^\circ = -860179.8 \frac{\text{J}}{\text{mol}} - (64531.6 + 19240) \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_{r(1)}^\circ = -943951.4 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Este cálculo es realizado para cada una de las reacciones a diferentes temperaturas consiguiendo el comportamiento en la gráfica 1.

Gráfica 1. Entalpía de reacciones a diferentes temperaturas.



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 1 se observa que todas las reacciones de oxidación que producen escoria son de carácter exotérmicas y su cambio con la temperatura es poco. Además se observa que la formación de Al_2O_3 es la que más energía adiciona durante la operación en el HEA. Esta información es importante tenerla en cuenta para conocer que no solo se provee al sistema de energía en forma eléctrica y de combustión por parte del oxígeno, sino también energía química que proviene de la formación de los óxidos que forman la escoria espumosa.

2.3.2 Energía libre de Gibbs. Es la predicción de ocurrencia de la reacción, es decir, si tiene lugar la reacción química, es un aspecto termodinámico, concretamente la variación en la energía libre de Gibbs entre reactivos y productos determina la espontaneidad.

Ecuación 2. Energía libre de Gibbs para la reacción.

$$\Delta G_f^\circ = \sum n_P \cdot \Delta G_{f,P}^\circ - \sum n_R \cdot \Delta G_{f,R}^\circ$$

Donde,

n_P : Coeficiente estequiométrico de los productos.

n_R : Coeficiente estequiométrico de los reactivos.

$\Delta G_{f,P}^\circ$: Energía libre de Gibbs de los productos.

$\Delta G_{f,R}^\circ$: Energía libre de Gibbs de los reactivos.

$\Delta G_f^\circ < 0$: La reacción se produce de manera espontánea.

$\Delta G_f^\circ > 0$: La reacción no se produce de manera espontánea.

De tal manera que para la reacción $\text{Si (l)} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{SiO}_2(\text{l})$ (1) se muestra en la tabla 5 los datos para llevar a cabo el cálculo a una temperatura de 900K tomado de la base de datos Fact-Web.

Tabla 2. Datos para cálculo de energía libre de Gibbs.

Propiedades	Valor
T(K)	900
ΔG_{Si} (J/mol)	-2404,9
ΔG_{O2} (J/mol)	-196695,5
ΔG_{SiO2} (J/mol)	-964376,2

Fuente: elaboración propia, con base en: FactWeb, Compound-Web.

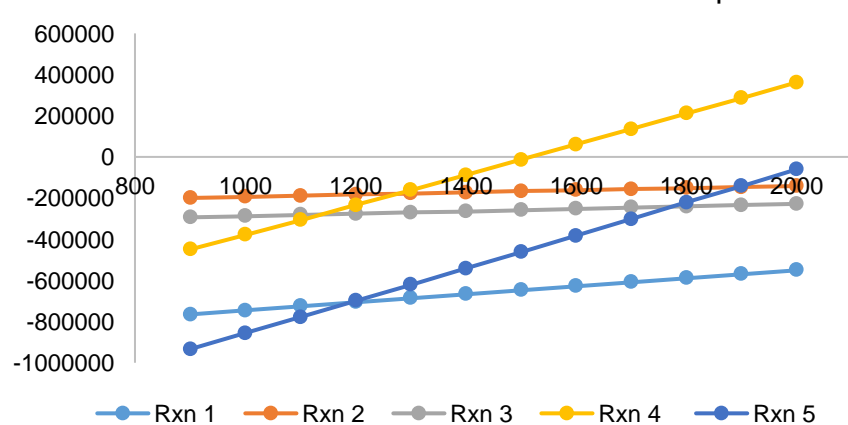
Para obtener $\Delta G_{(1)}^\circ$ se utiliza la ecuación 2 con la información de la tabla 5

$$\Delta G_{(1)}^\circ = -2404,9 \frac{J}{mol} - (-196695,5 - 964376,2) \frac{J}{mol}$$

$$\Delta G_{(1)}^\circ = -765275,8 \frac{J}{mol}$$

Este cálculo es realizado para cada una de las reacciones a diferentes temperaturas, obteniendo el siguiente comportamiento en la gráfica 2:

Gráfica 2. Variación de Gibbs a diferentes temperaturas.

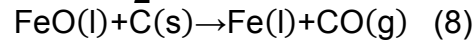
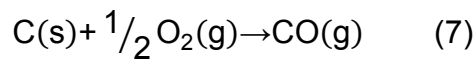


Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica 2 las reacciones 1, 2, 3 y 5 son reacciones espontáneas en la temperatura de operación del horno de arco eléctrico (hasta 1873 K). Por otro lado se observa que la formación de Cr_2O_3 a temperatura de afino no es espontánea, por lo tanto las impurezas no se alojan en la escoria sino en el acero como Cr, pero en la chatarra este compuesto se encuentra en un 0.13%. Un comportamiento similar se ve con la reacción 5 en la que se obtiene Al_2O_3 pero en esta se mantiene espontánea en las temperaturas que se alcanzan en el HEA.

2.4 ESCORIA ESPUMOSA

Su producción se da durante el afino primario y se caracteriza por tener un volumen 9 veces mayor que la escoria convencional debido a la formación de burbujas que son atrapadas en la escoria por la afluencia de partículas sólidas de CaO y MgO. Las burbujas son monóxido de carbono y en menor proporción están compuestas de CO₂ generadas en la postcombustión del CO y burbujas pequeñas son mejores pues son más estables. Como lo menciona Páez⁴⁴, el CO puede producirse a través del carbono alimentando junto con la chatarra o a través de la reacción entre el C inyectado en el afino con FeO como se muestra en las siguientes reacciones.

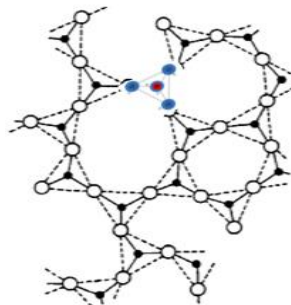


Entonces para producir una buena escoria espumosa se inyecta primero oxígeno en la fase líquida para formar FeO y luego se inyecta C en la interface baño escoria para que ocurran las reacciones antes vistas.

2.4.1 Propiedades físico químicas de la escoria espumosa. Conocer las propiedades físicas y químicas de la escoria espumosa no solo permiten entender mejor el proceso sino además de acuerdo con Vieira⁴⁵, da la posibilidad de mejorar el proceso por el hecho que algunas variables del proceso como la eficiencia del refinado en el acero, el desgaste de los refractarios, el consumo de energía eléctrica y el rendimiento metálico dependen de estas propiedades.

2.4.1.1 Estructura de la escoria. Está compuesta primordialmente por silicatos en forma tetraédrica que unidos entre si forman una cadena del mismo como se puede observar en la Figura 22.

Figura 22. Estructura de la sílice tetraédrica fundida.



Fuente: PAEZ, Juan, En: Escuela técnica acería Gerdau. Escoria del horno de arco eléctrico.

⁴⁴ PAEZ. Op. Cit., p. 15.

⁴⁵ VIEIRA. Op. Cit., p. 47.

Los óxidos metálicos (CaO, FeO, MgO) rompen esta red y se unen donde fue dividida haciendo que la escoria sea más fluida y por tanto la viscosidad disminuye. Como dice Unamuno⁴⁶ una buena escoria tiene apariencia cremosa.

2.4.1.2 Viscosidad. Es un parámetro influyente en la formación de escoria espumosa y se ve afectada por la composición y la temperatura. La viscosidad de la escoria disminuye con el aumento de la temperatura, por otro lado, como menciona Luz⁴⁷, esta puede variar según la cantidad de CaO y MgO (óxidos refractarios), y de Al₂O₃, SiO₂, FeO y CaF₂ (óxidos fluidificantes); si aumenta los óxidos refractarios la viscosidad de la escoria aumenta y puede volver crujiente la escoria y no espumaria, pero si aumenta los óxidos fluidificantes la viscosidad de la escoria baja a tal punto que puede llegar a dañar los refractarios y la espumación. Por lo tanto se debe buscar una relación óptima de estos óxidos que preparen una escoria espumosa adecuada. El cálculo de viscosidad se puede realizar por medio de modelos empíricos o modelos estructurales. Mientras que los empíricos utilizan la temperatura y la composición de la escoria de forma experimental para el cálculo de la viscosidad, los modelos estructurales consideran la profunda estructura interna de los fundidos de silicato y este tipo de modelos son más precisos y flexibles a la hora de utilizarlos. De acuerdo con Han⁴⁸ el modelo estructural de Urbain es un perfecto predictor de viscosidad cubriendo una amplia gama de sistemas de múltiples componente. Según Kekkonen, Oghbasilasie y Louhenkilpi⁴⁹, el modelo de Urbain considera la dependencia de la viscosidad con respecto a la temperatura por medio de la ecuación de Arrhenius modificada:

Ecuación 3. Modelo de Urbain para el cálculo de la viscosidad

$$\eta = A \cdot T \cdot \exp\left(\frac{1000 \cdot B}{T}\right)$$

Donde η es la viscosidad en poises (P), T es la temperatura en K, A es el factor pre-exponencial y B representa la energía de activación integral.

⁴⁶ UNAMUNO. Op. Cit., p. 161.

⁴⁷ LUZ, A.G. et al. Slag foaming practice in the steelmaking process. *Ceramics International*. EN: CERAMIC INTERNATIONAL .2018. p. 15. [PDF]. [Consulta el 12 de agosto de 2018].

⁴⁸ HAN, Chan. Viscosity studies of high-temperature metallurgical slags relevant to iron making process. Tesis de doctorado. Queensland: Universidad de Queensland. 2017. 94 p. [Sitio web]. [Consulta el 20 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:689105>

⁴⁹ KEKKONEN, Marko; OGHBASILASIE, Haile y LOUHENKILPI, Seppo. Viscosity models for molten slags. *Aalto University Science + Technology*. 2012. 13-14 p. [Sitio web]. [Consulta el 25 de enero de 2019]. Disponible en: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/3640/isbn9789526046037.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

En la ecuación 3 la energía de activación representado por B de acuerdo con HAN⁵⁰ describe la suma de energía requerida para el movimiento de los componentes (CaO, MgO, FeO entre otros que forman la escoria) que rompen la red de silicato para alcanzar otras posiciones de equilibrio, mientras que factor pre-exponencial representado por la letra A tiene una relación con la energía de activación con la siguiente expresión:

Ecuación 4. Cálculo del parámetro A del modelo de Urbain

$$\ln A = - 0.29B - 11.57$$

De acuerdo con Kekkonen, Oghbasilasie y Louhenkilpi⁵¹ el modelo de Urbain clasifica los componentes de la escoria en: formadores de vidrio (X_G) encargados de crear la red (estos aumentan la viscosidad), los modificadores (X_M) encargados de romper la red permitiendo la movilidad de la escoria (estos disminuyen la viscosidad), y los anfóteros (X_A) que se comportan como óxidos ácidos o básicos cuando hay insuficiencia de estos óxidos. A continuación se muestra los componentes que representan estos grupos.

Ecuación 5. Cálculo de la fracción molar de los formadores de vidrio X_G

$$X_G = X_{SiO_2} + X_{P_2O_5}$$

Ecuación 6. Cálculo de la fracción molar de los modificadores X_M

$$X_M = X_{CaO} + X_{MgO} + X_{FeO} + X_{MnO} + X_{CrO} + X_{NiO} + X_{Na_2O} + X_{K_2O} + X_{Li_2O} + 2X_{TiO_2} + 2X_{ZrO_2} + 3X_{CaF_2}$$

Ecuación 7. Cálculo de la fracción molar de los anfóteros X_A

$$X_A = X_{Al_2O_3} + X_{Fe_2O_3} + X_{B_2O_3} + X_{Cr_2O_3}$$

Se deben normalizar X_G , X_M y X_A ya que el modelo de Urbain funciona predominante sobre la base de M_xO por lo que crea iones extra por lo cual se debe dividir X_G , X_M y X_A entre $(1 + X_{TiO_2} + X_{ZrO_2} + X_{CaF_2})$ obteniendo X_G^* , X_M^* y X_A^* .

Para calcular B se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Cálculo del parámetro B del modelo de Urbain

$$B = B_a + B_b X_G^* + B_c (X_G^*)^2 + B_d (X_G^*)^3$$

⁵⁰ HAN. Op Cit., p 97.

⁵¹ KEKKONEN, OGHBASILASIE y LOUHENKILPI. Op Cit., p. 13.

Donde B_a , B_b , B_c y B_d son parámetros del modelo de Urbain, y se calculan con las siguientes ecuaciones:

Ecuación 9. Cálculo Parámetro B_a del modelo de Urbain

$$B_a = 13.8 + 39.9355 \alpha - 44.049 \alpha^2$$

Ecuación 10. Cálculo Parámetro B_b del modelo de Urbain

$$B_b = 30.481 - 117.1505 \alpha + 139.9978 \alpha^2$$

Ecuación 11. Cálculo Parámetro B_c del modelo de Urbain.

$$B_c = -40.9429 + 234.0486 \alpha - 300.04 \alpha^2$$

Ecuación 12. Cálculo Parámetro B_d del modelo de Urbain.

$$B_d = 60.7619 - 153.9276 \alpha + 211.1616 \alpha^2$$

Ecuación 13. Cálculo α utilizado en los parámetros de Urbain

$$\alpha = \frac{X_M^*}{X_M^* + X_A^*}$$

2.4.1.3 Composición química de la escoria. Los compuestos que forman la escoria pueden provenir del material cargado o del material formado durante el proceso. Por ejemplo el FeO se obtiene de la chatarra y de la oxidación del acero, el SiO₂ proviene de las impurezas (tierra) de la chatarra, el CaO es agregado intencionalmente, así como el MgO que incluso se puede conseguir del desgaste de los refractarios, óxidos de Mn, Cr, Al entre otros se generan también por la inyección de O₂. La composición de la escoria de acuerdo con Paez⁵² se suele representar en términos de los óxidos que lo conforman y el color de esta puede ser un buen indicador de su calidad y su composición que normalmente es oscura cuando está solidificada, a consecuencia de la presencia del óxido de hierro. A continuación, en la tabla 6 se muestra la composición más común de la escoria y su fuente de origen.

⁵²PAEZ. Op. Cit., p. 25.

Tabla 6. Composición y fuentes típicas de la escoria.

Compuesto	Porcentaje	Fuente
CaO	35-50	Adicionado como cal cálcica y refractarios (58% CaO -39% Mg)
MgO	5-15	Adicionado como cal dolomítica y refractarios (58% CaO -39% Mg)
SiO ₂	10-25	Como tierra u oxidación del Si en el acero
FeO	20-45	Oxidación del Fe en el acero
MnO	4-10	Oxidación del Mn en el acero
Al ₂ O ₃	4-12	Oxidación del Al del acero o adicionado
CaF ₂	<1	Adicionado
P ₂ O ₅	<1	Oxidación del P en el acero

Fuente: PAEZ, Juan, En: Escuela técnica acería Gerdau. Escoria del horno de arco eléctrico. 2014.

2.4.1.4 Basicidad. En la escoria los componentes capaces de donar aniones de O₂ como el CaO y el MgO son considerados como básicos mientras que los que captan estos aniones se les considera ácidos como por ejemplo el SiO₂, Al₂O₃, FeO, MnO y P₂O₅. Como lo menciona Kipepe y Pan⁵³ se requiere un exceso de óxidos básicos para formar una excelente escoria manteniendo un equilibrio con los óxidos ácidos lo cual ha llevado a realizar varias definiciones sobre la basicidad:

Ecuación 14. Basicidad binaria (B₂)

$$\text{Basicidad binaria (B}_2\text{)} = \frac{\%CaO}{\%SiO_2}$$

Ecuación 15. Basicidad ternaria (B₃)

$$\text{Basicidad ternaria (B}_3\text{)} = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$$

⁵³ KIPEPE, T y PAN, X. Importance and Effect of Foaming Slag on Energy Efficiency. En: world foundry congress (19-21, mayo 2014. Pallacio Euskalduna, BILBAO). Importance and Effect of Foaming Slag on Energy Efficiency. BILBAO. Department of Extraction Metallurgy, Faculty of Engineering and the Built Environment, University of Johannesburg Johannesburg, South Africa. 2014. p. 4. [Sitio web]. [Consulta 22 agosto de 2018]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/54187641.pdf>

Ecuación 16. Basicidad cuaternaria (B_4)

$$\text{Basicidad cuaternaria } (B_4) = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$$

Según Páez⁵⁴, una escoria se considera ácida cuando la basicidad binaria está por debajo de 1.5 y se considera básica cuando es mayor a este valor. En GERDAU DIACO S.A se considera que una escoria es buena cuando la basicidad binaria esta entre 1.7- 2.2, cuando está por encima de este valor afecta la absorción de óxidos y el desecoriado, y cuando está por debajo de 1.7 la escoria es muy fluida dificultando la espumación y el desgaste de refractarios es mayor.

2.4.1.5 Densidad. Generalmente este valor en la escoria es de “2-4 g/cm³ mientras que el acero tiene una densidad de 7 g/cm³ lo que hace que la escoria flote en el acero; además, la cantidad de escoria se ve favorecida por una densidad baja ya que se tiene la misma masa ocupando un menor volumen”⁵⁵. De igual forma, permite conocer el porcentaje de FeO indirectamente con la densidad siendo así alta con un porcentaje FeO alto y viceversa. Para el sistema (CaO+MgO SiO₂)-FeO Mills y Kenne⁵⁶ definieron la siguiente expresión para calcularla:

Ecuación 17. Densidad de la escoria (ρ)

$$\rho = 2.46 + 0.018 (\%FeO) \frac{g}{cm^3}$$

2.4.1.6 Tensión superficial. Según Conejo, Torres y Cuellar⁵⁷, cuando el tamaño de la burbuja es pequeño (<2mm) se observa una espumación de la escoria intenso y para lograrlo se debe disminuir la tensión superficial ya que se disminuye el ángulo de contacto para el sistema metal-gas-escoria gracias a la disminución de FeO como se puede ver en la siguiente ecuación:

⁵⁴ PAEZ. Op. Cit., p. 30.

⁵⁵ PAEZ. Op. Cit., 34-35p.

⁵⁶ MILLS, K.C y KENEE, B.J. Physical properties of BOS slags. Citado por CONEJO, A.N, TORRES, R y CUELLAR, E. análisis industrial del a reducción de óxido de hierro mediante la inyección de finos de carbono. En: REVISTA METALURGICA. Enero, 1999. Vol. 35, no. 2, p 111-125.

⁵⁷ CONEJO, A.N, TORRES, R y CUELLAR, E. análisis industrial del a reducción de óxido de hierro mediante la inyección de finos de carbono. Enero, 1999. Vol. 35, no. 2, p 111-125. En: REVISTA DE METALURGIA. [Sitio web]. [Consulta el 02 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>

Ecuación 18. Tensión superficial en la escoria y

$$\gamma = 0.75 - 0.57 \left[\frac{\%SiO_2}{100} \right] - 0.137 \left[\frac{\%FeO}{100} \right] \text{ dina} \cdot \text{cm}^{-1}$$

“En general, un aumento en el FeO tiene un efecto mayor sobre la viscosidad que sobre la tensión superficial por lo que aumentar su concentración disminuye el espumamiento de la escoria”⁵⁸

2.4.1.7 Efecto del FeO en la escoria. El FeO tiene un gran impacto en la viscosidad de la escoria ya que es uno de los óxidos fluidificantes de mayor composición en esta, y para obtener las proporciones adecuadas, se debe encontrar la relación óptima de inyección de oxígeno y carbono, el primero lo forma y el segundo lo desoxida consiguiendo una buena espumación y rendimiento metálico. Aminorraya y Edris⁵⁹ encontraron para una basicidad binaria de 2.2 un menor consumo de energía cuando el porcentaje de FeO se encontraba entre los valores de 20-25% inyectando en total de 9 kg/min de C y 2300 m³/h de oxígeno.

