

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE MATERIALES AVANZADOS

# TRABAJO FIN DE MASTER

## *ESTUDIO PARA LA MEJORA DE LOS PERFILES DE TRABAJO DE UN HORNO ELÉCTRICO DE ARCO PARA LA FABRICACIÓN DE ACERO*



**Estudiante:** Martínez De Zúñiga Saldaña, Raúl

**Director/Directora:** García Romero, Ane Miren

**Curso:** 2023-2024

**Fecha:** Bilbao, 19 de Febrero de 2024

# INDICE

1.INTRODUCCIÓN.....	10
2.OBJETIVOS .....	17
3.BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO.....	19
4. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE .....	20
4.1. EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ACERO EN LA RUTA DE ACERÍA ELÉCTRICA .....	20
4.1.1. Procedimiento de fusión en el HEA de ArcelorMittal Sestao.....	21
4.1.2. Oxidación de los elementos del HEA .....	24
4.1.3. Defosforación del acero .....	25
4.2. EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (HEA) DE ARCELOR-MITTAL SESTAO...	26
4.2.1. Cuba del horno .....	28
4.2.2. Bóveda .....	29
4.2.3. Electrodos.....	30
4.2.4. Equipo de sujeción de electrodo.....	32
4.2.5. Módulos de inyección .....	33
4.2.6. Transformador del horno .....	34
4.2.7. Extracción y depuración de humos.....	35
4.3. MATERIALES .....	35
4.3.1. Materiales metálicos .....	35
4.3.2. Materiales creadores de escoria.....	41

4.3.3. Materiales de oxidación y carburación .....	43
4.4. ESCORIA DEL HEA.....	44
4.4.1. Funciones de la escoria .....	46
4.4.2. Desoxidación del FeO y espumación de la escoria.....	47
4.4.3. Beneficios de la espumación .....	48
4.4.4. Viscosidad y las partículas de segunda fase .....	51
4.4.5. Influencia de la basicidad.....	53
5. PLANTEAMIENTO.....	57
5.1. DESCRIPCIÓN DE UN PERFIL DE INYECCIÓN.....	57
5.2. DIAGRAMA DE GANTT .....	60
5.3. PROBLEMAS ACAECIDOS DURANTE LAS PRUEBAS.....	64
5.3.1. Pie de baño alto .....	64
5.3.2. Mal funcionamiento de los inyectores de carbón .....	65
5.3.3. Aparición de infundidos en el baño metálico .....	65
5.3.4. Desprendimiento de trozos de electrodo.....	65
5.3.5. Interrupción de la secuencia de coladas con 1 cesta por coladas en las que se cargan 2 cestas.....	65
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	66
6.1. PERFILES DE INYECCIÓN .....	66
6.2. SITUACIÓN DE HORNO FUNCIONANDO DE CONTINUO.....	69
6.3. SITUACION DE HORNO FUNCIONANDO CON PARADAS .....	73

6.3.1. Situación Parada 1 .....	73
6.3.2. Situación de Parada 2.....	76
7. ASPECTOS ECONÓMICOS .....	81
8. CONCLUSIONES.....	84
9. BIBLIOGRAFÍA.....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Producción anual de acero de las empresas a nivel mundial en el año 2022 [2]. .....	12
<b>Tabla 2.</b> Parámetros químicos de los materiales producidos mediante reducción directa [5].	38
<b>Tabla 3.</b> Propiedades físicas del arrabio [5]. .....	40
<b>Tabla 4.</b> Características típicas de los constituyentes del arrabio [5]. .....	40
<b>Tabla 5.</b> Perfil P1, perfil propuesto en este TFM para horno funcionando de continuo. ....	59
<b>Tabla 6.</b> Etapas de inyección de coque y oxígeno del perfil P1. ....	66
<b>Tabla 7.</b> Etapas de inyección de coque y oxígeno del P2. ....	68
<b>Tabla 8.</b> Etapas de inyección de coque y oxígeno del P3. ....	69
<b>Tabla 9.</b> Costes por peso del carbón de inyección y el de tolva/cesta. ....	81
<b>Tabla 10.</b> Consumos y costes de los diferentes usos del carbón en el perfil P1 y el perfil viejo. .....	82
<b>Tabla 11.</b> Costes y consumos eléctricos obtenidos con los perfiles P1 y el perfil viejo. ....	82

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Uso del acero en los diferentes sectores de la industria [2]. .....	11
<b>Figura 2.</b> Producción de los países en base a la producción total a nivel mundial de acero en 2022 [2].....	12
<b>Figura 3.</b> Producción de acero por diferentes rutas de diferentes [2].....	13
<b>Figura 4.</b> Localización de la acería ArcelorMittal en Sestao [1].....	14
<b>Figura 5.</b> Instalaciones de la planta siderúrgica de ArcelorMittal Sestao [1]. .....	15
<b>Figura 6.</b> Proceso de fusión del Horno de arco eléctrico [5]. .....	23
<b>Figura 7.</b> Horno de arco eléctrico de corriente directa (DC) [5].....	28
<b>Figura 8.</b> Cuba del horno de arco eléctrico [5]. .....	29
<b>Figura 9.</b> Bóveda del HEA con orificio de electrodo y tubo de extracción de humos [5].....	30
<b>Figura 10.</b> Electrodo superiores del horno de arco eléctrico [5]. .....	31
<b>Figura 11.</b> Equipo de sujeción de electrodos [5].....	33
<b>Figura 12.</b> a) Vista del módulo en su conjunto con sus respectivos inyectores, b) distribución de los módulos en el HEA. ....	34
<b>Figura 13.</b> Chatarra metálica usada en el HEA [5]. .....	36
<b>Figura 14.</b> Materiales de reducción directa en forma de a) CDRI y b) HBI.....	37
<b>Figura 15.</b> Arrabio usado para el proceso de fusión en el Horno de arco eléctrico [5].....	39
<b>Figura 16.</b> Cal calcinada dentro de su respectivo silo [5].....	42
<b>Figura 17.</b> Cal dolomítica dentro de su respectivo silo [5].....	43
<b>Figura 18.</b> Representación esquemática de los tetraedros de sílice en la sílice a) cristalina y b) fundida. Los átomos de oxígeno se muestran en blanco y los átomos de sílice en negro. [8]..	44

<b>Figura 19.</b> Representación esquemática de un óxido metálico divalente en la sílice fundida. Los iones metálicos son representados con átomos grises o sombreados. La concentración de los óxidos metálicos aumenta de izquierda a derecha [8].....	45
<b>Figura 20.</b> Mecanismo de reacciones en la interfase acero-escoria debido a la inyección de oxígeno y coque en el proceso de espumación de la escoria. ....	48
<b>Figura 21.</b> Burbujas esféricas observadas en una escoria bien espumada [11]. ....	49
<b>Figura 22.</b> Efecto en la pérdida de calor al cubrir el arco con escoria espumosa durante el proceso de HEA [4]. ....	50
<b>Figura 23.</b> Efecto de la escoria espumada en la pérdida de energía con el aumento del factor de potencia [4].....	51
<b>Figura 24.</b> Líneas de isoviscosidad para el sistema FeO – CaO – SiO <sub>2</sub> a 1450°C (mol %) [3]. .....	52
<b>Figura 25.</b> Relación entre el índice de viscosidad y la viscosidad efectiva [8]. ....	53
<b>Figura 26.</b> Comportamiento de la espumación efectiva en función de la basicidad y el contenido de FeO en la escoria [8].....	55
<b>Figura 27.</b> Efecto de la basicidad de la escoria en el índice de retención de gas [11]. ....	56
<b>Figura 28.</b> Diagrama de Gantt de la metodología seguida en el trabajo.....	61
<b>Figura 29.</b> Evolución del óxido ferroso (FeO) respecto a la cantidad de coque de inyección y de cesta (tolva) en Continuo.....	70
<b>Figura 30.</b> Evolución del óxido ferroso (FeO), magnesia (MgO) e índice de basicidad (IB) de las coladas en la situación <i>Continuo</i> .....	71
<b>Figura 31.</b> Efecto del % de FeO y el tiempo de funcionamiento del horno (min) en el consumo eléctrico del HEA. ....	72
<b>Figura 32.</b> Evolución del óxido ferroso (FeO) respecto a la cantidad de carbón de inyección y de cesta (tolva). ....	73

<b>Figura 33.</b> Evolución del óxido ferroso (FeO), magnesia (MgO) e índice de basicidad (IB) de las coladas en la situación <i>Parada 1</i> .....	75
<b>Figura 34.</b> Efecto del % de FeO en el consumo eléctrico del HEA. ....	76
<b>Figura 35.</b> Evolución del óxido ferroso (FeO) respecto a la cantidad de coque de inyección y de cesta (tolva) en Parada 2. ....	77
<b>Figura 36.</b> Evolución del óxido ferroso (FeO), magnesia (MgO) e índice de basicidad (IB) de las coladas en la situación <i>Parada 2</i> .....	78
<b>Figura 37.</b> Efecto del % de FeO en el consumo eléctrico del HEA. ....	79
<b>Figura 38.</b> Costes totales de los perfiles P1 promedio, con/sin cuchara disponible y perfil viejo. ....	83



## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<i>AC</i>	Corriente Alterna
<i>BF</i>	Horno Alto (Blast Furnace)
<i>BOF</i>	Convertidor Básico de Oxígeno
<i>CDRI</i>	Cold Direct Reduction Iron
<i>DC</i>	Corriente Continua
<i>DRI</i>	Direct Reduction Iron
<i>HBI</i>	Hot Briquetted Iron
<i>HC</i>	Horno Cuchara
<i>HDRI</i>	Hot Direct Reduction Iron
<i>HEA</i>	Horno de Arco Eléctrico
<i>HMI</i>	Human Machine Interface
<i>IB</i>	Índice de Basicidad
<i>UE</i>	Unión Europea
<i>USMCA</i>	Unión de Estados Unidos, México y Canadá

## RESUMEN

ArcelorMittal Sestao es una empresa siderúrgica que se dedica a fabricar producto plano a través de la chatarra metálica mediante el uso de un Horno de arco eléctrico para obtener el acero líquido. La escoria del HEA es crucial en el proceso. Esta se somete a un proceso de espumación gracias a la inyección de carbón y oxígeno a lo largo de diferentes etapas del proceso de fusión de la chatarra. Los caudales y tiempos de estas inyecciones son regulados gracias a unos perfiles/recetas de inyección. La composición de la escoria es indicativa de una adecuada espumación de la misma, así como del desgaste del material refractario dentro del horno por lo que ha de tener un control. Este trabajo se basa en mejorar el perfil de inyección de oxígeno y carbón para controlar la escoria.

**Palabras clave:** acero, carbón, consumo, escoria, inyección, óxido ferroso, oxígeno, perfil.

## LABURPENA

ArcelorMittal Sestao txatarra metalikotik abiatuz produktu laua ekoizten duen empresa siderurgiko bat da. Hau arku elektrikoko labeari esker lortzen du. Zepak elementu garrantzitsuena da prozesu honetan. Ikatz eta oxigeno injekzioari esker, zepak espumatzen da prozesuaren etapa desberdinetan zehar. Injekzio fluxuak eta denborak injekzio profilekin kontrolatzen dira. Zeparen konposizioa prozesuaren hainbat informazio ematen du; zeparen espumazio egokiari buruz edo material erregogorraren higadura handia den ala ez. Hau dela eta, zeparen kontrola eduki behar da. Lan honek ikatz eta oxigeno injekzio profilen hobekuntza lort nahi du, zeparen control egokia lortzeko.

**Gako hitzak:** altzairua, ikatza, kontsumoa, zepa, injekzioa, burdin oxidoa, oxigenoa, profila.

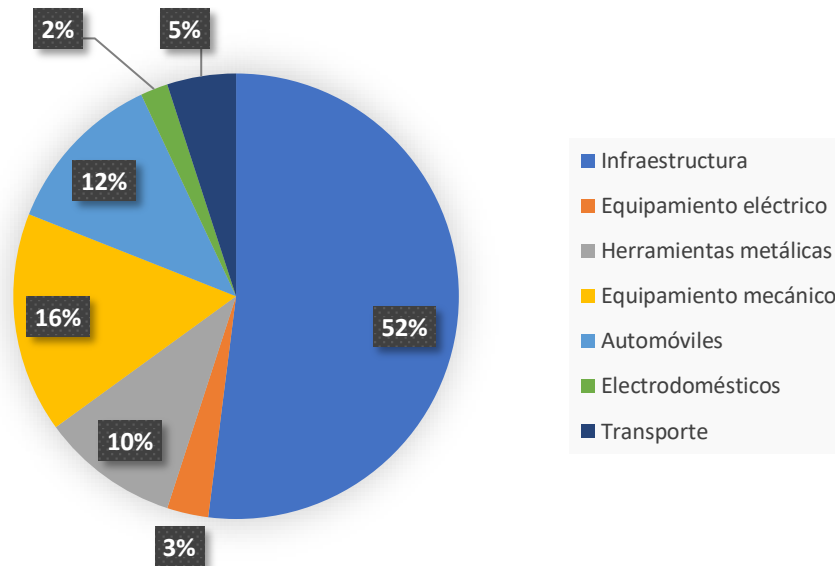
## SUMMARY

ArcelorMittal Sestao is a steel company dedicated to manufacturing flat steel products through the electric route. To produce this product, metallic scrap is first melted using an Electric Arc Furnace to obtain liquid steel. A crucial element in this process is the EAF slag. It undergoes a foaming process through the injection of coal and oxygen at different stages of the scrap melting process. The flow rates and timing of these injections are regulated by injection profiles/recipes. The composition of the slag is indicative of proper foaming and refractory material wear inside the furnace, thus requiring control. This work is focused on improving the oxygen and coal injection profile to control the slag within pre-established optimal ranges.

**Keywords:** steel, coal, consumption, slag, injection, ferrous oxide, oxygen, profile.

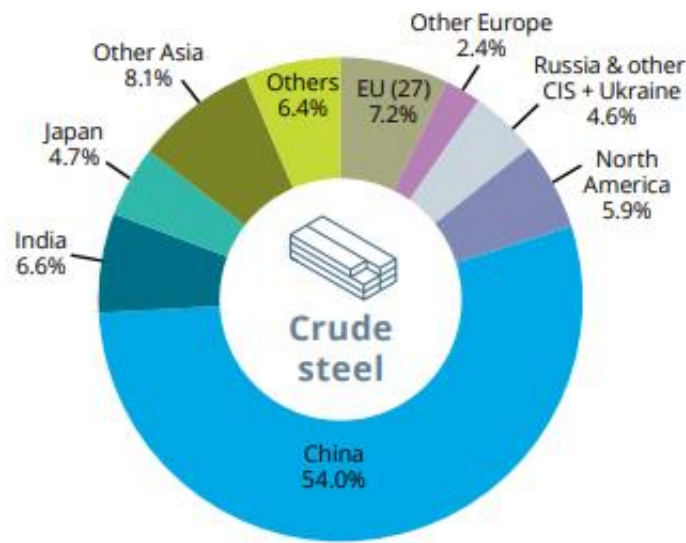
# 1.INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la población mundial se ha visto en una situación de crecimiento constante a una velocidad muy elevada. Debido a ello, los países que se han visto en dicha situación han aumentado la demanda y producción de todo tipo de productos para adecuarse a las necesidades de sus habitantes. Uno de estos productos es el acero. Este es un material de gran relevancia en la sociedad actual, ya que el ser humano se encuentra rodeado de él en su día a día. La sociedad en la que vivimos no se concibe sin acero ya que el acero es la base de toda construcción y maquinaria, además de una gran parte de todos los ingenios y utillajes que se emplean para que las personas prosigamos con nuestras vidas. Ello es debido a las excelentes características mecánicas que ofrece genéricamente el acero y a la gran variedad de aleaciones disponibles y en desarrollo, que se adaptan a distintos requerimientos específicos. Pero sobre todo, y ante todo, la omnipresencia del acero en nuestra sociedad se debe a su gran disponibilidad a un coste que es órdenes de magnitud inferior al de sus posibles competidores en la mayoría de los desarrollos tecnológicos realizados.. Como se puede observar en la Figura 1. en el año 2022 de una producción mundial de 1762.2 millones de toneladas de acero, más de la mitad, 52%, fue empleada en edificios e infraestructuras debido a la rápida urbanización que se ha dado en los últimos años, siendo previsto que este aumento y destinación de acero siga siendo constante en los próximos tiempos. Por otro lado, el segundo empleo más común se da en la fabricación de equipamiento mecánico con un 16%, mientras que el tercero es el sector automovilístico con un 12%. Este último es evidente, ya que gracias a la creciente movilidad la carga de transporte ha aumentado en los últimos años, siendo necesario satisfacer las necesidades del transporte.



**Figura 1.** Uso del acero en los diferentes sectores de la industria [2].

Como se ha podido observar, el empleo del acero en diferentes sectores se da en ingentes cantidades, por lo que su producción ofrece un nicho de oportunidad económica. Gracias a los datos recopilados por la *World Steel Association* en el año 2022 [2], se ha logrado recopilar la producción de acero crudo por región y continentes más relevantes. Como se observa en la Figura 2 **Figura 2** el continente que más acero produce es Asia, siendo China su referente principal (relacionando el crecimiento de población con el aumento de la demanda y necesidad de este material), obteniendo el 52.9% de la producción mundial con 1032.8 millones de toneladas, seguida bastante de lejos por la UE con un 7.8%, India con un 6.1% y la USMCA, constituido por Estados Unidos, México y Canadá, con un 6.0%.



**Figura 2.** Producción de los países en base a la producción total a nivel mundial de acero en 2022 [2].

Lo mismo ocurre con las empresas que se dedican a su producción (ver Tabla 1). Observando donde se produce una mayor cantidad de acero, se puede determinar que las empresas que mayor producción tienen están localizadas en China, siendo la empresa *China Baowu Group* con un total de 131.84 millones de toneladas anuales. Por otro lado, la empresa *ArcelorMittal* la sigue en el segundo puesto con una producción de 68.89 millones de toneladas. Finalmente, la empresa *Ansteel Group* es la tercera en este ranking con 55.65 millones de toneladas.

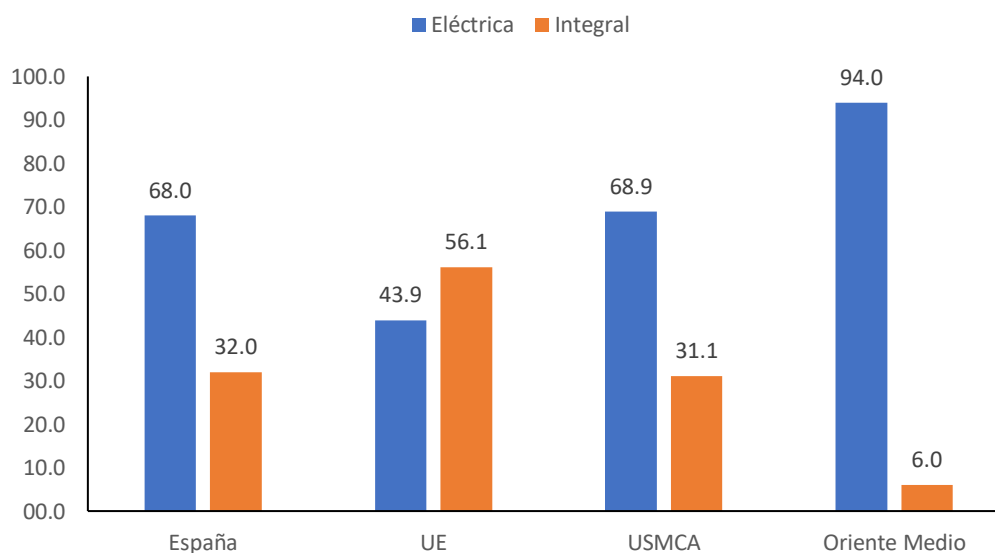
**Tabla 1.** Producción anual de acero de las empresas a nivel mundial en el año 2022 [2].

Rank	Company	Tonnage
1	China Baowu Group <sup>(1)</sup>	131.84
2	ArcelorMittal <sup>(2)</sup>	68.89
3	Ansteel Group <sup>(3)</sup>	55.65

La obtención del acero se da por dos rutas diferentes; la primera, la ruta integral, es decir, la ruta de Alto Horno (BF/BOF) y la segunda, en la cual se ha basado este Trabajo de Fin de Máster, la eléctrica, la del Horno de arco eléctrico (HEA). Ambas son complementarias, dado que la primera parte del mineral de hierro y la segunda recicla los residuos de acero (chatarra).

La ruta integral cubre el incremento de consumo mundial de acero, en cambio, la eléctrica cierra el ciclo de vida del material con una eficiencia ambiental, económica y social alta.

Durante los últimos 20-30 años, el uso de los Hornos eléctricos de arco ha aumentado considerablemente debido a su alta productividad y bajo coste operacional. Operar con este tipo de hornos tiene un coste de capital de entre 127-182 EUR/tonelada de acero, mientras que en los hornos altos es de 912 EUR/tonelada de acero. Como resultado, la ruta eléctrica ha ido reemplazando a la ruta integral. Otra causa del aumento del uso de operaciones en HEA es por la concienciación medioambiental ya que debido al aumento de las restricciones concernientes a la emisión de gases de efecto invernadero, cambio climático y sostenibilidad que se están implementando a nivel global en las legislaciones, esta ruta ha sido impulsada como medio para lograr los objetivos establecidos en la legislación. Según los datos recopilados en [2], países ya industrializados como los pertenecientes a la UE. Según la Figura 3 [2], en España la producción de acero se da a través del HEA, con un 68.0%. Esto está por encima de la media de la Unión Europea (UE) que dedica un 43.9% de su producción de acero a través del HEA. Por otro lado, la Unión de Estados Unidos, México y Canadá o también conocido como la USMCA produce acero con un 68,9% a través del HEA. Finalmente, se destaca a Oriente Medio, el cual produce su acero mayoritariamente a través del HEA, con 94%. Gracias a estos datos, es obvio que la apuesta por el HEA es cada vez más evidente.



**Figura 3.** Producción de acero por diferentes rutas de diferentes [2].

Es ahí donde entra en escena la acería de ArcelorMittal Sestao. Esta acería, como su propio nombre indica, está situada en el País Vasco, más concretamente en el municipio vizcaíno de Sestao, a orillas de la Ría del Nervión, a unos 10 km de Bilbao. La Figura 4 muestra su localización en la comarca del Gran Bilbao.



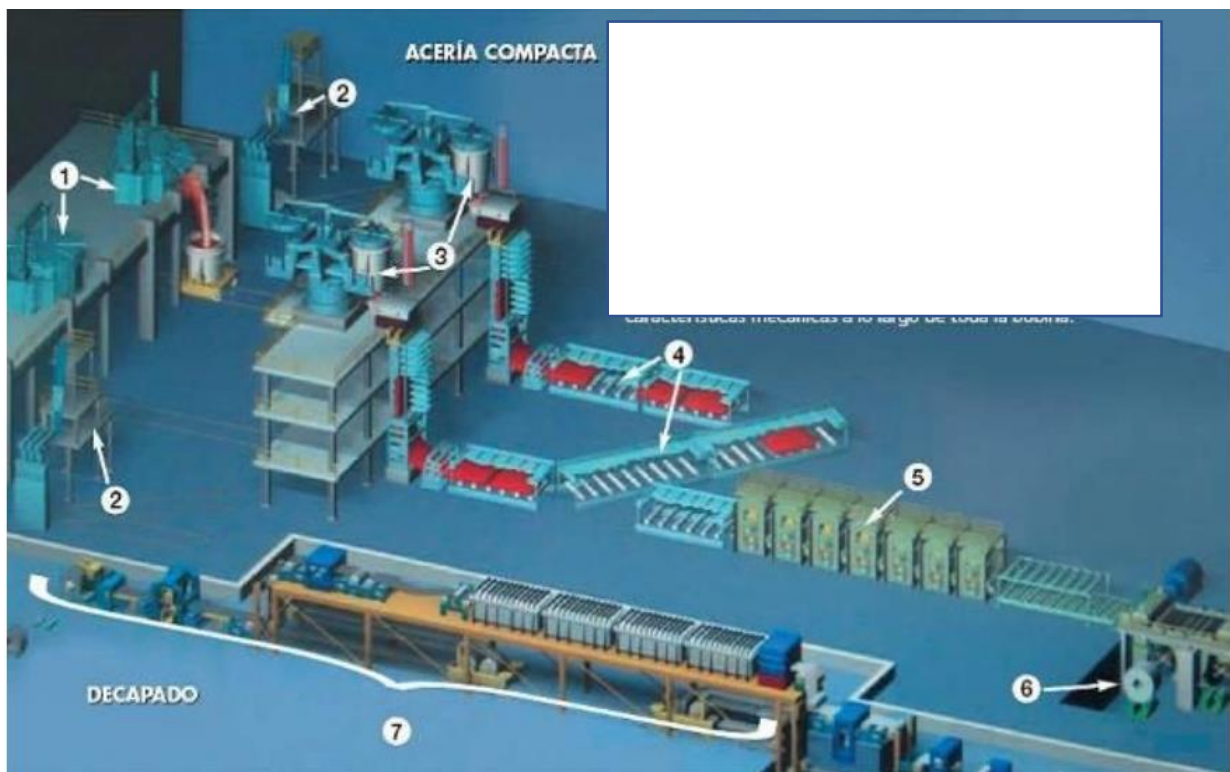
**Figura 4.** Localización de la acería ArcelorMittal en Sestao [1].