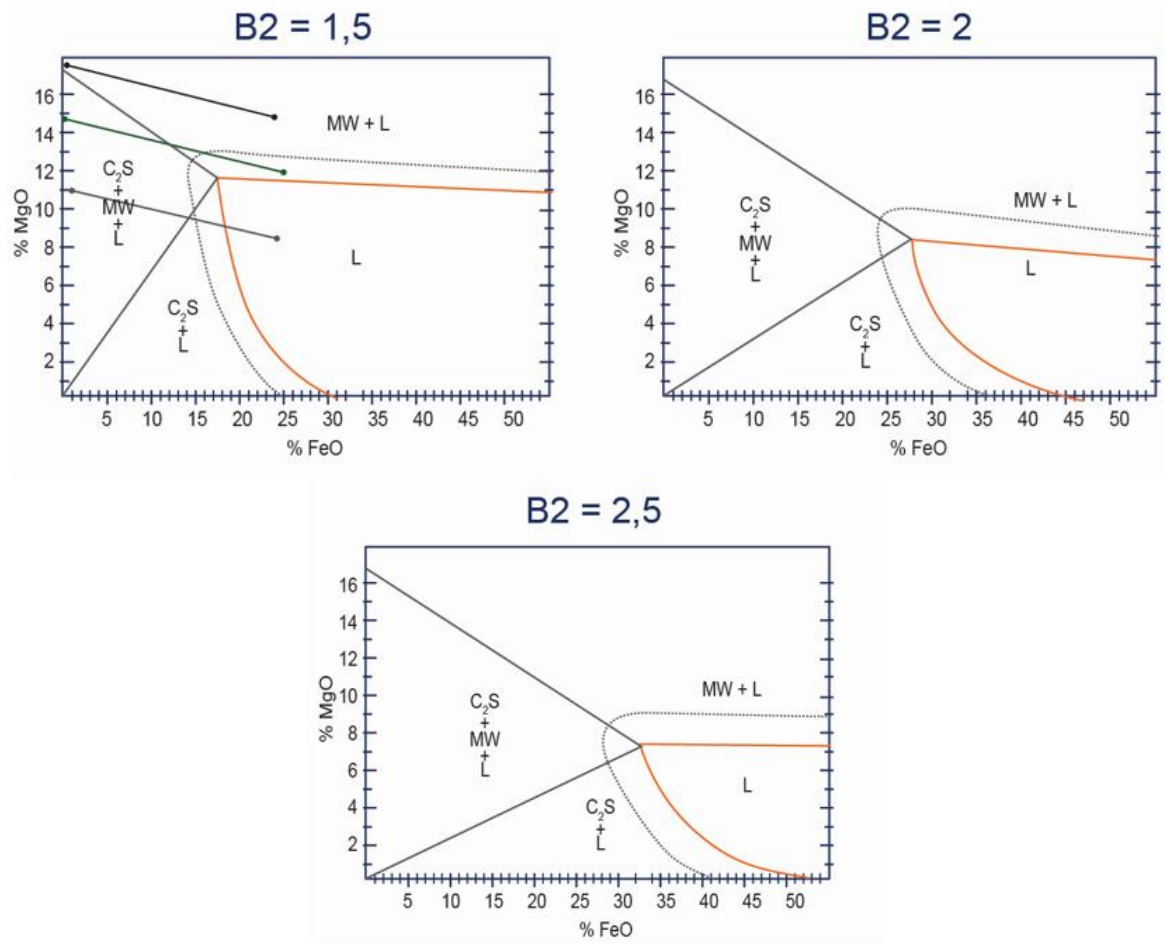
2.4.1.8 Saturación del MgO. La saturación del MgO garantiza que el desgaste de los refractarios no sea excesivo. Como el FeO juega un papel importante en la formación de escoria, Pretorius y Carlisle⁶⁰ han creado los diagramas de estabilidad isotérmicos para ver el efecto de este componente en la solubilidad del MgO. Estos diagramas se realizan a una basicidad y temperatura específica como el mostrado en la figura 23 que se desarrolla a 1600 °C.

⁵⁸ Ibid., p. 114.

⁵⁹ AMINORROAYA, Sima y EDRIS, Hossein. The effect of foamy slag in electric arc furnaces on electric energy consumption. En: 7 European Electric Steelmaking Conference. Australia: Universidad de Wollongong, 2002. p. 2.447-2456.

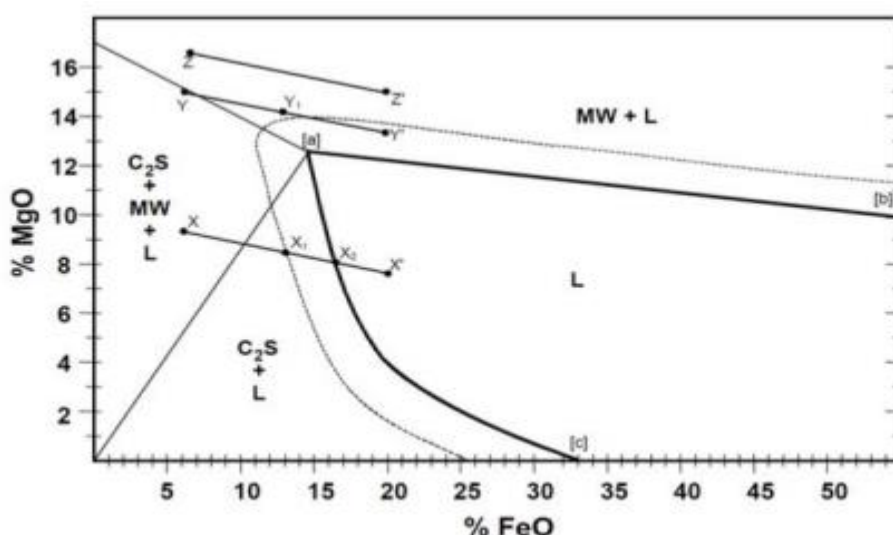
⁶⁰ Pretorius EB, Carlisle RC. Foamy slag fundamentals and their practical application to electric furnace steelmaking. En: Proceedings of the 16th Process Technology Conference; 1998 Nov 15-18; New Orleans, LA, USA.

Figura 23. Diagramas de estabilidad isotérmica (ISD) para basicidades binarias de 1.5, 2.0 y 2.5 a una temperatura de 1600 °C.



Fuente: PAEZ, Juan, En: Escuela técnica acería Gerdau. Escoria del horno de arco eléctrico. 2014.

Figura 24. Diagrama de estabilidad isotérmica. Donde $C_2S:Ca_2SiO_4$
MW: Magnesio-Wustita y L: líquido.



Fuente: PRETORIUS, EB. Y CARLISLE, RC. Foamy slag fundamentals and their practical application to electric furnace steelmaking. En: Proceedings of the 16th Process Technology Conference; 1998 Nov 15-18; New Orleans, LA, USA. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/13a3/e1a9976aece5a9611393562061b92bda9fca.pdf>

En la figura 24 “a es el punto de doble saturación para C_2S y MW en la superficie de líquidos y la línea comprendida entre a-b y a-c es la saturación de MgO (MW) y CaO (C_2S) respectivamente por separado. La línea punteada representa el sitio donde se obtiene escorias con características óptimas de formación de espuma, es decir con una viscosidad óptima”⁶¹.

De la Figura 24 se puede entender que a medida que el FeO aumenta, aumenta la fracción líquida a tal punto que la zona no es conveniente debido a que no se lleva a cabo la espumación por la baja viscosidad. En el punto (x) el MgO está saturado y cuando pasa entre x_1 y x_2 se obtienen una buena espumación, pero cuando se establece en x' se encuentra en fase líquida ya que se insatura el MgO dejando expuesto al refractario. Por otro lado si se tiene el punto (y) y se empieza a aumentar el contenido de FeO en el sistema se alcanza el punto y_1 donde las propiedades de espumación son buenas, manteniéndose aun cuando se llega a y' debido a la presencia de la fase MW en el líquido. El punto (z) muestra un exceso de MgO y sigue así cuando se llegue al punto z' , lo cual clasifica a la escoria crujiente y de malas propiedades para espumar pues no permite el paso de burbujas debidamente.

2.4.1.9 Índice de espumación. Es el tiempo de residencia de las burbujas formadas en la escoria, mientras más duren en la escoria esta espumará más y

⁶¹UNAMUNO. Op. Cit., p. 204.

por ende su altura incrementará cubriendo mejor los electrodos permitiendo una buena transferencia de energía al acero. Este tiempo se suele representar según Dicker⁶² por el índice de espumación:

Ecuación 19. Índice de espumación según Dicker

$$\Sigma = \frac{V_f}{Q_g}$$

Donde Σ es el índice de espumación en unidades de tiempo (s), V_f es el volumen de la escoria y Q_g es el caudal de gas. Ito y Fruehan⁶³ desarrollaron una ecuación empírica para incluir términos como la viscosidad, la tensión superficial y la densidad como se muestra a continuación:

Ecuación 20. Índice de espumación según Ito y Fruehan

$$\Sigma = 570 \frac{\mu}{\sqrt{\rho\gamma}}$$

Donde μ es la viscosidad (Ns/m²), ρ en la densidad (kg/m³) y γ es la tensión superficial.

2.5 REQUISITOS PARA LA OBTENCIÓN DE UNA BUENA ESCORIA ESPUMOSA

Como se ha visto la formación de la escoria está gobernada por diferentes factores que se pueden controlar durante el proceso. Así, uno de los factores más tratados es la viscosidad la cual debe ser de una consistencia cremosa y se puede controlar con el ajuste de temperatura, basicidad y la composición química. Un componente fundamental en la viscosidad es el contenido de FeO el cual se puede modificar con las relaciones adecuadas de inyección de oxígeno y carbono.

Otro requisito indispensable para la formación de escoria es la formación de gases lo cual se da por las reacciones de oxidación del carbono y la desoxidación del FeO por el C. como ya fue mencionado, junto a la chatarra “se carga carbono en

⁶²DICKER, Jonathan. Monitoring of slag foaming and other performance indicators in an electric arc furnace. Tesis para obtener el título de master en ingeniería. Sydney: Universidad de nueva gales del sur. Escuela de ciencia en materiales e ingeniería, 2014. 17-18 p. [PDF]. [Consulta el 22 de septiembre de 2018].

⁶³ ITO, K y FRUEHAN, RJ. Study on the slag foaming of CaO-SiO₂-FeO: Part I. Foaming parameters and experimental results. Metallurgical Transactions B. 1989; 20 (4): 509-510 p. [Sitio web]. [Consulta el 13 de abril de 2019]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02654600>

forma de antracita gruesa pues su oxidación genera el 20% de la escoria espumeante”⁶⁴.

También, la participación de partículas sólidas proporcionadas por la saturación de MgO y CaO da estabilidad a las burbujas formadas y retener los gases. Al mismo tiempo que el FeO afecta la saturación de estos compuestos, el tamaño de las partículas, la composición química y el grado de combustión de la materia prima a usar también influye en la producción de la escoria. Las materias que contiene estos dos óxidos más utilizadas son la cal cálcica y la cal dolomítica y Según UNAMUNO ⁶⁵ esta debe tener un tamaño de partícula entre 3 a 15 mm con piezas finas menores a 3 mm las cuales absorben el calor con mayor rapidez y el tiempo de operación es menor; por otro lado una buena cal es la que contiene 90% o más de CaO, ya que si es mucho menos a este valor la energía suministrada por el horno será utilizada para la liberación de dióxido de carbono lo cual se conoce como incineración de la caliza. Paralelamente la fracción de azufre en esta debe ser mínima ya que su inclusión en el acero perjudica las propiedades físicas del producto final.

A continuación se muestran los rangos de los parámetros influyentes en la formación de la escoria espumosa recopiladas por Paez⁶⁶ de diferentes autores:

- El %FeO en la escoria debe estar entre 25-35%
- La temperatura optima debe estar entre 1600-1620 °C
- La basicidad binaria debe estar entre 1.7 y 2.2
- El MgO debe estar saturado.

⁶⁴ PAEZ. Op. Cit., p. 53.

⁶⁵UNAMUNO. Op. Cit., p. 27-29.

⁶⁶ PAEZ. Op. Cit., p. 60.

3. ALTERNATIVA DE MEJORA

En este capítulo se realiza un estudio a la base de datos en GERDAU DIACO con el fin de calcular y analizar cada una de las propiedades influyentes en la formación de escoria espumosa en las coladas del año 2018 y así determinar su influencia o efecto sobre el consumo de la energía eléctrica y espumación para generar posibles propuestas de mejora en el proceso.

3.1 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS INFLUYENTES EN LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA

Para determinar las características influyentes en la formación de la escoria espumosa tales como basicidad, viscosidad, saturación del MgO, %FeO en la escoria, temperatura e índice de espumación; se recopila la información histórica de las corridas realizadas en la planta Tuta de la acería GERDAU DIACO S.A durante el año 2018 obteniendo dos bases de datos las cuales proporcionan la información de las coladas y de las escorias (cada una de estas con su respectivo número de lote). Para unificar la información se hace un empalme de dichas bases de datos por el número de lote y se elimina las coladas que no contienen la información completa o necesaria obteniendo 791 datos. La base de datos unificada proporciona la siguiente información por colada: número total de cargas, tiempos tap-to-tap (min), energía eléctrica por tonelada de chatarra (kWh/ton), temperatura (°C), suministro de oxígeno (Nm³), rendimiento de chatarra (%), cal cálcica y dolomítica agregada al proceso (Kg), coque o antracita (gruesa y fina) como suministro de carbono (kg), chatarra total agregada a la colada (kg) y composición de la escoria (%FeO, %CaO, %MgO, %Al₂O₃, %MnO, %P₂O₅, %S, %SiO₂ y %TiO₂). Posterior a ello se filtra la información de acuerdo a los parámetros establecidos como habituales o normales dentro de la planta eliminando coladas con tiempos tap-to-tap mayores a 63 min y coladas con número de cargas diferente a 4; ya que tiempos o cargas mayores implican mayor gasto energético o atípico dentro del proceso. De esta manera se obtienen 304 datos representativos (a los cuales se les asigna un número para identificarlos) del comportamiento de las coladas dentro de la acería para caracterizar las escorias que fueron obtenidas en el año 2018 como en la tabla 7 que fue para la colada número. Los resultados obtenidos se muestran a manera de ejemplo para la colada 1, para las demás coladas se realiza el mismo procedimiento que con esta.

Tabla 7. Resultado base de datos para colada número 1 del año 2018.

DESCRIPCIÓN	VALOR
Número asignado	1
Cargues	4
Temperatura colado (°c)	1626
Energía chatarra (kwh/ton)	397.41

Tabla 7. (Continuación)

TTT (min)	58
Energía eléctrica (kwh)	19950
Carbon total (kg/t)	8.27
Oxígeno (nm3)	1598
Fosforo	0.016
Rend. chatarra (%)	0,88
Cal calcitica	600
Cal dolomitica	900
Coque	300
Antracita gruesa	-
Total chatarra (kg)	50200
%Al ₂ O ₃	-
%CaO	23
%FeO	31.16
%MgO	6.87
%MnO	5.97
%P ₂ O ₅	0.36
%SiO ₂	17.87
%S	0.050
%TiO ₂	-

Fuente: elaboración propia, con base en GERDAU DIACO SA informacion.

3.1.1 Basicidad binaria (B₂). Se obtiene el valor con la ecuación 14:

$$\text{Basicidad binaria (B}_2\text{)} = 1,29$$

Se recopilan los resultados en la tabla 8 con los cálculos de la B₂ de todas las coladas.

Tabla 8. Tipos de escoria según basicidad binaria de las coladas del año 2018.

Tipo de escoria	B ₂	Cantidad	%
Ácida-fluidas	<1,5	75	25%
Básica	1,5-1,7	83	27%
Básica óptima	1,7-2,2	115	38%
Básicas-duras	>2,2	31	10%
Total		304	100%

Fuente: elaboración propia.

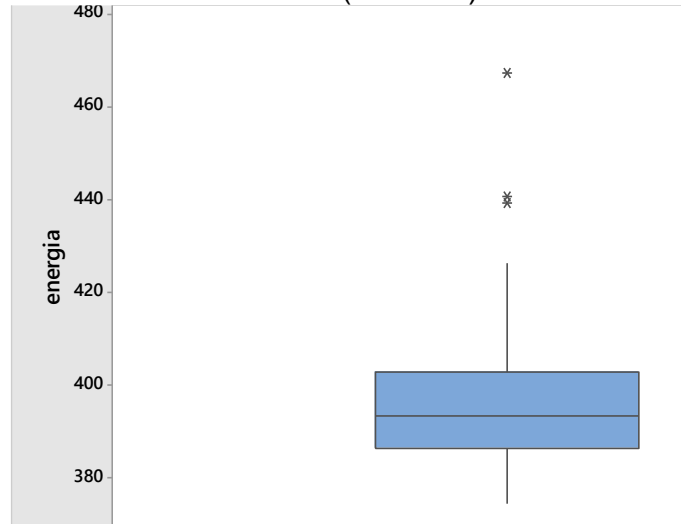
De acuerdo con la tabla 8, se puede decir que la mayoría de las coladas son básicas o básicas óptimas representadas con el 27% y 38% del total respectivamente y por lo tanto se tienen más escorias que no son muy fluidas ni muy crujientes a lo cual Pretorius⁶⁷ denomina como escorias cremosas las cuales son buenas para la fabricación de acero y el cuidado de refractarios. Sin embargo hay que aumentar la formación de escorias con valores de 1.7-2.2 de basicidad binaria (B_2) donde es óptima, evitando escorias muy fluidas o ácidas que constituyen 25% de las escorias producidas las cuales no espuman pues según Almeida *et al.*⁶⁸ El CaO agregado apenas permite la ruptura de los enlaces de sílice disminuyendo la viscosidad, pero si la cantidad de CaO es muy elevada en comparación del sílice la viscosidad aumenta por la saturación del CaO por lo cual se precipita la fase sólida en la escoria obteniendo escorias crujientes o duras que representan 10% del total de las coladas analizadas que pueden dificultar la absorción de óxidos. Esto también puede suceder por falta de SiO_2 .

3.1.1.1 Efecto de B_2 sobre la energía eléctrica. Para observar el efecto de la basicidad binaria sobre la energía eléctrica por tonelada de chatarra se realiza una gráfica con el fin de obtener el valor de basicidad donde el consumo de energía es mínimo. Para realizar dicha grafica se toman los datos de basicidad binaria entre 1.7 y 2.2 ya que son las óptimas, % SiO_2 en la escoria entre 10% y 25% pues estos son los porcentajes típicos de este compuesto de acuerdo con la tabla 6, % CaO en la escoria entre 25% y 50% a pesar que en la tabla 6 se especifica entre 35% y 50% ya que en este rango no se encuentran datos de acuerdo con la información proporcionada por la acería para las escorias obtenidas en el año 2018 y finalmente se realiza un diagrama de cajas con los datos de energía eléctrica por tonelada de chatarra para eliminar aquellos datos atípicos los cuales son representados con asteriscos en la figura 25.

⁶⁷ PRETORIUS, Eugene y BAKER, refractories. Fundamentals of EAF and ladle slags and ladle refining principles. 12. [Sitio web]. [Consulta el 20 de julio de 2019]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/5109/946bfb401ec66c8bf13bc34298c48b6be59.pdf>

⁶⁸ ALMEIDA, Rodolfo *Et al.* Slag Foaming Fundamentals - A Critical Assessment. Mat. Res. 2017, vol.20, n.2, 476 p. [Sitio web]. [Consulta el 15 de agosto de 2018]. Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/mr/v20n2/1516-1439-mr-1980-5373-MR-2016-0059.pdf>. Epub Mar 02, 2017. ISSN 1516-1439. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0059>.

Figura 25. Diagrama de caja y bigotes de energía eléctrica por tonelada de chatarra (kWh/ton).

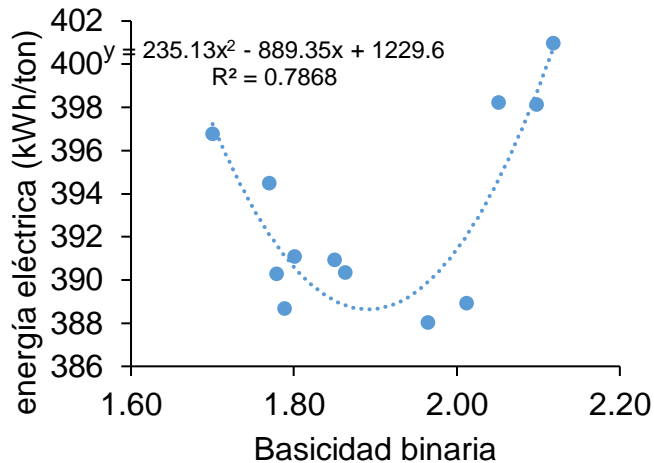


Fuente: elaboración propia.

La figura 25 muestra que los datos atípicos en las coladas respecto al gasto de energía eléctrica son los que están por encima de 430 kWh/ton representados con asteriscos, por lo tanto se eliminan pues no son representativos de la muestra.

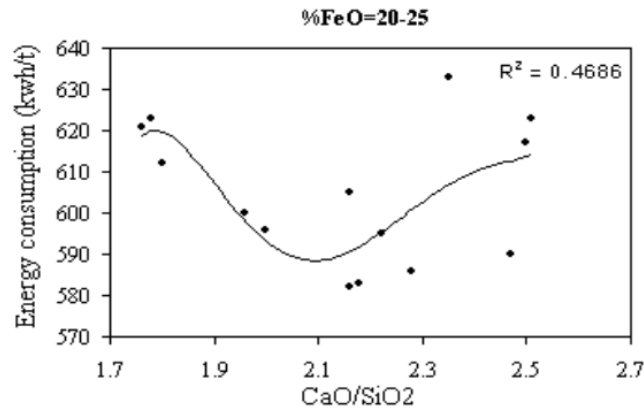
A continuación en la gráfica 3 se observa el cambio de energía eléctrica con respecto a la basicidad binaria, y en la gráfica 4 se encuentra la curva con la cual se compara.

Gráfica 3. Energía eléctrica por tonelada de chatarra (kWh/ton) vs basicidad binaria (B_2) para los datos del 2018.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 4. Energía eléctrica por tonelada de chatarra (kWh/ton) vs basicidad binaria para la acería Mobarake.



Fuente: AMINORROAYA, S. & Edris, H. The effect of foamy slag in electric arc furnaces on electric energy consumption. 7th European Electric Steelmaking Conference. AIM. (2002). Disponible en: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=2409&context=aimpapers>

La gráfica 4 se obtiene de la investigación en el horno de arco eléctrico de la acería Mobarake en Irán en donde se determina que con una basicidad binaria de la escoria de 2.1 se logra el menor consumo de energía eléctrica con composiciones de FeO en la escoria entre 20-25%. Por otra parte, en la gráfica 3 se puede ver el mismo comportamiento, pero con la diferencia de que el menor consumo de energía se tiene cuando la basicidad binaria es de 1.89, esta diferencia entre lo obtenido se debe a que las acerías cuentan con distintas materias primas siendo una de las principales la chatarra que no tiene una composición definida o estandarizada, es decir, puede venir con mayor contenido de tierra o con mayor cantidad de metales no deseados, entre otros.

El valor obtenido de basicidad binaria (1.89) se encuentra dentro del rango de básica óptima y corresponde al menor consumo de energía eléctrica por tonelada de chatarra (388.64 kWh/ton) dentro del comportamiento presentado a lo largo del 2018.

3.1.2 Densidad. La densidad de la escoria se calcula con la ecuación 17 la cual se relaciona con el %FeO en la escoria.

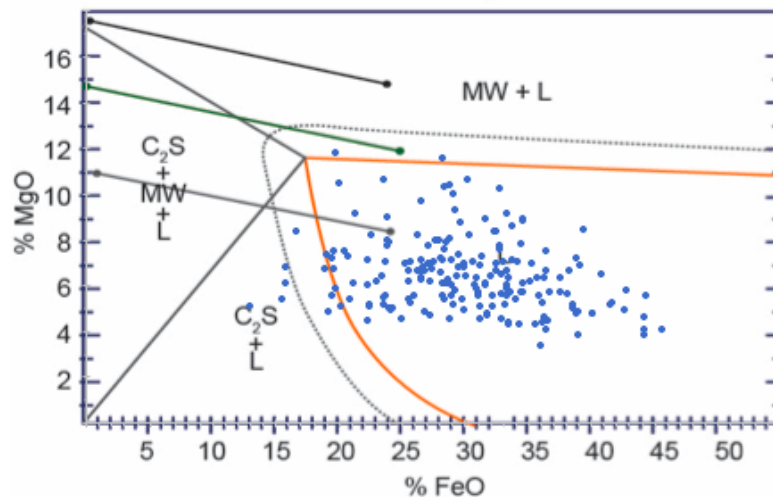
$$\rho = 3,021 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Calculando la densidad para los 304 datos se encuentra que el 100% está en el rango de 2-4 g/cm³, siendo un resultado apropiado debido a que la densidad de la escoria debe ser menor que la del acero líquido (7 g/cm³) para que este flote y pueda retirarse con facilidad en el desescoriado.

3.1.3 Saturación de MgO. La saturación del MgO durante el proceso es clave para evitar el desgaste excesivo de refractarios por el uso del MgO de estos por parte de la escoria y además de garantizar una buena espumación.

Para determinar la saturación adecuada de MgO y obtener una buena espumación se utilizan los diagramas de estabilidad isotérmica que muestra la relación entre las fases formadas por MgO (MW), CaO (C_2S) y la escoria líquida, se pueden ubicar puntos en ella por las composiciones en la escoria (MgO y CaO). Los diagramas de estabilidad isotérmica (ISD) utilizados para ubicar los datos del 2018 se tomaron del documento AC-226⁶⁹ proporcionado por GERDAU DIACO con basicidades binarias de 1.5, 2.0 y 2.5 a una temperatura de 1600 °C. Obteniendo las figuras 26,27 y 28.

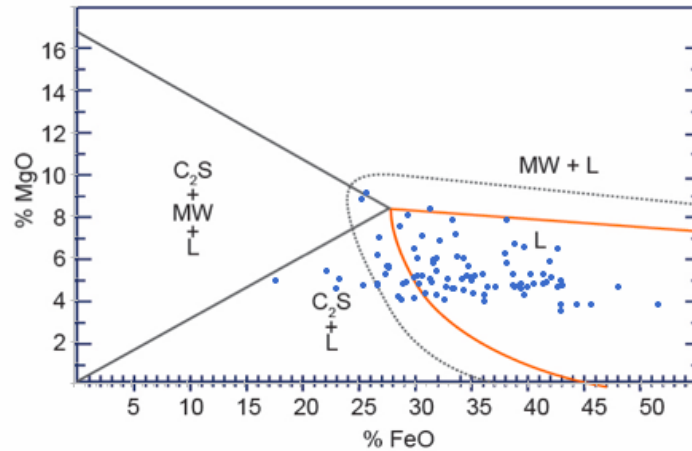
Figura 26. Datos 2018 ubicados en ISD de $B_2=1.5$ a 1600 °C.



Fuente: elaboración propia, basado en PAEZ, Juan, En: Escuela técnica acería Gerdau. Escoria del horno de arco eléctrico. 2014.

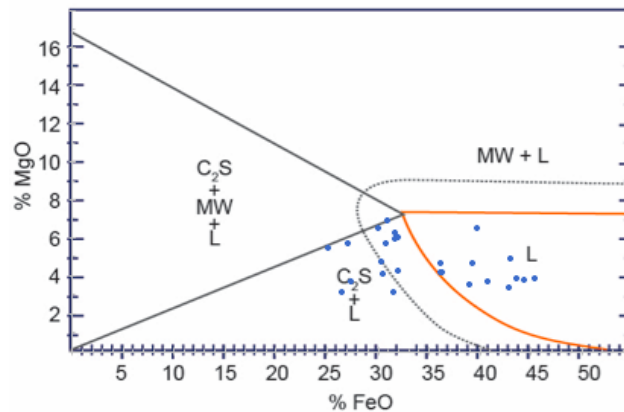
⁶⁹ PAEZ, Op. cit., p. 5.

Figura 27. Datos 2018 ubicados en ISD de $B_2=2$ a 1600°C .



Fuente: elaboración propia, con base en: PAEZ, Juan, En: Escuela técnica acería Gerdau. Escoria del horno de arco eléctrico. 2014.

Figura 28. Datos 2018 ubicados en ISD de $B_2=2.5$ a 1600°C .



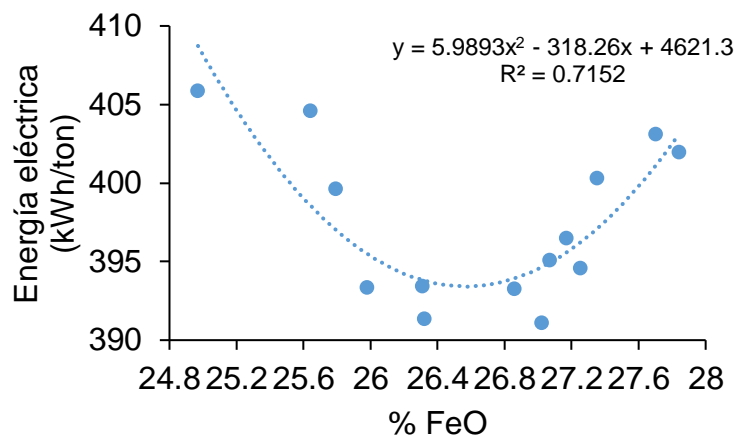
Fuente: elaboración propia, con base en: PAEZ, Juan, En: Escuela técnica acería Gerdau. Escoria del horno de arco eléctrico. 2014.

En general en las figuras 26 y 27 se tiene que la mayoría de escorias son líquidas (región L) es decir que la escoria es poco viscosa debido al alto contenido de FeO y a la poca presencia de MgO en esta. En esta región no es posible una buena espumación debido a que las burbujas formadas en el baño pasan con facilidad la capa de escoria ya que no hay suficiente fuerza en ella que las contenga. Esto ocasiona que el consumo del refractario y energía sea mayor, no hay escoria espumosa que cubra los electrodos para transmitir la energía al acero fundido durante el afino primario. Asimismo, no hay partículas sólidas con las cuales se inicie la formación de burbujas. También se ve que a medida que la basicidad aumenta la zona líquida es más pequeña posicionando más datos en la región delimitada por la línea punteada y la de saturación donde la espumación de escoria es máxima por la existencia de partículas en segunda fase (sólida por

presencia de partículas de CaO y MgO), que es causado por el aumento del óxido refractario CaO que tiene un efecto en la basicidad y hace que la escoria tenga una mayor viscosidad por la presencia de dichas partículas. Sin embargo cuando la basicidad es muy alta como se observa en la figura 28 que tiene una basicidad binaria de 2.5, se pueden llegar a obtener escorias muy duras o crujientes por el exceso de partículas en segunda fase, obstaculizando la formación de burbujas por el aumento de la viscosidad. Si bien los refractarios no son consumidos por la escoria habrá un consumo mayor de energía, los electrodos no se cubren con escoria espumosa y el arco eléctrico se disipa a las paredes del horno dañándolas.

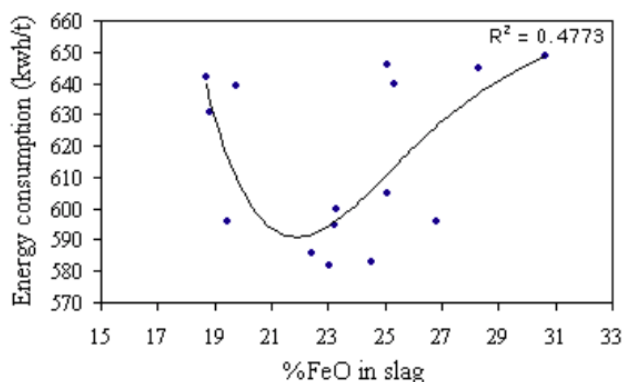
3.1.3.1 Efecto del FeO en la scoria. El FeO tiene un efecto importante en las características de la escoria ya que es el óxido fluidificante de mayor composición en la escoria afectando propiedades como la viscosidad y la densidad de la escoria como se ve en los diagramas de estabilidad isotérmica. Por eso se plantea la construcción de una gráfica que relaciona el consumo de energía eléctrica con él %FeO en la escoria. Para realizar esta gráfica, se filtra la energía eléctrica con ayuda de la Figura 25 (diagrama de caja y bigotes) y se toman los datos que tienen un %FeO entre 24% y el 28%, en estos valores se ha notado una buena espumación dentro de la planta Tuta de GERDAU DIACO S.A; en la gráfica 5 se puede observar el resultado obtenido y en la gráfica 6 se encuentra la curva con la cual se compara.

Gráfica 5. Energía eléctrica (kWh/ton) vs %FeO en la escoria para los datos del 2018.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 6. Energía eléctrica (kWh/ton) vs %FeO en la escoria para la acería Mobarake
CaO/SiO₂=2-2.2



Fuente: AMINORROAYA, S. & Edris, H. The effect of foamy slag in electric arc furnaces on electric energy consumption. 7th European Electric Steelmaking Conference. AIM. (2002). Disponible en: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=2409&context=aiimpapers>

En la gráfica 5 y 6 tienen un comportamiento similar y se obtiene un punto donde el consumo de energía es menor, en el caso de la grafica 5 el valor es de 26% de FeO mientras que para la realizada en Mobareke (grafica 6) el valor es de 22% de FeO. Respecto al porcentaje de FeO de acuerdo con Aminorraya y Edris⁷⁰ la baja tensión superficial y la densidad característica de la escoria se debe al bajo contenido de FeO proporcionando una escoria estable.

De la gráfica 5 se obtiene que con un %FeO= 26,57 el consumo de energía eléctrica mínimo es de 393.37 kWh/ton. Con este %FeO es con el que se debe trabajar para que el consumo de energía eléctrica sea el menor posible.

3.1.4 Viscosidad. La viscosidad influirá o no en la producción de escoria espumosa pues si está muy viscosa las burbujas de CO no podrán atravesar la escoria y si es poco viscosa las burbujas atravesarán tan rápido la escoria que no espumara. De igual modo este parámetro servirá para el cálculo de índice de espumación que se tratará luego. Para obtener el valor de la viscosidad se utilizan las ecuaciones de la 4 a la 13 que pertenecen al modelo de Urbain la cual relaciona la viscosidad con la temperatura por medio de la ecuación de Arrhenius y donde la energía de activación (B) está relacionada con las composiciones molares de la escoria, por lo tanto se debe convertir los porcentajes suministrados por GERDAU DIACO S.A (ver tabla 9) en masa a molar. Esto se hace sumando los porcentajes de los componentes y el resultado se toma como el 100% para

⁷⁰ AMINORROAYA. Op. Cit., p. 2456.

calcular la nueva composición másica (proceso conocido como normalización de datos) y con este valor obtener la composición molar de la escoria.

Tabla 9. Datos de composición másicas de la escoria colada número 1 para la normalización.

Compuesto	%W _i	Compuesto	%W _i
%Al ₂ O ₃	0%	%P ₂ O ₅	0.36%
%CaO	23%	%SiO ₂	17.87%
%FeO	31.16%	%S	0.05%
%MgO	6.87%	%TiO ₂	0%
%MnO	5.97%		

Fuente: elaboración propia, con base en: GERDAU DIACO S.A.

Al sumar estos valores da como resultado 85.28%. Este resultado sirve para normalizar las composiciones de la escoria así:

Ecuación 21. Normalización de %W_i

$$\%W_{i-n} = \frac{\%W_i}{\%W_{total}}$$

Donde %W_{i-n} es la composición másica normalizada, %W_i es la composición másica de la escoria y %W_{total} es la suma de todas las composiciones másicas de la escoria. Entonces, la composición másica normalizada del CaO es:

$$\%CaO_{normalizado} = 26.97\%$$

Se realiza el mismo cálculo para cada uno de los compuestos y se obtienen las composiciones másicas compiladas en la tabla 10.

Tabla 10. Composiciones másicas normalizadas para los compuestos de la colada número 1.

Compuesto	%W _i	Compuesto	%W _i
%Al ₂ O ₃	0%	%P ₂ O ₅	0.422%
%CaO	26.97%	%SiO ₂	20.96%
%FeO	36.54%	%S	0.059%
%MgO	8.06%	%TiO ₂	0%
%MnO	7%		

Fuente: elaboración propia.

La fracción molar se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 22. Fracción molar de los compuestos en la escoria

$$X_i = \frac{w_{i-n}/M_i}{\sum_i w_{i-n}/M_i}$$

Donde X_i es la fracción molar del compuesto en la escoria, w_{i-n} es la composición másica de la escoria normalizada y M_i es el peso molecular del compuesto.

La fracción molar para el CaO es:

$$X_{CaO} = 0.293$$

La fracción molar para los otros componentes se calcula de la misma obteniendo la tabla 11.

Tabla 11. Fracción molar para los compuestos de la colada número 1.

Compuesto	X_i	Compuesto	X_i
Al ₂ O ₃	0	P ₂ O ₅	0.002
CaO	0.29	SiO ₂	0.21
FeO	0.31	S	0.001
MgO	0.12	TiO ₂	0
MnO	0.06		

Fuente: elaboración propia.

Con las fracciones molares calculadas, se pueden utilizar las ecuaciones de la 3 a la 13 para calcular la viscosidad, donde para los resultados del dato 1 se tiene:

$$X_G = 0.214$$

$$X_M = 0.785$$

$$X_A = 0$$

Normalizando X_G , X_M y X_A :

$$X_G^* = 0.214$$

$$X_M^* = 0.785$$

$$X_A^* = 0$$

Con la ecuación 13 se calcula α :

$$\alpha=1$$

Se calculan los parametros de Urbain con las ecuaciones 9, 10, 11 y 12 para hallar B:

$$B_a=13.69$$

$$B_b=43.33$$

$$B_c=-106.93$$

$$B_d=118.00$$

$$B=19.22$$

Con la ecuación 4 se tiene A:

$$A = 5 \times 10^8$$

Por último se calcula la viscosidad (P) con la ecuación 3:

$$\eta=2.27 \quad P=0.23 \text{ Pa.s}$$

De acuerdo con HAN⁷¹ el rango de viscosidades comunes en escoria en las industrias es de 0 - 1Pa.s, rango en el cual se encuentran todas las viscosidades de las escorias del 2018 al hacer la conversión de poises (P) a Pa.s. Por ello, estos valores pueden ser utilizados para el cálculo de índice de espumación con seguridad de obtener resultados correctos.

3.1.5. Índice de espumación (Σ). El índice de espumación determina el tiempo (s) que tarda las burbujas de CO y en menor proporción de CO₂ en atravesar la capa que se forma de escoria. Cuando el índice de espumación es muy bajo quiere decir que las burbujas no se están reteniendo en la escoria y por lo tanto la espumación no es buena debido a la viscosidad baja, por otro lado si el índice de espumación es muy elevado puede deberse a que la viscosidad es muy alta y por lo tanto las burbujas no traspasan la capa de escoria pues no cuentan con la energía suficiente para superar la fuerza que ejerce esta.

Para el cálculo de índice de espumación se utiliza la ecuación 20 la cual requiere el cálculo previo de la viscosidad (η) en Pa.s o Ns/m², la densidad (ρ) en kg/m³, y la tensión superficial (γ) calculada con la ecuación 18 en (N/m).

⁷¹ HAN. Op Cit., p. 101.