*ArcelorMittal Sestao* es una planta siderúrgica que tiene como producto principal el producto plano de acero, la cual se obtiene en forma de bobina de acero laminada en caliente y posteriormente decapada. Dicha planta cuenta con una capacidad máxima de 1.800.000 toneladas anuales de bobina de acero laminado en caliente y 600.000 toneladas anuales de bobina decapada. Debido a su localización, los materiales como chatarra, arrabio y prerreducidos llegan por barco y/o camión y/o ferrocarril hasta ser depositados en el parque de materias primas o parque de chatarra. La instalación cuenta en su conjunto con los siguientes elementos:

- Dos hornos eléctricos de arco (HEA): donde a partir de la reutilización de chatarra se obtiene el acero líquido mediante su fusión.

- Dos hornos de cuchara: donde se dará la desoxidación y desulfuración de la colada que llega proveniente del horno de arco eléctrico (HEA). Además, se realiza el ajuste de la composición química en base al grado de acero solicitado por el cliente.
- Dos líneas de colada continua: el acero líquido se transforma en sólido, cayendo este por una artesa y un molde que le dará la forma deseada. Una vez solidificado, se corta en planchones gracias a una tijera perpendicular.
- Dos hornos túnel: ayudan a mantener la temperatura del planchón y a homogeneizarla.
- Un tren de laminación: el planchón es laminado y ve su espesor reducido de 60 mm hasta 1 mm.
- Bobinadora Flejadora: las bandas laminadas son bobinadas en caliente.
- Una línea de decapado: se elimina mediante ácido clorhídrico la capa de óxido formada en la superficie del producto durante la laminación en caliente.
- Instalaciones auxiliares: Cucharas, Depuración de Humos, Laboratorio, Planta de Tratamiento de Aguas y Subestación Eléctrica.

La mayoría de las instalaciones mencionadas pueden ser observadas en la Figura 5.



**Figura 5.** Instalaciones de la planta siderúrgica de ArcelorMittal Sestao [1].



En el proceso de fusión de la chatarra para obtener acero líquido dentro del horno de arco eléctrico, varios factores y elementos desempeñan labores indispensables en el control del proceso, como son la calidad de la chatarra y de las adiciones, la inyección de carbón y oxígeno al proceso, el pie de baño del horno entre otros. La eficiencia y coste económico del producto final depende de la operación del horno en un rango estrecho de valores de cada elemento que interviene en el proceso, los cuales además se encuentran interrelacionados. Entre estos elementos se encuentra la escoria negra del HEA. La escoria negra a temperatura ambiente es un sólido formado por una mezcla de óxidos metálicos. A la temperatura de trabajo en el horno de arco eléctrico es un líquido formado por una solución iónica de óxidos metálicos fundidos o parcialmente fundidos que flota sobre la capa de acero. Juega un papel importante al ser espumada durante la fusión de la chatarra, ya que afecta de manera positiva en los consumos varios del proceso, entre los que se encuentran los consumos del ladrillo de refractario dentro de las paredes y cuba del horno, el consumo de la columna de grafito denominada como electrodo y en el consumo eléctrico que se usa para ayudar a fundir la chatarra gracias al arco eléctrico que se forma. Por ello, es de vital importancia y esencial controlar la espumación, viscosidad y otras características de la escoria dentro del Horno de arco eléctrico. Este control se establece eficientemente gracias a la inyección de carbón y oxígeno en la interfase de acero-escoria donde se dan las reacciones de espumación y oxidación. Adicionalmente, se controla la adición de elementos creadores de escoria como son la cal y la cal dolomítica. Mantener una escoria óptima es esencial para una correcta fundición de chatarra.

## 2.OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es identificar los rangos de trabajo que conduzcan a optimizar el funcionamiento y uso del propio horno de arco eléctrico en referencia a la inyección de carbón y oxígeno que se realiza para espumar la escoria negra de HEA.

El HEA es un elemento que tiene dos situaciones recurrentes en su manera de trabajar:

- Funcionamiento de continuo, es decir, sin tener interrupciones o paradas que provoquen detener la producción de acero.
- Funcionamiento con paradas. Estas paradas provocan que el horno de arco eléctrico deba apagarse, lo cual hace que durante estas paradas el horno se enfríe y entre oxígeno, oxidándolo y provocando que el baño metálico y la escoria se oxide en exceso, provocando la pérdida de hierro en forma de óxido ferroso (FeO).

Debido a esto, se tiene como objetivo primordial lograr controlar la composición de la escoria gracias a las recetas/perfiles. Estas, añaden cierta cantidad de carbón y oxígeno al proceso de fusión del horno de arco eléctrico (HEA). Este tiene dos situaciones de funcionamiento recurrentes: funcionamiento de continuo (sin interrupciones ni paradas durante las coladas) y de funcionamiento con paradas entre coladas.

La receta/perfil en situación de funcionamiento continuo, tiene como objetivo principal mantener el % de óxido ferroso contenido en la escoria entre los rangos de 27.0-35.0%, rangos que están ligados a una buena espumación de la escoria, además de mantener el % de Magnesia (óxido de Magnesio) en la misma escoria por encima del 8.0% y llegando a alcanzar como máximo un 10.0% de contenido en la escoria, lo cual indica que la escoria está saturada con este elemento y no trata de obtenerlo del material refractario del horno, consiguiendo así no desgastarlo en exceso. Además de ello, se busca disminuir el consumo eléctrico respecto al perfil usado previamente en *ArcelorMittal Sestao*. Este consumo eléctrico está ligado al % de FeO de la escoria, ya que si se mantiene entre los valores de 27.0-35.0 %, la espumación de esta es buena y la transmisión térmica del electrodo al baño metálico es más eficiente.

Por otro lado, las recetas/perfiles en situación de funcionamiento con paradas, tienen como objetivo principal disminuir el % de FeO, ya que la parada provoca que el baño se oxide y el oxígeno reaccione con el hierro (Fe), dándose una oxidación excesiva del HEA. Esto conlleva

que la escoria sea de carácter muy poco viscoso (líquida) y no se retengan el tiempo suficiente las burbujas de CO que pasan a través de la escoria, teniendo una mala espumación. Es por ello, que se busca disminuir el % de FeO hasta valores menores a 35.0%.

### **3.BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO**

Entre los beneficios del proyecto destaca la mejora de los perfiles/recetas de inyección de oxígeno y carbón a la hora de controlar la composición de la escoria del horno de arco eléctrico. En el control de la escoria es un elemento esencial en el proceso de fusión de chatarra ya que esta nos indica del desgaste del material refractario dentro del horno gracias a la magnesia (MgO). Además, mejorar el control del óxido ferroso (FeO) de la escoria puede conllevar de ciertos beneficios al proceso: mejorar la transmisión térmica, evitar el consumo del material refractario dentro del HEA, disminuir el consumo eléctrico, entre otros. Este elemento es indicativo de la espumación de la escoria, si los valores de este se encuentran entre 27.0-35.0%, es indicativo que las burbujas de CO que se generan debido a la desoxidación del FeO y pasan a través de la escoria, tienen un tiempo de retención suficiente para aumentar el volumen de esta y espumarla adecuadamente. Si se obtienen valores superiores a 35.0%, implica que la escoria es líquida y el tiempo de retención de las burbujas de CO no es suficiente como para espumarla, por lo que se da una espumación de la escoria inadecuada. Por otro lado, valores inferiores a 27.0% indican que la escoria que se obtiene es demasiado viscosa y las burbujas de CO no logran pasar a través de ella, impidiéndose una buena espumación. Por lo que está claro que ejercer un control sobre el nivel del FeO en la escoria es vital en el proceso de fusión de la chatarra. En caso de mantener el FeO dentro de los rangos previamente mencionados, la transmisión térmica del arco es buena, se protege el refractario del arco generado por los electrodos inferiores y el electrodo superior y se consigue disminuir el consumo eléctrico del proceso.

Gracias a lo mencionado, si se consigue disminuir el consumo eléctrico gracias a la inyección de carbón y oxígeno se puede a la vez, disminuir los costes energéticos del proceso de fusión de chatarra en el horno de arco eléctrico.

## **4. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE**

### **4.1. EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ACERO EN LA RUTA DE ACERÍA ELÉCTRICA**

La obtención de acero líquido a través del Horno de arco eléctrico consiste en fundir chatarra de acero mediante el empleo de energía eléctrica suministrada al baño metálico dentro del horno a través de un electrodo. Entre la materia prima y los electrodos se genera un arco eléctrico cuyo calor desprendido funde la chatarra. Este arco se genera gracias a que el electrodo actúa como cátodo, y al sumergirse en el horno interactúa con 4 electrodos más pequeños que están situados en la parte inferior de la cuba del horno (estos actúan como ánodos). Gracias a esta interacción se hace saltar un arco, formándose un circuito eléctrico, que proporcionará la energía térmica necesaria para fundir la chatarra. Esta característica corresponde a los HEA de corriente continua (DC). El horno de ArcelorMittal Sestao corresponde a este tipo de hornos. Generalmente se suelen usar más los de corriente alterna (AC), los cuales poseen tres electrodos superiores que son más pequeños que el de DC y no poseen ningún electrodo inferior. Las características de este tipo de horno se discutirán más adelante.

El proceso de obtención del acero como producto final en forma de planchones (producto plano), consiste en varias etapas. Primero, se cargan las cestas con chatarra de acero. Estas cestas cargadas se transportan hasta el HEA donde se deposita la chatarra. Se cierra la bóveda, se inserta el electrodo y se procede a fundir la chatarra. En el HEA se distinguen dos etapas.

- Etapa de fusión: se funde la chatarra mediante la energía eléctrica proporcionada por el arco generado entre el electrodo superior y los cuatro electrodos inferiores, además del remanente de baño metálico que se deja con este propósito. Este último se conoce como pie de baño.
- Etapa de afino: se oxidan varios elementos que pasan a la escoria. Esta última es espumada mediante la inyección de carbón y se desoxida el óxido ferroso (FeO) para recuperar el hierro y evitar su pérdida. Se da la defosforación del acero.

Estas etapas serán explicadas en más profundidad más adelante.

Para proceder con el vertido del acero líquido que se obtiene como producto final, es necesario medir la temperatura del baño y el nivel de oxidación del mismo. Este último se mide

habitualmente en mV ya la desoxidación del baño se relaciona con el voltaje aplicado. Cuando se alcanza una temperatura de 1620°C y una oxidación de entre 200-210 mV se procede a colar. Este acero líquido se vierte sobre una cuchara de transporte, en la cual se lleva y vierte al Horno cuchara (HC), etapa conocida como etapa de afino. En ella, se dan los procesos de desulfurización y desoxidación. Estos procesos alteran la composición química del acero y se la adecua hasta obtener la composición deseada. Al finalizar esta etapa de afino, se lleva la cuchara a la zona de colada continua, donde se vierte el acero sobre una artesa, la cual tiene un agujero por la que se vierte el acero. Gracias a un molde, se le da la forma deseada. El acero llega hasta una cortadora que le da la longitud deseada al planchón. El producto se calienta homogéneamente mediante un horno túnel para que llegue con cierta temperatura hasta laminación, dónde se da la laminación en caliente. En esta etapa se reduce el espesor del producto hasta 1 mm. Posteriormente el producto se bobina en caliente mediante una bobina flejadora y se decapa, es decir, se elimina mediante ácido clorhídrico la capa de óxido formada en la superficie del producto durante la laminación en caliente.

#### 4.1.1. Procedimiento de fusión en el HEA de ArcelorMittal Sestao

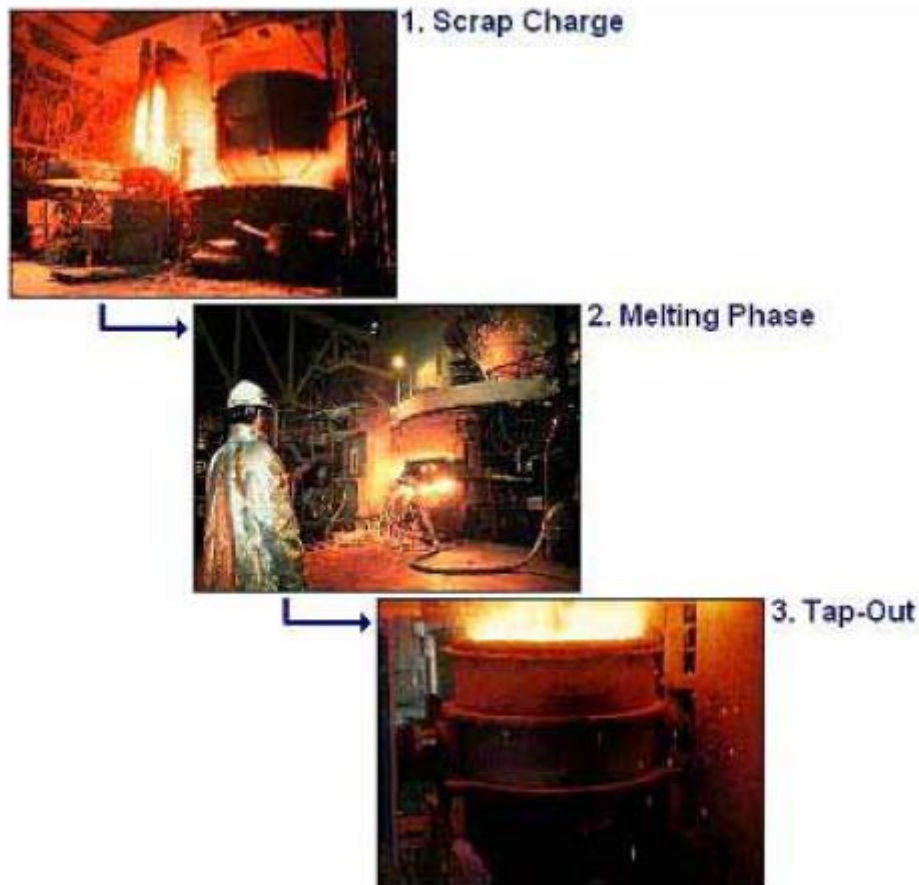
Inicialmente, se carga cuidadosamente la chatarra y/o el menú seleccionado en una cesta en el parque de chatarras. Esta carga, aparte de tener chatarra, incluye fundentes y agentes carbonosos (cal, carbón...) que aportarán el C necesario para la fusión. A continuación, se lleva la cesta con grúas hasta el EAF y se procede a cargar la materia prima en el horno por la parte superior de este tras haber desconectado la potencia de los electrodos y haber abierto la bóveda. Cuando la cesta está dentro del diámetro de bóveda del horno, habiéndose asegurado que la posición en la que está hará que toda la carga caiga dentro del horno, se abre la cesta por la parte inferior y la carga cae sobre el pie de baño (remanente de acero líquido de la colada anterior que ayuda a fundir la carga). Una vez haya caído todo, se cierra la bóveda y se baja el electrodo de grafito.

Cabe recalcar que la disposición de la chatarra, fundentes y agentes carbonosos dentro de la cesta es esencial. La mala colocación de la carga puede ocasionar problemas, cómo, por ejemplo, si se coloca la cal sobre la carga no se formará el arco eléctrico y se puede ocasionar la rotura del electrodo. El modo de carga del horno afectará a la eficiencia de este y a la vida útil de los electrodos.

La disposición de la carga en la cesta ha de seguir el siguiente procedimiento para asegurar una máxima eficiencia en el proceso:

- Chatarra gruesa deberá ser cargada en el centro de la cesta
- Los formadores de escoria deberán de ir en las zonas laterales para terminar cerca de las paredes del horno y ayudar a proteger al material refractario.
- Chatarra ligera, fundentes y carbón en el fondo para evitar caída de material fino de la cesta y protege el crisol.
- Chatarra fina en la parte superior, ya que, asegura una buena penetración del electrodo y una buena ignición.

Una vez se cierra la bóveda, se baja el electrodo y éste penetra la capa de chatarra ligera hasta contactar con la capa de chatarra más pesada. Una vez en posición, el electrodo de grafito actúa como cátodo y transporta la energía eléctrica al interior del horno al interactuar con los cuatro electrodos más pequeños, colocados en la parte inferior del horno, que actúan como ánodo. Gracias a esta interacción, se hace saltar un arco y se forma un circuito eléctrico, proporcionando la energía térmica necesaria para comenzar a fundir la chatarra, además de oxígeno. Cada vez que se carga una cesta de chatarra, se inyectará gas natural junto con el oxígeno a través de los tres inyectores (conocidos como MORE) colocados dentro del horno de arco eléctrico. Esta inyección de Gas Natural viene acompañada con caudales de oxígeno que funcionan como quemadores y ayudan a fundir la chatarra. A medida que se va fundiendo la chatarra, el material cae hacia el fondo de la cuba, lo que aumenta el volumen en el interior del horno. Dependiendo del tipo de proceso en el que se trabaje se fundirá con una o dos cestas. En caso de ser la segunda opción, se cortará el suministro eléctrico cuando se alcancen 19.000 kWh de proceso y se abrirá la bóveda para cargarse otra cesta de chatarra. Una vez hecho esto, se cierra la bóveda y se vuelve a formar el arco entre los electrodos para proseguir con la fusión. En esta segunda cesta, se volverá a inyectar gas natural para calentar la carga, además de oxígeno.



**Figura 6.** Proceso de fusión del Horno de arco eléctrico [5].

Una vez cerrada la bóveda se continúa con el suministro de energía eléctrica a través del electrodo y con la inyección de oxígeno y carbón a través de los inyectores situados dentro del horno de arco eléctrico. En esta etapa se darán varias reacciones de oxidación que tienen como objetivo liberar el baño de impurezas y que aportarán de energía química al proceso, ya que dichas reacciones son exotérmicas. Por otro lado, se dará el proceso de espumación, el cual espuma la escoria gracias a reacciones entre el C y el oxígeno que darán a paso a la creación de burbujas de gas, aumentando su volumen hasta cubrir el arco, dándose una clara disminución del ruido proveniente del horno. A medida que pasa el tiempo, la escoria espumada irá abandonando el proceso, sacándose esta a través de la puerta de desescoriado. Durante todo el proceso, se generarán humos los cuales serán extraídos por el orificio de extracción de humos situados sobre la bóveda del horno de arco eléctrico. Cuando, se alcanza cierta cantidad de kWh, se procede con la medición de la temperatura y el nivel de oxidación del baño mediante un sistema de medición denominado como Catfis, el cual posee una lanza sobre la cual se coloca el Celox (elemento de medida de oxidación y temperatura) y se procede a insertarlo al baño. Dicho proceso ronda alrededor de 10 segundos. Una vez se alcanza la temperatura de vertido



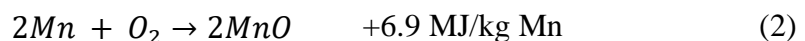
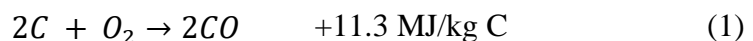
de 1650°C y un nivel de oxidación de 210 mV, se procede a colar el acero, inclinando el horno encima de una cuchara sobre la que caerá el acero por el agujero de la piquera, el cual está situado sobre la zona de EBT. Posteriormente, esa cuchara se llevará al horno cuchara (HC) para las etapas de afino y desoxidación. El propio HEA, después de terminar de colar, vuelve a su posición original y se prepara para la carga de las cestas de chatarra para la próxima colada y repetir el proceso.

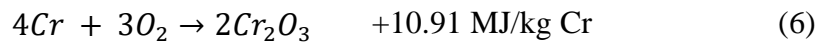
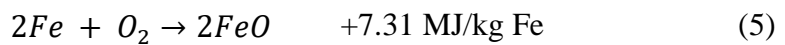
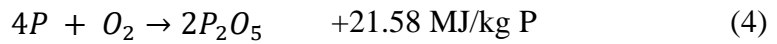
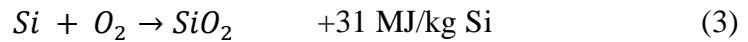
#### 4.1.2. Oxidación de los elementos dentro del HEA

El oxígeno es introducido en el Horno de arco eléctrico a través de los inyectores de oxígeno, conocidos como OxygenJet, que se encuentran en los módulos de inyección repartidos en tres localizaciones diferentes del horno. Este elemento juega un papel vital en el proceso de obtención del acero líquido. El empleo del oxígeno en el horno tiene tres motivos fundamentales

- Oxidar elementos que están en exceso en la carga para obtener una composición química adecuada.
- Junto con la inyección de carbón, espumar la escoria hasta ocultar el arco, mejorando el aprovechamiento de la energía química, así como disminuir el consumo de refractario dentro del horno y el propio electrodo.
- Generar energía química que complementa a la energía eléctrica, ayudando a acortar la duración del proceso.

Esta última situación se da, debido a que al oxidar elementos como lo son el C, Mn, P, Si, Al y Cr, los cuales son añadidos por la chatarra, o de manera predeterminada con inyectores o adiciones, gracias a las reacciones de oxidación, se libera energía química que aporta calor al proceso de obtención del acero, gracias a que se trata de reacciones exotérmicas. Dichas reacciones pueden ser observadas a continuación, con su respectiva cantidad de energía liberada.

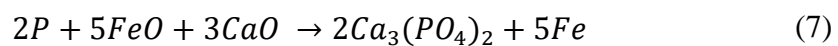




Cada una de estas reacciones aporta la energía que indica a la fusión, siendo la energía química total aportada la suma de todas ellas. Estos óxidos van directamente a formar parte de la escoria. Este aporte extra de energía química ayuda a disminuir el tiempo de fusión y el consumo de energía eléctrica. En la Ecuación 4 se observa la oxidación del hierro. Esta se inicia a bajas temperaturas y para frenar su oxidación se adiciona carbón, dándose una desoxidación.

#### 4.1.3. Defosforación del acero

El fósforo se aporta al horno mediante la carga, siendo el HBI y el Arrabio los materiales que más influyen en su valor. La presencia de fósforo en el acero es perjudicial porque se presenta disuelto en el líquido fundido y le dota de una gran fragilidad en frío. El proceso de eliminación de fósforo en el acero, es decir, la defosforación, tiene lugar durante la etapa de afinado del proceso. La defosforación del hierro tiene lugar en base a la siguiente reacción:



Como se observa en la Ecuación 7, la Cal y el óxido ferroso son necesarios para la defosforación. El fósforo oxidado desaparece del líquido fundido y pasa a formar parte de la escoria.

#### **4.2. EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (HEA) DE ARCELOR-MITTAL SESTAO**

Como bien se ha mencionado en el apartado anterior, existen actualmente dos tipos de hornos eléctricos de arco, entre los que se encuentran los siguientes:

- HEA de corriente continua (DC).
- HEA de corriente alterna (AC).

Por lo general, la mayoría de los HEA son de corriente alterna. Este tipo de hornos tienen tres electrodos superiores por los que se transmite la energía eléctrica al horno. Por otro lado, en ArcelorMittal Sestao, se hace uso del HEA de corriente continua. Este tipo de hornos posee un único electrodo superior, pero a diferencia del de corriente alterna, si posee cuatro electrodos inferiores (situados en la parte inferior de la cuba). Este tipo de horno posee ciertas características que le separan de los de corriente alterna (AC), entre las cuales se encuentran las siguientes:

- Se precisa de un solo electrodo, el cual actúa como cátodo, en lugar de usarse tres, como en el de corriente alterna (AC). Gracias a ello, se simplifica el sistema de cables secundarios, columnas, sistema de sujeción de electrodos y la propia bóveda del horno.
- La solera del horno actúa como ánodo, por lo cual debe ser conductora, lo que implica la construcción de conductores en la parte inferior del horno.

El uso de un tipo de horno u otro otorga ciertas ventajas y desventajas. Entre las ventajas principales de usar un HEA de corriente continua sobre uno de corriente alterna se encuentran las siguientes:

- Menor consumo de electrodo.
- Menor consumo eléctrico durante el proceso de fusión.
- Aumenta el efecto de agitación, mejorando las propiedades metalúrgicas del baño fundido y la escoria.
- Facilita y mejora el control del proceso.
- Reduce los riesgos generados por el ruido.

- Se alimenta directamente el mineral y el polvo. No es necesario hacer uso de aglomeraciones.
- Se requieren componentes eléctricos más caros.
- Se simplifica el sistema de cables secundarios, columnas, sistema de sujeción de electrodos y la propia bóveda del horno.

Por otro lado, entre las desventajas se destacan las siguientes:

- Se limita el tamaño del HEA debido a la capacidad de corriente de los electrodos.
- Es necesario usar material refractario más caro en la parte inferior de la cuba.
- Mayor desgaste del material en la parte inferior de la cuba debido a la conductividad del ánodo.
- La parte inferior del baño debe de ser metal líquido para proveer buena conductividad al arco.

Los dos HEA de ArcelorMittal Sestao consiste en la unión de diferentes elementos que tienen distintas funcionalidades, pero en su unión ayudan a la obtención del acero líquido. Entre estos elementos se destacan los siguientes:

- Un electrodo superior y 4 electrodos inferiores: se encargan de proveer energía eléctrica mediante el salto de un arco entre el electrodo superior (cátodos) y los inferiores (ánodo).
  - Una Bóveda: sirve para tapar el horno. Posee dos agujeros, uno situado en el centro de esta para introducir el electrodo y otro en un costado, usado para extraer los gases y humos generados en el proceso. Su uso principal es mejorar el control de la pérdida térmica en forma de gases y humos generados en el proceso.
  - Equipo de sujeción de electrodos: se encargan de subir y bajar el electrodo durante el proceso de fusión de la chatarra.
  - Cuba: es la carcasa del horno. Está formada por paneles refrigerados con agua y dos capas de ladrillos refractarios que la protegen del proceso de fusión.
  - Transformador: su objetivo principal es alimentar adecuadamente adaptándose a las variaciones que se puedan originar durante el proceso.
- Módulos de inyección de carbón y oxígeno: inyectan carbón y oxígeno durante el proceso de fusión para controlar la composición del acero y la escoria del horno de arco eléctrico.

Los HEA de ArcelorMittal Sestao consiste en la unión de tres tipos de componentes que se unen para formar el horno; el recipiente del horno junto con su respectiva bóveda, el equipamiento mecánico y el eléctrico. El proceso metalúrgico se lleva a cabo en el primero. El recipiente está formado por una bóveda con un agujero por el que se introduce el electrodo y otros más pequeños por los que se da la evacuación de gases. Las paredes del horno están hechas de acero recubierto por material refractario. En la 7 se puede observar un Horno de arco eléctrico de corriente directa (DC). El HEA de ArcelorMittal Sestao trabaja de continuo durante 24 días seguidos. Después, para completamente durante 6 días por mantenimiento, en los que se realizarán las operaciones necesarias para dejarlo listo y en buenas condiciones para el nuevo periodo de funcionamiento de 24 días. A pesar de tener 2 HEA no se trabaja con ambos al mismo tiempo. El HEA está encendido en todo momento durante las coladas hasta que llega el cambio de horno.



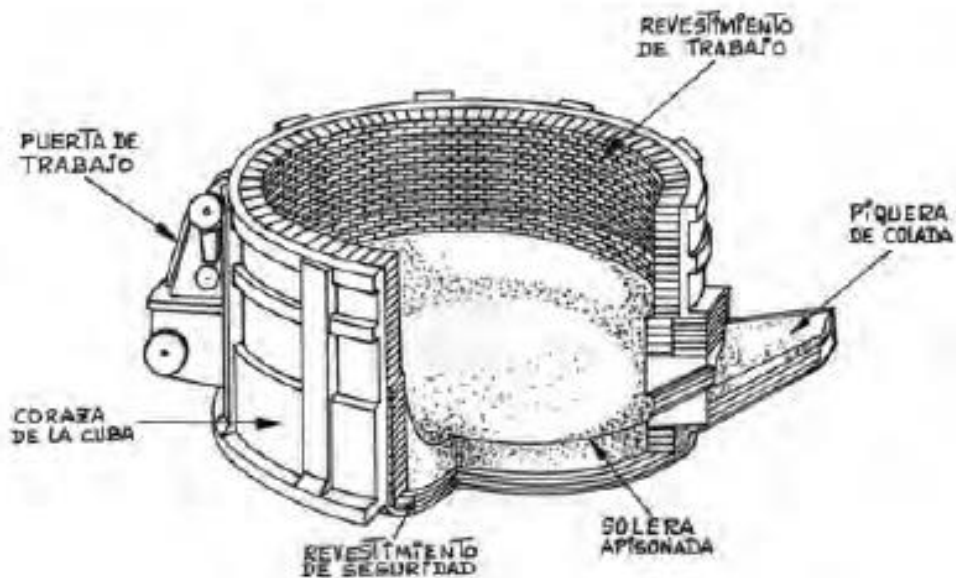
**Figura 7.** Horno de arco eléctrico de corriente directa (DC) [5].

#### 4.2.1. Cuba del horno

Está constituida por una virola vertical y un fondo en forma de casquete esférico. En su conjunto está formada por planchas de acero soldadas y atornilladas. La relación entre el diámetro del baño y su profundidad es tal que proporciona una buena superficie de interfase acero-escoria para que las reacciones de oxidación sean rápidas y efectivas. La cuba posee una puerta de

trabajo conocida como puerta de escoria, por donde se evacua la susodicha, y en el lado contrario a la misma posee una piquera, por donde se vierte el acero obtenido como producto final. La cuba de ArcelorMittal tiene una capacidad de 200 toneladas y un diámetro de 9825 mm.

Un esquema de la cuba se puede ver en la 8. La cuba, desde el punto de vista del revestimiento, posee dos zonas, la solera y las paredes verticales. Sobre estas dos zonas se coloca una capa de refractario de seguridad (constituidos por lo general de ladrillos de magnesita) lindante a la chapa o paneles y otro de trabajo (ladrillos de dolomía y magnesita) que es el que está en contacto con el acero líquido. La solera suele tener un tamaño de entre 500 a 1.000 mm de espesor, dependiendo del tamaño del horno. En cuanto a la parte media y alta de las paredes de la cuba, las cuales no entrarán en contacto ni con el acero líquido ni con la escoria, no hay ladrillo refractario, sino que están solo los paneles de acero refrigerados por agua.

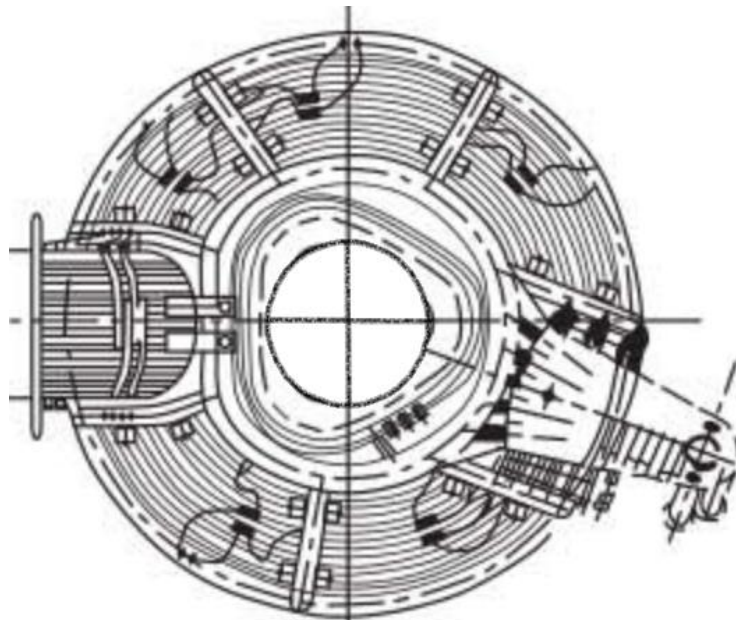


**Figura 8.** Cuba del horno de arco eléctrico [5].

#### 4.2.2. Bóveda

También conocido como tapa de horno, se trata de un componente estructuralmente independiente, ya que no está permanentemente conectado al HEA. Gracias a esto, se posibilita la apertura de la bóveda de manera rápida para la deposición de la carga, y en caso de ser necesario también su mantenimiento. Un esquema de la bóveda se aprecia en la 9. La estructura es levemente convexa y formada en su totalidad por paneles refrigerados con agua, los cuales

contienen en su interior anillos metálicos refrigerados con agua, evitando así el sobrecalentamiento de la bóveda. Cuenta además con dos orificios: en el centro del elemento uno con gran diámetro para un único electrodo, ya que se trata de un HEA de corriente directa (DC) y el segundo orificio para la extracción de humos que se generan durante el proceso de fusión.



**Figura 9.** Bóveda del HEA con orificio de electrodo y tubo de extracción de humos [5].

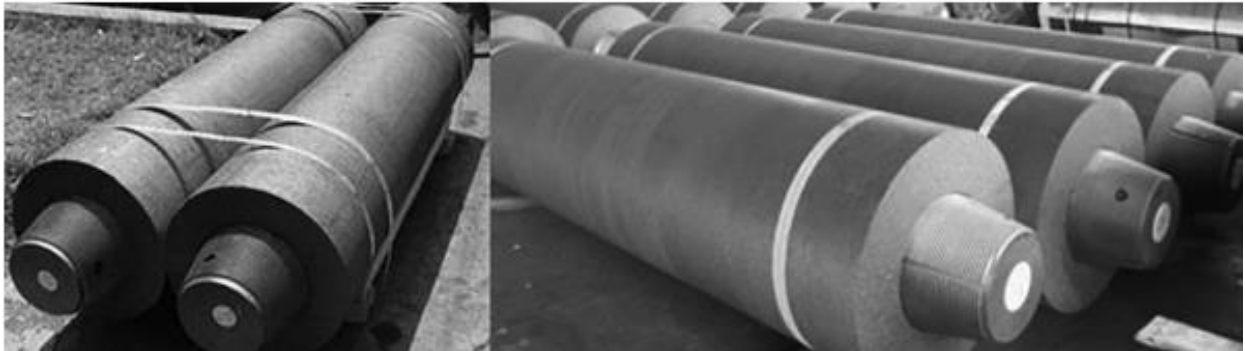
#### 4.2.3. Electrodo

Es el elemento más característico de los Hornos Eléctricos de Arco de Corriente Directa (DC) y la disposición del electrodo principal, el cual se inserta por la parte superior de la cuba, corresponde al orificio grande central de la bóveda, por el cual se consigue una distribución térmica homogénea. Este elemento posee una longitud de 9 m y un diámetro que oscila entre 761 y 765 mm. Además de este electrodo superior, existen otros 4 electrodos más pequeños que están situados en la parte inferior de la cuba. Estos actúan como ánodo a la hora de hacer saltar el arco.

Los cinco electrodos están hechos de grafito de alta pureza, es decir, carbono cristalino prácticamente puro. Desempeña un papel vital en el proceso de fabricación de acero, ya que es un conductor eléctrico que permite a la energía eléctrica del transformador llegar al baño. El

electrodo de grafito es capaz de aguantar amplios cambios drásticos de temperatura y al mismo tiempo proveer de forma continua y uniforme la fuente de alimentación al proceso.

El electrodo transporta la energía eléctrica al interior del horno actuando como cátodo el cual, al sumergirse en el horno, interactúa con los 4 electrodos inferiores, que juegan el papel de ánodo y hacen saltar un arco, formándose un circuito eléctrico, proporcionando así la energía térmica necesaria para fundir la chatarra.



**Figura 10.** Electrodos superiores del horno de arco eléctrico [5].

Los electrodos usados en el Horno de arco eléctrico de corriente continua poseen las siguientes propiedades:

- Alta conductividad eléctrica
- Alta resistencia a altas temperaturas
- Baja conductividad térmica
- Bajo consumo por unidad de acero producido
- Resistencia mecánica suficiente

El desgaste de los electrodos de grafito bajo las condiciones de operación en el EAF es un proceso extremadamente complejo. En él, influyen el impacto de las altas temperaturas, el impacto químico del baño de metal, la escoria y los gases oxidantes calientes y las diferentes cargas mecánicas que impactan sobre él. El proceso provoca que el electrodo tenga dos zonas de consumo/desgaste diferenciadas:

- a) Consumo en punta
- b) Consumo lateral



La punta del electrodo se ve afectada por el rápido movimiento del arco, la escoria líquida y el baño, lo que provoca la erosión del grafito. La reducción gradual de las superficies laterales cercanas a la punta del electrodo se debe a la acción oxidante de la propia atmósfera del horno. Por un lado, el acortamiento de la longitud del electrodo se debe únicamente a la etapa de la formación del arco, es decir, cuando se suministra potencia al horno. Por el otro lado, el desgaste de la superficie lateral se da prácticamente en todo momento en el que el electrodo se ve expuesto o sometido a altas temperaturas. La combinación de estos dos factores, determinan el proceso conocido como consumo de electrodos.

Los factores que influyen en el consumo del electrodo en el EAF pueden ser divididos en tres tipos:

- Factores químicos, entre los que se incluyen los efectos oxidantes de la atmósfera dentro del horno y de las propias reacciones que suceden en el baño y entre la escoria y el electrodo.
- Factores mecánicos, como impactos, fuerzas electrodinámicas e inclinación del horno.
- Factores térmicos, como sublimación de la punta del electrodo en la zona del arco y cambios drásticos de temperatura.

#### 4.2.4. Equipo de sujeción de electrodo

En los HEA, durante la etapa previa a fusión, el electrodo está suspendido verticalmente en la posición que coincide sobre el orificio en la bóveda, de manera que pueda ser introducido y extraído sin mayor manipulación. El electrodo está dotado de una suspensión propia, la cual viene dada por el equipo de sujeción de este, tratándose de un brazo horizontal sujeto a su vez por un mástil. El equipo de sujeción de electrodo puede ser observado en la Figura 11.

Dicho equipo tiene como objetivo fijar el electrodo y suministrarle corriente eléctrica. Los componentes básicos del sistema de transporte de carga en el equipo de sujeción están hechos de acero no magnético, mientras que las partes de la fuente de alimentación están hechas de cobre o bronce. La fuerza de sujeción ha de ser 6 o 7 veces superior al peso del propio electrodo. Las zapatas de sujeción del equipo generalmente están hechas de bronce debido a que la resistencia eléctrica entre el electrodo de grafito y el bronce es de las más bajas entre todos los materiales.

El equipo de sujeción de electrodo trabaja bajo condiciones térmicas extremas, ya que es calentado debido a la corriente de calor proveniente del propio horno y por la corriente inducida al electrodo. Por todo ello, es necesario evitar una expansión térmica excesiva, ya que esto puede causar el debilitamiento de la sujeción del electrodo. Esto se consigue refrigerando las sujeciones con agua.



**Figura 11.** Equipo de sujeción de electrodos [5].

#### 4.2.5. Módulos de inyección

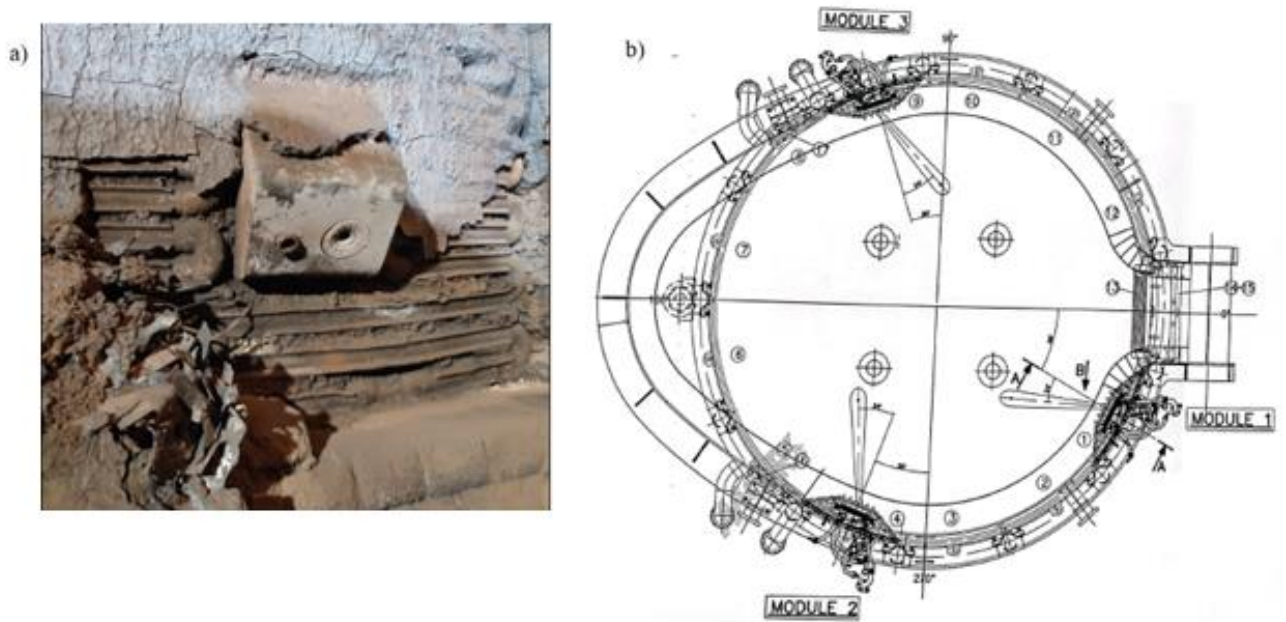
Un módulo de inyección consiste en una unidad compuesta por inyectores refrigerados por agua:

- Un inyector de oxígeno, conocido como OxygenJet
- Un inyector de carbón, conocido como CarbonJet

Cada módulo va sobre un panel refrigerado *PAV 51* que se coloca en la pared del horno sobre la línea de refractario. En total hay tres módulos distribuidos por todo el horno, pudiéndose observar su disposición en la Figura 12, dónde el Módulo 1 está al costado de la puerta de

desescoriado, mientras que los Módulos 2 y 3 están uno enfrente del otro en el centro del horno de arco eléctrico.

Estos tres módulos se encargan de inyectar el oxígeno y el carbón a la interfase de acero-escoria durante el proceso de fusión, desempeñando un papel fundamental tanto en la oxidación de elementos indeseados como en la recuperación del hierro (Fe) mediante la reducción del óxido ferroso y la espumación de la escoria.



**Figura 12.** a) Vista del módulo en su conjunto con sus respectivos inyectores, b) distribución de los módulos en el HEA.

Estos tres elementos se colocan en el punto más bajo posible sobre la línea de refractario para no interferir con éste. Por otro lado, los ejes de los inyectores de oxígeno y carbón se encuentran en un punto teórico conocido como punto de intersección, el cual se encuentra justo encima del nivel de acero, en la interfase de acero-escoria.

#### 4.2.6. Transformador del horno

Este elemento es parte fundamental del horno de arco eléctrico, ya que le alimenta adecuadamente adaptándose a las variaciones que se puedan originar. Este tiene varias tomas de corriente a diferentes tensiones para que se pueda trabajar con diferentes potencias en las diferentes etapas o fases del proceso de fusión. Al principio del proceso se usan generalmente

potencias mayores, y según éste va avanzando y se llega a las etapas finales de afino como la desoxidación del óxido ferroso, se hace uso de potencias más bajas.

#### 4.2.7. Extracción y depuración de humos

En la bóveda hay dos agujeros, uno de ellos es para insertar el electrodo, mientras que el otro es para extraer los humos y gases que se generan durante el proceso de fusión de la chatarra, este agujero se conoce como cuarto agujero. Este se prolonga en un codo de 90° y es refrigerado por circulación de agua. Gracias a este elemento, se extraen los gases y humos que se generan en la colada. Este codo conecta con el sistema de depuración de humos.

### 4.3. MATERIALES

Los materiales usados en los procesos de fabricación de acero pueden ser divididos en tres grupos básicos:

- a) Materiales metálicos
  - Chatarra metálica
  - Hierro de reducción directa (DRI)
  - Arrabio o acero crudo
- b) Materiales creadores de escoria
  - Cal
  - Cal-Dolomítica
- c) Materiales oxidantes y carburantes
  - Oxígeno y carbón o carbón

#### 4.3.1. MATERIALES METÁLICOS

##### 4.3.1.1. Chatarra metálica

Es la materia prima básica en la producción en EAF y es fuente principal para añadir hierro al proceso de fusión. Su clasificación depende de los aceros que se quieran fabricar y de la chatarra que haya disponible comercialmente. La chatarra, está clasificada dependiendo de su densidad, partiendo desde la ligera ( $0.5 \text{ t/m}^3$ ), la cual se funde fácilmente, hasta la pesada ( $1.0 \text{ t/m}^3$ ), que requiere de más energía para ser fundida y puede aumentar el consumo del refractario dentro del horno y del electrodo de grafito. Por lo general, la chatarra ideal usada en el Horno de arco

eléctrico tiene una densidad de alrededor de  $0.7 \text{ t/m}^3$ . La geometría de la chatarra varía en sobremanera ya que existen gran variedad de tipos entre los cuales se pueden encontrar los siguientes:

- Paquete de doble embutición (4A): paquete prensado de chapa fina y libre de material recubierto, estañado y galvanizado. Generalmente tiene un espesor  $< 3 \text{ mm}$ .
- Paquetes 4C: paquete prensado de chapa fina que puede incluir un porcentaje de material recubierto, estañado y galvanizado. Por lo general, tiene un espesor  $< 3 \text{ mm}$ .
- Paquete desestañado: paquetes formados a partir de latas de bebida o comida y pueden contener pequeñas cantidades de Sn.
- Bobinas de doble embutición: bobinas de alambre que son flejadas con seguridad.
- Recorte de embutición: recortes ligeros sueltos que pueden incluir material con recubrimiento, pero excluyendo material estañado o con recubrimiento de Cu. Tiene un espesor  $< 3 \text{ mm}$ .
- OA/Estructural: chatarra de acero compuesta de chapa y estructurales que puede incluir chatarra de vagón y tubos. Generalmente tiene un espesor de  $6 \text{ mm}$ .
- Fragmentada: chatarra ligera de acero viejo fragmentado en piezas y exenta de humedad, metales ferrosos y cascarillas.



**Figura 13.** Chatarra metálica usada en el HEA [5].

#### 4.3.1.2. DRI y HBI

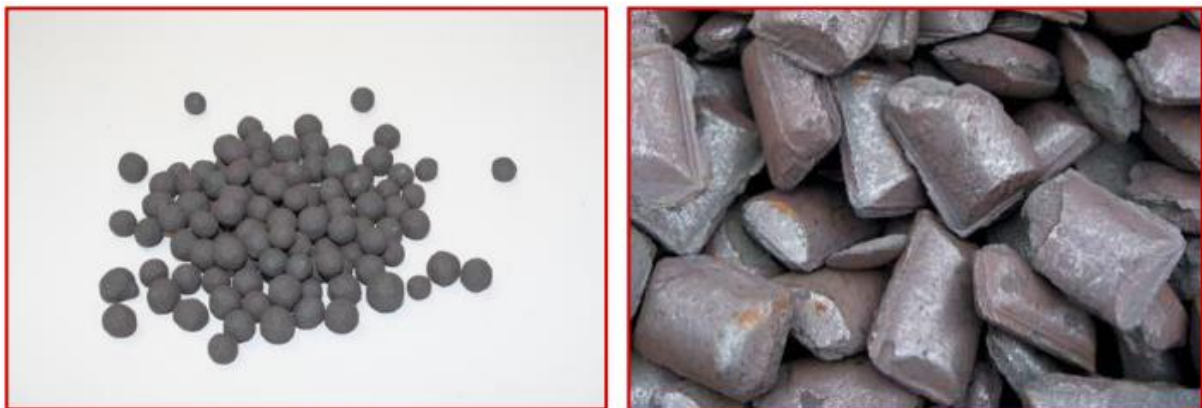
El Hierro de Reducción Direca es otro material fundamental en la carga, a parte de la chatarra, en los procesos de metalurgia en el EAF. Este material puede venir con diferentes formas y aspectos, así como granulado, en briquetas o en forma de polvo, y es procedente de la reducción directa del mineral de hierro mediante gas reductor. Para este último, se usa una mezcla de hidrógeno y CO. El DRI es creado a través del gas natural y la combustión del carbón. El mineral es reducido mientras está en su fase sólida a una temperatura de 800-1,000°C. El proceso de producción se puede llevar a cabo en hornos de lecho fluidizado o rotatorios.