Cálculo de la tensión superficial:

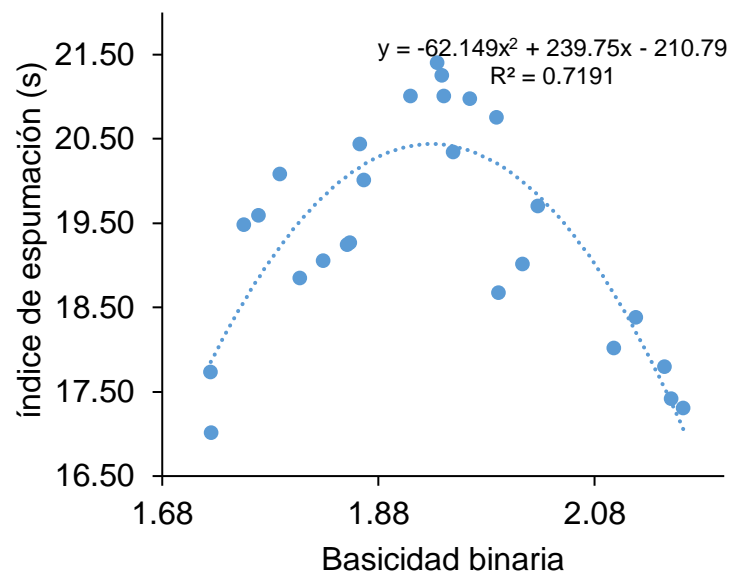
$$\gamma = 0.00061 \text{ N/m}$$

Se calcula el índice de espumación con las variables ya establecidas y se obtiene:

$$\Sigma = 19.28 \text{ s}$$

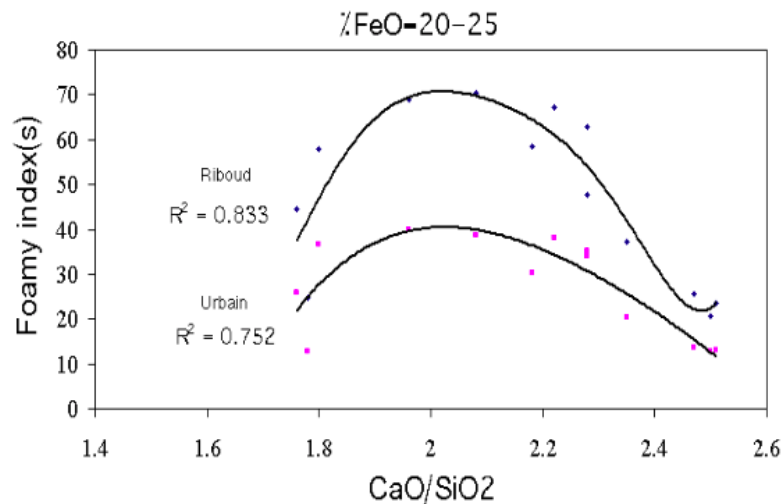
Para el análisis del índice de espumación se grafican los valores obtenidos con respecto al %FeO y la basicidad binaria (B_2) con el fin de encontrar los valores que maximicen la espumación.

Gráfica 7. Índice de espumación (Σ) vs Basicidad Binaria (B_2).



Fuente: elaboración propia

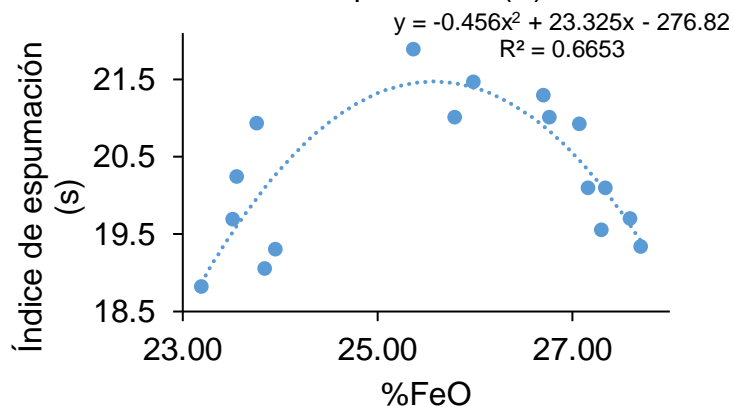
Gráfica 8. Índice de espumación (Σ) vs Basicidad Binaria (B_2) en la empresa Mabarake.



Fuente: AMINORROAYA, S. & Edris, H. The effect of foamy slag in electric arc furnaces on electric energy consumption. 7th European Electric Steelmaking Conference. AIM. (2002). Disponible en: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=2409&context=aiimpapers>

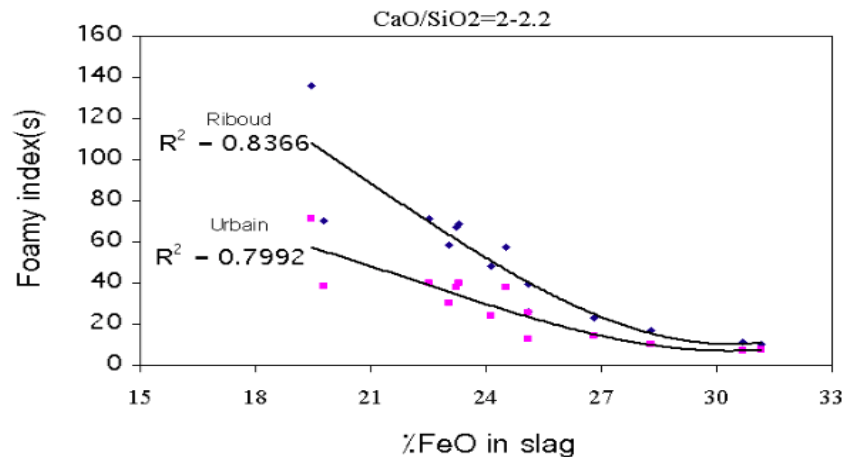
La gráfica 8 sirve como comparativo del comportamiento del índice de espumación con respecto a la basicidad binaria, obteniendo tanto en la gráfica 7 como en la 8 un punto máximo donde el índice de espumación es el mayor. Siendo así, el índice de espumación para la acería de Mabarake es máximo cuando la basicidad binaria esta entre 1.95 y 2.15 valores que están por encima de la basicidad de 1.93 obtenida en GERDAU DIACO S.A. Cabe aclarar que la comparación se realiza con la curva nombrada Urbain ya que este modelo fue utilizado para el cálculo de la viscosidad.

Gráfica 9. Índice de espumación (Σ) vs %FeO.



Fuente: elaboración propia

Gráfica 10. Índice de espumación (Σ) vs %FeO para la acería Mabarake



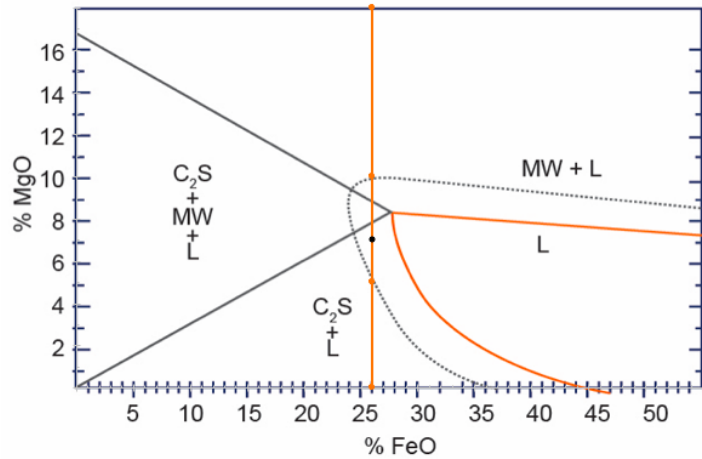
Fuente: AMINORROAYA, S. & Edris, H. The effect of foamy slag in electric arc furnaces on electric energy consumption. 7th European Electric Steelmaking Conference. AIM. (2002). Disponible en: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=2409&context=aiimpapers>

La gráfica 9 se compara con la gráfica 10 que se obtuvo de la información obtenida de la acería Mabareke, en la cual no se puede predecir el porcentaje óptimo de FeO en la escoria, solo se puede decir de esta gráfica mirando el modelo de Urbain, que a medida que el FeO disminuye el índice de espumación es mayor. Al contrario de lo obtenido en la figura 9 donde se ve un punto donde el índice de espumación es máxima a un valor de FeO específico. Esta variación de resultados en ambas figuras se puede deber a la diferencia en el rango de basicidad binaria en el que se desarrollaron; para la gráfica 9 el rango de basicidad fue de 1.7-2.2 mientras que el rango de la gráfica 10 es de 2-2.2. De la gráfica 7 se tiene que el índice de espumación es máximo (20.42 s) cuando la basicidad binaria es de 1.93, y de la gráfica 9 se puede decir que el índice de espumación es máximo (en este caso de 21.46) cuando la composición de FeO en el acero es de 25.58%.

3.2 PROPUESTA DE MEJORA

Se tiene que la basicidad binaria que minimiza el consumo de energía y maximiza el índice de espumación en la escoria es de 1.91, valor hallado al promediar los resultados de las gráficas 3 y 7. Por otro lado se tiene que el %FeO en la escoria que logra una buena espumación y un consumo mínimo de energía es de 26% el cual se obtiene al promediar los resultados obtenidos de las gráficas 5 y 9. Con esta composición de FeO se obtiene la composición de MgO del 7% para su saturación y una buena espumación por medio de los diagramas ISD como se ve en la figura 29.

Figura 29. Composición de MgO en la escoria ubicado en ISD con %FeO de 26%.

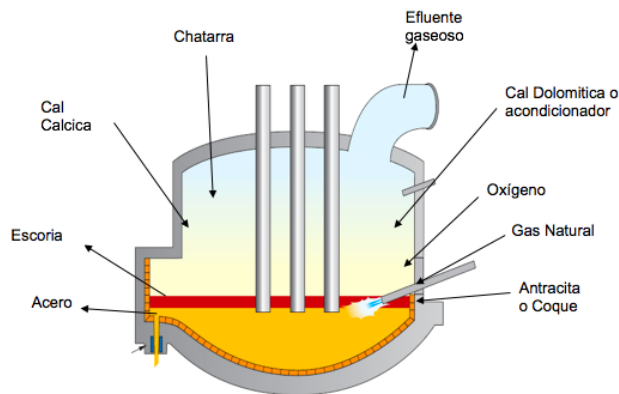


Fuente: elaboración propia, con base en: PAEZ, Juan, En: Escuela técnica acería Gerdau. Escoria del horno de arco eléctrico. 2014.

En la figura 29 se observa que se pueden utilizar composiciones por encima del 6% y por debajo de 10% de MgO. Lo más recomendado es trabajar en una composición de 9% de MgO por si %FeO aumenta, la espumación y la saturación de MgO no se vea afectada pues se mantiene en la región óptima. Se decide escoger la composición de 7% (punto negro en la figura 29) de MgO ya que se ha visto en las coladas del 2018 que la composición de MgO se encuentra cercano a este valor, además un aumento de MgO en la escoria representa un aumento significativo en la materia prima.

Estos valores sirven para determinar la cantidad de cal cálcica, cal dolomítica o acondicionador, antracita o coque y oxígeno. Para ello se realizan balances de masa en el horno de arco eléctrico haciendo las siguientes suposiciones por falta de información: no hay desgaste de refractarios ni de electrodos, no hay formación de polvos en el horno, los óxidos que vienen en la chatarra pasarán en su totalidad a la escoria y compuestos como el Si y el Mn reaccionan en su totalidad con oxígeno para formar sus óxidos. Se considera el siguiente diagrama de flujo para el proceso (ver figura 30).

Figura 30. Diagrama para balances de masa.



Fuente: metal products and engineering-us, LLC, EML-SIE Electric Arc Furnace Slag Detection System. Disponible en: http://mpe-us.com/Pages/EMLI_SIE.html

Como base de cálculo se va a tomar 50000 kg de chatarra agregados al horno. A continuación se muestran las composiciones de la chatarra (ver tabla 12).

Tabla 12. Composición general de la chatarra de GERDAU DIACO S.A

Compuesto	%	Cantidad con base a 50000 kg de chatarra (kg)
Si	0.18%	90
SiO ₂	2.73%	1365
CaO	0.36%	180
MgO	0.38%	190
Al ₂ O ₃	0.82%	410
Mn	0.59%	295
Fe	88.23%	44115
FeO	0.00%	0
S	0.02%	10
Trazas de otros metales (Cu, Ni, Zn, Cr...)	6.69%	3345

Fuente: GERDAU DIACO S.A.

Para la composición de la cal cálcica y dolomítica, antracita o coque se lleva la muestra a un laboratorio externo el cual realiza diferentes análisis (Ver tablas de 13-17).

Tabla 13. Composición de cal calcica obtenida por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.

Compuesto	%
CaO	94.54%
MgO	0.21%
SiO ₂	0.53%
Al ₂ O ₃	0.32%
Otros (K ₂ O, Na ₂ O, SrO, ZnO,SO ₃ ...) y compuestos orgánicos	4.4%

Fuente: elaboración propia, con base en: resultados de laboratorio.

Tabla 14. Composición de cal dolomítica obtenido por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.

Compuesto	%
CaO	53.45%
MgO	30.46%
SiO ₂	4.35%
Al ₂ O ₃	1.12%
Otros (K ₂ O, Na ₂ O, SrO, ZnO,SO ₃ ...) y compuestos orgánicos	10.62%

Fuente: elaboración propia, con base en: resultados de laboratorio.

Tabla 15. Composición de antracita obtenida por laboratorio externo por análisis ASTM D3180-15.

Compuesto	%
Carbono fijo	80%
Material volátil	7.22%
humedad	2.65%
cenizas	10.13%

Fuente: elaboración propia, con base en: resultados de laboratorio.

Tabla 16. Composición de coque obtenido por laboratorio externo por análisis ASTM D3180-15.

Compuesto	%
Carbono fijo	81.36%
Material volátil	1.80%
humedad	1.38%
cenizas	15.46%

Fuente: elaboración propia, con base en: resultados de laboratorio.

Dado que la cal dolomítica tiene bajo contenido en óxidos de magnesio se realiza una prueba a un acondicionador con el fin de analizar la posibilidad de su uso.

Tabla 17. Composición de acondicionador obtenido por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.

Compuesto	%
CaO	2.84%
MgO	59.75%
SiO ₂	2.98%
Al ₂ O ₃	0.25%
Otros (K ₂ O, Na ₂ O, SrO, ZnO, SO ₃ ...) y compuestos orgánicos	34.18%

Fuente: elaboración propia, con base en: resultados de laboratorio.

El acero vaciado al horno cuchara va a contener 98% de Fe y el resto son trazas de metales Al, V, C, S, Ni, Cu, W, Ti, As, Co entre otros compuestos. El efluente gaseoso está compuesto por CO, N₂, CO₂, O₂ y H₂; y la escoria está compuesta principalmente por FeO (26%), CaO, MgO (7%), SiO₂, Al₂O₃, MnO y en menor proporciones de TiO₂, P₂O₅ y S.

Para calcular la cantidad de cal dolomítica se utiliza la siguiente ecuación que se obtiene del balance de MgO:

Ecuación 23. Cantidad de cal dolomítica en kg

$$m_{\text{cal dolomítica}} \text{ (kg)} = \frac{m_{\text{escoria}} \cdot w_{\text{es-MgO}} - m_{\text{chatarra}} \cdot w_{\text{chat-MgO}}}{w_{\text{dol-MgO}}}$$

Donde $m_{\text{cal dolomítica}}$ es la cal dolomítica a agregar al horno, $m_{\text{escoria}} \cdot w_{\text{es-MgO}}$ es la cantidad de MgO presente en la chatarra en kg, $m_{\text{escoria}} \cdot w_{\text{es-MgO}}$ es la cantidad de MgO en la escoria en kg y $w_{\text{dol-MgO}}$ es la composición másica de MgO en la cal dolomítica. m_{escoria} se toma como base 6000 kg que luego se recalcula.

$$m_{\text{cal dolomítica}} \text{ (kg)} = 755.09 \text{ kg}$$

Para calcular la cantidad de CaO se utiliza la basicidad binaria de 1.91 para calcular primero la cantidad de CaO que habría en la escoria:

Ecuación 24. Cantidad de CaO en la escoria (kg)

$$m_{\text{CaO en la escoria}} = B_2 \cdot m_{\text{SiO}_2 \text{ en la escoria}}$$

Donde m_{SiO_2} en la escoria es:

Ecuación 25. Cantidad de SiO_2 en la escoria (kg)

$$m_{\text{SiO}_2 \text{ en la escoria}} = m_{\text{chatarra}} \cdot w_{\text{chat-SiO}_2} + m_{\text{dol-SiO}_2} \cdot w_{\text{dol-SiO}_2} + m_{\text{chatarra}} \cdot w_{\text{chat-Si}} \cdot \frac{M_{\text{SiO}_2}}{M_{\text{Si}}}$$

$$m_{\text{SiO}_2 \text{ en la escoria}} \text{ (kg)} = 1590.39 \text{ kg}$$

Por lo tanto la cantidad de CaO en la escoria es de:

$$m_{\text{CaO en la escoria}} = 3037.64 \text{ kg}$$

Con este valor se calcula la cantidad de cal cálcica:

Ecuación 26. Cantidad de cal cálcica

$$m_{\text{cal cálcica}} \text{ (kg)} = \frac{m_{\text{escoria}} \cdot w_{\text{es-CaO}} - m_{\text{cal-dol}} \cdot w_{\text{dol-CaO}} - m_{\text{chatarra}} \cdot w_{\text{chat-CaO}}}{w_{\text{cálcica-CaO}}}$$

$m_{\text{cal cálcica}}$ Es la cantidad de cal cálcica en kg, $m_{\text{escoria}} \cdot w_{\text{es-CaO}}$ es la cantidad de CaO en la escoria en kg y fue el valor calculado anteriormente, $m_{\text{cal-dol}} \cdot w_{\text{dol-CaO}}$ es la cantidad de CaO en la cal dolomítica en kg, $m_{\text{chatarra}} \cdot w_{\text{chat-CaO}}$ es la cantidad de CaO en la chatarra y $w_{\text{cálcica-CaO}}$ es la composición de CaO en la cal cálcica.

$$m_{\text{cal cálcica}} \text{ (kg)} = 2595.77 \text{ kg}$$

Con la cantidad de cal cálcica previamente hallada se calcula la cantidad de la escoria:

Ecuación 27. Cantidad de escoria producida (kg)

$$m_{\text{escoria}} \text{ (kg)} = \frac{m_{\text{cal cálcica}} \cdot w_{\text{cálcica-CaO}} + m_{\text{cal-dol}} \cdot w_{\text{dol-CaO}} + m_{\text{chatarra}} \cdot w_{\text{chat-CaO}}}{w_{\text{es-CaO}}}$$

La composición de CaO en la escoria ($w_{\text{es-CaO}}$) se fija con un valor del 38% ya que este valor se encuentra dentro de los rangos en que es típica la composición de la escoria según la tabla 6. Se recalcula la cantidad de escoria obteniendo los resultados recopilados en la tabla 18.

Tabla 18. Cantidades obtenidas de los balances de masa con cal cálcica.

Material	Cantidad (kg)
peso escoria	8099
Cal calcica	2365.45
Cal dolomítica	1237.46

Fuente: elaboración propia.

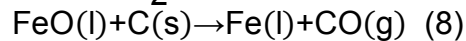
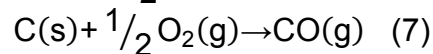
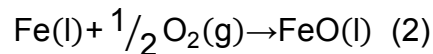
El procedimiento anterior se lleva a cabo con el acondicionador para remplazar la cal dolomítica y se obtiene:

Tabla 19. Cantidades obtenidas de los balances de masa con acondicionador.

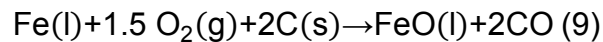
Material	Cantidad (kg)
peso escoria	7920
Cal calcica (kg)	2974.71
acondicionador (kg)	609.87

Fuente: elaboración propia.

La cantidad de antracita y oxígeno se obtiene por medio de las siguientes reacciones



De las cuales se llega a la reacción 9:



Como se tiene la composición de FeO en la escoria y la cantidad de escoria producida, se puede calcular la cantidad de oxígeno y antracita a agregar.