Se producen tres variedades de materiales mediante la reducción directa:

- Cold direct reduction iron (CDRI), se trata de hierro de reducción directa en frío.
- Hot direct reduction iron (HDRI), se trata de hierro de reducción directa en caliente.
- Hot briquetted iron (HBI), hierro briqueteado en caliente.

Dentro de estas tres variedades de materiales de reducción directa, se ha de destacar el HBI o también conocido como Hierro briqueteado en caliente. Este es DRI que ha sido compactado a una temperatura superior a 650°C. Gracias a que se compacta en forma de briquetas, su alimentación al horno es sencilla. Esto es una gran diferencia respecto a la chatarra, la cual, en ocasiones, ha de ser cortada. Para la composición química del HBI, se ha de tener en cuenta los indicados en el DRI.

En la Figura 14. se muestran el HBI en briquetas y el CDRI en forma de pelotillas.



**Figura 14.** Materiales de reducción directa en forma de a) CDRI y b) HBI.

Independientemente de la variedad, estos materiales poseen los siguientes parámetros; grado de metalización, contenido de carbón, ganga y otras impurezas. A continuación, se muestran en la Tabla 2. los parámetros químicos.

**Tabla 2.** Parámetros químicos de los materiales producidos mediante reducción directa [5].

<b>Parámetros químicos de materiales de reducción directa</b>	
<b>Parámetros</b>	<b>Valor (%)</b>
Grado de metalización	90-95
$SiO_2$	1.0-3.0
$Al_2O_3$	0.5-2.5
$CaO$	0.1-1.5
$MgO$	0.1-1.0
$Na_2O + K_2O + TiO_2$	Max. 0.15
S	Max. 0.01
C	0.5-2.5

Este tipo de materiales, al ser ricos en hierro, son aplicados como sustitutos de la chatarra. A pesar de que la producción de acero a través de la chatarra como materia prima principal sea la más viable económicamente e incluso desde el punto de vista de protección medioambiental, no es posible satisfacer la demanda global de acero con solo chatarra, debido a su escasez. Es por ello, que aquí entra en juego el DRI.



#### 4.3.1.3. Arrabio

El arrabio es un material comúnmente usado en el mundo de la metalurgia, como materia prima en el EAF. La composición química del arrabio es esencial en la práctica y en la economía de la producción de acero. En la Figura 15. se observa el arrabio en forma sólida.



**Figura 15.** Arrabio usado para el proceso de fusión en el Horno de arco eléctrico [5].

Este es un material de bajo residuo metálico con un alto contenido en Fe, haciéndolo idóneo para la producción de productos de acero de alta calidad. A parte de ser visto como un sustituto idóneo de la chatarra, también es una fuente limpia de hierro. De media, el arrabio constituye el 5-10% de la carga metálica mundial en el EAF. Cabe mencionar, que en países en los que escasea en sobremana la chatarra, el arrabio llega a alcanzar un 60% de la carga total. En ocasiones, en caso de superar el 30-40% del total de la carga, se prolonga la inyección de oxígeno para eliminar el C, pudiendo resultar en el daño o deterioro de los refractarios del EAF, la generación de una gran cantidad de escoria y el aumento del tiempo del proceso, conllevando un gran encarecimiento.

El arrabio, para las acerías eléctricas, se añaden en forma de lingotes, siendo el peso de cada lingote de entre 3.5-45 kg. Otras características físicas de este producto pueden ser visibles en la Tabla 3.



**Tabla 3.** Propiedades físicas del arrabio [5].

<b>Características físicas</b>	<b>Valor</b>
Densidad aparente (t/m <sup>3</sup> )	6.5 – 7.0
Contenido de finos (%)	≤ 2

El arrabio es una de las ferroaleaciones que más carbono contiene, siendo usualmente entre 3.8-4.5%. Además de ello, contiene otros constituyentes, los cuales son mostrados en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Características típicas de los constituyentes del arrabio [5].

<b>Constituyentes</b>	<b>Valor (%)</b>
Fe	94.0 - 95.0
C	3.5 - 4.5
S	≤ 0.05
P	0.08-0.15
Si	≤ 1.25
Mn	≤ 1.0
Cu, Ni, Cr, Mo, Sn, Pb, Zn, V	Dependen de la química del carbón y el mineral de hierro

Para la producción de acero, el Si y el Mn (parcialmente) pasan por reacciones de oxidación exotérmicas, de las cuales emiten calor, siendo beneficioso desde el punto de vista energético. Sin embargo, los productos obtenidos de estas reacciones son óxidos que van directamente a la escoria, aumentando su volumen y el  $SiO_2$  formado, genera la necesidad de añadir cal en la escoria para mantener el nivel de basicidad dentro del rango de 1.6-2.0, ya que, si no se hace

esto, afectará negativamente a las paredes de refractario. Por otro lado, el P y S son impurezas perjudiciales del acero, por lo que es necesario disminuir su contenido hasta el mínimo posible. Es por ello que es de vital importancia usar como material de carga que cumplan con estas características, incluyendo el arrabio.

El uso de este material como materia prima dota de ciertas ventajas al proceso:

- Una alta pureza y baja ganga permite una producción de productos de acero con un requerimiento bajo en contenido de residuo.
- Una química conocida y consistente certificada por análisis.
- Una entrega eficiente de energía química por el contenido de C que favorece el hervido y la formación de la escoria espumosa.
- La alta densidad reduce el número de carga de cestas, permitiendo el uso de materiales menos densos y reduce el espacio de almacenamiento.
- Su forma consistente dota mayor eficiencia de manejo del material.
- Reduce el consumo de energía, hasta 3-5 kWh/t por cada 1% adicionado.
- Mejora el rendimiento metálico de la carga.

#### 4.3.2. Materiales creadores de escoria

Este tipo de materiales se usan para producir escoria en el proceso de fabricación de acero, esta escoria se trata de una solución iónica con una naturaleza no-metálica que posee una composición química óptima. Se distinguen dos materiales principales: cal metalúrgica, Dolomita.

##### 4.3.2.1. Cal

La cal metalúrgica es la base de los materiales para formar escoria dentro del Horno de arco eléctrico, incluyendo su variedad conocida como Cal-dolomítica.

La cal, siendo portador de CaO en la escoria, es producida a partir de un mineral conocido como caliza. Su proceso de producción incluye el calcinamiento en hornos a una temperatura de 1.000-1.200°C. Los parámetros como composición química, reactividad y porosidad definen la idoneidad de la cal en los procesos metalúrgicos.



**Figura 16.** Cal calcinada dentro de su respectivo silo [5].

El objetivo de la cal en el proceso del horno de arco eléctrico es compensar la sílice de la escoria (aportada normalmente por el HBI) para que la escoria mantenga los niveles de basicidad (1.5-2.0) que afecta a la viscosidad de la escoria y no se dañe el refractario en todo el proceso y, por otro lado, desfosforar el acero. Los niveles de este material han de ser medidos con cuidado ya que un exceso puede provocar una peor espumación y un aumento del consumo por pérdidas por radiación.

#### 4.3.2.2. Cal-Dolomítica

Este elemento se usa en los procesos de producción de acero debido a que es portador de MgO a la escoria. Este producto se obtiene mediante la quema de la dolomita a 900°C. Químicamente, es una mezcla carbonatos de Cal y Mg. El objetivo del quemado es para evaporar la humedad y transformar los carbonatos en óxidos. Durante el quemado, se libera un 40-50% de la dolomita en forma de carbono dióxido. La dolomita tiene por lo general, una composición de 30-40% CaO, 20-50% MgO y un conjunto de impurezas de  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$ .



**Figura 17.** Cal dolomítica dentro de su respectivo silo [5].

#### 4.3.3. Materiales de oxidación y carburación

El oxígeno en forma de gas es el elemento base para la oxidación del material. En el horno de arco eléctrico, la tecnología o el equipo que se encarga de alimentar oxígeno son inyectores de oxígeno. Estas están hechas de tubos de acero enfriados con agua.

El oxígeno tiene como objetivos oxidar los elementos no deseados y llevarlos a la escoria, obtener energía química de las reacciones exotérmicas de la oxidación y reaccionar con el Fe para formar FeO, elemento esencial para la defosforación, la viscosidad de la escoria y su espumación.

Por otro lado, el carbón es también otro producto esencial, desempeña las siguientes funciones:

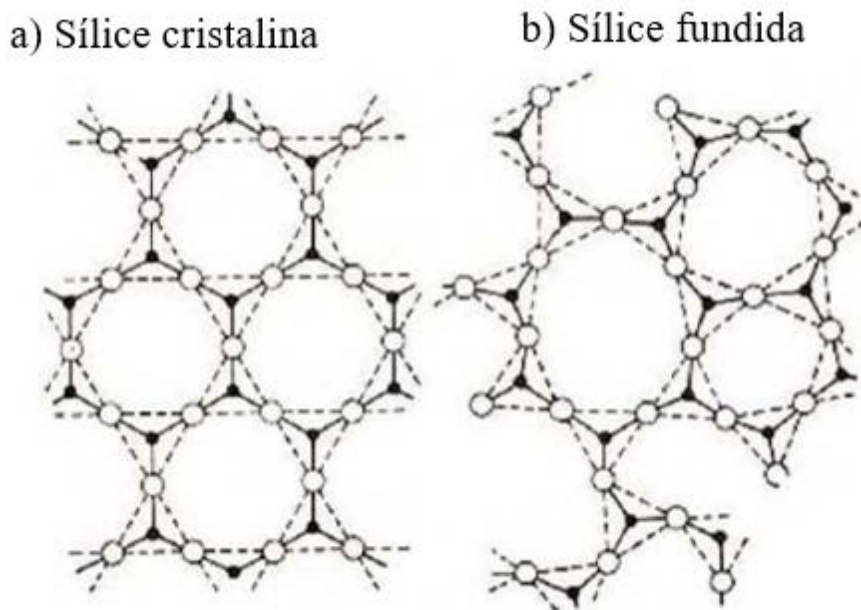
- Alear el acero.
- Aumentar el contenido de carbono en el baño para llevar a cabo el periodo de oxidación.
- Producir energía térmica a partir de la oxidación.
- Aumentar la espumación de la escoria.

En la práctica industrial, se usan materiales que contengan carbón como elementos básicos para espumar y carburar, por lo que son conocidos como “agentes carburantes” o “agentes espumantes”. El primero es llamado así porque aumenta el contenido de carbono en el baño, mientras que el segundo se debe a que, al añadir carbón, este reacciona con el FeO,

desoxidándolo y formando burbujas de CO que pasarán a la escoria, aumentando su volumen y ayudando a la espumación.

#### 4.4. ESCORIA DEL HEA

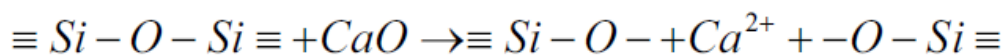
Las escorias son materiales fundidos homogéneos (líquidos) de naturaleza iónica consistentes de cationes y complejos de silicatos negativamente cargados. La sílice pura y todos los silicatos están constituidos por una red de tetraedros de silicato. Gracias al análisis de su estructura cristalina, se ha podido observar que el silicio está situado en el centro del tetraedro, siendo rodeado por 4 átomos de oxígeno, llegando a formar una red polimerizada de  $SiO_2^{4-}$ . Esto puede ser visualizado en la Fig. 18, en la cual se muestran los átomos de oxígeno en blanco, mientras que los átomos de sílice están en negro.



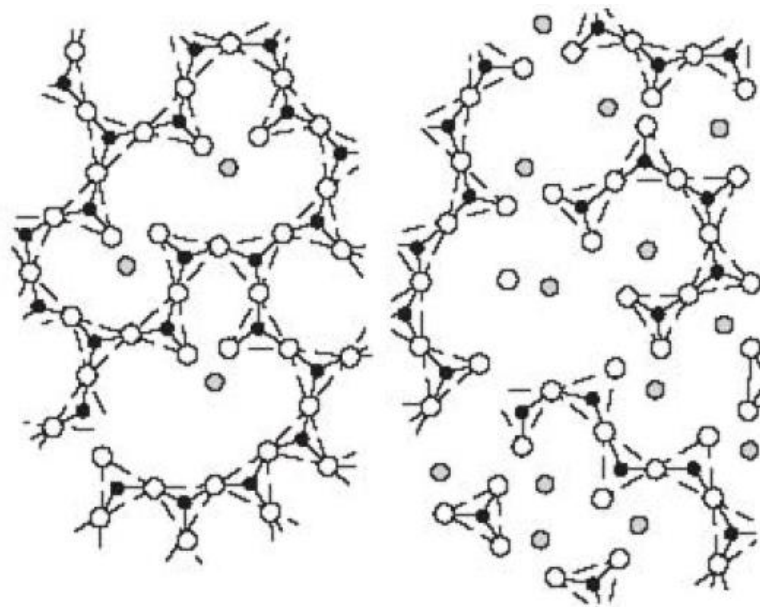
**Figura 18.** Representación esquemática de los tetraedros de sílice en la sílice a) cristalina y b) fundida. Los átomos de oxígeno se muestran en blanco y los átomos de sílice en negro. [8]

En el estado cristalino la disposición de los átomos de sílice y oxígeno en los tetraedros es simétrica. La estructura sólida no sufre ningún cambio repentino en la fusión. En la sílice fundida, la estructura se distorsiona, pero la mayoría de las esquinas del tetraedro siguen estando unidas. Únicamente desaparece el orden de larga distancia para formar una red sólida tridimensional. Esto hace que el material fundido sea altamente viscoso.

La adición de óxidos metálicos en la sílice fundida, como por ejemplo óxido ferroso (FeO), cal (CaO) y magnesia (MgO), transforma por completo la red de silicato, rompiéndola. Esta reacción puede ser observada en la siguiente fórmula:



Cada átomo de oxígeno en el punto de ruptura posee una carga negativa y los cationes de  $Ca^{2+}$  o  $Mg^{2+}$  se acomodan en estos huecos creados tras la ruptura de la cadena. Cuando se añaden dichos óxidos en altas concentraciones, la red de sílice se descompone cada vez más y la viscosidad disminuye en consecuencia. Finalmente, se alcanza un estado en el que no se comparten esquinas y la estructura de sílice fundida consiste en un conjunto tetraédrico discreto en vez de la estructura polimérica que se muestra en la Figura 19.



**Figura 19.** Representación esquemática de un óxido metálico divalente en la sílice fundida. Los iones metálicos son representados con átomos grises o sombreados. La concentración de los óxidos metálicos aumenta de izquierda a derecha [8].

#### 4.4.1. Funciones de la escoria

Esta solución iónica formada por óxidos metálicos fundidos o parcialmente fundidos denominada como escoria, flota sobre la capa de acero. Esta desempeña un rol muy importante en el proceso de fabricación de acero, en concreto en la absorción de impurezas (especialmente azufre y fósforo). La escoria consiste en la combinación de impurezas que son añadidas con la carga metálica, como la suciedad y los productos de las reacciones de oxidación. Actualmente, en la práctica del HEA, la escoria es espumada ya que se ha observado que esto mejora la transmisión de calor del arco eléctrico al baño de acero y protege las paredes del horno de la radiación del arco. Además de ello, gracias a la espumación de la escoria, se disminuye considerablemente el ruido del arco y mejora la eficiencia eléctrica del horno. Entre las funciones principales de la escoria se destacan las siguientes:

- Cubre el arco del HEA y protege las paredes refractarias del horno del propio arco.
- Mejora la calidad del acero gracias a la absorción de productos desoxidantes ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ).
- Defosforación del acero.
- Protege el baño metálico de la oxidación.
- Mejora la transmisión de calor del arco.

La espumación se consigue mediante la inyección de oxígeno y carbón al baño metálico fundido y a la escoria respectivamente. Cierta cantidad de oxígeno es necesaria para oxidar las impurezas y reducir el contenido de carbono mientras que simultáneamente se inyecta carbón y oxígeno a la interfase acero-escoria para producir adecuadamente el fenómeno de la espumación.

La viscosidad de la escoria es la propiedad más crítica y determinante en el proceso del HEA. Una buena escoria desde el punto de vista de la práctica metalúrgica debe de tener una alta fluidez, es decir, baja viscosidad, mientras que, desde el punto de vista del protector refractario, todo lo contrario, debe de tener una alta viscosidad para asegurar el mínimo de desgaste del mismo. Es por ello, que teniendo en cuenta ambos puntos de vista, la escoria debe de ser suficientemente fluida para refinar el metal, pero no demasiado como para acelerar el desgaste del refractario, por lo. Por lo que los requerimientos para una buena escoria serán,

- Mejorar la calidad del acero.

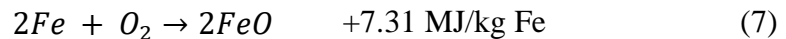
- Ser compatibles con el refractario, en cuanto a una adecuada saturación en MgO.
- Tener buenas propiedades de espumación (espumar en el momento adecuado y mantenerlo el tiempo suficiente).

#### 4.4.2. Desoxidación del FeO y espumación de la escoria

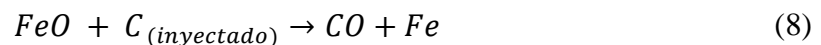
Como bien se ha mencionado previamente, espumar la escoria aporta de grandes beneficios al proceso de obtención de acero en el Horno de arco eléctrico. Este fenómeno se produce en parte como resultado del gas proveniente de las reacciones químicas que tienen lugar en la interfase escoria-acero debido a la inyección de carbón y oxígeno.

Principalmente, la espumación tiene como objetivo aumentar la eficiencia térmica del horno durante el periodo final de refinado, cuando las paredes del refractario se ven completamente expuestas a la radiación del arco. Durante esta etapa, la escoria espumosa debe aumentar su volumen y cubrir el arco, mejorando así la eficiencia térmica y la transmisión de energía a la fase de acero.

Esta espumación se obtiene mediante la inyección inicial de oxígeno al acero líquido, donde se dará la reacción exotérmica de oxidación del hierro, de acuerdo a la siguiente reacción, en la que se muestra además la cantidad de energía química que aporta al proceso:

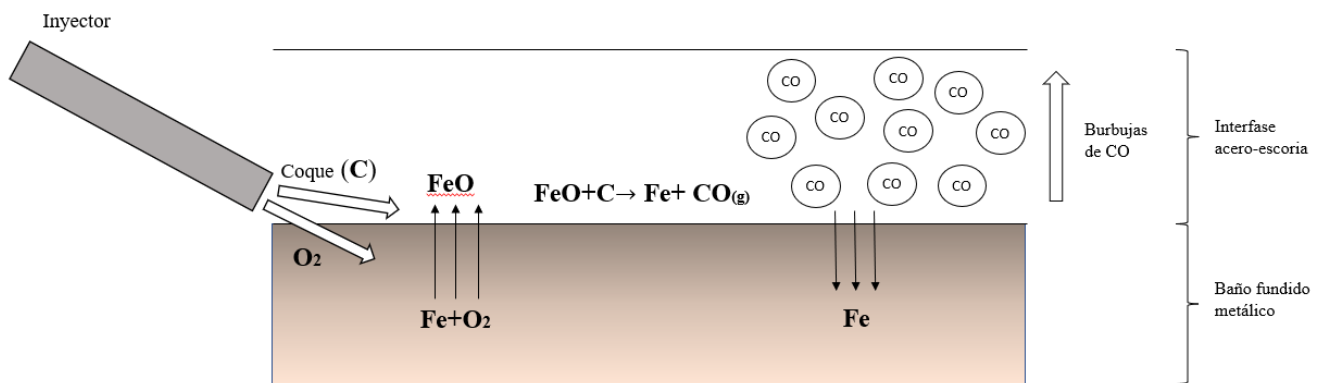


Este óxido metálico se elevará y pasará del baño metálico a la interfase acero-escoria, donde a continuación, se inyecta el carbón a la interfase escoria-acero para reducir el óxido ferroso y que reaccione además con el oxígeno que se está inyectando simultáneamente.





El monóxido de carbono resultante es el elemento clave en el proceso, ya que, debido a la energía neumática que provee, en parte debido a la reacción de reducción de FeO y a la reacción con el oxígeno, se generan burbujas de CO que pasarán a través de la escoria, provocando el aumento de volumen de esta y generando el fenómeno denominado como espumación. El mecanismo de la espumación de la escoria puede ser visualizado en la Figura 20.



**Figura 20.** Mecanismo de reacciones en la interfase acero-escoria debido a la inyección de oxígeno y coque en el proceso de espumación de la escoria.

#### 4.4.3. Beneficios de la espumación

Se dice que un medio líquido espuma cuando las burbujas de gas arrastradas se acumulan y expanden el medio, formando una estructura similar a un panal de abejas que consiste en burbujas de gas densamente agrupadas y separadas por finas películas del medio líquido [9]. Esto puede ser observado en la Figura 21, donde se observa el conjunto de burbujas esféricas de carbono monóxido en una escoria bien espumada.



**Figura 21.** Burbujas esféricas observadas en una escoria bien espumada [11].

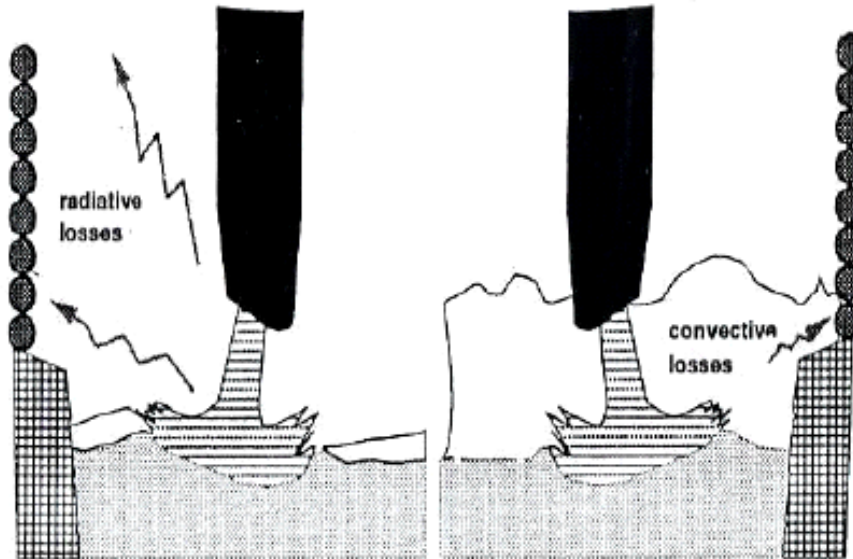
La práctica de espumar la escoria en el HEA conlleva la creación de burbujas de gas en la escoria, creadas a partir de las reacciones químicas que ocurren durante el proceso, además de mantener una composición apropiada de la escoria para preservar estas burbujas. Una escoria bien espumada reduce las pérdidas de calor radiativo del baño, mejorando la eficiencia térmica y el consumo de energía eléctrica. Debido a ello, se permite el uso de mayores niveles de potencia sin arriesgar daño alguno sobre el material refractario del horno. El uso de mayores potencias conlleva una reducción de tiempo de fusión y tap-to-taps más cortos. [7]

Por lo que los beneficios de espumar la escoria se pueden listar de la siguiente manera:

- Reducción de las pérdidas de calor a través de las paredes laterales.
- Mejora de la transferencia de calor del arco al acero, permitiendo el uso de mayores niveles de potencia.
- Reducción de las fluctuaciones de potencia y voltaje.
- Reducción eléctrica y de los niveles sonoros.
- Permite el aumento del arco hasta un 100% sin llegar a aumentar la pérdida de calor.
- Reducción del desgaste del electrodo y del material refractario.
- Disminución del tap-to-tap.

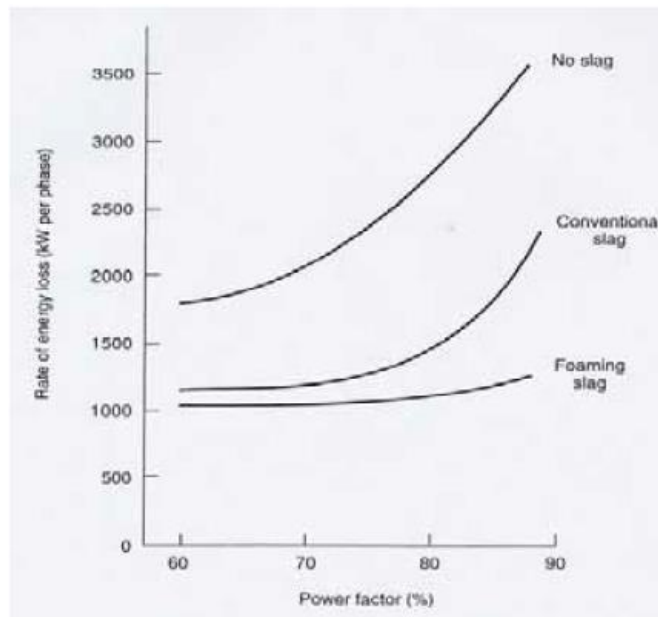
Estas pueden ser visualizadas en la siguiente figura. En la Figura 21 se muestra los beneficios de espumar la escoria, previniendo la pérdida de calor durante el proceso. La capa de escoria cubre el arco y ayuda a contener la mayoría del calor generado, minimizando las pérdidas de calor radiativo. Si no se hace uso de la capa de escoria espumada y no cubrir el arco, este

golpearía las paredes del horno dañando el refractario y se daría una alta pérdida de calor, siendo esto visible en la Figura 22. Por lo que, cubriendo el arco con escoria, esta actúa como escudo y se transmite la energía directamente al baño metálico.



**Figura 22.** Efecto en la pérdida de calor al cubrir el arco con escoria espumosa durante el proceso de HEA [4].

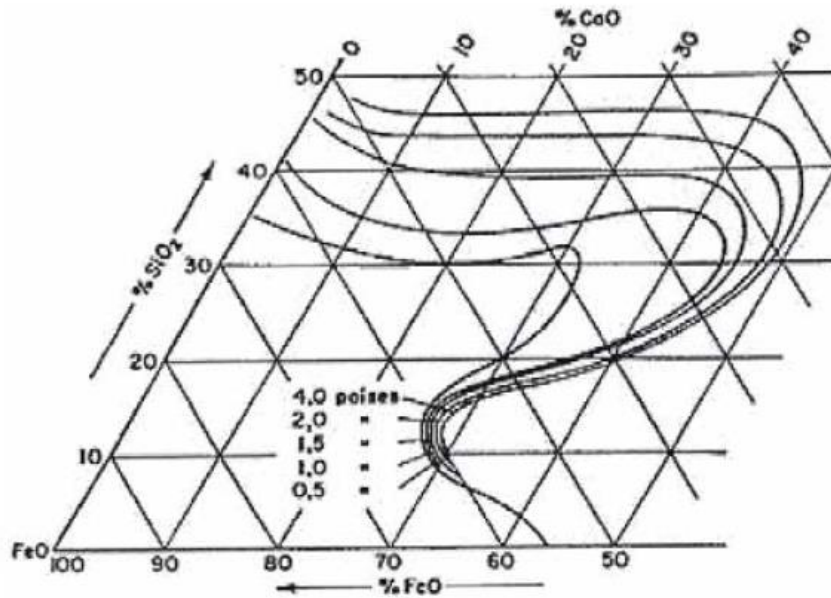
Por otro lado, si se consigue establecer una buena espumación de la escoria en una etapa temprana del proceso y mantenerla por un largo periodo del mismo, se permite aumentar sustancialmente el factor de potencia mediante el uso de taps de mayor voltaje para aumentar el calentamiento del baño metálico, siendo esto visible en la Fig. X. Cabe destacar que, espumando la escoria, se permite aumentar el factor de potencia y la longitud del arco sin que conlleve ningún tipo de pérdida térmica, siendo esto representado en la Figura 23. La corriente disminuye a medida que la longitud del arco hace lo mismo, esto puede reducir el consumo eléctrico con un pequeño cambio en la potencia o en la eficiencia térmica.



**Figura 23.** Efecto de la escoria espumada en la pérdida de energía con el aumento del factor de potencia [4].

#### 4.4.4. Viscosidad y las partículas de segunda fase

La escoria dentro del horno de arco eléctrico es descrita como una emulsión de gas y líquido [6] en la cual el volumen del medio líquido es menor que el volumen total del sistema. La formación y la durabilidad del espumado, mejora con el decrecimiento de la tensión superficial y el aumento de la viscosidad de la escoria. Estos dos factores son los elementos más importantes para espumar la escoria. Sin embargo, se ha observado que la presencia en la escoria de partículas de la segunda fase en suspensión tienen un mayor impacto que las mencionadas previamente [8]. La mayoría de las líneas de escoria de refractario son básicas (magnesia o dolomía) por lo que es necesario saturar la escoria con CaO y/o MgO para minimizar el desgaste químico de los refractarios. Estos dos elementos poseen unos puntos de fusión de 2570°C y 2800°C respectivamente, por lo que se requieren flujos para formar escorias líquidas trabajando con temperaturas de 1600°C, las cuales suelen ser comunes en la fabricación del acero. Partiendo de la composición típica de la escoria, se el FeO es el flujo más importante en el proceso, ya que es el único componente que está completamente fundido en las temperaturas de trabajo de 1600°C. En la Figura 24 se observa el efecto del FeO en la viscosidad mediante las curvas de isoviscosidad para los sistemas de  $FeO - CaO - SiO_2$ .



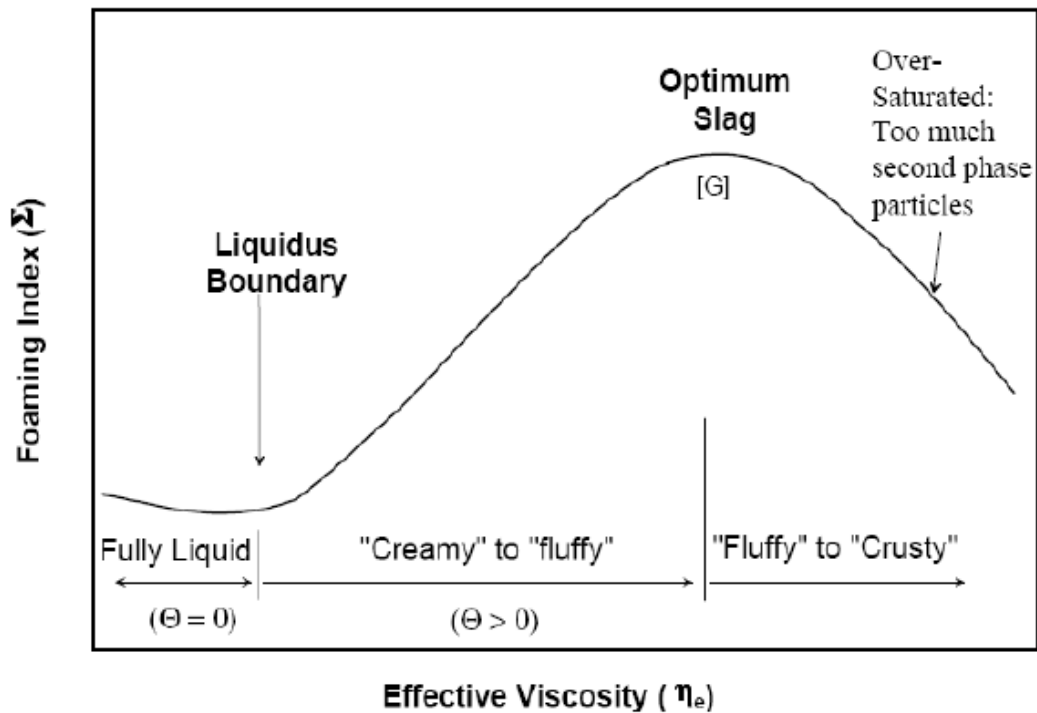
**Figura 24.** Líneas de isoviscosidad para el sistema FeO – CaO – SiO<sub>2</sub> a 1450°C (mol %) [3].

La escoria que logran las mejores propiedades de espumación tienen consistencia (fluidéz) que se encuentra entre “cremosa” y “esponjosa”, con “acuosa” y “crujiente” en los extremos opuestos del espectro. Esto quiere decir que las escorias óptimas no son completamente “acuosas” (líquidas) sino que están saturadas respecto a los elementos CaO (se forma el compuesto sólido  $Ca_2SiO_4$  el cual aumenta la viscosidad de la escoria y MgO (se forma la solución sólida magnesia-wustita). Estas partículas de segunda fase sirven como zonas de nucleación para los gases, lo cual favorece en sobremanera la formación de pequeñas burbujas de gas que espuman la escoria [8].

El término de viscosidad efectiva ( $\eta_e$ ) es definido para relacionar la cantidad de partículas de segunda fase en la escoria y la viscosidad. Su cálculo puede observarse con la Ecuación 10.

$$\eta_e = \eta(1 - 1.35\theta)^{-\frac{5}{2}} \quad (10)$$

Dónde  $\eta$  es la viscosidad de la escoria fundida,  $\eta_e$  es la viscosidad efectiva de la escoria y  $\theta$  es la fracción de las fases sólidas precipitadas. A continuación, se muestra en la Figura 25 la relación entre el índice de viscosidad ( $\Sigma$ ) (el cual relaciona ratio de flujo de gas, la altura de la espuma y la vida de ésta) y la viscosidad efectiva ( $\eta_e$ ).



**Figura 25.** Relación entre el índice de viscosidad y la viscosidad efectiva [8].

Se observa que a medida que la viscosidad efectiva relativa se ve aumentada, el tiempo de residencia de las burbujas de gas en la escoria es prolongado, extendiendo la estabilidad y subsecuentemente la vida de la espuma. Se observa además que hay un límite máximo crítico de partículas de segunda fase, el cual es beneficioso para la estabilidad de la espuma. Una vez se excede este punto, la escoria se vuelve demasiado “crujiente” (sobresaturada) y el índice de espumación disminuye [8].

#### 4.4.5. Influencia de la basicidad

Los componentes de la escoria se dividen en dos grupos: los refractarios u óxidos básicos (entre los que se encuentran MgO y CaO) y los óxidos ácidos (FeO, MnO,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  y  $CaF_2$ ).

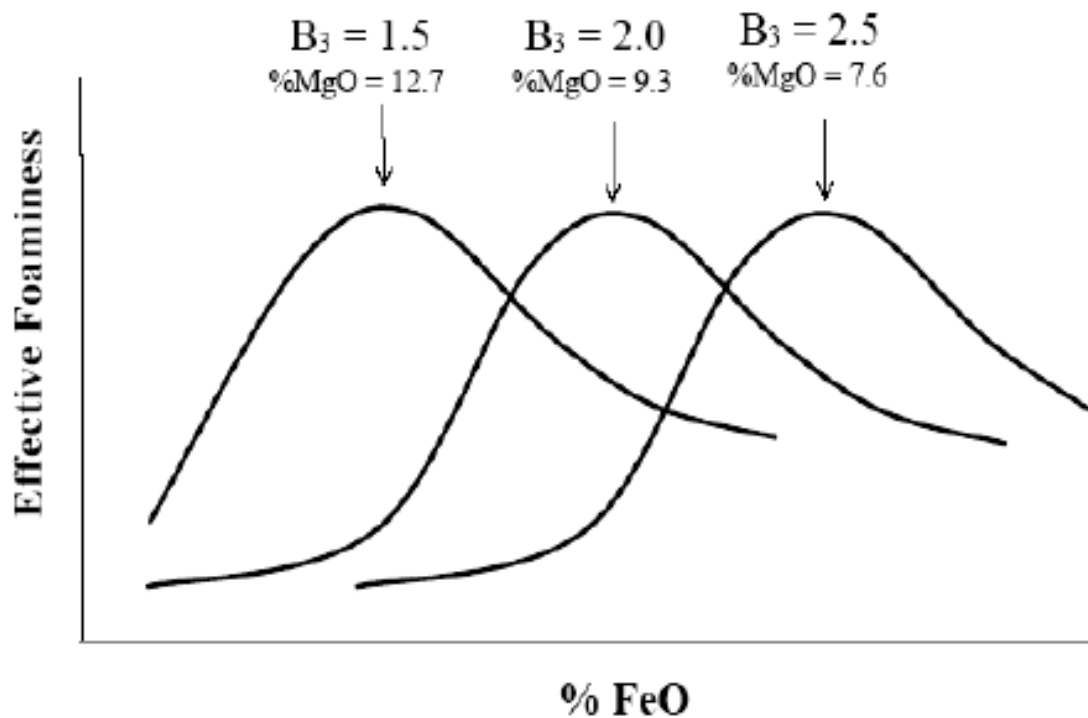
En la producción de acero se busca mantener un balance entre los óxidos básicos y ácidos, de modo que la escoria sea compatible con el refractario básico y sea adecuado para espumar. Adicionalmente, saturar la escoria con óxidos básicos, como lo son CaO y MgO, es esencial para una buena espumación además de asegurarse un menor desgaste y consumo del refractario dentro del horno [8].

Como se ha mencionado, alcanzar un balance entre los óxidos básicos y ácidos es esencial en la práctica de la metalurgia. Es aquí donde entra el concepto de índice de basicidad (IB). Este parámetro será el que indicará el balance entre los óxidos. Actualmente existen varias formas de definir el IB, pero en este trabajo de fin de máster se hará uso del índice de basicidad terciario ( $IB_3$ ), el cual se muestra en la Ecuación 11.

$$IB_3 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \quad (11)$$

La basicidad de la escoria no ejerce una influencia directa sobre la formación de la escoria espumosa, pero si está relacionada con la viscosidad y ésta si influye en el grado de espumación. Cuando se tiene una viscosidad baja las burbujas de CO que se generan debido a la desoxidación del óxido ferroso (FeO), atraviesan fácilmente la escoria para salir a la atmósfera del horno y no se espuma adecuadamente. Es por ello que la escoria debe de tener una viscosidad óptima para que las burbujas de CO tarden más en atravesarla y espumen más. La composición adecuada de la escoria para una buena formación de escoria se basa en un índice de basicidad (IB) de 1.5-2.0 y un contenido en la escoria de FeO de 27.0-35.0 %. De esta forma se da una moderación en el desgaste del revestimiento refractario del horno que está fabricado en base MgO.

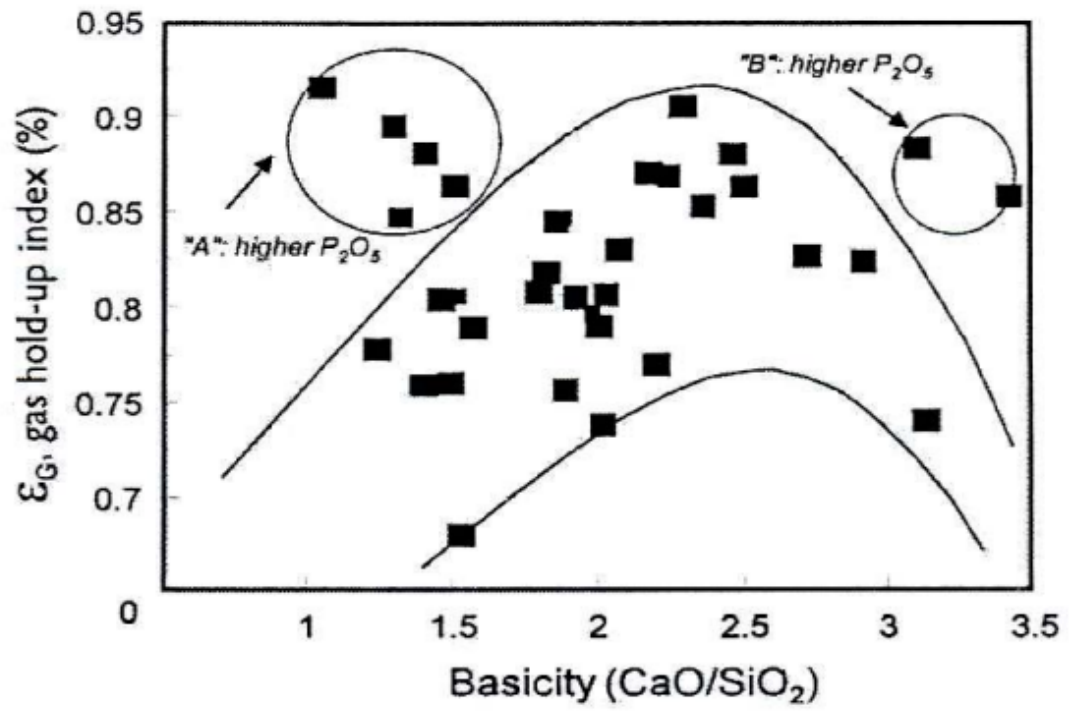
Cabe destacar que gracias a investigaciones llevadas a cabo previamente, se ha demostrado que existen un amplio abanico de composiciones de escoria posibles que permiten obtener buenas propiedades de espumación. Esto viene siendo apoyado por las prácticas de escoria en el HEA a través de la industria siderúrgica dónde la basicidad de la escoria varía desde 1.5 hasta más de 3.0 con niveles de FeO de entre 10-50% mientras que se siguen obteniendo buenos comportamientos de la escoria espumada. La Figura 26 muestra la efectividad de la espumación en base al índice de basicidad para cierto contenido de FeO. Esta figura muestra la disminución de la solubilidad de la magnesia (MgO) a medida que aumenta el índice de basicidad, así como el contenido de óxido ferroso (FeO) en la escoria [8].



**Figura 26.** Comportamiento de la espumación efectiva en función de la basicidad y el contenido de FeO en la escoria [8].

Cabe destacar que ciertos investigadores llevaron a cabo pruebas a la hora de analizar la relación entre la basicidad y el índice de espumación o la altura de espumación, mediante el uso de un índice de basicidad modificado para diferentes sistemas y bajo varias condiciones. Gracias a esto, se observó que el índice de espumación decrecía con el aumento del índice de basicidad hasta cierto valor, y posteriormente aumentaba junto con la basicidad, segiriendo que la precipitación de las partículas de segunda fase, como lo es  $2CaOSiO_2$ , tienen una influencia importante en la estabilidad de la espuma. Una de estas investigaciones fue la que llevaron a cabo [11]. En esta, se hizo uso del índice de retención de gas como función de la basicidad, expresada como  $CaO/SiO_2$ , la cual mostraba una curva parabólica con un máximo de basicidad de 2.5. Esto puede ser visualizado en la Figura 27.





**Figura 27.** Efecto de la basicidad de la escoria en el índice de retención de gas [11].

## 5. PLANTEAMIENTO

### 5.1. DESCRIPCIÓN DE UN PERFIL DE INYECCIÓN

En este proyecto, se ha tenido como objetivo optimizar recetas/perfiles de inyección de coque y oxígeno en el proceso de fusión de chatarra en el horno de arco eléctrico. Estas recetas sirven únicamente para cuando se carga una sola cesta de chatarra. Primero de todo es comprender que es un perfil/receta de inyección de carbón y oxígeno. Un perfil de inyección tiene diferentes etapas de proceso, se divide el proceso en unos rangos de kWh. En cada uno de estos rangos se inyectan distintos caudales de oxígeno, carbón y gas natural. En la Tabla 5 se puede observar el perfil P1, el cual es el que se propone para ser usado cuando el horno esté funcionando de continuo con el objetivo de mantener el % de FeO entre 27.0-35.0% y el MgO entre 8.0-10.0%.

Los perfiles de inyección tienen tres etapas principales de proceso.

Etapas de fundir chatarra: esta etapa es la principal del proceso. En el perfil P1 corresponde a los rangos de 0-12.000 kWh. Se carga la chatarra dentro del HEA mediante la cesta y se cierra la bóveda. Se baja el electrodo y se hace saltar el arco entre el electrodo superior y los cuatro electrodos inferiores. Se funde la chatarra hasta que deje de ser sólida. Al comienzo de esta etapa, se inyecta gas natural junto con el oxígeno en el rango de 0-8.000 kWh. Esto ayuda a fundir la chatarra cercana al OxygenJet más eficientemente. El caudal de oxígeno va aumentando a lo largo de esta etapa. Este aumento ha de ser comedido y poco a poco, ya que de esta forma se va abriendo paso en la chatarra (fundiéndola) en la zona circundante a los inyectores y se asegura que no haya rebotes que puedan dañar los paneles refractarios dentro del horno.

Etapas de espumación de la escoria: se da comienzo a la inyección de carbón mediante los módulos de inyección. Esta etapa es la que más dura en todo el proceso de fusión del HEA. Se sitúa en el rango de 12.000-48.000 kWh. Gracias a la búsqueda bibliográfica que se ha realizado, se ha determinado hacer uso de una relación aproximada COR de  $0.7 \text{ kg C/Nm}^3 \text{O}_2$ . Al igual que la etapa anterior, el caudal de oxígeno sigue aumentando progresivamente hasta el máximo,  $2.500 \text{ Nm}^3 \text{O}_2/\text{h}$ . Este caudal se le conoce como oxígeno supersónico, y es el que penetra más eficientemente en el baño metálico sin provocar salpicaduras. Al igual que el

oxígeno, el caudal de carbón aumenta también. Esto se debe a que se busca mantener en todo momento la relación COR comentada previamente.

Etapa de decarburación: esta es la etapa final del proceso. Corresponde al rango de 48.000-99.000 kWh. En esta etapa la inyección de carbón no busca espumar la escoria, sino que se pretende asegurar la decarburación del baño metálico. Esto se logra mediante un caudal de oxígeno de  $2.000 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2 / \text{h}$  y un caudal de carbón de 10 kg/min en el rango de 48.000-55.000 kWh. Por otro lado, en el rango de 55.000-99.000 kWh se inyecta únicamente oxígeno. Esto se debe a que de esta forma se asegura que el baño metálico cumpla con el requisito de tener un nivel de oxidación superior a 200 mV.

Al final del proceso de fusión y afino del horno de arco eléctrico se mide la oxidación y la temperatura del baño metálico. En caso de que la oxidación (medida en mV, ya que la oxidación del baño se relaciona con el voltaje aplicado) no esté entre los valores de 200-210 mV se requiere que los módulos de inyección inyecten los siguientes caudales:

En caso de necesitar recarburar ( $>220 \text{ mV}$ ) se deben aplicar por módulo los siguientes caudales hasta lograr que la oxidación disminuya:

- CarbonJet: 20 kg de carbón/min
- OxygenJet:  $1.000 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2 / \text{min}$

En caso de necesitar decarburar ( $<200 \text{ mV}$ ) se aplican los siguientes caudales:

- CarbonJet: 0 kg de carbón/min
- OxygenJet:  $2.500 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2 / \text{min}$

**Tabla 5.** Perfil P1, perfil propuesto en este TFM para horno funcionando de continuo.

<b>OXYGENJET</b>										
GN( $Nm^3/h$ )	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O2 ( $Nm^3/h$ )	350	400	750	1000	1500	2000	2500	2000	2500	2000
<b>CARBONJET</b>										
O2 ( $Nm^3/h$ )	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbón (kg/min)	0	0	10	12	17	20	17	10	0	0
kWh×100	80	120	170	190	250	350	480	550	610	990

Gracias a varias pruebas se ha observado que no es posible inyectar cantidades de carbón superiores a 25 kg/ min ya que los módulos son propensos a atascarse. Por otro lado, no es posible adicionar menos de 10 kg/min, ya que los módulos toman las unidades seleccionadas como nulas y no se inyecta carbón.