Ecuación 28. Cantidad de oxígeno a inyectar Nm^3

$$V_{\text{oxígeno}}(\text{Nm}^3) = \frac{m_{\text{escoria}} \cdot w_{\text{es-FeO}} \cdot \frac{1 \text{ kmol FeO}}{71.8444 \text{ kg FeO}} \cdot \frac{1.5 \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol FeO}} \cdot \frac{15.9994 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol}}}{\rho_{\text{oxígeno}}}$$

Donde $V_{\text{oxígeno}}$ es el volumen de oxígeno a agregar, $m_{\text{escoria}} \cdot w_{\text{es-FeO}}$ es la cantidad de FeO en la escoria y $\rho_{\text{oxígeno}}$ es la densidad del oxígeno a condiciones normales de un gas (0°C y 1 atm) en kg/m^3 . Remplazando en la ecuación anterior:

$$V_{\text{oxígeno}}(\text{Nm}^3) = 492.24 \text{ Nm}^3$$

Del mismo modo la cantidad de coque es:

Ecuación 29. Cantidad de coque (kg).

$$m_{\text{coque}}(\text{Kg}) = \frac{m_{\text{escoria}} \cdot W_{\text{es-FeO}} \cdot \frac{1 \text{ kmol FeO}}{71.8444 \text{ kg FeO}} \cdot \frac{2 \text{ kmol C}}{1 \text{ kmol FeO}} \cdot \frac{12.0107 \text{ kg C}}{1 \text{ kmol}}}{W_{\text{coque-C}}}$$

Remplazando los valores se obtiene:

$$m_{\text{antracita}}(\text{Kg}) = 865.36 \text{ kg}$$

Los mismos cálculos se realizan con la información de la tabla 17 cuando se agrega acondicionador, se tiene que se debe agregar 481.36 m³ de oxígeno y 846.24 kg de coque. Al observar los resultados de estimación de la cantidad de oxígeno a agregar se puede decir que se agrega menos que en las coladas del 2018 (generalmente se agrega por encima de 1500 m³ de oxígeno) ya que el oxígeno es usado en el proceso de oxicorte durante la fundición del acero para acelerar esta etapa.

A continuación se muestran las tablas (con cal dolomítica y acondicionador) con las cantidades de materias primas que se deben agregar para lograr una basicidad binaria de 1.91, %FeO del 26%, %MgO de 7% y un %CaO del 38%.

Tabla 20. Propuesta de materias primas con cal dolomítica.

Materias prima	Cantidad
Cal cálcica (kg)	2365.45
Cal dolomítica (kg)	1237.46
Coque (kg)	865.36
Oxígeno a agregar (Nm ³)	512.75
Rendimiento metálico	84%
Composiciones de escoria obtenidas (%w)	
%Al ₂ O ₃	5%
%CaO	38%
%MgO	7%
%SiO ₂	20%
%MnO	5%
%FeO	26%

Fuente: elaboración propia.

Tabla 21. Propuesta de materias primas con acondicionador.

Materia prima	Cantidad
Cal cálcica (kg)	2974.71
Acondicionador (kg)	609.87
Coque kg	846.24
Oxígeno a agregar (Nm ³)	481.36
Rendimiento metálico	84%
Composiciones de escoria obtenidas (%w)	
%Al ₂ O ₃	5%
%CaO	38%
%MgO	7%
%SiO ₂	20%
%MnO	5%
%FeO	26%

Fuente: elaboración propia.

4. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORA

En este capítulo se evidencia diferentes coladas de acuerdo con las dos propuestas planteadas con el fin de determinar la mejora bajo las nuevas condiciones de proceso, así mismo se calcula y analiza cada uno de los parámetros influyentes y su efecto en el proceso, finalmente se realiza una comparación entre las coladas del año 2018 con las coladas realizadas de acuerdo a las propuestas de mejora.

4.1 METODOLOGÍA

De acuerdo con la propuesta de mejora planteada en el capítulo 3, se identifica que el proceso requiere un aumento en materias primas tales como cal dolomítica o acondicionador, cal calcíca y coque para alcanzar los valores de basicidad (1.91), %FeO (26%), %MgO (7%), %CaO (38%), donde la densidad y la viscosidad de la escoria se encuentren en un rango de 2- 4 g/cm³ y 0-1 Pa.s respectivamente para alcanzar el consumo de energía mínimo y mayor índice de espumación posible.

Conforme a esto se observa que las cantidades de materias primas que se deben agregar son elevadas en comparación con las coladas realizadas durante el año 2018 como se ve en la tabla 22.

Tabla 22. Comparativo de materias primas en el 2018 y las propuestas 1 y 2.

Materia prima	Cal dolomítica (kg)	Cal calcíca (kg)	Acondicionador (kg)	Coque (kg)
Año 2018	900	600-900	-	300-600
Propuesta 1	1237	2365	-	865
Propuesta 2	-	2974	610	846

Fuente: elaboración propia.

Un aumento de dicha magnitud en las materias primas conlleva un aumento significativo en los costos de producción, por lo tanto por parte de la empresa GERDAU DIACO S.A se llevan a cabo en planta algunos ensayos con diferentes cantidades de materia prima variando principalmente la cal calcíca ya que es donde hay un gran aumento para determinar los valores en los que se presenta una mejora evidenciada principalmente en la escoria producida, realizar una colada implica además de las materias primas ya mencionadas 50 ton de chatarra y 400 Kwh/ton de energía aproximadamente; motivo por el cual se decide realizar 6 coladas de prueba en las cuales se hace una replica agregando 1500 kg de CaO, 400 kg de acondicionador y 500 kg de coque (coladas 1 y 5), y una replica con el uso de cal dolimítica (coladas 2 y 6). Estas replicas se llevan a cabo para determinar si otros factores como la calidad de la chatarra y la materia prima

afectan los parámetros influyentes en la formación de escoria espumosa. A continuación en la tabla 23 están las coladas propuestas.

Tabla 23. Materias primas para coladas de prueba.

Número colada	Cal dolomítica (kg)	Cal Cálcica (kg)	Acondicionador (kg)	Coque (kg)
1	-	1500	400	500
2	1000	1500	-	500
3	-	1200	400	500
4	-	1800	400	500
5	-	1500	400	500
6	1000	1500	-	500

Fuente: elaboración propia.

Estos datos de materia prima son los acordados por medio de los ensayos y el balance realizado para las propuestas de mejora 1 y 2 en el capítulo 3.

4.2 COLADAS DE PRUEBA

Las materias primas son llevadas a laboratorio para realizar diferentes pruebas para identificar la composición de estas como se ve en las tablas 24-27.

Tabla 24. Composición de cal cálcica obtenido por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.

Compuesto	%
CaO	91.83%
MgO	0.22%
SiO ₂	0.70%
Al ₂ O ₃	1.24%
(K ₂ O, Na ₂ O, SrO, ZnO,SO ₃ ...) y compuestos orgánicos	6.01%

Fuente: elaboración propia, con base en: resultados obtenidos por laboratorio externo.

Tabla 25. Composición de cal dolomítica obtenido por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.

Compuesto	%
CaO	58.16%
MgO	9.35%
SiO ₂	5.19%
Al ₂ O ₃	2.11%
Otros (K ₂ O, Na ₂ O, SrO, ZnO,SO ₃ ...) y compuestos orgánicos	25.19%

Fuente: elaboración propia, con base en: resultados obtenidos por laboratorio externo.

Tabla 26. Composición de acondicionador obtenido por laboratorio externo por análisis FRX sobre perla.

Compuesto	%
CaO	3.29%
MgO	62.98%
SiO ₂	2.5%
Al ₂ O ₃	0.64%
Otros (K ₂ O, Na ₂ O, SrO, ZnO,SO ₃ ...) y compuestos orgánicos	30.59%

Fuente: elaboración propia, con base en: resultados obtenidos por laboratorio externo.

Tabla 27. Composición de coque obtenido por laboratorio externo por análisis ASTM D3180-15.

Compuesto	%
Carbono fijo	84.43%
Material volátil	1.02%
Humedad	0%
Cenizas	14.55%

Fuente: elaboración propia, con base en: resultados obtenidos por laboratorio externo.

Se llevan a cabo 6 coladas con las materias primas acordadas para evaluar la propuesta de mejora como se ve en la tabla 28.

Tabla 28. Características de las coladas de prueba.

Número de colada	1	2	3	4	5	6
Cargues	4	4	4	4	4	4
Temperatura colado (°C)	1644	1635	1623	1650	1623	1612
Energía chatarra (Kwh/ton)	385.46	387.67	389.19	385.77	385.38	395.81
TTT(min)	56	64	62	49	45	50
Carbón total (Kg/ton)	6.02	3.55	5.0978	4.631	5.0977	6.45
Oxígeno (Nm3/ton)	40.84	41.02	39.63	43.27	37.804	43.98
Gas natural (Nm3/ton)	11.44	10.35	11.89	11.69	10.07	10.97
ppm O ₂	683	699	-	685	403	-
Chatarra cargada	50200	50120	48100	50600	50080	50100

Fuente: elaboración propia, con base en: GERDAU DIACO S.A.

Al realizar las coladas se obtiene la composición de la escoria por medio del espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X (ver tabla 29).

Tabla 29. Composición de la escoria de las corridas de prueba.

Número de colada	1	2	3	4	5	6
%Al ₂ O ₃	8.21	7.31	7.98	7.12	8.77	7.06
%CaO	28.44	31.70	31.21	30.97	31.72	29.34
%FeO	26.30	25.85	26.00	25.74	25.83	27.35
%MgO	7.64	5.31	9.28	5.58	7.26	5.37
%MnO	6.10	5.17	6.12	5.84	5.25	4.65
%P ₂ O ₅	0.46	0.41	0.49	0.46	0.43	0.43
%SiO ₂	15.59	17.11	16.49	16.31	16.27	14.87
%S	0.13	0.070	0.080	0.060	0.080	0.060
%TiO ₂	0.75	0.67	0.81	0.69	0.74	0.61

Fuente: elaboración propia, con base en: GERDAU DIACO S.A.

Con los datos obtenidos se realizan los cálculos de todos los parámetros fisicoquímicos influyentes en la formación de la escoria como se muestra en la tabla 30.

Tabla 30. Propiedades calculadas de las coladas de prueba.

Número de colada	1	2	3	4	5	6
B ₂	1.82	1.85	1.89	1.90	1.95	1.97
ρ(kg/m ³)	2933.40	2925.30	2928	2923.32	2924.94	2952.30
γ (N/m)	0.00063	0.00062	0.00062	0.00062	0.00062	0.00063
μ (Kg/m·s)	0.26	0.28	0.28	0.25	0.30	0.30
Σ (s)	22.10	24.03	23.76	21.50	25.19	24.99

Fuente: elaboración propia.

4.2.1. Análisis de resultados. En las 6 coladas realizadas se observa que la basicidad binaria se encuentra en los rangos de una escoria básica óptima (1.7-2.2), las basicidades obtenidas van desde 1.82 a 1.97, las muestras que se acercan al valor de basicidad propuesto (1.91) son las coladas 3, 4 y 5 a las cuales se les agrega acondicionador y diferentes cantidades de cal cálcica. El agregar acondicionador en vez de cal dolomítica permite no solo agregar más MgO a la escoria sino también disminuir el contenido de SiO₂ permitiendo una mejor relación entre CaO y SiO₂. La colada 1 con las mismas cantidades de cal cálcica y acondicionador no logra una basicidad cercana a la propuesta y puede deberse a que la chatarra utilizada en esa colada tuviera más tierra de lo normal; así mismo, las coladas 2 y 6 a las cuales se les agrega cal dolomítica, las escorias tienen una basicidad binaria (1.85 y 1.97) alejada del valor propuesto.

Respecto a la densidad de la escoria de las 6 coladas realizadas se observa en la tabla 31 que están dentro del rango de 2-4 g/cm³ por lo tanto la escoria sobrenada en el acero fundido, donde estos valores de densidad obtenidos son muy similares entre si ya que los porcentajes de FeO en la escoria van desde 25.74 a 27.35 y las viscosidades de la escorias se encuentra en el rango de 0 a 1 Pa.s.

Tabla 31. Densidades de las escorias de las coladas de prueba.

Número de colada	ρ (g/cm ³)
1	2.93
2	2.93
3	2.93
4	2.92
5	2.92
6	2.95

Fuente: elaboración propia.

El %MgO se obtiene con valores cercanos entre si en las coladas 1, 3 y 5 gracias al uso del acondicionador que contiene mayor contenido de MgO que la cal dolomítica pero menor contenido de CaO y por ello se agrega más cal cálcica. Aunque a la colada 4 también se le agrega acondicionador el %MgO es de 5.58 pues es la colada a la que se agrega más cal cálcica aumentando el contenido de SiO₂ en la escoria. Por otro lado, las coladas 2 y 6 en las que se utiliza dolomítica se observa que el contenido de MgO no llega al 6% colocando a la escoria en el límite de la saturación. El %CaO en las coladas realizadas no llega al valor propuesto de 38% pues la cantidad de cal cálcica utilizada en las pruebas no es la suficiente para aportar la cantidad de CaO a la escoria. Del mismo modo, la cantidad de FeO esta alrededor del 26%, valor que fue propuesto ya que las cantidades CaO y MgO aumentaron en la escoria disminuyendo la composición de este compuesto, además la cantidades de oxígeno y coque inyectadas por el sistema permitieron el balance adecuado de Fe convertido en FeO y viceversa.

4.3 COMPARACIÓN DE LAS COLADAS REALIZADAS CON LAS DEL AÑO 2018

Para realizar la comparación se toman 6 coladas del año 2018 que tuvieran una basicidad similar a las coladas de prueba. Se seleccionan las coladas por la basicidad binaria ya que es la propiedad que se puede manipular fácilmente con las cantidades de cales a agregar, conociendo el contenido de SiO₂ que ingresa al horno. En la tabla 32 se observan las 6 coladas seleccionadas con sus características.

Tabla 34. Características de las colas seleccionadas del 2018.

Número de colada	Cal cálcica (Kg)	Cal dolomítica (Kg)	Coque (Kg)	B ₂	Energía eléctrica (kWh/ton)	TTT (min)	Σ (s)
1	600	900	600	1.82	391.05	57	18.15
2	900	900	600	1.85	384.60	48	19.27
3	900	900	600	1.89	393.47	51	21.68
4	900	900	600	1.90	373.48	52	18.81
5	1800	500	600	1.95	401.81	56	16.65
6	900	900	300	1.97	376.19	52	23.67

Fuente: elaboración propia, con base en: GERDAU DIACO S.A.

En el 2018 se agrega menor cantidad de cal cálcica y cal dolomítica, además, no se usa acondicionador. Las coladas están ordenadas de forma ascendente por la basicidad binaria y estas se comparan con las coladas de prueba con las que tengan el mismo número de colada, es decir, colada 1 de las coladas de prueba con la colada 1 del año 2018.

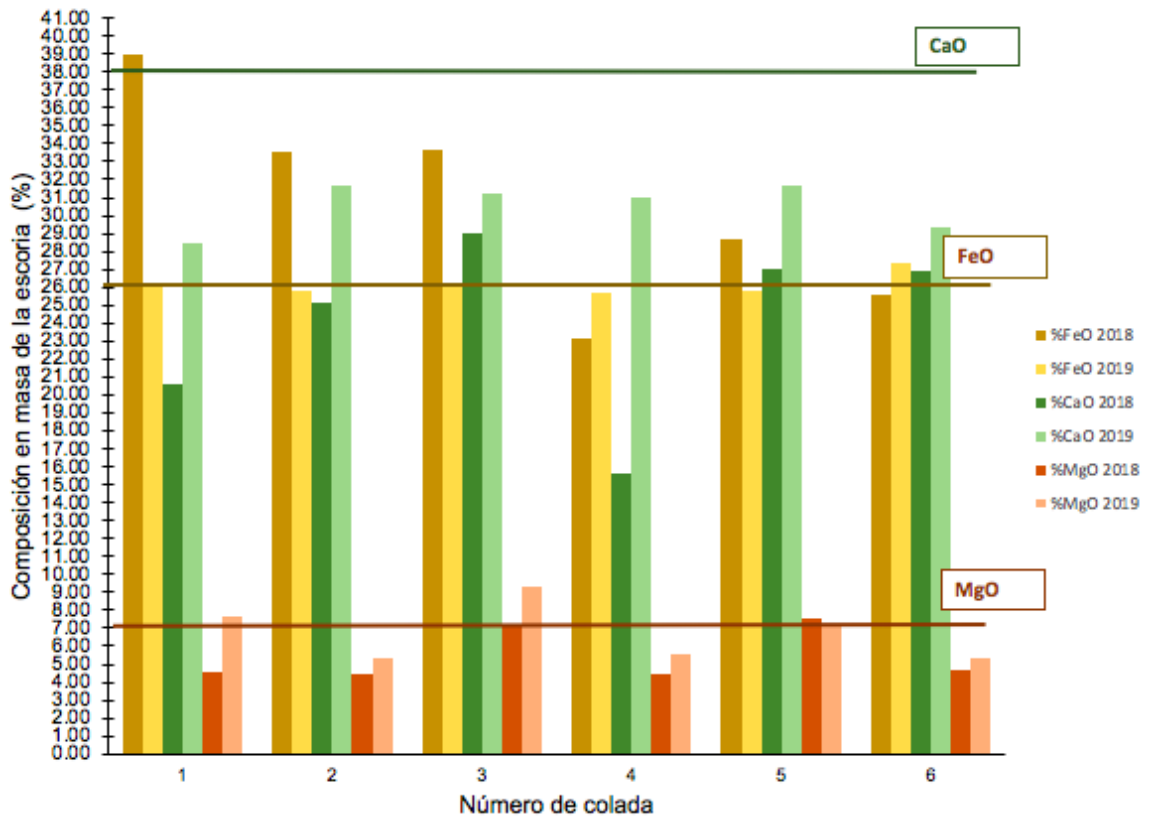
4.3.1. Composición de la escoria. En la tabla 33 se tiene los porcentajes de CaO, MgO y FeO de las coladas del 2018 que sirven para compararlas a través de la gráfica 11 con las composiciones de la escoria de las coladas de propuesta de mejora.

Tabla 35. Composiciones de FeO, MgO y CaO en la escoria de las coladas del 2018 seleccionadas.

Número de colada	%FeO	%CaO	%MgO
1	38.92	20.63	4.61
2	33.56	25.10	4.49
3	33.65	29.00	7.10
4	23.19	15.66	4.47
5	28.72	27.06	7.50
6	25.55	26.87	4.68

Fuente: elaboración propia, con base en: GERDAU DIACO S.A

Gráfica 11. Comparación de las composiciones de las escorias del 2018 y de la propuesta.



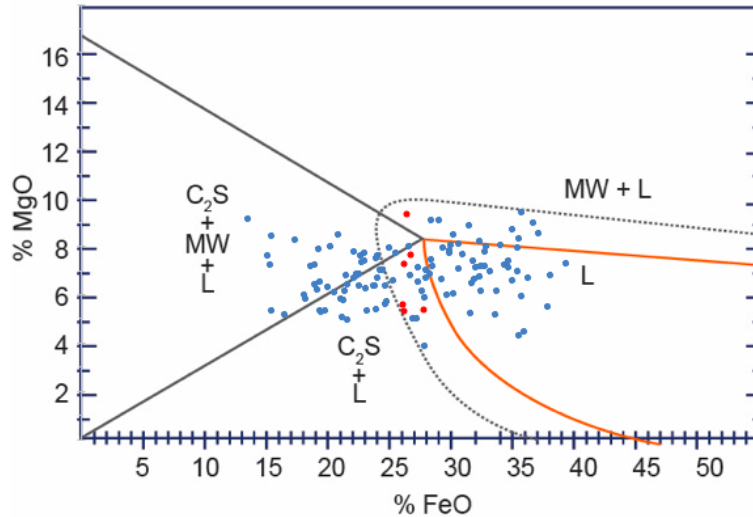
Fuente: elaboración propia, con base en: GERDAU DIACO S.A.

En la Figura 11 las barras amarillas representan el %FeO, las verdes el %CaO y las rojas el %MgO los colores oscuros representan a las coladas del 2018 mientras que los colores claros representan a la información de las coladas de prueba. Se observa que el %FeO de las coladas realizadas ha disminuido respecto a las coladas del 2018 hasta acercarse al 26% propuesto, como se había mencionado antes, esto se logra con el correcto balance de oxígeno y carbón y el aumento de las composiciones de CaO y MgO, por otro lado, las composiciones de CaO de las escorias de la propuesta han aumentado en relación a las del 2018, como se puede observar la cantidad de cal cálcica suministrada al horno aumenta pero no hasta lo propuesto debido a que no se agrega la cantidad obtenida del balance de materia. De igual forma, la cantidad de MgO aumenta acercándose al 7%, lo que no pasaba con las coladas del 2018 que en su mayoría están alrededor del 4%, en esas coladas no se usaba acondicionador.