Desde el primer momento que se han implementado las primeras propuestas de perfiles de inyección hasta la verificación del funcionamiento de los perfiles optimizados, se han realizado pruebas en 167 coladas, de las cuales un 76.0 % han servido para obtener información relevante y poder hacer ajustes en las relaciones de oxígeno/carbón inyectadas de las recetas/perfiles de inyección. En este Trabajo de Fin de Máster se muestra la variación de la composición de la escoria, el índice de basicidad de la misma y el consumo eléctrico durante 15 coladas en situaciones de continuo y de parada, verificando que los perfiles optimizados de inyección de carbón y oxígeno funcionan adecuadamente y consiguen estabilizar la composición de la escoria, logrando estabilizar el % de óxido ferroso (FeO) entre valores de 27.0-35.0% y el % de magnesia (MgO) entre valores de 8.0-10.0%, evitando que este último alcance valores inferiores a 8.0%, indicativo que se dará un desgaste mayor del material refractario dentro del horno de arco eléctrico. Para llegar a estos perfiles óptimos primero se ha partido de un perfil

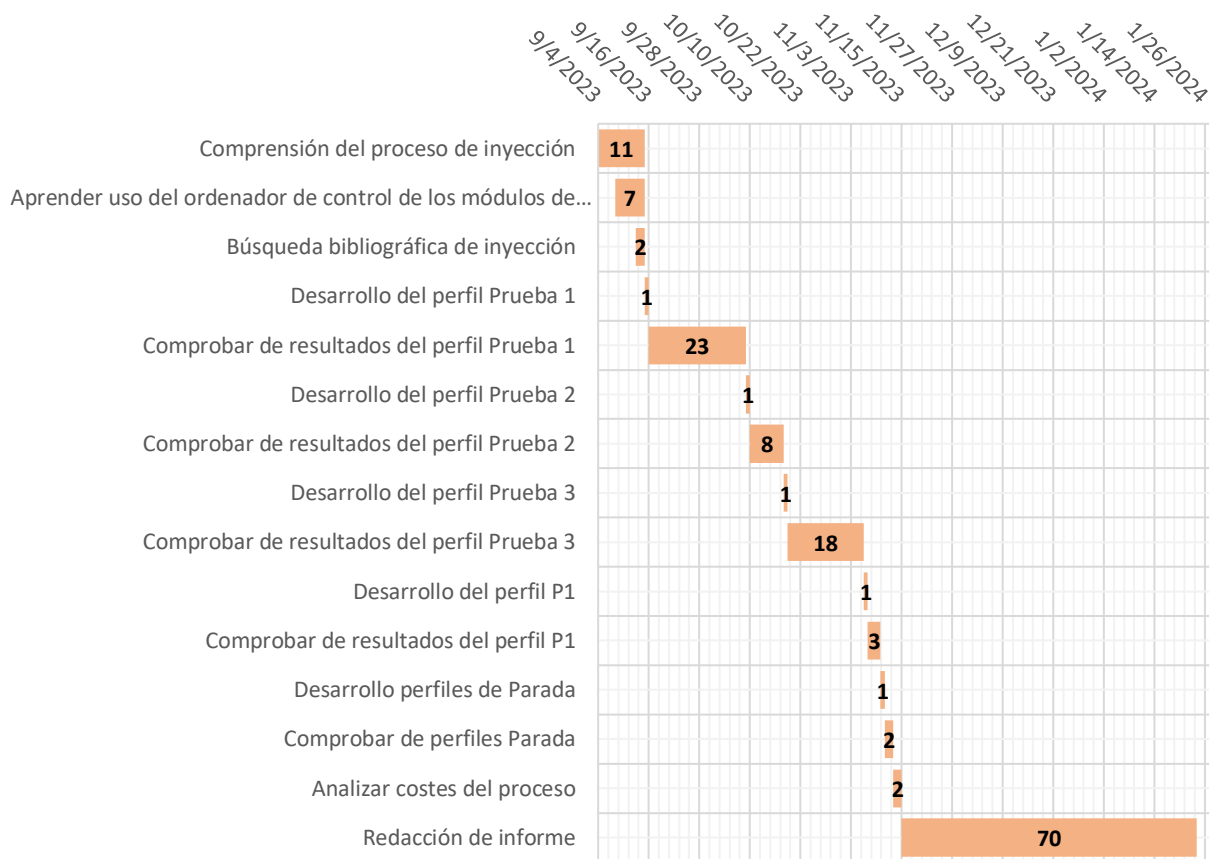
de inyección previamente usado en *ArcelorMittal Sestao*. Este ha sido modificado a medida que se han obtenido resultados desfavorables en las coladas hasta llegar al perfil P1, el cual es usado cuando el HEA funciona de continuo (sin interrupciones ni paradas durante las coladas).

Para estas pruebas se ha necesitado una continuidad en las coladas, es decir, que haya habido varias coladas seguidas en las que se haya cargado 1 cesta. Una vez logrado el perfil que logra mantener el contenido de la escoria dentro de los rangos previamente mencionados, el perfil P1 (mostrado en el siguiente apartado), dicho perfil ha sido modificado, aumentando la relación de kg de carbón/ $Nm^3O_2$  para ser utilizado en las situaciones en las que hay una parada, estos perfiles son los mostrados en este Trabajo de Fin de Máster, P2 y P3. Esta parada provoca que el baño metálico se oxide por lo que el óxido ferroso obtenido será superior a 35.0%.

Para la obtención de los perfiles de inyección de carbón y oxígeno para la carga de 1 cesta mostrados en este trabajo de fin de máster, se ha dado un proceso continuo de mejora, creando perfiles basados en perfiles anteriormente usados en *ArcelorMittal Sestao* que son insertados en el ordenador que controla los módulos de inyección y ver la evolución de los contenidos de los compuestos presentes en la escoria, como lo son el FeO, MgO, CaO, Alúmina y sílice. Cada prueba realizada en la fusión dentro del horno ha tenido una duración alrededor de 45 minutos, por lo que para comprobar si los perfiles creados son eficaces, se han de necesitar varias coladas, ya que la escoria de cada una de ellas, se deja como remanente en el horno. Su propósito es ayudar a fundir la chatarra que será adicionada en la siguiente colada. Este remanente de escoria y baño metálico se conoce como pie de baño.

## **5.2. DIAGRAMA DE GANTT**

La metodología se ha dividido en fases o tareas. Las fases han tenido una duración muy diferente, pero al final del proyecto se han completado todas con éxito. En la Figura 28 se muestra el diagrama de Gantt de la metodología seguida para la realización del trabajo. En este, se detallan los días que han sido necesarios para realizar cada fase.



**Figura 28.** Diagrama de Gantt de la metodología seguida en el trabajo.

Como puede verse en el cronograma, se dió inicio al proyecto el 4 de septiembre gracias al aula de empresa *Room4Steel* de la *Escuela de Ingeniería de Bilbao*. La primera fase consistió en comprender el proceso de fusión de chatarra en el horno de arco eléctrico, la importancia de la escoria y el papel fundamental que ejerce en el proceso y el método de inyección de carbón y oxígeno a través de los módulos de inyección situados a lo ancho del horno.

La segunda fase del proyecto consistió en familiarizarse con el ordenador que controlaba los caudales de carbón y de oxígeno que eran inyectados al horno. Gracias a esto se obtiene conocimiento de cómo añadir perfiles gracias a la asignación de los caudales a inyectar, como guardarlos, como seleccionarlos, visualizar los perfiles de inyección que se usaban anteriormente y conocer cuáles son las diferentes etapas en el proceso de inyección.

Tras comprender la fase teórica del proyecto se realizó una búsqueda bibliográfica del suministrador de los módulos de inyección para determinar que relación COR ( $\text{kg C}/\text{Nm}^3\text{O}_2$ ) debía usarse en los hornos de arco eléctrico. Además de esto, se puso en contacto con un experto de los módulos de inyección. Este sugiere mantener una relación COR alrededor de 0.7 kg

C/Nm<sup>3</sup>O<sub>2</sub> durante la etapa de espumación e ir reduciéndolo hasta 0.3 kg C/Nm<sup>3</sup>O<sub>2</sub> al final del proceso para asegurar la decarburación del baño metálico.

Una vez reunida toda la información necesaria, se desarrolló un perfil de inyección de carbón y oxígeno que buscaba mantener el % de FeO en la escoria entre los valores de 27.0-35.0% gracias a la relación COR durante las etapas del proceso. Estos valores de FeO son indicativos de que se da una buena espumación de la escoria.

Posteriormente, se insertan los caudales y tiempos de inyección del perfil de inyección Prueba 1 en el ordenador que controla los módulos de inyección de carbón y oxígeno. Este perfil es un modelo anterior al que se propone en este Trabajo de Fin de Máster. Cuando las coladas sean de 1 cesta de carga de chatarra, se inyectarán los caudales de carbón y oxígeno según el *set point* establecido en el perfil. Para llegar a una conclusión clara del perfil, han sido necesarios varios días ya que, al tratarse de un proceso industrial, conlleva la aparición de varios problemas que dificultan la obtención de unos resultados claros. Estos problemas serán descritos en más profundidad en el siguiente apartado. Además, durante las pruebas, ha habido una semana en la que la acería ha parado su funcionamiento debido a que hay una semana en la que se deben realizar actividades varias de mantenimiento. Después de 23 días, se han recopilado los datos de la composición de la escoria, que han servido para realizar cambios en los caudales de carbón durante la etapa 12-17 MWh, cambiando el set point a 10 kg de C/min. Antes se había establecido un caudal de 9 kg C/min. Este cambio se realiza debido a que cantidades inferiores a 10 kg C/min son tomadas como nulas y provoca que no se añada carbón a lo largo de este rango de MWh, lográndose un FeO > 35.0%. Por lo que se aumenta el COR durante la etapa de 12-17 MWh a 0.8.

Este nuevo perfil, perfil *Prueba 2* se inserta en el ordenador que controla los módulos de inyección para ser usado en las próximas pruebas.

El perfil *Prueba 2* ha sido usado a lo largo de 8 días. A lo largo de las pruebas se ha observado que durante las primeras coladas si consigue mantener el FeO entre el rango de 27.0-35.0% pero eventualmente se obtienen valores por debajo de 27.0%. Por otro lado, ha sido necesario decarburar durante varias coladas, ya que no se alcanza un nivel de oxidación de 200-210 mV, logrando valores inferiores a 200 mV. La decarburación conlleva la inyección de un caudal de oxígeno de 1000 Nm<sup>3</sup>/h y 0 kg/min de carbón por cada módulo. Esto repercute en un tiempo ON (tiempo de funcionamiento) mayor que alarga el proceso en el horno eléctrico de arco. Por

lo tanto, se descarta este perfil y se tiene en consideración lo previamente mencionado para ajustar la cantidad de oxígeno y carbón que se inyecta.

Gracias a los datos recopilados, se tiene en cuenta la necesidad de decarburar del perfil *Prueba 2*. Es por ello que se decide aumentar la relación COR aumentando hasta  $2000 \text{ Nm}^3/\text{h}$  el caudal de oxígeno en el rango de 25.000-35.000 kWh además de aumentar el carbón de inyección a 20 kg/min, logrando una relación COR de  $0.60 \text{ kg C/Nm}^3\text{O}_2$ . De esta forma se obtiene el perfil P3. Este perfil se inserta en el ordenador que controla los inyectores y se deja para ser usado en las coladas posteriores de 1 cesta.

El perfil Prueba 3 ha sido usado a lo largo de 18 días. Durante esta etapa, ha habido una semana de parada por mantenimiento. El pie de baño ha estado alto durante varias coladas, lo que ha provocado que se obtengan niveles de FeO altos. Por otro lado, cuando el nivel del pie de baño ha estado a una altura adecuada, se ha observado que los niveles de FeO no han conseguido mantenerse entre el rango de 27.0-35.0% y ha sido necesario decarburar en alguna colada. Es por ello que se ha decidido modificar el perfil *Prueba 3*.

Se ha desarrollado el perfil P1, el cual inyecta menos cantidad de carbón en el rango de 35.000-48.000 kWh, teniendo un caudal de 17 kg/min. Se inserta en el ordenador que controla los inyectores para ser usado en las coladas posteriores.

Han sido necesarios 3 días únicamente para comprobar que este perfil controla el % de FeO y MgO entre los rangos propuestos. Los primeros dos días hubo varios problemas por desprendimientos de electrodo que recarburan el baño, pie de baño alto e interrupciones de coladas de 1 cesta por cargarse 2 cestas. El día 3 de las pruebas se ha dado la situación de tener 6 coladas consecutivas de 1 cesta en la que se ha podido observar adecuadamente el funcionamiento del *perfil P1*.

Gracias a que se observa que el perfil P1 tiene un buen desempeño en cuanto a control de % de FeO, espumación y consumo eléctrico, se decide desarrollar los perfiles para cuando hay paradas de 2-3 horas. Las paradas provocan que el oxígeno entre dentro del horno y oxide el hierro del remanente de acero líquido que se deja como pie de baño y se obtengan valores de FeO superiores a 35.0 %. Por lo que estos perfiles inyectan más cantidad de carbón con el fin de reducir el FeO progresivamente a lo largo de las coladas.



Estos perfiles se insertan en el ordenador que controla los inyectores para ser usados en las coladas. Estos perfiles han sido usados en dos situaciones de parada distribuidas en dos días. Se ha observado que efectivamente, se reduce el FeO y el consumo eléctrico a lo largo de las coladas, demostrando un correcto funcionamiento de los perfiles de inyección de parada.

Para analizar la viabilidad económica del perfil P1, el cual será usado en situaciones de funcionamiento de continuo, se ha contactado con la persona encargada de compras de los materiales usados en ArcelorMittal Sestao. Se ha analizado la viabilidad económica del perfil P1 únicamente, ya que los perfiles P2 y P3 son usados exclusivamente en situaciones excepcionales de parada.

Finalmente, una vez se han recopilado todos los datos necesarios para este Trabajo de Fin de Máster, se ha procedido a redactar este documento a lo largo de 70 días.

### **5.3. PROBLEMAS ACAECIDOS DURANTE LAS PRUEBAS**

Desde el inicio de las pruebas que se han llevado a cabo, han surgido diferentes situaciones o problemas que han obstaculizado verificar el correcto desempeño de los perfiles/recetas de inyección de oxígeno y carbón. Entre estos problemas se encuentra, pie de baño alto, mal funcionamiento de los inyectores de carbón, aparición de infundidos en el baño metálico, desprendimiento de trozos de electrodo, interrupción de la secuencia de coladas de 1 cesta por coladas en las que se cargan 2 cestas.

#### **5.3.1. Pie de baño alto**

Este problema ha sido recurrente durante las pruebas. El principal problema que conlleva es que, al inyectar el carbón, este, en vez de adicionarse en la interfase acero-escoria, se inyecta directamente al baño. Esto provoca que el carbón no reaccione con el óxido ferroso (FeO) y lo reduzca/desoxide adecuadamente, lo que se traduce en la obtención de un contenido en escoria alto de FeO, perdiéndose hierro al desescoriar. El tener FeO superiores a 35.0% implica tener una escoria líquida y una disminución de la solubilidad de la Magnesia, obteniendo valores inferiores a 8.0%, lo que genera un aumento en el desgaste del material refractario del horno. Para solucionar este problema y que no pase en la colada siguiente se ha de adicionar menos toneladas de carga en la cesta.

### 5.3.2. Mal funcionamiento de los inyectores de carbón

Como bien se ha mencionado al inicio de este apartado, se ha observado que no es posible seleccionar caudales de carbón inferiores a 10 kg/min (los inyectores toman esos valores como nulos y no se inyecta carbón) y valores iguales o mayores a 25 kg/min (los inyectores sufren atascos y no se adiciona la cantidad estipulada). Esto conlleva que el óxido ferroso contenido en la escoria obtenga valores superiores a 35.0% y se disminuya la solubilidad del MgO. Este problema ha de ser solucionado por mantenimiento aumentando el caudal de aire del CarbonJet.

### 5.3.3. Aparición de infundidos en el baño metálico

La generación de infundidos se debe a que, al tener el pie de baño bajo con una escoria muy viscosa, a la hora de adicionar la chatarra, esta se ve envuelta por la escoria viscosa, recubriéndola y evitando que esta se funda. Estos trozos solidificados pueden provocar atascos en la piqueta a la hora de colar el acero líquido además de dificultar una correcta homogeneización de la temperatura en el baño. Para solucionar este problema ha de calentarse más el baño aplicando más consumo eléctrico.

### 5.3.4. Desprendimiento de trozos de electrodo

Al estar hechos de grafito puro, los trozos de electrodo que caen al baño alteran la composición química del mismo y lo recarburan. Se puede traducir en la obtención de una escoria baja en óxido ferroso (valores inferiores a 27.0%).

### 5.3.5. Interrupción de la secuencia de coladas con 1 cesta por coladas en las que se cargan 2 cestas.

Las coladas que requieren cargarse 2 cestas hacen uso de un perfil de inyección completamente diferente a los que se proponen en este Trabajo de Fin de Máster. La composición química del baño y de la escoria que se deja como pie de baño para ayudar a fundir la siguiente colada tiene una composición química diferente, por lo que influenciará a la siguiente colada.

## 6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El propósito de este proyecto ha consistido en la optimización de los perfiles de inyección de oxígeno y carbón en el horno de arco eléctrico con el fin de mejorar la espumación de la escoria en la etapa de refinado. Para ello, se han modificado los parámetros de proceso asociados a la inyección de oxígeno y carbón (caudal y tiempo), obteniéndose 3 perfiles, P1, P2 y P3 para operar en función del % de FeO en la escoria negra.

### 6.1. PERFILES DE INYECCIÓN

#### Perfil 1- P1

El perfil que se ha denominado como P1, es el perfil estándar de operación, es decir, el perfil que se emplea en todas las coladas para mantener el FeO en la escoria entre 27.0-35.0%. Para mantener esta composición, la cantidad de coque inyectado busca que los niveles de óxido ferroso se mantengan estables entre los valores de 27.0-35.0%. De esta forma, la escoria que queda en el pie de baño influye a la siguiente de una manera comedida, permitiendo que no haya desvíos de óxido ferroso entre los límites marcados. El perfil P1 se ve en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Etapas de inyección de coque y oxígeno del perfil P1.

<b>OXYGENJET</b>										
GN( $Nm^3/h$ )	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O2 ( $Nm^3/h$ )	350	400	750	1000	1500	2000	2500	2000	2500	2000
<b>CARBONJET</b>										
O2 ( $Nm^3/h$ )	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbón (kg/min)	0	0	10	12	17	20	17	10	0	0
kWh×100	80	120	170	190	250	350	480	550	610	990

### Perfil 2- P2

El perfil P2 se ha diseñado para emplearlo en la primera colada después de que el horno eléctrico haya estado parado durante 2-3h. Durante este tiempo de parada, el horno se enfría, por lo que se ha de aportar un extra de 3.000 kWh al proceso para que la chatarra cargada en el horno se funda correctamente y alcance la temperatura de vertido (1650°C). Dado que el tiempo ON del horno aumenta, además, es necesario retrasar la inyección del oxígeno y el coque. Cuando el horno está parado, además, el hierro en estado líquido en su interior en presencia del oxígeno atmosférico se oxida a FeO, por lo que se parte de la acertada suposición de que los valores de FeO serán superiores a los valores establecidos como límite máximo del mismo (35.0%). Es por ello que este perfil inyecta una cantidad de coque superior al perfil 1, con el objetivo de que el óxido ferroso presente en el baño y la escoria, reaccione con el carbono y disminuya hasta tener un porcentaje en la escoria inferior a 35.0%.

En la Tabla 7. se muestra el perfil P2, indicando la cantidad de coque y oxígeno a inyectar por cada Módulo al alcanzar los kWh especificados en la parte inferior de la tabla. Como se ha mencionado previamente, al cargar la chatarra se inyecta junto al  $O_2$  Gas Natural para ayudar a fundir la chatarra, no volviéndose a hacer uso de este en lo que resta de proceso. Inicialmente el caudal de oxígeno (700 Nm<sup>3</sup>/h) es el necesario estequiométricamente para combustionar el caudal de gas natural (350 Nm<sup>3</sup>/h) y se va aumentando progresivamente (hasta 2500 Nm<sup>3</sup>/h) a medida que la chatarra se va fundiendo para evitar que se produzcan rebotes del chorro de oxígeno con la chatarra y evitar así perforaciones de los paneles refrigerados del HEA. Por otro lado, la inyección de coque comienza a partir de 12.300 kWh, y aumenta durante las siguientes etapas hasta alcanzar una relación COR de 0.66 kg C/Nm<sup>3</sup>O<sub>2</sub>. En las etapas finales, se disminuye el coque hasta 17 kg C/min para asegurar el proceso de decarburación.

**Tabla 7.** Etapas de inyección de coque y oxígeno del P2.

<b>OXYGENJET</b>										
GN( $Nm^3/h$ )	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O2 ( $Nm^3/h$ )	350	400	750	1000	1500	2000	2500	2000	2500	2000
<b>CARBONJET</b>										
O2 ( $Nm^3/h$ )	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbón (kg/min)	0	0	10	12	17	20	22	17	0	0
kWh×100	115	123	173	193	253	353	483	553	613	990

### Perfil 3- P3

Este perfil se usa en la segunda colada después de una situación de horno parado durante 2-3 horas, es decir, se usa después de P2. Este perfil es idéntico a P2 pero sin el extra de 3.000 kWh. El objetivo de este perfil es seguir disminuyendo el FeO, ya que, tras analizar la escoria de la colada anterior se observa que es superior al 35.0% (escoria líquida), y dado que, como ya se ha comentado anteriormente, la escoria que se deja en el pie de baño de la colada anterior influye directamente en las posteriores, es necesario usar un perfil más reductor (más carbón). El perfil P3 puede ser observado en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Etapas de inyección de coque y oxígeno del P3.

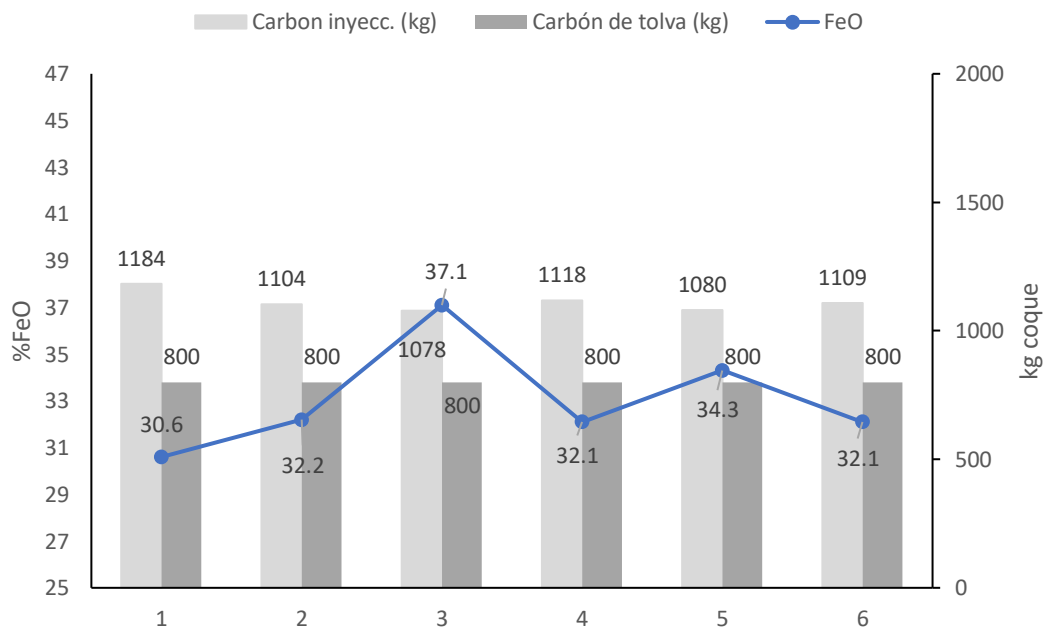
<b>OXYGENJET</b>										
GN( $Nm^3/h$ )	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O2 ( $Nm^3/h$ )	350	400	750	1000	1500	2000	2500	2000	2500	2000
<b>CARBONJET</b>										
O2 ( $Nm^3/h$ )	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbón (kg/min)	0	0	10	12	17	20	22	17	0	0
kWh×100	80	120	170	190	250	350	480	550	610	990

## 6.2. SITUACIÓN DE HORNO FUNCIONANDO DE CONTINUO

El funcionamiento habitual de un horno de arco eléctrico es de 24/7 es decir (operación en continuo), el proceso comienza con la carga de la chatarra en el horno, se funde, se cuela y vuelve a empezar el proceso. En base a la experiencia previa, sabemos que los parámetros de proceso críticos a controlar en la escoria negra son el %FeO, entre 27.0-35.0, %MgO, entre 8.0-10.0% y el IB entre 1,6-2. Para lograr mantener estos parámetros en el horno a lo largo de todas las fusiones, se ha diseñado el perfil P1.

En las coladas realizadas, se ha conseguido mantener una cantidad de carbón de cesta/tolva constante de 800 kg. Como se puede observar en la Figura 29, en la primera colada de esta prueba (1), el nivel de FeO está dentro de los valores fijados como estándar (27.0-35.0 %), donde el FeO en la escoria es de 30.6% con una inyección de carbón de 1184 kg. En la siguiente colada (2), con la misma cantidad de carbón de cesta añadida, se observa un ligero incremento en el óxido ferroso, debiéndose esto a la disminución de carbón inyectado, ya que se reduce hasta 1104 kg. Por otro lado, se destaca el considerable aumento del FeO en la colada 3, ya que

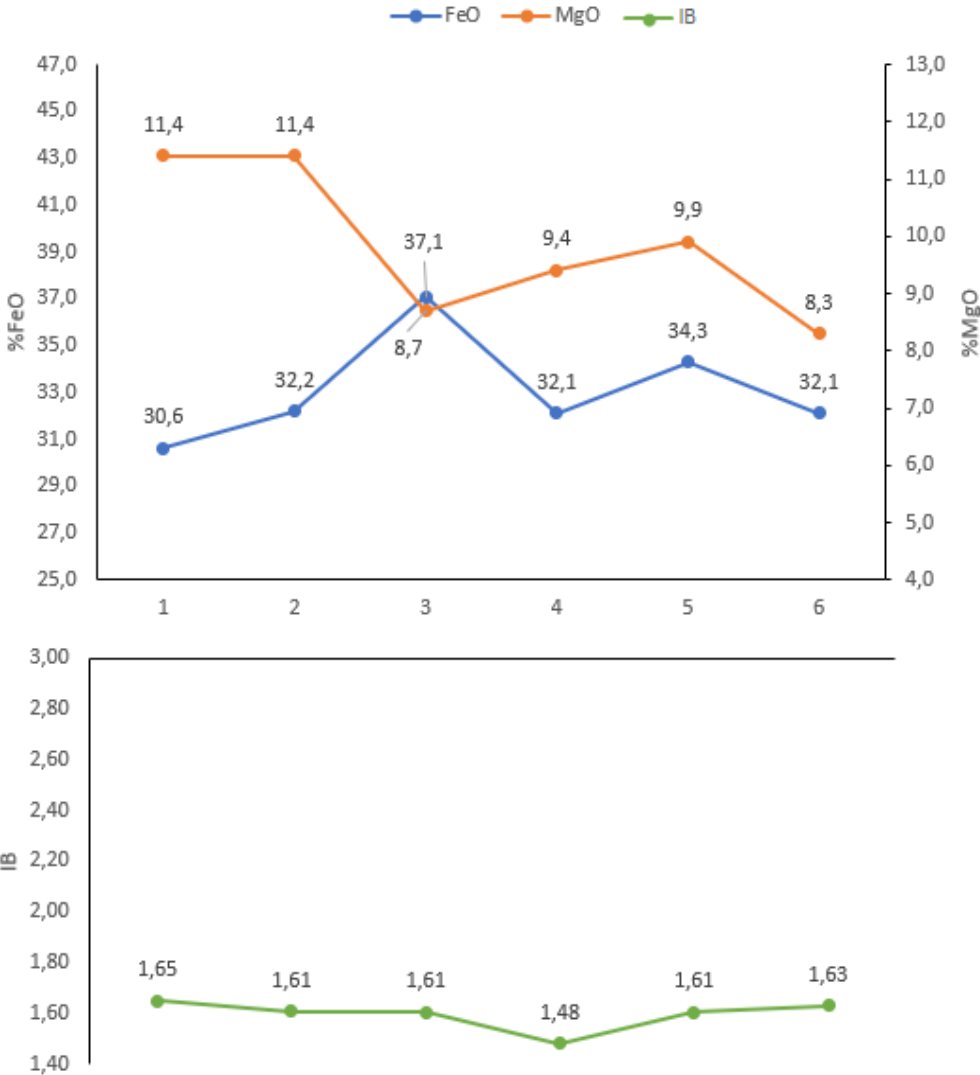
este ve aumentado su contenido en la escoria hasta 37.1%, generando una escoria líquida, por lo que la espumación de esta no es la adecuada. El aumento del %FeO en la colada 3 es debido a que el pie de baño fue más alto de lo estándar, por lo que la inyección de carbón/oxígeno ha ido directamente al baño y no a la interfase escoria acero que se encuentra más elevada. Finalmente, en las coladas 4, 5 y 6 se consigue volver a estabilizar el FeO contenido en la escoria, obteniendo valores de 32.1%, 34,3% y 32,1% respectivamente.



**Figura 29.** Evolución del óxido ferroso (FeO) respecto a la cantidad de coque de inyección y de cesta (tolva) en Continuo.

En la Figura 30 se puede observar la evolución del FeO y el índice de basicidad durante las coladas y el efecto que ambos tienen sobre la solubilidad de la magnesia (MgO) durante el proceso. Como bien hemos mencionado en la figura anterior, se consigue mantener estables los niveles de óxido ferroso durante el periodo de uso del perfil P1, por lo que cabe esperar que el porcentaje de MgO durante estas pruebas sea superior a 8.0%, indicando que no se desgasta el refractario en exceso debido a que la escoria es debidamente saturada manteniendo unos valores de IB de entre 1.5-2.0. Esto se comprueba fácilmente al visualizar la Figura 29 ya que el índice de basicidad oscila en todo momento entre 1.48 y 1.65. Al ser el IB cercano al límite inferior establecido como aceptable, se aumenta la solubilidad de la magnesia, logrando valores de hasta 11.4 % en las coladas iniciales. Se destaca la colada 3, en la que el nivel de FeO aumenta hasta 37.1%, en ella el nivel de MgO disminuye hasta 8.7% pero al tener un índice de basicidad bajo

(1.61), la solubilidad de la magnesia no es baja por lo que se mantiene por encima del 8.0% de contenido en la escoria. Por otro lado, en la colada 4, el IB es inferior a 1.5, debiéndose esto a que los porcentajes de sílice y alúmina en la escoria son superiores al promedio, con un 13.27% y 6.13%. A pesar de ello, el % de MgO consigue mantenerse por encima del 8.0%. En las coladas posteriores, el IB vuelve a estabilizarse siendo superior a 1.5, lo que mantiene la solubilidad de la magnesia y logrando un % de esta por encima del límite de saturación de la escoria.

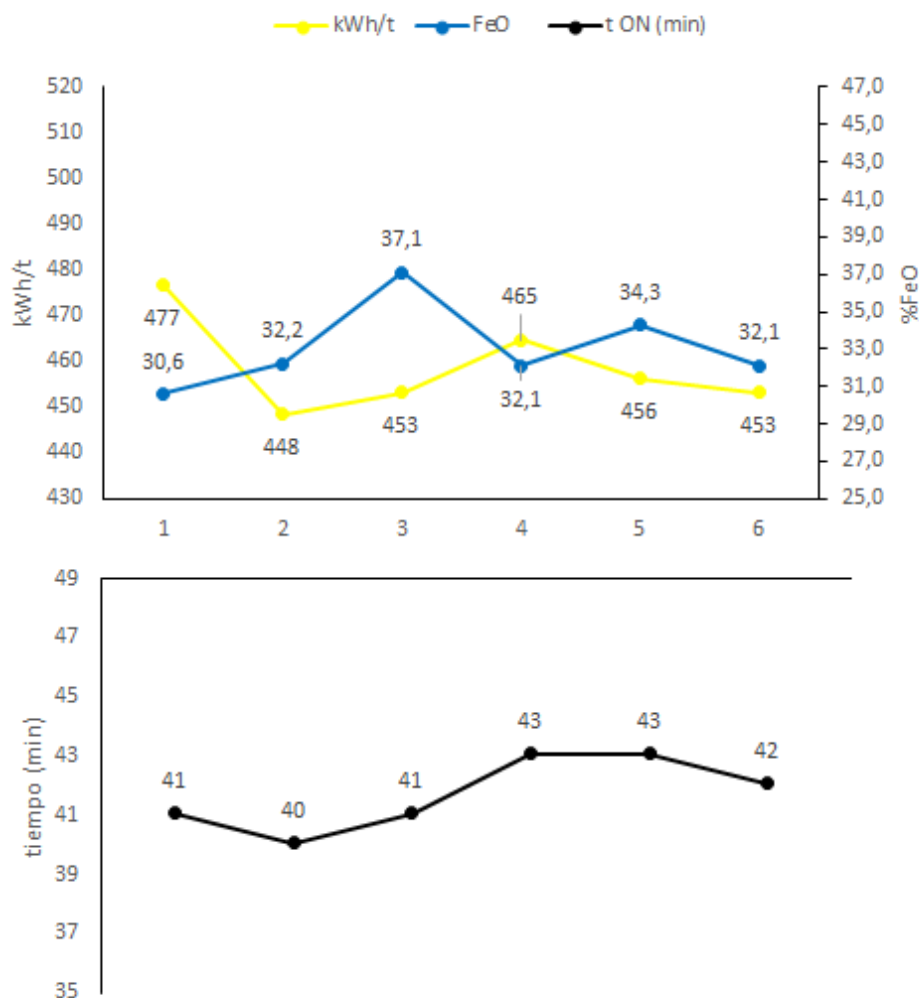


**Figura 30.** Evolución del óxido ferroso (FeO), magnesia (MgO) e índice de basicidad (IB) de las coladas en la situación *Continuo*.



Finalmente, en la Figura 31 se muestra la evolución del FeO durante el funcionamiento de Continuo y el efecto que este tiene en el consumo eléctrico. A lo largo de estas 6 coladas, se ha logrado un promedio de 459 kWh/tonelada de acero líquido.

En las primeras dos coladas, 1 y 2, el consumo eléctrico ha pasado de 477 kWh/t de acero líquido a 448 kWh/t. Esta disminución se debe en parte a que el tiempo de operación del proceso de fusión de la chatarra se ha recortado en 1 min. En la siguiente colada, 3, el FeO aumenta hasta 37.1%, debiéndose por tener el pie de baño alto. A pesar de esto, se obtiene un consumo de 453 kWh/t. Finalmente, las siguientes 3 coladas (4, 5 y 6) muestran que el FeO vuelve a bajar, obteniendo valores que están dentro del rango de 27.0-35.0%. A lo largo de estas coladas se obtiene un consumo de 465, 456 y 453 kWh/toneladas de acero líquido respectivamente.



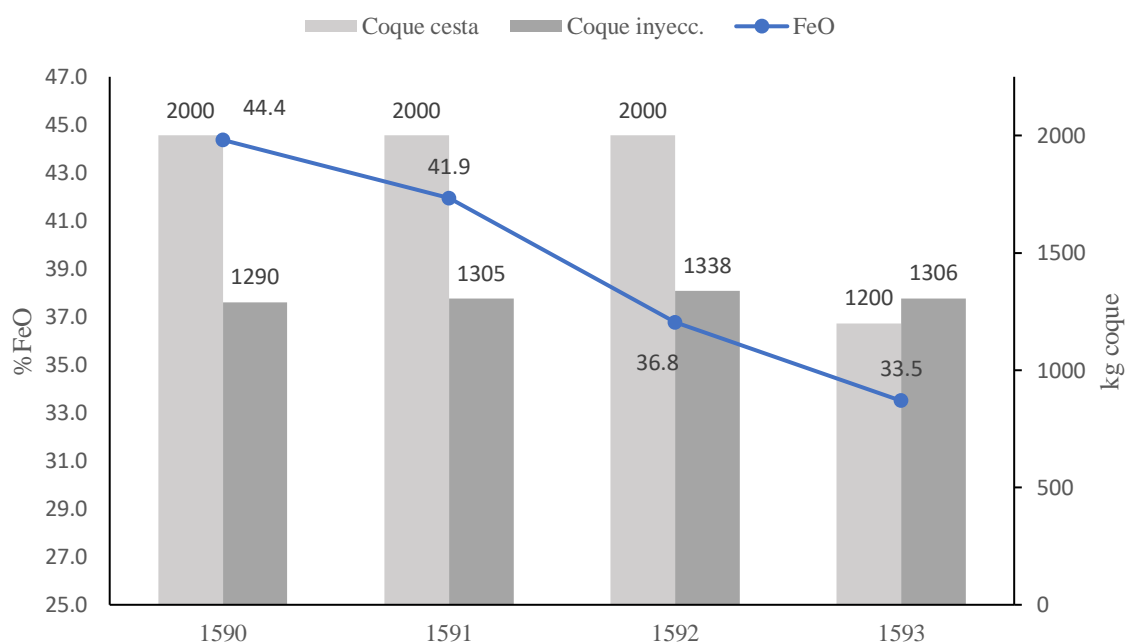
**Figura 31.** Efecto del % de FeO y el tiempo de funcionamiento del horno (min) en el consumo eléctrico del HEA.

### 6.3. SITUACION DE HORNO FUNCIONANDO CON PARADAS

Como bien se ha mencionado previamente, los perfiles *P2* y *P3* se han usado en este tipo de situaciones. Se han dado dos situaciones de parada que se han denominado como *Parada 1* y *Parada 2*. En ambas situaciones se muestra el comportamiento de la escoria. Además, se ha verificado que ambos perfiles tienen un correcto desempeño en el control del óxido ferroso (FeO) y la Magnesita (MgO).

#### 6.3.1. Situación Parada 1

Para el control y comportamiento del óxido ferroso (FeO) se hace hincapié en la cantidad de carbón adicionada al proceso tanto por inyección como por tolva (cesta). Esto se representa en la Figura 32, que muestra la cantidad de carbón adicionado de las dos maneras y la evolución del FeO. Se observa que, para una cantidad fija de 2000 kg de carbón de cesta, y un ligero aumento en el carbón de inyección durante las coladas 1590, 1591 y 1592, el FeO disminuye considerablemente hasta 36.77% en la escoria. En la colada 1593, se adicionan 1200 kg de carbón de cesta y 1306 kg de carbón de inyección, donde se observa que el %FeO baja hasta 33,5 estando dentro del rango de control (27.0-35.0%).

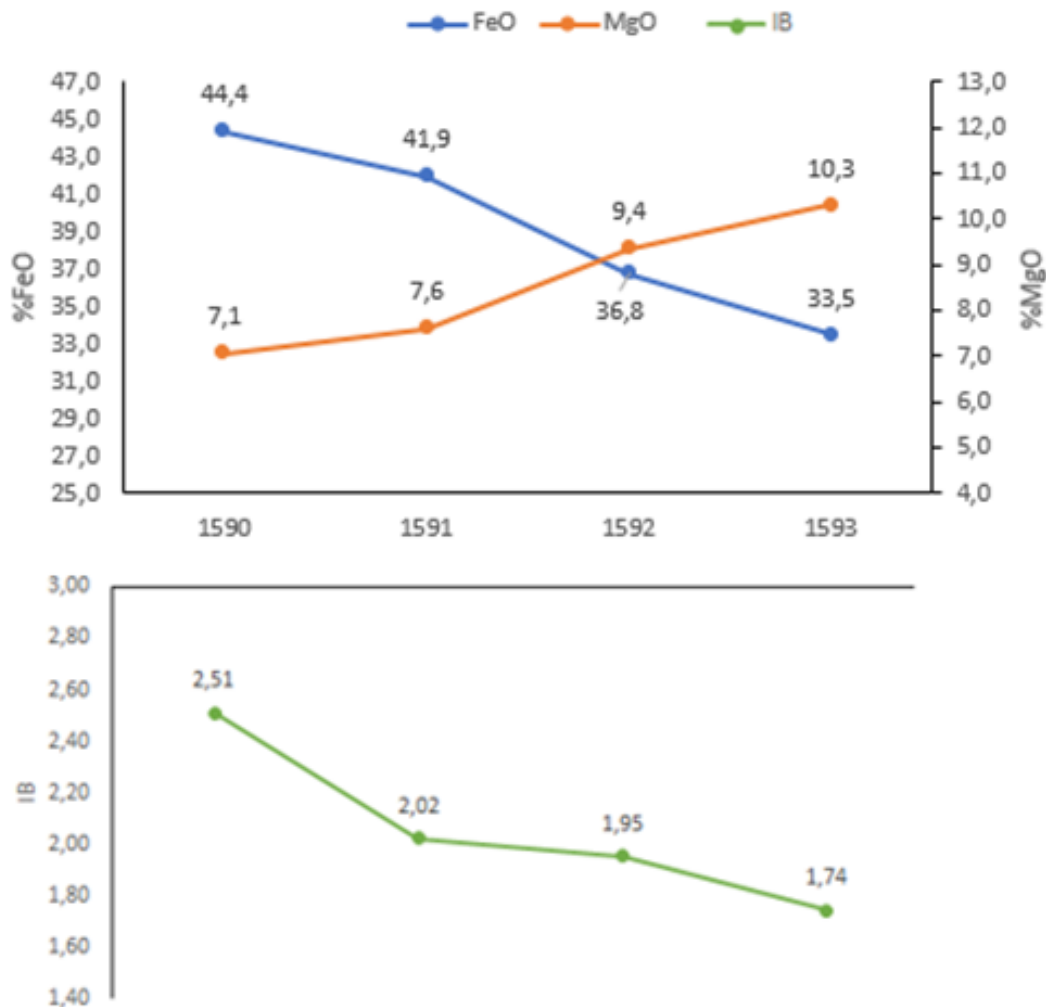


**Figura 32.** Evolución del óxido ferroso (FeO) respecto a la cantidad de carbón de inyección y de cesta (tolva).

En la Figura 32 se observa el comportamiento del óxido ferroso y la magnesia durante las coladas 1590 hasta 1593 para unos índices de basicidad determinados, en lo que se ha denominado como, situación *Parada 1*. La producción de estas coladas ha sido de continuo, es decir una detrás de otra sin parar el horno. En la colada 1590 se ha usado el perfil P1 ( perfil de horno parado); en esta colada se observa que el porcentaje de óxido ferroso obtenido esta fuera de rango, alcanzando un valor de 44.37%, esto se debe a la entrada del oxígeno en el horno durante la parada, el cual oxida el hierro y provoca que la escoria tenga un contenido en FeO fuera de rango, que disminuye la solubilidad del MgO (contenido inferior al 8% en la escoria).

El aumento de %FeO en la escoria, implica una escoria muy liquida, una escoria que no es capaz de retener las burbujas de CO que se generan de la reacción del carbón con el oxígeno, que son las encargadas de generar la escoria espumosa tan necesaria para el proceso de fusión en el horno de arco de corriente continua.

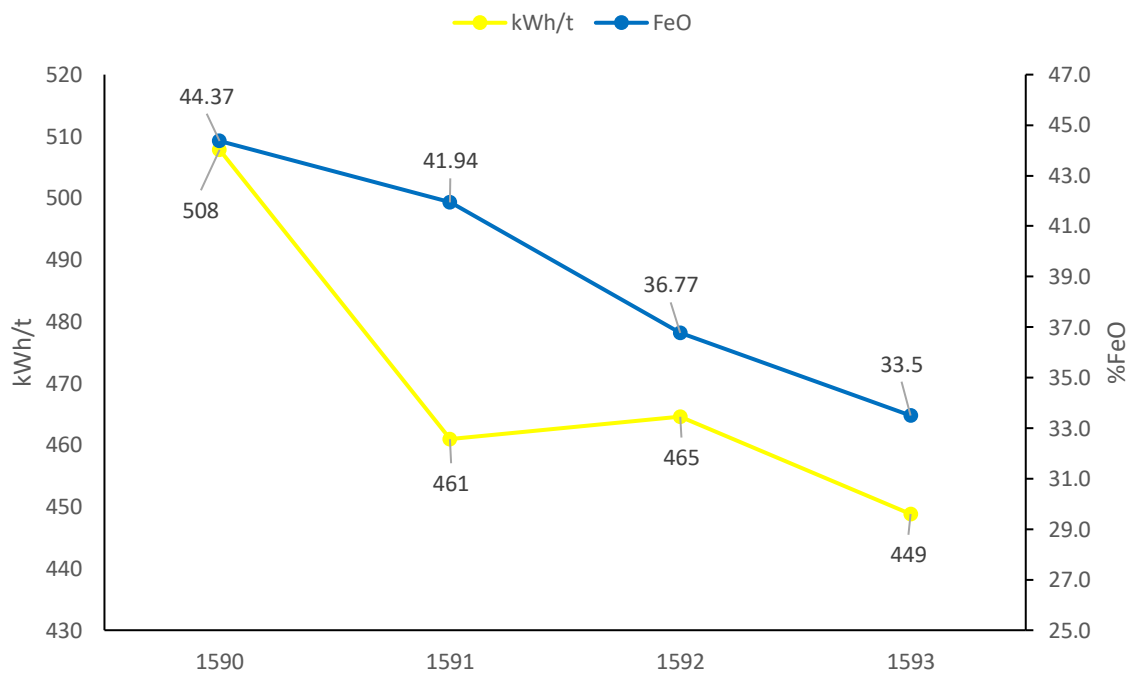
Además, el porcentaje de MgO obtenido es el más bajo de las cuatro coladas (7,1%), esto se debe a que a medida que aumenta el contenido en FeO de la escoria y aumenta el índice de basicidad, la solubilidad del MgO disminuye, explicándose así que alcance un valor de 7.1%. En las siguientes coladas se ha pasado al uso del perfil P3, igual a P2, sin los 3000 kWh extra. Con este perfil se confirma la disminución progresiva del FeO en la escoria, el cual pasa de un valor de 41.9% en la colada 1591 hasta 33.5% en la colada 1593, entrando dentro del rango fijado para este parámetro de proceso el cual se sitúa entre un 27.0-35.0%. Por otro lado, la magnesia tiene un comportamiento totalmente opuesto, ya que ésta aumenta a medida que disminuyen el % de FeO y el IB, comenzando con valores de 7.6% en la colada 1591 hasta alcanzar un 10.3% en la colada 1593, junto con un IB de 1.74. De esta forma, se determina que los perfiles P2 y P3 en la situación de *Parada 1* presentan una buena actuación para la estabilización de los parámetros del horno tras una parada, ya que disminuye el óxido ferroso hasta valores inferiores a 35%, estabilizándose, al igual que la magnesia, que se encuentra en el rango 8-10% en la escoria, necesario para disminuir el desgaste del refractario del horno.



**Figura 33.** Evolución del óxido ferroso (FeO), magnesia (MgO) e índice de basicidad (IB) de las coladas en la situación *Parada 1*.

Por otro lado, se ha podido analizar la evolución del consumo eléctrico del horno eléctrico de arco, durante la etapa de fusión en la *Parada 1* (Figura 34). El consumo eléctrico del horno está estrechamente relacionado con la espumación de la escoria. Como se ha explicado previamente, el contenido de FeO es un indicativo directo de la espumación durante el proceso, es decir, con valores superiores a 35%, la escoria se vuelve líquida y las burbujas de CO la atraviesan sin problemas, no generando la espumación óptima para cubrir todo el arco durante la fusión, lo que conlleva a que la transmisión térmica será peor. Se observa claramente que en la colada 1590, para un 44.4% de FeO, el consumo eléctrico asciende hasta 508 kWh/t de acero líquido, debiéndose a lo previamente mencionado. En la colada 1591 el consumo es de 461 kWh/t, mientras que en la 1592 aumenta hasta 465 kWh/t, esto es debido a que en la primera se han

colado 128 toneladas de acero líquido y en la segunda 127 toneladas, lo que explica este incremento. En el conjunto de las coladas se observa la disminución de ambos, demostrando así que con la bajada del % de FeO, disminuye también el consumo eléctrico hasta lograr 449 kWh/t para un % de óxido ferroso de 33.5%, el cual está dentro del rango determinado como adecuado para espumación.