4.3.2. Saturación de MgO. Como se mencionaba anteriormente, se modifica la composición de MgO para que la escoria se ubicara en la región de espumación en el diagrama de estabilidad isotérmica al %FeO y B_2 óptimos encontrados. Según lo anterior se puede ver en la figura 31 que las escorias de las coladas de prueba realizadas (puntos de color rojo) se encuentran en la región de buena

espumación. En esta misma figura también se puede ver escorias de más coladas (puntos azules) realizadas para dar seguimiento a la mejora en planta con las mismas cantidades de materias primas que se proponen.

Figura 31. Datos del 2019 ubicados en ISD de $B_2=2$ a 1600 °C.

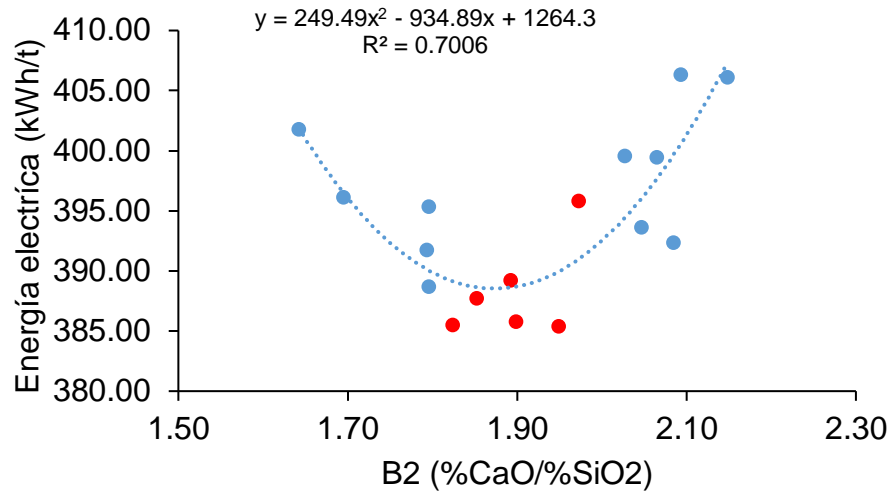


Fuente: elaboración propia, con base en: PAEZ, Juan, En; Escuela técnica acería Gerdau. Escoria del horno de arco eléctrico. 2014.

Al comparar los resultados obtenidos en la figura 31 con la figura 27 se puede ver que las escorias de las coladas del 2019 se han desplazado a la izquierda dirigiéndose hacia la zona óptima de espumación y ubicando menos datos en la zona líquida a diferencia de lo que se veía en las escorias del 2018 lo que no permitía espumar bien. Este desplazamiento fue gracias a la modificación de %FeO y de MgO en la escoria. En la figura 31 también se ven escorias donde el contenido de FeO se baja a tal punto que las escorias se vuelven crujientes (zona $C_2S+MW+L$) y no pueden espumar bien. Por eso hay que estar verificando que se alcanza el %FeO y %MgO propuesto para que las escorias espumen adecuadamente controlando la inyección de coque, oxígeno y las cargas de cales, así con las calidades de toda la materia prima.

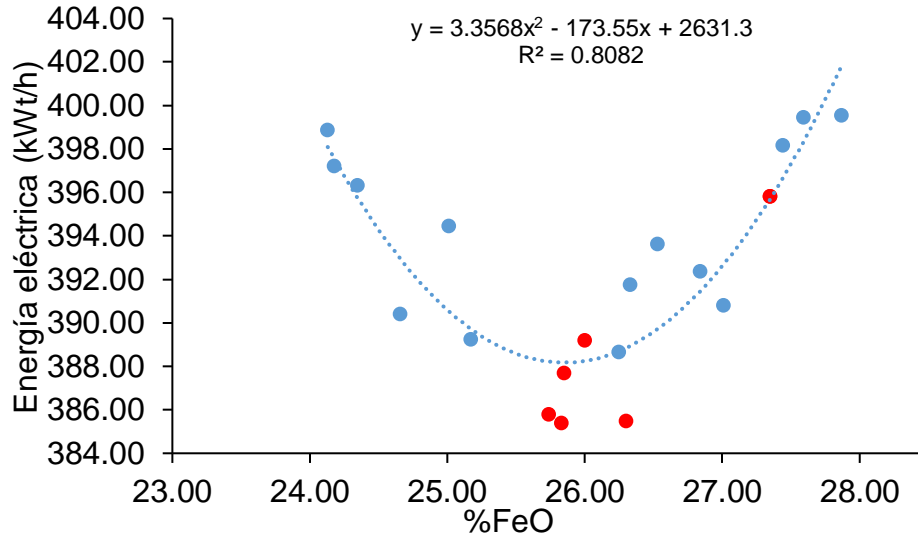
4.3.3. Energía eléctrica consumida. Para realizar la comparación de la energía consumida por el horno eléctrico se gráfica el consumo de energía eléctrico contra %FeO y la basicidad binaria de las coladas realizadas en el 2019, incluyendo la propuesta, generando un comportamiento en la gráfica 12 y 13.

Gráfica 12. Energía eléctrica vs B₂ de las escorias del 2019.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 13. Energía eléctrica vs %FeO de las escorias del 2019.



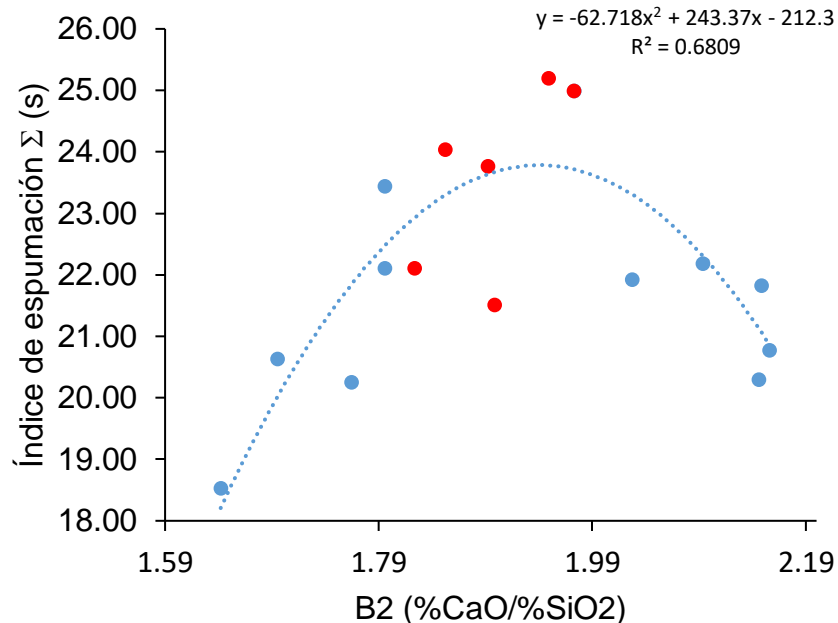
Fuente: elaboración propia.

En las gráficas 12 y 13 los puntos rojos representa a las escorias obtenidas de las 6 coladas de prueba, el resto de puntos son coladas realizadas en el año para dar seguimiento. En ambas gráficas es evidente que las escorias que menor consumo de energía son las 6 coladas que se llevaron a cabo con valores cercanos a 26% de FeO y 1.91 de B₂, excepto por la colada 6 que tiene los valores más altos de FeO (27.35%) y basicidad binaria (1.95). Al comparar la gráfica 12 y la gráfica 3 para hacer una relación general de las coladas del 2018 con las coladas del 2019 con la mejora, se puede observar que el consumo de energía es menor en las coladas del año 2019 (por debajo de 390 kwh/ton) ya que hay una mejor espumación de la escoria contrario a las escorias del 2018 que el consumo de

energía eléctrica no baja de los 388 kWh/ton. Del mismo modo, si se compara ahora la gráfica 13 con la gráfica 5 se puede decir igualmente que hay un menor consumo de energía en las escorias del 2019. Aunque se aprecie que la disminución de energía del año 2019 no es elevada respecto a la del 2018 (aproximadamente 3 kWh/ton), en cuestión de costos de producción si es significativo teniendo en cuenta que se procesa alrededor de 50 toneladas de chatarra.

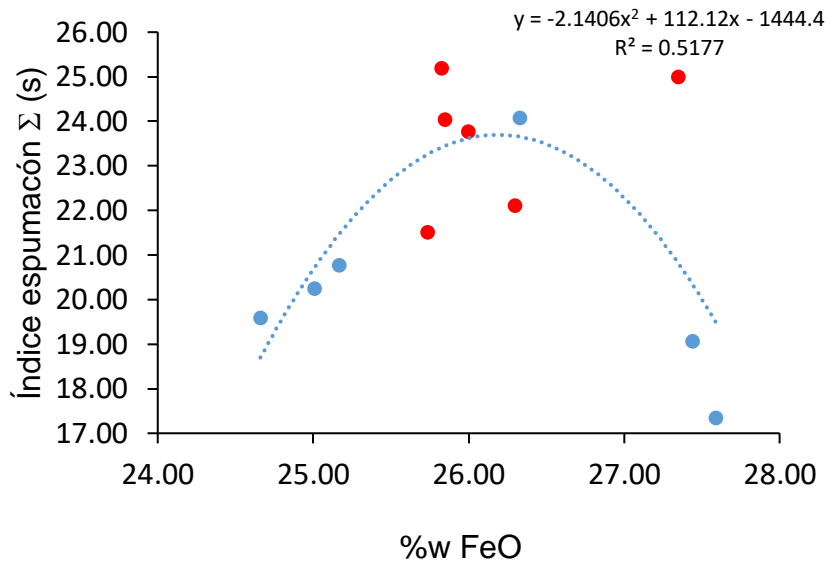
4.3.4. Índice de espumación. El índice de espumación para las coladas del 2019 se obtienen aplicando la ecuación 20, del mismo modo que se hizo con los datos del 2018. Con el valor del índice de espumación calculado, se realizan las gráficas 14 y 15.

Gráfica 14. Índice de espumación (Σ) vs Basicidad Binaria B_2



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 15. Índice de espumación (Σ) vs %FeO.



Fuente: elaboración propia.

En las gráficas 14 y 15 se ve que las escorias de las 6 coladas de prueba son las que mayor índice de espumación tienen. Se puede ver en la gráfica 15 que el punto que representa 27.35% de FeO y un índice de espumación de 24.99 s, correspondientes a la colada 6 tiene un comportamiento atípico en comparación con los otros datos. Ahora bien, si se compara la gráfica 14 con la gráfica 7 se tiene que las coladas del 2019 con la mejora tiene un mayor índice de espumación que las del año 2018 pues se disminuye %FeO lo que hace la escoria más viscosa, el MgO se aumenta acercándose a valores del 7% y por lo tanto coloca a la escoria en la región de saturación de MgO donde existen partículas sólidas que permiten una espumación mayor y el %CaO también aumenta para equilibrar el exceso de SiO_2 y obtener una basicidad binaria cercana al 1.91, el mismo aumento del índice de espumación también se ve comparando las gráfica 15 y 9. Si bien las 6 coladas realizadas obtuvieron el índice de espumación más alto con un control riguroso del proceso, en general con todos los datos del año 2019 hubo un aumento de 3 s en el índice de espumación respecto a las coladas del 2018, y el valor se ve reflejado en la disminución general del consumo de energía eléctrica del 2019 ya que el tiempo de afino disminuye pues los electrodos se cubren con escoria espumosa permitiendo la descarga energética de los electrodos directamente al acero líquido. Además al aumentar el tiempo de retención de las burbujas de CO en la escoria permite cubrir a los refractarios del arco eléctrico generado.

En resumen, obtener escorias con un 26% de FeO, 7% de MgO, 1.91 de B_2 y %CaO mayor al 30% permiten la saturación del MgO y que la escoria espume de manera adecuado ayudando a que el consumo de energía en el horno de arco eléctrico sea menor disminuyendo el desgaste de refractarios. Durante el proceso

de comparación se analiza que no se puede estudiar las coladas por separado de los dos años con respecto al consumo de energía eléctrica ya que esta no solo depende de la composición de la escoria sino también de otros factores como por ejemplo el tiempo que tarda abierto el horno en el momento de carga de chatarra o las cantidades de chatarra que se agrega y su calidad. Se podría hacer esta comparación por colada si se tuviera la energía que se utiliza solo en el afino así como el tiempo que se tarda en alcanzar la temperatura de vuelco del horno.

5. ANÁLISIS FINANCIERO

En este capítulo se presenta el costo de las principales materias primas utilizadas en el proceso y de la energía eléctrica a lo largo del año, con el fin de establecer el ahorro que conlleva la disminución del consumo de energía y la mezcla formulada de materias primas y así mismo, poder establecer un comparativo entre los años estudiados.

5.1 COSTOS DE MATERIA PRIMA Y SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

se realiza el análisis de las principales materias primas utilizadas durante el proceso del HEA y el servicio de energía eléctrica para establecer una cantidad promedio gastada en cada una de las coladas como se ve en la tabla 34.

Tabla 34. Cantidad de materia prima por colada utilizada en años 2018 y 2019 y su respectivo valor.

Materia prima	2018	2019	Und.	Valor	Und.
Chatarra	50	50	Ton/col	\$680,000	\$/ton
Cal cálcica	0.9	1.5	Ton/col	\$12,000	\$/ton
Cal dolomítica	0.9	0	Ton/col	\$17,000	\$/ton
Acondicionador	0	0.4	Ton/col	\$17,000	\$/ton
Coque	0.6	0.5	Ton/col	\$7,000	\$/ton
Antracita	0.6	0.6	Ton/col	\$2,500	\$/ton
Energía Eléctrica	391	388	kWh/ton-col	\$275	kWh

Fuente: elaboración propia, con base en: GERDAU DIACO S.A

Se puede evidenciar que la cal cálcica sufre un aumento significativo (0.6 ton) en el año 2019 esto debido al contenido de SiO₂ en la chatarra, los óxidos de magnesio en el año 2019 son aportados por el acondicionador y no por la cal dolomítica presentando mejores resultados con menor cantidad, es decir, se logra disminuir en 0.5 ton la cantidad de materia prima utilizada durante el proceso, la chatarra y la antracita son constantes, mientras que el coque disminuyó en 0.1 ton; la disminución más importante es la de la energía eléctrica (3 kWh/ton) ya que esta representa el mayor gasto en la planta y era el principal objetivo del proyecto ya que al disminuir el consumo de energía implica que los tiempos de afino sean menores y la productividad aumente; en la empresa se realizan alrededor de 681 coladas a lo largo de un mes y se obtienen aproximadamente 30,000 ton de acero motivo por el cual el ahorro de energía por tonelada es tan revelador.

5.2 COMPARACIÓN DE COSTOS DEL AÑO 2018 Y 2019

con la información de la tabla 34 se calcula el costo de cada uno de los materiales utilizados en el horno eléctrico de la siguiente forma:

Ecuación 30. Cálculo de precio de chatarra

$$\text{\$chararra} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = m_{\text{chat}} \left(\frac{\text{ton}}{\text{col}} \right) \cdot \text{precio chat} \left(\frac{\$}{\text{ton}} \right) \cdot 641 \left(\frac{\text{col}}{\text{mes}} \right) \cdot 12 \left(\frac{\text{mes}}{\text{año}} \right)$$

Donde \\$ chatarra es el precio de chatarra al año, m_{chat} es la cantidad de chatarra en toneladas usada por colada, 681 son las cantidades de coladas que se realizan normalmente en el mes y 12 son los meses que contiene el año. Remplazando los valores de la tabla 34 se obtiene para los dos años:

$$\text{\$chararra} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = 50 \left(\frac{\text{ton}}{\text{col}} \right) \cdot 680,000 \left(\frac{\$}{\text{ton}} \right) \cdot 681 \left(\frac{\text{col}}{\text{mes}} \right) \cdot 12 \left(\frac{\text{mes}}{\text{año}} \right)$$

$$\text{\$chararra} = 261,528,000,000 \frac{\$}{\text{año}}$$

Ecuación 31. Cálculo de precio de cal cálcica, dolomítica, acondicionador, coque y antracita

$$\text{PRAN}_i \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = m_i \left(\frac{\text{ton}}{\text{col}} \right) \cdot \text{PRMAT}_i \left(\frac{\$}{\text{ton}} \right) \cdot 681 \left(\frac{\text{col}}{\text{mes}} \right) \cdot 12 \left(\frac{\text{mes}}{\text{año}} \right)$$

Donde PRAN_i es el precio anual de la materia prima i , m_i es la cantidad de la materia prima i por colada (ver tabla 34), PRMAT_i es el precio de la materia prima i por tonelada de materia prima utilizada producida el cual se obtiene de la tabla 34. El subíndice i se remplaza por cada materia prima (cal cálcica, dolomítica, acondicionador, coque y antracita)

A continuación se muestra el cálculo del precio de la cal cálcica para el año 2019

$$\text{PRAN}_{\text{cal cálcica}} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = 0.9 \left(\frac{\text{ton}}{\text{col}} \right) \cdot 12,000 \left(\frac{\$}{\text{ton}} \right) \cdot 681 \left(\frac{\text{col}}{\text{mes}} \right) \cdot 12 \left(\frac{\text{mes}}{\text{año}} \right)$$

$$\text{PRAN}_{\text{cal cálcica}} = 88,257,600 \frac{\$}{\text{año}}$$

El cálculo anterior se realiza para la cal dolomítica, acondicionador, coque y antracita para los dos años y los resultados se encuentran en la tabla 35.

Ecuación 32. Cálculo del precio de energía eléctrica

$$\text{\$Energía} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = \text{Energía-consm} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{ton} \cdot \text{col}} \right) \cdot 50 \text{ ton} \cdot 275 \left(\frac{\$}{\text{kWh}} \right) \cdot 681 \left(\frac{\text{col}}{\text{mes}} \right) \cdot 12 \left(\frac{\text{mes}}{\text{año}} \right)$$

Donde \$Energía es el precio de la energía eléctrica al año, Energía-consm es la cantidad de energía eléctrica consumida por cada colada y chatarra utilizada en el horno que es de 50 toneladas y 275 equivale al precio de cada kWh. A continuación se muestra el cálculo de la energía eléctrica para el año 2018.

$$\text{\$Energía} \left(\frac{\text{\$}}{\text{año}} \right) = 391 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{ton}\cdot\text{col}} \right) \cdot 50 \text{ ton} \cdot 275 \left(\frac{\text{\$}}{\text{kWh}} \right) \cdot 681 \left(\frac{\text{col}}{\text{mes}} \right) \cdot 12 \left(\frac{\text{mes}}{\text{año}} \right)$$

$$\text{\$Energía} = 43,934,715,000 \frac{\text{\$}}{\text{año}}$$

El gasto o ahorro es la resta del año 2018 con el del 2019. La cal dolomítica se resta con el acondicionador ya que tienen el mismo precio y cumplen la misma función, el gasto o ahorro aparece en la fila del acondicionador en la tabla 35.

Tabla 35. Costos del año 2018 y 2019 materia prima en el HEA y servicio de energía eléctrica.

Materia prima	2018 (\\$/año)	2019 (\\$/año)	Gasto o ahorro (\\$/año)
Chatarra	\$ 277,848,000,000	\$277,848,000,000	\$ -
Cal calcica	\$ 88,257,600	\$ 147,096,000	\$ 58,838,400
Cal dolomítica	\$ 125,031,600	\$ -	\$ -
Acondicionador	\$ -	\$ 55,569,600	\$ 69,462,000
Coque	\$ 34,322,400	\$ 28,602,000	\$ 5,720,400
Antracita	\$ 12,258,000	\$ 12,258,000	\$ -
Energía Eléctrica	\$ 43,934,715,000	\$ 43,597,620,000	\$ 337,095,000
Ahorro anual			\$ 471,115,800

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 35 se muestran los costos basados en la producción anual de la acería, asimismo se ve en color verde las materias primas que se logran ahorrar y en rojo se evidencia el gasto mayor de cal cálcica del año 2019 respecto al 2018.