**Figura 34.** Efecto del % de FeO en el consumo eléctrico del HEA.

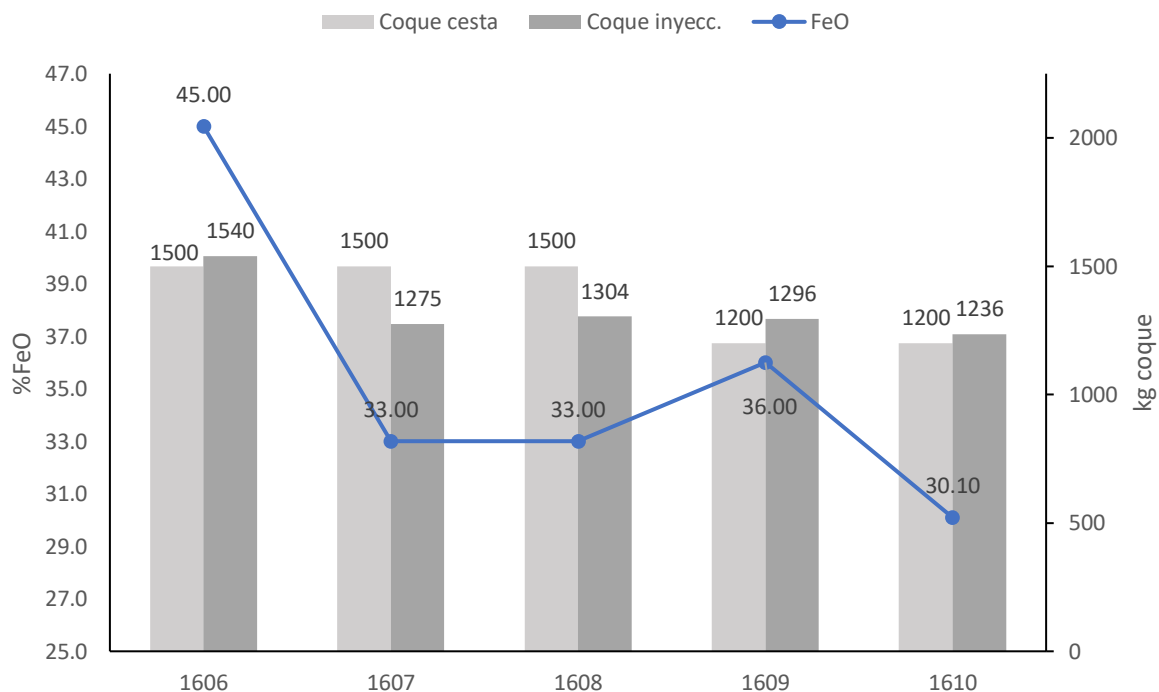
En base a estos resultados, se puede concluir que el *P2* y el *P3* son adecuados para lograr una estabilización del horno tras una parada de 2-3h en la que el acero en el interior de este ha perdido temperatura y se ha oxidado por la presencia de  $O_2$ . Se observa una reducción del %FeO de 10.9% y una disminución del consumo eléctrico de 59 kWh/t.

### 6.3.2. Situación parada 2

En esta parada han sido necesarias 5 coladas consecutivas en vez de 4 (como en el caso de Parada 1) para estabilizar el óxido ferroso, debido a que el tiempo de parada ha sido algo más largo.

En esta situación, se observa en la Figura 35 que durante las primeras tres coladas se mantiene una cantidad de carbón de cesta/tolva constante de 1500 kg, mientras que en las últimas dos coladas, 1609 y 1610, se disminuye en 300 kg, hasta 1200 kg de carbón de tolva. Se observa

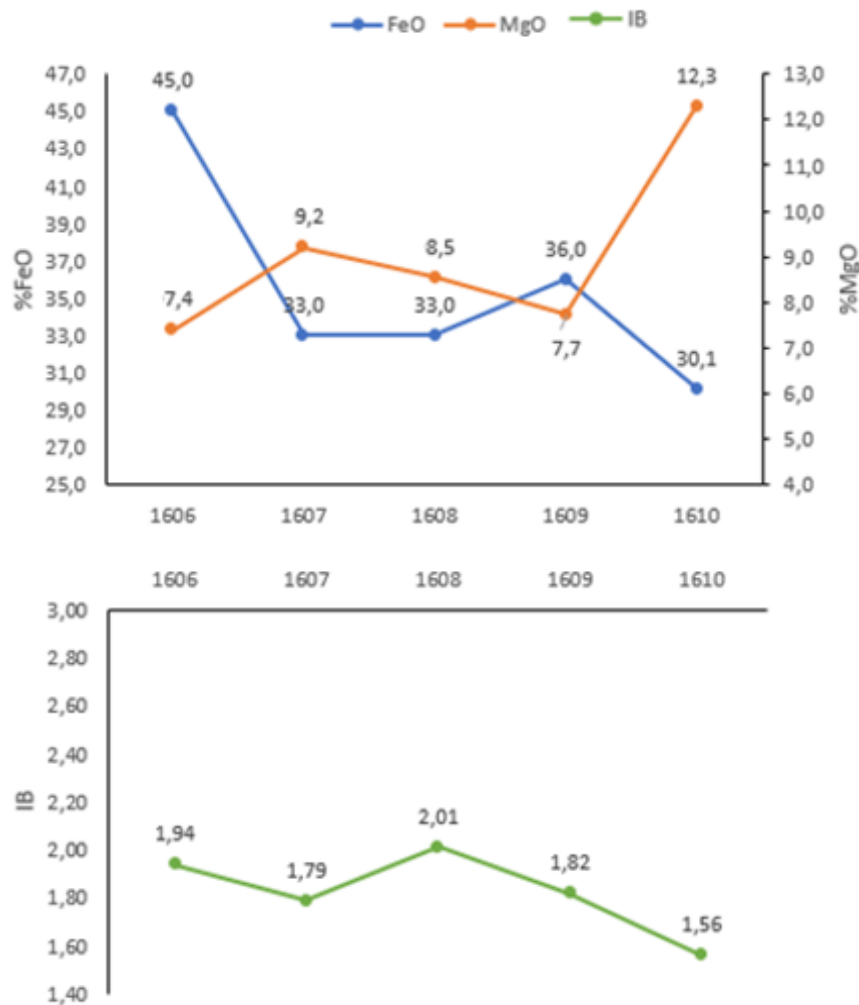
que para la colada 1606, en la que se usa el perfil P2 (el cual cuenta con un exceso de 3000 kWh) se obtiene un óxido ferroso de 45.0%. Se aprecia que la cantidad de carbón inyectada es de 1540 kg, esto se debe a que ha sido necesario recarburar durante varios minutos, ya que, al medir la oxidación del baño, se han logrado valores de oxidación muy superiores a 200 mV, por lo que debe añadirse más carbón para reducir el nivel de oxígeno. En las siguientes coladas se pasa a usar el perfil P3, el cual ya no cuenta con el exceso de 3000 kWh. Se puede observar que el óxido ferroso sigue reduciéndose durante estas coladas, a excepción de la colada 1609, donde el FeO alcanza un valor de 36.0%. Este repentino aumento se debe a que el pie de baño estaba alto y el carbón adicionado se ha inyectado directamente al baño metálico y no ha reducido adecuadamente el FeO.



**Figura 35.** Evolución del óxido ferroso (FeO) respecto a la cantidad de coque de inyección y de cesta (tolva) en Parada 2.

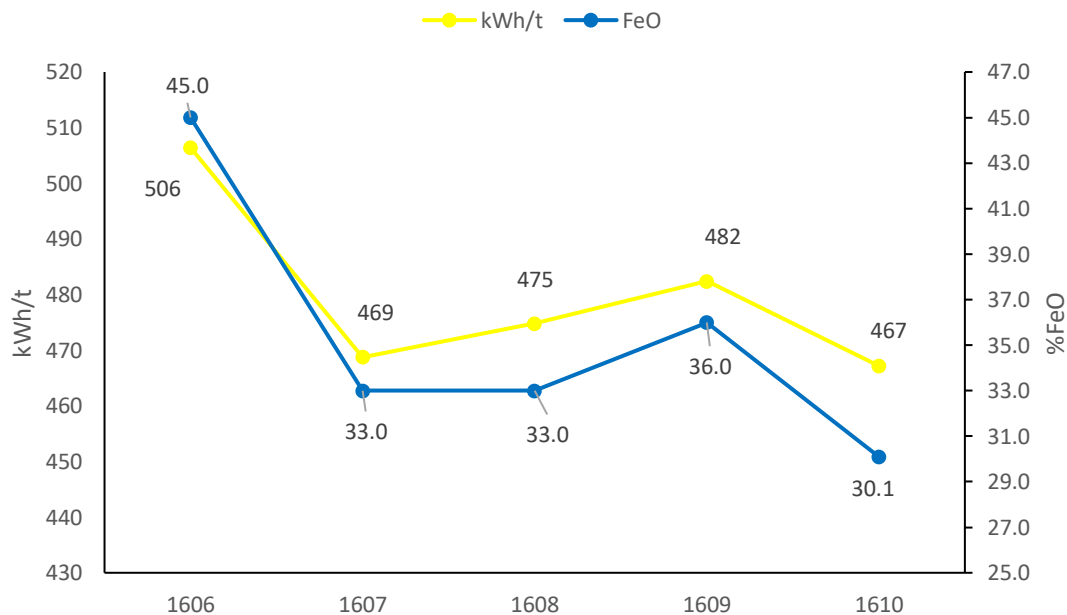
Una vez analizado como repercute en el FeO la cantidad de coque adicionada, se procede a analizar el efecto del óxido ferroso y el índice de basicidad en el porcentaje de magnesia contenido en la escoria. Como bien se ha comentado previamente, en la colada 1606 se ha usado el perfil P2, donde se obtiene 45% de FeO y un IB de 1.94, lo cual genera la obtención de un % de MgO bajo, 7.4%. Esto provoca que la escoria sea propensa a adquirir la magnesia del refractario del horno, buscando saturarse de ella. De la colada 1607 en adelante se ha usado el

perfil P3, el cual no cuenta con el exceso de kWh. En las coladas 1607 y 1608 se obtiene un 33% de FeO, lo que conlleva a que la solubilidad del MgO aumente, hasta alcanzar valores por encima del 8.0% lo que indica que el desgaste del refractario no será tan elevado como en la colada 1606. Por otro lado, se observa que el nivel de MgO en la colada disminuye a 8.5% en la colada 1608 respecto a la anterior. Esto se debe a que, a pesar de tener el mismo nivel de FeO, el IB de la colada 1608 es 2.01 frente a 1.79, por lo que la solubilidad de la magnesia disminuye. Cabe destacar que en la colada 1609 al ser el % de FeO superior a 35.0%, se disminuye la solubilidad de la magnesia para un índice de basicidad (IB) de 1.82, logrando un 7.7% de MgO. Finalmente, en la última colada, 1610, el % de FeO sigue disminuyendo al igual que el IB, causando el aumento de la magnesia hasta 12.3%.



**Figura 36.** Evolución del óxido ferroso (FeO), magnesia (MgO) e índice de basicidad (IB) de las coladas en la situación *Parada 2*.

Por otro lado, en la Figura 37 se observa el consumo eléctrico del horno respecto a la cantidad de óxido ferroso (FeO) contenido en la escoria. Se vuelve a comprobar que, con niveles elevados de FeO, como en la colada 1606, el consumo eléctrico es considerablemente elevado, alcanzando 506 kWh/tonelada de acero líquido, asemejándose considerablemente a la primera colada (1590) del caso de Parada 1. En las coladas posteriores, 1607 y 1608, los niveles de FeO disminuyen hasta alcanzar un 33.0% en ambas, lo que conlleva a una disminución del consumo eléctrico. Se observa que en la colada 1608 se da un ligero incremento en los kWh/t, debiéndose esto a que se ha colado menor cantidad, es decir, si en la colada 1607 se han obtenido 128 toneladas de acero líquido, en esta han sido 127 toneladas. Por otro lado, con el aumento del óxido ferroso (36.0%) en la colada 1609, se observa que el consumo eléctrico incrementa también. Esto se debe a que, al haber una cantidad de FeO superior al límite establecido, es indicativo de que la espumación de la escoria no se está llevando a cabo adecuadamente, ya que esta se vuelve líquida y las burbujas de CO no encuentran resistencia, fluyendo a través sin aumentar su volumen. Finalmente, el FeO vuelve a bajar hasta 30.1% en la colada 1610, con un consumo eléctrico de 467 kWh/t de acero líquido, siendo el más bajo obtenido en esta situación de *Parada 2*.



**Figura 37.** Efecto del % de FeO en el consumo eléctrico del HEA.

En base a estos resultados, queda demostrado que los perfiles P2 y P3 consiguen estabilizar los porcentajes de óxido ferroso (FeO) y magnesia (MgO) en el proceso de fusión, ayudando en



sobremanera al consumo eléctrico y a reducir el consumo eléctrico hasta 49 kWh/t a lo largo de las coladas.

## 7. ASPECTOS ECONÓMICOS

El perfil P1, el cual se usa en situación de funcionamiento de Continuo, propone disminuir la cantidad de carbón de tolva en un 26.0% y aumentar el carbón de inyección en un 33.45%. Los costes de cada tipo de carbón son diferentes, y el cambio que se propone tiene un efecto en el consumo eléctrico. Debido a esto es necesario determinar si la propuesta mostrada en este Trabajo de Fin de Máster es viable económicamente.

A la fecha de redactar este documento el precio del carbón de cesta y de tolva tienen los siguientes valores, mostrados en la Tabla 9. En ella, se observa que el carbón de cesta tiene un precio de 0.46 €/kg, siendo ligeramente superior al de inyección con 0.45 €/kg.

**Tabla 9.** Costes por peso del carbón de inyección y el de tolva/cesta.

	Coste (€/kg)
Carbón de inyección	0.45
Carbón de cesta/tolva	0.46

Una vez conocidos los costes de adicionar el carbón al horno de arco eléctrico por las dos vías (inyección y tolva) se ha de determinar las cantidades de las que se hace uso por colada. Esto se muestra en la Tabla 10. En ella se observa que el perfil P1 tiene una inyección de carbón de 800 kg y una adición por tolva de 1100 kg por colada. Al multiplicarse estos valores por los precios mostrados en la Tabla 11 y sumando ambos, se observa que el coste total de la suma de ambos carbones asciende a 914 €/colada. Sabiendo que se cuelean alrededor de 128 toneladas por colada, se obtiene el coste necesario para producir una tonelada de acero, siendo su valor de 6.77 €/tonelada de acero líquido. Por otro lado, el perfil previamente usado en ArcelorMittal Sestao, adicionaba al proceso de fusión de chatarra 1080 kg de carbón de tolva y 732 kg de carbón de inyección. Esto resultaba en un coste total de 6.5 €/tonelada de acero líquido. Se observa por lo tanto que la propuesta sugerida en este Trabajo de Fin de Máster conlleva un incremento de 0.27 €/t.

**Tabla 10.** Consumos y costes de los diferentes usos del carbón en el perfil P1 y el perfil viejo.

	Carbón de tolva (kg/colada)	Carbón de inyecc. (kg/colada)	Coste carbón de cesta + carbón de inyecc. (€/colada)	Coste total carbón (€/ton acero)
Perfil P1	800	1100	867	6.77
Perfil viejo	1080	732	832	6.50

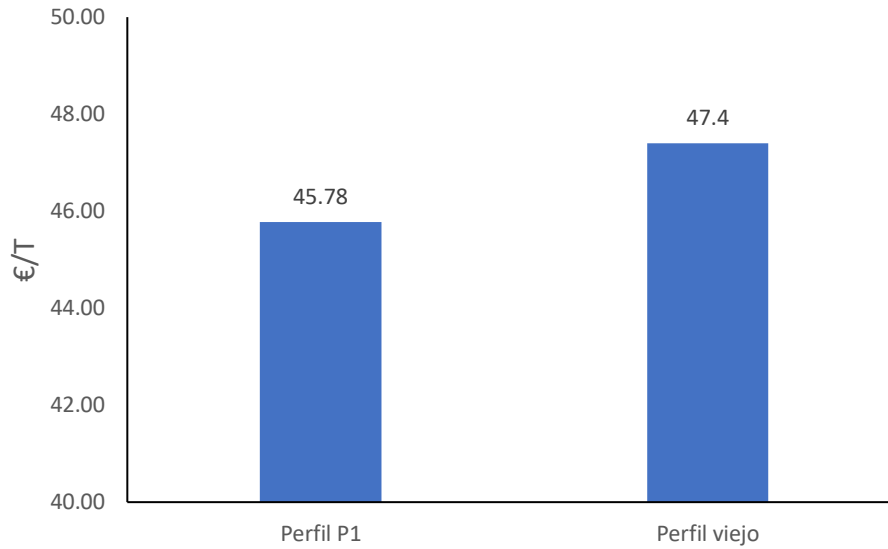
A pesar del incremento en el coste del carbón para fabricar una tonelada de acero, es necesario conocer el consumo eléctrico obtenido entre ambos perfiles. En la Tabla 11 se muestra los consumos por colada obtenidos haciendo uso de ambos perfiles: P1 y perfil viejo. Se observa que el perfil P1 consigue reducir el consumo eléctrico en 22 kWh/tonelada de acero líquido. El kWh tiene un coste promedio anual de 0.085 €/kWh. Multiplicando los consumos obtenidos por el coste eléctrico, se obtiene un coste de 39.01 €/tonelada de acero líquido con el perfil P1, siendo 1.89 €/t menor que el del perfil viejo.

**Tabla 11.** Costes y consumos eléctricos obtenidos con los perfiles P1 y el perfil viejo.

	Consumos (kWh/t)	Costes (€/t)
Perfil P1	459	39.01
Perfil viejo	481	40.90

Una vez analizados los costes del carbón y del consumo eléctrico se procede a analizar los costes totales del perfil P1 y el perfil viejo gracias a la Figura 38. En ella se observa la suma de los costes del carbón y eléctrico para cada situación. El perfil P1 alcanza unos costes de 45.78 €/t, mientras que el perfil viejo tiene un coste total de 47.4 €/t. Por lo que se consigue reducir

los costes en 1.62 €/t haciendo uso del perfil P1. A simple vista puede parecer que esta reducción de costes es insignificante, pero para una planta siderúrgica que produce 45.000 toneladas al mes, puede significar un ahorro de hasta 72.000 € mensuales.



**Figura 38.** Costes totales de los perfiles P1 promedio, con/sin cuchara disponible y perfil viejo.

## 8. CONCLUSIONES

Gracias a los resultados que se han obtenido y se han mostrado en el apartado anterior se ha logrado determinar y verificar el correcto funcionamiento de los perfiles de inyección de carbón y oxígeno.

El perfil P1, ha logrado, a través de las coladas, mantener el óxido ferroso (FeO) entre el margen de 27.0-35.0% de contenido en la escoria, manteniendo una correcta espumación de la escoria dentro del horno de arco eléctrico, gracias a que inyecta de media por colada 1100 kg de carbón para una cantidad de carbón de tolva constante de 800 kg. Además, se consigue mantener el % de magnesia (MgO) contenida en la escoria entre 8.0-10.0%. Gracias a ello, se consigue evitar un desgaste mayor del material refractario dentro del horno de arco eléctrico. El consumo eléctrico está estrechamente relacionado con el % de óxido ferroso en la escoria y se observa que en las coladas en las que se hace uso del perfil P1, el consumo eléctrico es de 459 kWh/tonelada de acero líquido. Esto representa una reducción en el consumo eléctrico de 22 kWh/tonelada de acero líquido. En cuanto al aspecto económico, el perfil P1, consigue reducir el coste del proceso en 1.62 €/t respecto al perfil que se usaba previamente (perfil viejo). Esto se traduce en que, para una producción mensual objetivo de 45.000 toneladas, se consigue disminuir el coste en 72.000 €.

Por otro lado, los perfiles de situación de parada, P2 y P3, los cuales tienen como objetivo primordial disminuir los altos valores de óxido ferroso esperados debido a la oxidación del baño por la parada, logran este cometido eficientemente a lo largo de 4-5 coladas. En ambas situaciones de parada, Parada 1 y Parada 2, logran que el óxido ferroso disminuya hasta valores inferiores a 35.0% y que la magnesia (MgO) se estabilice en valores por encima del 8.0%, logrando que no se dé un mayor desgaste del material refractario dentro del horno. En Parada 1 se requieren sólo 4 coladas, mientras que en Parada 2, debido a tener el pie de baño alto y su respectivo aumento de % FeO en la escoria, se necesitan 5 coladas. A pesar de esta variación, los perfiles logran cumplir con su cometido. Cabe añadir, que, gracias a la disminución del FeO, se consigue la misma tendencia en el consumo eléctrico, logrando reducirlo en 59 kWh/t en la Parada 1 y 49 kWh/t en la Parada 2.

Cabe destacar que pese al correcto desempeño del perfil P1, un factor importante que afecta negativamente en la obtención de una escoria correctamente espumada (% FeO entre 27.0-

35.0%), es el nivel de altura del pie de baño. Tener un pie de baño alto implica que el carbón inyectado se dé directamente al baño metálico en vez de a la interfase acero-escoria y no reduzca eficientemente el FeO, provocando que se logre una escoria líquida y que las burbujas de CO que se generan, al pasar a través de la escoria no tengan un tiempo de retención suficiente como para aumentar el volumen de esta y espumarla adecuadamente, lo que conlleva a una peor distribución térmica, menor solubilidad de la magnesia (MgO) y mayor consumo eléctrico. Este caso ha sido recurrente a lo largo de las pruebas. Por lo que se sugiere establecer un método de control para mantener el pie de baño a una altura determinada con el fin de evitar los problemas previamente mencionados.

Debido a lo mencionado previamente, se ha conseguido establecer una lección puntual para operar con el perfil P1, dónde se especifica que el perfil P1 ha de usarse cuando el % de FeO esté entre los valores 27.0-35.0%, y los perfiles de parada, P2 y P3 cuando se da una situación de parada de 2-3 horas de duración. Además, en caso de que por algún casual el nivel de FeO se salga de los rangos de 27.0-35.0%, se han desarrollado dos perfiles nuevos a partir del perfil P1 en la lección puntual que serán usados para los siguientes casos:

- P4: perfil que inyecta menos cantidad de carbón en las etapas finales del proceso de fusión de chatarra. Este perfil será usado cuando el  $\text{FeO} < 27.0\%$ .
- P5: perfil que inyecta menos oxígeno y más cantidad de carbón. Este perfil será usado cuando el  $\text{FeO} > 35.0\%$ .

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arcelor Mittal Sestao Informe Correspondiente, A. E. A. (s/f). *Declaración Ambiental*. ArcelorMittal.com. Recuperado el 8 de enero de 2024, de <https://spain.arcelormittal.com/wp-content/uploads/sestao-declaracion-ambiental-2021.pdf>
- [2] Basson E. (2022). *2022 World Steel in figures foreword*. Worldsteel.org. Recuperado de: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-inFigures-2022-1.pdf>
- [3] Bronson A., Pierre G. R. St. (1985), "Electric furnace slags", *Electric furnace steelmaking*, Taylor C. R. (Ed), Iron and Steel Society, A.I.M.E., pp. 321-334.
- [4] Jones J. A. T., Bowman B., et al. (1998). *Electric furnace steelmaking. The making, shaping and treating of steel*, 11th edition, steelmaking and refining volume, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, Pa., vol. 1, pp. 525.
- [5] Karbowniczek M. (2021). *Electric Arc Furnace Steelmaking*. CRC Press.
- [6] Kozakevich P. (1969). "Foam and Emulsions in Steelmaking." *Journal of Metals*, vol.7, pp. 57-67.
- [7] Morales R. D., Romero J. A., et al. (2005). Reduction of FeO and foaming properties of steelmaking slag. 13th Process Technology Conference Proceedings, Nashville, TN, Iron and steel society.
- [8] Pretorius B. E. and Carlisle R. C., (1998). *Foamy Slag Fundamentals and their Application to Electric Furnace Steelmaking*. 56th Electric Arc Furnace Conference. New Orleans, USA.
- [9] Turkdogan E. (1983). *Physicochemical Properties of Molten Slags and Glasses*, The Metals Society
- [10] Verein deutscher eisenhüttenleute (1981). *Schlackenatlas - Slag atlas*, Verlag stahleisen.
- [11] Yi S. H. and Kim S. M., (2002). "Effect of surface-active species on the foam stability in the EAF slag system." *Scandinavian Journal of Metallurgy*, vol. 31, pp. 148-152.