Gracias a la implementación de la propuesta de mejora se obtiene un ahorro de \$471,115,800 al disminuir el consumo de energía eléctrica en 3 kWh/ton en y aumentar el índice de espumación en 3 s.

Se realiza la mejora en la formación y espumación de escoria, lo cual asegura un mejor uso de la energía eléctrica al quedar los electrodos totalmente tapados y conduciendo la energía hacia la fundición de la chatarra, disminuyendo así el tiempo de afino y por ende el tiempo tap to tap.

El uso de más cal cálcica asegura mayor eficiencia en el proceso productivo y el gasto es mínimo en comparación con el ahorro de energía eléctrica que este

genera, este aumento también se afecta por la disminución del portador del MgO (acondicionador) el cual contiene menos contenido de CaO y es más costoso proporcionando un ahorro en este material respecto al 2018.

6. CONCLUSIONES

- Se determino que la espumación de la escoria sucede durante la etapa de refinado en el HEA, donde, se busca remover compuestos nocivos para el acero por medio de la oxidación de elementos como Fe, Si, Mn, Al, Ti, P entre otros metales debido a la inyección de oxígeno y carbono, también depende de la calidad y el buen almacenamiento de las cales, el contenido de tierra en la chatarra y propiedades físico químicas de la escoria como la viscosidad, basicidad binaria (entre 1.7 a 2.2), densidad (entre 2 a 4 g/cm³), tensión superficial y saturación del MgO (entre 25%-35%).
- Se plantean dos propuestas de materias primas 2975 kg de cal cálcica, 610 kg de acondicionador y 500 kg de coque o 2365 kg de cal cálcica, 1237 kg de cal dolomítica y 500 kg de coque para procesar 50000 kg de chatarra con las cuales se logra un índice de espumación mayor a 20 s (buena espumación) con el menor consumo de energía eléctrica con valores de $B_2=1.91$, %FeO=26%, %CaO=38%, %MgO= 7% para que se ubique en la zona saturación en el ISD, densidad entre 2 a 4 g/cm³ y viscosidad entre 0 a 1 Pa.s.
- Se establece que las mejores cantidades de materias primas a agregar son de 1500 kg de cal cálcica, 400 kg de acondicionador y 500 kg de coque ya que al compararlas con las coladas del 2018 se obtiene una disminución en el consumo de energía eléctrica de 3 kWh/ton y un aumento en el índice de espumación de 3 s y por consiguiente el tiempo de afinado es menor.
- Del análisis financiero se concluye que al disminuir el consumo de energía eléctrica en 3 kWh/ton se ahorra \$337,095,000 al año. También hay un ahorro en el acondicionador a causa de que esta materia prima tiene mayor contenido de MgO pero menor cantidad de CaO por lo cual se debe agregar más cal cálcica siendo el gasto del 2019 respecto al 2018 de \$58,838,400 el cual no es mayor al ahorro del acondicionador de \$69,462,000, para un ahorro total al año de \$471,115,800.

7. RECOMENDACIONES

- Hacer un análisis económico respecto al desgaste de los refractarios por el arco eléctrico y la escoria espumosa y con la ayuda del sistema de detección de armónicos.
- Determinar la cantidad de oxígeno que se utiliza para la fundición del acero y el afino en el HEA con el fin de conocer las cantidades de oxígeno utilizados para el corte de chatarra y el oxígeno para la oxidación de los metales.
- Determinar las composiciones de gases y polvos que se generan en el HEA para comparar los resultados de balance de masa al considerarlos.
- Determinar el efecto del flujo de inyección de antracita y oxígeno en la espumación de escoria.

BIBLIOGRAFÍA

ALAS, Cesar y PÉREZ, Rafael. Diccionario de siderurgia: español-inglés, inglés- español. [En línea]. Oviedo: Universidad de Oviedo, 2003. 625 - 655 p. [consultado 5, mayo, 2019]. ISBN 8483173921.

Disponibile en:
https://books.google.com.co/books?id=ErtcbG6RLWAC&pg=PA655&lpg=PA655&dq=Tiempo+tap+to+tap+metalurgia&source=bl&ots=syCvYvboso&sig=_L_S9lozqXp0ooIWqaZocTxpjfuA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiT3lymt6TdAhUGyIMKHdXyCP0Q6AEwAXoECAkQAQ#v=onepage&q=Tiempo%20tap%20to%20tap%20metalurgia&f=false

ALMEIDA, Rodolfo Amaldo Montecinos de; VIEIRA, Deisi; BIELEFELDT, Wagner Viana and VILELA, Antônio Cezar Faria. Slag Foaming Fundamentals - A Critical Assessment. Mat. Res. 2017, vol.20, n.2, pp.474-480. [Sitio web]. [Consulta el 15 de agosto de 2018]. Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/mr/v20n2/1516-1439-mr-1980-5373-MR-2016-0059.pdf>. Epub Mar 02, 2017. ISSN 1516-1439. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0059>.

AMINORROAYA, S. & Edris, H. The effect of foamy slag in electric arc furnaces on electric energy consumption. 7th European Electric Steelmaking Conference (pp. 2.447-2.456). AIM. (2002). [Sitio web]. [Consulta 13 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=2409&context=aiimpapers>

BRIZUELA, P y GARAY H. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Hierro y acero. En: REVISTA VIRTUAL PRO. párr 2. p 5. [Sitio web]. [Consulta 26 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.revistavirtualpro.com/revista/industria-del-acero/5>

CAP S.A. glosario de terminos siderurgicos. [Sitio web]. Santiago de Chile: la entidad. 10-18 p. [consultado 5, mayo, 2019]. Disponible en: https://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/glosario_de_terminos_siderurgicos.pdf

CHAMBERGO, Jorge. Balance termodinámico en la fabricación del acero y optimización del patrón de carga metálica para minimizar costos de producción en el horno eléctrico de la corporación aceros AREQUIPA S.A. Trabajo de grado ingeniero químico. Trujillo- Perú. Universidad nacional de Trujillo. 2012. p. 1-118. [Sitio web]. [Consulta el 25 de agosto de 2018]. Disponible en: http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3422/ChambergoVargas_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y

CHIRIMI, Edwin y GARCIA, David. Industria siderúrgica y mercado del acero: caracterización y perspectivas. En: Informe económico para aceros ferrasa. octubre-diciembre del 2009. no 20. p. 1 - 2. [Sitio web]. [Consulta el 19 de agosto de 2018]. Disponible en: https://camacol.co/sites/default/files/secciones_internas/EE_Coy20091222044525.pdf

CONEJO, A.N, TORRES, R y CUELLAR, E. análisis industrial del a reducción de óxido de hierro mediante la inyección de finos de carbono. Enero, 1999. Vol. 35, no. 2, p 111-125. En: REVISTA DE METALURGIA. [Sitio web]. [Consulta el 02 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>

DICKER, Jonathan. Monitoring of slag foaming and other performance indicators in an electric arc furnace. Tesis para obtener el título de master en ingeniería. Sydney: Universidad de nueva gales del sur. Escuela de ciencia en materiales e ingeniería, 2014. 17-18 p. [PDF]. [Consulta el 22 de septiembre de 2018].

ECURED. Colada del acero. [Sitio web] Ecured: 2016. [Consulta 5, mayo, 2019]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Colada_del_acero

ENRÍQUEZ BERCIANO, José, et al. Tecnología del hacero parte I. [en línea]. Monografía. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid: 2009. [Consulta 5, mayo, 2019]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/115195467/Berciano-Temps-Monografias-sobre-Tecnologia-del-Acero-Pt-I-Aceria-Elctrica>

GERDAU DIACO. Gerdau Diaco ha reducido en un 2,4% su consumo energético en el laminador de su planta de Tuta. En: ACIS. 2017. [Sitio web]. [Consulta el 20 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://acis.org.co/portal/content/gerdau-diac0-ha-reducido-en-un-24-su-consumo-energético-en-el-laminador-de-su-planta-de-tuta>

GJ, comunicaciones. Gerdau Diaco contribuye a los esfuerzos del país para lograr una mayor eficiencia energética. En: CONSTRUDATA. Octubre, 2017. [Sitio web]. [Consulta el 20 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://www.construdata.com/Bc/Construccion/Noticias/gerdau-diac0-eficiencia-energetica-27-10-17.asp>

GOMEZ, Víctor. Clasificación de los aceros [diapositivas]. Facultad Regional Tucumán, el conjunto de guías de estudio de la materia materiales metálicos 13 diapositivas. [Sitio web]. [Consulta 26 agosto de 2018]. Disponible en: <http://www.frt.utn.edu.ar/tecnoweb/imagenes/file/mecanica/Acero,%20Clasificaci%C3%B3n,%20Aluminos.pdf>

HAN, Chan. Viscosity studies of high-temperature metallurgical slags relevant to iron making process. Tesis de doctorado. Queensland: Universidad de Queensland. 2017. 94 p. [Sitio web]. [Consulta el 20 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:689105>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153p.

ITO, K y FRUEHAN, R.J. Study on the slag foaming of CaO-SiO₂-FeO: Part I. Foaming parameters and experimental results. Metallurgical Transactions B. 1989; 20 (4): 509-510 p. [Sitio web]. [Consulta el 13 de abril de 2019]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02654600>

KIPEPE, T y PAN, X. Importance and Effect of Foaming Slag on Energy Efficiency. En: world foundry congress (19-21, mayo 2014. Pallacio Euskalduna, BILBAO). Importance and Effect of Foaming Slag on Energy Efficiency. BILBAO. Department of Extraction Metallurgy, Faculty of Engineering and the

Built Environment, University of Johannesburg Johannesburg, South Africa. 2014. p. 1-9. [Sitio web]. [Consulta 22 agosto de 2018]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/54187641.pdf>

KEKKONEN, Marko; OGHASILASIE, Haile y LOUHENKILPI, Seppo. Viscosity models for molten slags. Aalto University Science + Technology. 2012. 13-14 p. [Sitio web]. [Consulta el 25 de enero de 2019]. Disponible en: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/3640/isbn9789526046037.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

LUZ, A.G. et al. Slag foaming practice in the steelmaking process. Ceramics International. EN: CERAMIC INTERNATIONAL. 2018. p. 15. [PDF]. [Consulta el 12 de agosto de 2018].

MAES, R. Celox for on-line process control in modern steelmaking. Heraeus Electro-Nite. [Sitio web]. [Consulta el 05 marzo de 2019]. Disponible en: https://www.heraeus.com/media/media/hen/doc_hen/steel_applications/steelmaking/Celox_for_on-line_process_control_in_modern_steelmaking_-_Rudi_Maes.pdf

MENDEZ, Sylvia Leonor. Control para la formación de escoria espumosa en hornos de arco eléctrico basado en la medición de armónicas. Informe final de cursos en cooperación técnica y desarrollo social como requisito parcial para optar al título de ingeniero electrónico. Sartenejas. Universidad Simón Bolívar. 2007. [PDF]. [Consulta el 26 de septiembre de 2018].

PAEZ, Juan, et al. Cap 1-5. En: Escuela técnica acería Gerdau. Escoria del horno de arco eléctrico. 2017. Cod. AC-226. p. 5-63. [Modulo]. [Consulta el 01 de agosto de 2018]. Disponible en: GERDAU DIACO S.A.

PARRA, L. y SÁNCHEZ, G. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica diaco. Municipio tuta boyacá. Programa de ingeniería Ambiental y sanitaria. Universidad de la Salle. Facultad de ingeniería. 2010. p. 26-54. [Sitio web]. [Consulta el 16 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/15030/T41.10%20P247a.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PRETORIUS, EB. Y CARLISLE, RC. Foamy slag fundamentals and their practical application to electric furnace steelmaking. En: Proceedings of the 16th Process Technology Conference; 1998 Nov 15-18; New Orleans, LA, USA. [Sitio web]. [Consulta 21 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/13a3/e1a9976aece5a9611393562061b92bda9fca.pdf>

REVISTA DINERO. La industria le apuesta al ahorro eléctrico En: REVISTA DINERO. Mayo, 2014 párr 5. [Sitio web]. [Consulta el 19 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.dinero.com/empresas/articulo/proyectos-eficiencia-energetica/196567>

RODRIGUEZ, Hemenegildo. Los fundamentos de la técnica del oxicorte. En: Ingemecanica. 2. El proceso de oxicorte Tutorial n° 44. [Sitio web]. [Consulta 01 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn44.html>

SANDERS, Willy. What is optical emission spectroscopy (OES). Hitachi [sitio web]. 26 de octubre del 2017. [Sitio web]. [Consulta el 10 marzo de 2019]. Disponible en: [https://hha.hitachi-hightech.com/pt/blogs-events/blogs/2017/10/25/optical-emission-spectroscopy-\(oes\)/](https://hha.hitachi-hightech.com/pt/blogs-events/blogs/2017/10/25/optical-emission-spectroscopy-(oes)/)

SANDOVAL, Juan. Preparación de muestras de ferroleaciones para análisis por fluorescencia de rayos x. [diapositivas]. Aceros GERDAU DIACO SA. [Consulta 15 marzo de 2019] Disponible en: GERDAU DIACO S.A

STEEL UNIVERSITY. Homo cuchara. [Sitio web]. Bruselas: World Steel Association. [Consulta 5, mayo, 2019]. Disponible en: <https://www.emaze.com/@AOFZTIWCW/htc-6166>

THERMO ELECTRON CORPORATION. ARL 3460 metals analyzer Optical Emission Spectrometer. p. 15 [Sitio web]. [Consulta 10 de mayo de 2019]. Disponible en: <http://inotech.com.vn/manager/VanBan/ARL%203460%20Technical%20Description20176173494.pdf>

THERMO FISHER SCIENTIFIC, Thermo Scientific ARL OPTIM'X Series WDXRF Spectrometer. p. 2-7. [Sitio web]. [Consulta 10 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/brochures/XRF-BR41146-arl-optimx-wdxf-spectrometer.pdf>

UNAMUNO, I. Cap 1-8. En: Escuela técnica acería Gerdau. Procesos HEA fusión y refinó. 2013. Cod. AC-210, AC-512. p. 7-210. [Consulta el 01 de agosto de 2018]. Disponible en: GERDAU DIACO S.A.

UNIVERSIDAD DE ALICANTE, servicios técnicos de investigación: Espectroscopia de fluorescencia de rayos x. [Sitio web]. [Consulta el 01 de diciembre de 2018]. Disponible en: <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/espectroscopia-de-fluorescencia-de-rayos-x.html>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACION A DISTANCIA. Espectrometría de fluorescencia de rayos X. p. 1-4. [Sitio web]. [Consulta el 05 de diciembre de 2018]. Disponible en: http://www.usc.es/export9/sites/webinstitucional/gj/investigacion/riaidt/raiosx/descargas/UNED_Curso_Fluorescencia.pdf

VÁSQUEZ, Alberto. Trazabilidad de la Varilla de Acero para Construcción #3 como base para la elaboración de la Declaratoria Ambiental del Producto en ArcelorMittal Costa Rica. Proyecto final de graduación licenciado en ingeniería ambiental. Cartago.: Tecnológico de Costa Rica Ingeniería Ambiental. 2016. 19-20 p. [Sitio web]. [Consulta 12 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6798/trazabilidad-varilla-acero-construccion-base.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

VIEIRA, Deisi, Análise comparativa da composição química de aço e escória e rendimento metálico de um fea entre parâmetros de carregamento e injeções distintos. Dissertação para obtenção do título de mestre em Engenharia. Porto Alegre. Universidade federal do rio grande do sul escola de engenharia. 2017. p. 22- 158. [PDF]. [Consulta el 26 de agosto de 2018].

ANEXOS

ANEXO A. MEMORIA DE CÁLCULOS

- **Cálculo de la basicidad**

Binaria para el dato 1 de las coladas del 2018 a partir de la ecuación 3:

$$B_2 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} = \frac{23.00}{20.96} = 1,29$$

- **Cálculo basicidad binaria donde el consumo de energía es mínimo**

Para la obtención de la basicidad binaria donde el consumo de energía eléctrica es mínimo de la gráfica 3, se deriva la ecuación $y=235.15x^2-889.35x+1229.6$ ($R^2=0.7868$) de la curva obtenida, se iguala a cero y se despeja x:

$$f(x) = 235.15x^2 - 889.35x + 1229.6$$

$$f'(x) = 470.3x - 889.35$$

$$470.3x - 889.35 = 0$$

$$x = \frac{889.35}{470.3} = 1.89$$

- **Cálculo %FeO donde el consumo de energía es mínimo**

Para la obtención del %FeO donde el consumo de energía eléctrica es mínima se deriva la ecuación de la curva $y=5.9893x^2-318.26x+4621.3$ ($R^2=0.7152$), se iguala a cero para despejar x:

$$f(x) = 5.9893x^2 - 318.26x + 4621.3$$

$$f'(x) = 11.9786x - 318.26$$

$$11.9786x - 318.26 = 0$$

$$x = \frac{318.26}{11.9786} = 26.57$$

- **Cálculo de la densidad**

Para el dato 1 de las coladas del 2018:

$$\rho = 2.46 + 0.018 (31.16\%) \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rho = 3,021 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

- **Cálculo de la viscosidad**

Composición másica normalizada de CaO en el dato 1 de las coladas del 2018 con la ecuación 21:

$$\% \text{CaO}_{\text{normalizado}} = \frac{23.00\%}{85.28\%} = 0.2697 \cdot 100 = 26.97\%$$

Cálculo de la fracción normalizada del CaO en el dato 1 de las coladas del 2018 con la ecuación 22, donde el divisor de la ecuación 22 es la suma de las fracciones entre la composición y su respectivo peso molecular (ver tabla 36).

Tabla 36. Peso molecular de los óxidos presentes en la escoria

Compuesto	M _i (g/mol)	Compuesto	M _i (g/mol)
Al ₂ O ₃	101.96	P ₂ O ₅	141.94
CaO	56.08	SiO ₂	60.08
FeO	71.84	S	32.07
MgO	40.30	TiO ₂	79.87
MnO	70.94		

Fuente: Elaboración propia.

$$\sum_i \frac{w_{i-n}}{M_i} = \frac{0\%}{101.96 \text{ g/mol}} + \frac{26.97\%}{56.08 \text{ g/mol}} + \frac{36.54\%}{71.84 \text{ g/mol}} + \frac{8.06\%}{40.30 \text{ g/mol}} + \frac{7\%}{70.94 \text{ g/mol}} + \frac{0.422\%}{141.94} + \frac{20.96\%}{60.08 \text{ g/mol}} + \frac{0.059\%}{32.065 \text{ g/mol}} + \frac{0\%}{79.87 \text{ g/mol}} = 1.642 \text{ mol/g}$$

La fracción molar del CaO del dato 1 es:

$$X_{\text{CaO}} = \frac{26.97\%}{\frac{56.0774 \text{ g/mol}}{1.642 \text{ mol/g}}} = 0.293$$

Con las fracciones molares calculadas, se pueden utilizar las ecuaciones de la 3 a la 13 para calcular la viscosidad. Donde primero se obtienen los valores de X_G , X_M y X_A :

$$X_G = 0.212 + 0.002 = 0.214$$

$$X_M = 0.293 + 0.122 + 0.31 + 0.06 + 2 \cdot 0 = 0.785$$

$$X_A = 0$$

Se normaliza X_G , X_M y X_A dividiéndolos por $1 + X_{TiO_2} + X_{ZrO_2} + X_{CaF_2}$:

$$X_G^* = \frac{0.214}{1+0} = 0.214$$

$$X_M^* = \frac{0.785}{1+0} = 0.785$$

$$X_A^* = \frac{0}{1+0} = 0$$

Con la ecuación 13 se calcula α :

$$\alpha = \frac{0.785}{0.785+0} = 1$$

Con α calculado se usan las ecuaciones 9, 10, 11 y 12 para obtener los parámetros de Urbain y así poder hallar B con la ecuación 8:

$$B_a = 13.8 + 39.9355 \cdot 1 - 44.049 \cdot 1^2 = 13.687$$

$$B_b = 30.481 - 117.1505 \cdot 1 + 139.9978 \cdot 1^2 = 43.328$$

$$B_c = -40.9429 + 234.0486 \cdot 1 - 300.04 \cdot 1^2 = -106.9343$$

$$B_d = 60.7619 - 153.9276 \cdot 1 + 211.1616 \cdot 1^2 = 117.996$$

$$B = 13.687 + 43.328 \cdot 0.214 - 106.9343 \cdot (0.214)^2 + 117.996 \cdot (0.214)^3 = 19.221$$

Con la ecuación 4 se tiene A:

$$A = \exp(-0.29 \cdot 19.221 - 11.57) = 5 \times 10^8$$

Por último, se calcula la viscosidad (P) con la ecuación 3:

$$\eta(P) = 5 \times 10^8 \cdot (1626^\circ\text{C} + 273.15) \cdot \exp\left(\frac{1000 \cdot 19.221}{1626^\circ\text{C} + 273.15}\right)$$

$$\eta = 2.27 \text{ P}$$

$$\eta = 2.27 \text{ P} \cdot \frac{0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}}{1 \text{ P}} = 0.227 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

- **Cálculo de tensión superficial**

Para obtener este valor se utiliza la ecuación 18 y se pasan las unidades dinas/cm a N/m para utilizar este valor en el cálculo de índice de espumación de la siguiente forma:

$$\gamma = 0.75 - 0.57 \left[\frac{17.87\%}{100} \right] - 0.137 \left[\frac{31.16\%}{100} \right] = 0.61 \text{ dina/cm}$$

$$\gamma = 0.6055 \frac{\text{dina}}{\text{cm}} \cdot \frac{100}{1\text{m}} \cdot \frac{\text{N}}{100000\text{dinas}} = 0.00061 \text{ N/m}$$

- **Cálculo del índice de espumación**

Se obtiene de la ecuación 20 a partir de los valores de densidad, tensión superficial y viscosidad calculados previamente, de este modo:

$$\Sigma = 359 \cdot \frac{0.23 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2}{\sqrt{3020.88 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 0.0006055 \text{ N}/\text{m}}}$$

$$\Sigma = 19.28 \text{ s}$$

- **Cálculo de cal dolomítica que se agrega al horno**

Para ello se utiliza la ecuación 23 en la cual $m_{\text{chatarra}} \cdot w_{\text{chat-MgO}}$ se obtiene de la tabla 12, $w_{\text{dol-MgO}}$ se obtiene de la tabla 14, $w_{\text{es-MgO}}$ es 7% y m_{escoria} se toma como base 6000 kg que luego se recalcula.

$$m_{\text{cal dolomítica}} \text{ (kg)} = \frac{6000\text{kg} \cdot 0.07 - 50000\text{kg} \cdot 0.0036}{0.3046}$$

- **Cálculo de masa de CaO en la escoria**

Se calcula por medio de la ecuación 24, donde $m_{\text{SiO}_2 \text{ en la escoria}}$ es la suma de cantidades de SiO_2 provenientes de la chatarra (tabla 12), la cal dolomítica (tabla 14) y de la reacción del Si que ingresa en la chatarra con oxígeno, como se muestra en la ecuación 25:

$$m_{\text{SiO}_2 \text{ en la escoria}} \text{ (kg)} = 1365 \text{ kg} + 755.08 \text{ kg} \cdot 0.044 + 90 \text{ kg} \cdot \frac{60.08}{28.09} = 1590.39 \text{ kg}$$

La cantidad de la escoria es:

$$m_{\text{CaO en la escoria}} = 1.91 \cdot 1590.39 \text{ kg} = 3037.64 \text{ kg}$$

- **Cálculo de la cal cálcica a agregar al horno**

La cantidad de cal cálcica a utilizar en el HEA se halla con la ecuación 26 así:

$$m_{\text{cal cálcica}} \text{ (kg)} = \frac{3037.64 \text{ kg} - 755.09 \text{ kg} \cdot 0.53 - 180 \text{ kg}}{0.94} = 2595.77 \text{ kg}$$

- **Masa de la escoria**

Para el cálculo de cal dolomítica se toma un valor inicial de 6000 kg de masa de escoria, ahora este valor se calcula con la ecuación 27 y el valor obtenido se utiliza en la ecuación 23 hasta que el valor calculado de masa de escoria sea igual al valor que se va reemplazando en la ecuación 23.

- **Cálculo del volumen de oxígeno**

Para obtener la reacción 9 se multiplica la reacción 2 por 2 para que no se cancelen variables que se tiene como el FeO y el Fe . Esta reacción sirve de base para obtener la ecuación 28 la cual se utiliza para calcular la cantidad de oxígeno:

$$V_{\text{oxígeno}} \text{ (Nm}^3\text{)} = \frac{8099 \text{ kg} \cdot 0.26 \cdot 1.5 \cdot \frac{16}{71.84}}{1.429 \text{ kg/m}^3} = 492.24 \text{ Nm}^3$$

- **Cálculo de coque**

Del mismo modo que se hizo con el oxígeno se obtiene la ecuación 29 utilizada para encontrar la cantidad de coque. La composición de carbono en coque ($w_{\text{coque-C}}$) se obtiene de la tabla 14. Remplazando:

$$m_{\text{antracita}}(\text{Kg}) = \frac{8099\text{kg} \cdot 0.26 \cdot 2 \cdot \frac{12.01}{71.84}}{0.81} = 865.36 \text{ kg}$$

ANEXO B.
RESULTADOS DE ENTALPÍA DE REACCIÓN PARA REACCIONES FORMADORAS DE ÓXIDOS

Las unidades que se manejan en todos los cálculos de entalpía son: J/mol.

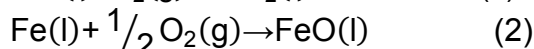
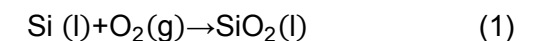


Tabla 37. Entalpía de reacción de (1) y (2) a diferentes temperaturas.

T (K)	ΔHSi	ΔHO_2	ΔHSiO_2	ΔHFe	ΔHFeO	$\Delta\text{H}_{\text{r}(1)}^\circ$	$\Delta\text{H}_{\text{r}(2)}^\circ$
900	64531.6	19240	-860179.8	38259.1	-201915.4	-943951.4	-249794.5
1000	67141	22702.7	-853284.5	41472.3	-196220.3	-943128.2	-249043.95
1100	69796.2	26213.2	-846288.7	44793.1	-190406.1	-942298.1	-248305.8
1200	72495.5	29764.1	-839210.1	48227.1	-184453.5	-941469.7	-247562.65
1300	75237.7	33348.2	-832061.7	51782.6	-178346.3	-940647.6	-246803
1400	78021.7	36961.3	-824853.8	55471.4	-172070.2	-939836.8	-246022.25
1500	80847.1	40601.3	-817594.3	59309.4	-165613.0	-939042.7	-245223.05
1600	83713.3	44266.9	-810289.6	63317.8	-158964.0	-938269.8	-24441525
1700	86589.2	47957.4	-802944.8	67523.9	-152156.0	-937491.4	-243658.6
1800	89308.8	51672.4	-795564.2	71962.9	-145336.1	-936545.4	-243135.2
1900	92028.4	55411.4	-788151.4	76561.2	-138516.2	-935591.2	-242783.1
2000	94748	59174.2	-780664.5	81161.2	-131696.3	-934586.7	-242444.6

Fuente: elaboración propia, con basado en: FactWeb, Compound-Web.

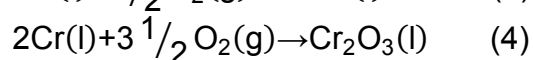
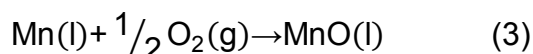


Tabla 38. Entalpía de reacción de (3) y (4) a diferentes temperaturas.

T (K)	ΔHMn	ΔHO_2	ΔHMnO	ΔHCr	$\Delta\text{HCr}_2\text{O}_3$	$\Delta\text{H}_{\text{r}(3)}^\circ$	$\Delta\text{H}_{\text{r}(4)}^\circ$
900	35485.6	19240	-300458.7	40622.2	-938318.6	-345564.3	-1086903
1000	39195.4	22702.7	-295080.1	43715.3	-925682.1	-345626.85	-1092572.2
1100	42985.2	26213.2	-289612.8	46947.4	-912922.1	-345704.6	-1098563.1
1200	47391.3	29764.1	-284058.8	50331	-900045.9	-346332.15	-1104882.3
1300	51993.7	33348.2	-278419.4	53877.6	-887058.7	-347087.2	-1111532.6
1400	56596.1	36961.3	-272695.4	57596.9	-873964.5	-347772.15	-1118522.9
1500	61198.5	40601.3	-266887.6	61496	-860766.4	-348386.75	-1125863
1600	65800.9	44266.9	-260996.4	65578.9	-847466.9	-348930.75	-1133558.9
1700	70403.3	47957.4	-255022.2	69845.8	-834068	-349404.2	-1141610.5
1800	75005.7	51672.4	-248965.3	74291.8	-820571.7	-349807.2	-1150008.7
1900	79608.1	55411.4	-242826	78906.2	-804902.6	-350139.8	-1156654.9
2000	84210.5	59174.2	-236604.5	83671.3	-789233.6	-350402.1	-1163685.9

Fuente: elaboración propia, con basado en: FactWeb, Compound-Web.

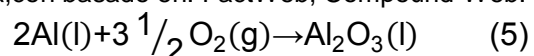


Tabla 39. Entalpía de reacción de (5) a diferentes temperaturas.

T (K)	ΔHAl	ΔHO_2	$\Delta\text{HAl}_2\text{O}_3$	$\Delta\text{H}_{\text{r}(5)}^\circ$
900	27631.9	19240	-1508575.9	-1631179.7
1000	30807	22702.7	-1494044.9	-1635118.4
1100	33982.1	26213.2	-1479506.5	-1639216.9
1200	37157.2	29764.1	-1464969.6	-1643458.4
1300	40332.3	33348.2	-1450442	-1647825.3
1400	43507.4	36961.3	-1435931.1	-1652310.5
1500	46682.5	40601.3	-1421443.3	-1656912.9
1600	49857.6	44266.9	-1406984.3	-1661633.7
1700	53032.7	47957.4	-1392559.1	-1666475.4
1800	56207.8	51672.4	-1378172.1	-1671441.1
1900	59382.9	55411.4	-1363827.2	-1676532.9
2000	62558	59174.2	-1349528.1	-1681753.8

Fuente: elaboración propia, con basado en: FactWeb, Compound-Web.

ANEXO C.
RESULTADOS DE LA ENERGÍA LIBRE DE GIBBS PARA LAS REACCIONES FORMADORAS DE ÓXIDOS

Las unidades que se manejan en todos los cálculos de la energía son: J/mol.

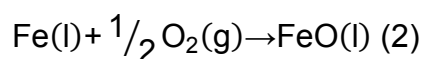
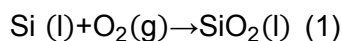


Tabla 40. Variación energía libre de Gibbs de las reacciones (1) y (2)

T (K)	ΔG_{Si}	ΔG_{O_2}	ΔG_{SiO_2}	ΔG_{Fe}	ΔG_{FeO}	$\Delta G_{(1)}$	$\Delta G_{(2)}$
900	-2404.9	-196695.5	-964376.2	-28395.1	-326182.2	-765276	-199439.4
1000	-9981.7	-220873.5	-976322.2	-35972.4	-340293.8	-745467	-193884.7
1100	-17822.1	-245400.7	-988963.9	-43876.7	-354981.6	-725741	-188404.6
1200	-25906.2	-270249.4	-1002246.2	-52088.2	-370204.6	-706091	-182991.7
1300	-34217.3	-295395.6	-1016122	-60591.2	-385930.4	-686509	-177641.4
1400	-42741.1	-320819	-1030550.6	-69372.8	-402132.7	-666991	-172350.4
1500	-51465.4	-346501.6	-1045496.2	-78423.2	-418790	-647529	-167116
1600	-60379.4	-372427.8	-1060927.7	-87735.1	-435884.2	-628121	-161935.2
1700	-69473.9	-398584.1	-1076817.2	-97303.6	-453399.9	-608759	-156804.3
1800	-78732.5	-424958.3	-1093140.2	-107126.1	-471316.9	-589449	-151711.7
1900	-88142.3	-451539.7	-1109874.2	-117200.9	-489612.9	-570192	-146642.2
2000	-97695.4	-478318.6	-1126999.4	-127517.9	-508268.1	-550985	-141590.9

Fuente: elaboración propia, con basado en: FactWeb, Compound-Web.

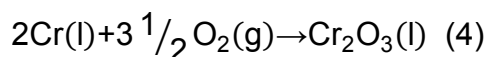
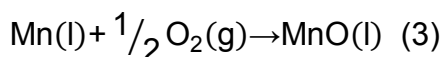


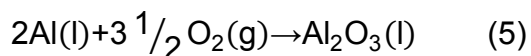
Tabla 41. Variación energía libre de Gibbs de las reacciones (3) y (4)

T (K)	ΔG_{Mn}	ΔG_{O_2}	ΔG_{MnO}	ΔG_{Cr}	$\Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3}$	$\Delta G_{(3)}$	$\Delta G_{(4)}$
900	-34411	-196696	-426408.1	-17184.7	-1172294	-293649.3	-449490.65
1000	-42375	-220874	-440690	-23772.3	-1198968	-287878.3	-378365.95
1100	-50715	-245401	-455515	-30676.3	-1226913	-282099.6	-306658.05
1200	-59421	-270249	-470841.4	-37881.2	-1256025	-276295.7	-234389.9
1300	-68509	-295396	-486634.8	-45374.9	-1286216	-270428.3	-161581.7
1400	-77951	-320819	-502865.5	-53148.1	-1317411	-264505.2	-88248.3
1500	-87722	-346502	-519508.4	-61193.4	-1349546	-258535.8	-14403.3
1600	-97800	-372428	-536541.5	-69504.8	-1382564	-252527.6	59942.7
1700	-108166	-398584	-553945.5	-78077.3	-1416418	-246487.5	134781.45
1800	-118803	-424958	-571703.6	-86906	-1451062	-240421.7	210103.75

Tabla 41. (Continuación)

1900	-129696	-451540	-589800.6	-95986.6	-1486517	-234335.3	285845.15
2000	-140831	-478319	-608223	-105314	-1522797	-228233.2	361946.6

Fuente: elaboración propia, con basado en: FactWeb, Compound-Web.

**Tabla 42.** Variación energía libre de Gibbs de la reacción (5)

T (K)	ΔG_{Al}	ΔG_{O_2}	$\Delta G_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\Delta G_{(5)}$
900	-35419	-196695.5	-1693361.1	-934090
1000	-42594	-220873.5	-1714671.6	-856426
1100	-50088	-245400.7	-1737438.1	-778359
1200	-57871	-270249.4	-1761528.1	-699913
1300	-65919	-295395.6	-1786830.5	-621108
1400	-74211	-320819	-1813251	-541962
1500	-82731	-346501.6	-1840708.1	-462492
1600	-91462	-372427.8	-1869130.9	-382710
1700	-100391	-398584.1	-1898456.9	-302630
1800	-109508	-424958.3	-1928630.9	-222261
1900	-118801	-451539.7	-1959603.4	-141613
2000	-128261	-478318.6	-1991330.1	-60693

Fuente: elaboración propia, con basado en: FactWeb, Compound-Web.

ANEXO D.
PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS DE LAS ESCORIAS OBTENIDAS EN EL 2018

A continuación se muestra las características de 10 coladas a manera de ejemplo ya que la base de datos, que reposa en la planta de GERDAU DIACO en tuta, es muy extensa.

Tabla 43. Parámetros importantes en la formación de escoria espumosa para las coladas del 2018.

Número de colada	T (°C)	TTT	B ₂	ρ (kg/m ³)	γ (N/m)	μ (Kg/m·s)	Σ (s)
1	1626	58	1.29	3020.88	0.0006055	0.23	19.28
2	1644	56	1.41	2956.26	0.0006096	0.21	17.91
3	1622	50	1.54	2889.12	0.0006272	0.22	19.05
4	1639	58	1.36	2891.1	0.0006101	0.22	19.30
5	1625	56	1.70	3104.94	0.0006177	0.20	16.31
6	1615	52	1.59	3161.28	0.0006156	0.20	16.82
7	1620	59	1.37	2883.9	0.0006123	0.23	20.24
8	1625	56	1.46	3020.34	0.000607	0.22	18.95
9	1625	55	1.79	2892.54	0.0006441	0.21	17.44
10	1628	56	1.77	2809.74	0.0006292	0.23	19.59

Fuente: elaboración propia.

Tabla 44. Composiciones de las escorias del 2018 obtenidas por XRF.

Número de colada	%Al ₂ O ₃	%CaO	%FeO	%MgO	%MnO	%P ₂ O ₅	%SiO ₂	%S	%TiO ₂
1	0	23.0	31.2	6.9	6.0	0.4	17.9	0.1	0
2	0	25.4	27.6	7.1	6.0	0.3	18.0	0.1	0
3	0	24.3	23.8	7.7	5.2	0.3	15.8	0.1	0
4	0	25.6	24.0	7.9	5.8	0.3	18.8	0.1	0
5	0	24.8	35.8	5.5	4.6	0.3	14.6	0.1	0
6	0	22.6	39.0	4.8	4.6	0.3	14.2	0.1	0
7	0	25.3	23.6	10.6	6.2	0.2	18.5	0.0	0
8	0	25.8	31.1	5.6	6.2	0.4	17.6	0.1	0
9	0	22.9	24.0	5.0	4.0	0.3	12.8	0.1	0
10	0	29.3	19.4	5.5	5.3	0.4	16.5	0.1	0

Fuente: GERDAU DIACO SA

ANEXO E.
Parámetros físico químicos de las escorias obtenidas en el 2019

Tabla 45. Parámetros importantes en la formación de escoria espumosa para las coladas del 2019.

Número de colada	(°C)	TTT	B ₂	ρ (kg/m ³)	γ (N/m)	μ (Kg/m·s)	Σ (s)
1	1,65	52	1.85	2995.14	0.00061	0.24	20.13
2	1,65	56	1.58	2995.14	0.0006	0.26	22.03
3	1,65	61	1.92	3090	0.00062	0.21	17.48
4	1,64	61	1.55	2985.06	0.00062	0.27	22.68
5	1,64	55	2.12	2898.3	0.00062	0.24	20.59
6	1,65	59	1.57	2935.56	0.00061	0.27	23.62
7	1,65	48	1.73	3025.02	0.00061	0.25	20.77
8	1,66	51	2.80	3076.32	0.00063	0.18	14.60
9	1,62	51	2.45	3041.4	0.00063	0.23	19
10	1,64	64	1.85	2925.3	0.00062	0.28	24.02

Fuente: elaboración propia.

Tabla 46. Composiciones de las escorias del 2019 obtenidas por XRF.

Número de colada	%Al ₂ O ₃	%CaO	%FeO	%MgO	%MnO	%P ₂ O ₅	% SiO ₂	%S	% TiO ₂
1	7.13	30.76	29.73	8.42	4.82	0.42	16.66	0.08	0.68
2	7.71	28.18	29.73	7.18	4.71	0.42	17.88	0.09	0.62
3	6.00	27.38	35.00	8.25	3.89	0.38	14.26	0.08	0.55
4	6.97	25.43	29.17	6.55	6.84	0.42	16.43	0.06	0.78
5	6.37	34.41	24.35	7.00	4.59	0.51	16.22	0.09	0.67
6	7.56	29.62	26.42	7.31	4.78	0.51	18.89	0.06	0.73
7	7.12	29.84	31.39	7.34	5.17	0.44	17.21	0.07	0.66
8	5.57	34.14	34.24	5.18	4.30	0.38	12.18	0.12	0.55
9	5.12	32.60	32.30	4.75	4.65	0.32	13.32	0.10	0.48
10	7.31	31.70	25.85	5.31	5.17	0.41	17.11	0.07	0.67

Fuente: GERDAU DIACO SA.