

IMPACTO DEL DISEÑO Y DESGASTE DEL REVESTIMIENTO REFRACTARIO DE LAS CUCHARAS SIDERÚRGICAS EN LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE LA ACERÍA

Micael Lojo Lapistoy – DNI 39.741.273 – Legajo N°11.264

DIRECTORES (TENARIS SIDERCA): DR. PABLO G. GALLIANO, pgalliano@tenaris.com,
ING. LEONARDO G. MUSANTE, lmusante@tenaris.com.

CO-DIRECTOR (UNMDP): DRA. ANALÍA G. TOMBA MARTÍNEZ. agtomba@fi.mdp.edu.ar

Proyecto Final para optar al grado de Ingeniero en Materiales



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

IMPACTO DEL DISEÑO Y DESGASTE DEL REVESTIMIENTO REFRACTARIO DE LAS CUCHARAS SIDERÚRGICAS EN LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE LA ACERÍA

Micael Lojo Lapistoy – DNI 39.741.273 – Legajo N°11.264

DIRECTORES (TENARIS SIDERCA): DR. PABLO G. GALLIANO, pgalliano@tenaris.com,
ING. LEONARDO G. MUSANTE, lmusante@tenaris.com.

CO-DIRECTOR (UNMDP): DRA. ANALÍA G. TOMBA MARTÍNEZ. agtomba@fi.mdp.edu.ar

Proyecto Final para optar al grado de Ingeniero en Materiales

Contenido

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Resumen..... | 3 |
| 1.1 | Introducción al problema..... | 3 |
| 1.2 | Objetivo general..... | 5 |
| 1.3 | Objetivos específicos..... | 5 |
| 2 | Antecedentes..... | 6 |
| 2.1 | Proceso de obtención del acero..... | 7 |
| 2.2 | Cuchara siderúrgica..... | 11 |
| 2.2.1 | Rol en el proceso productivo..... | 11 |
| 2.2.2 | Capacidad de carga de las cucharas..... | 15 |
| 2.3 | Revestimiento refractario..... | 15 |
| 2.3.1 | Requerimientos del revestimiento refractario de una cuchara para su uso en siderurgia..... | 16 |
| 2.3.2 | Ladrillos refractarios MgO-C..... | 17 |
| 2.3.3 | Degradación del revestimiento refractario en cucharas siderúrgicas..... | 19 |
| 2.3.4 | Armado del revestimiento refractario de una cuchara siderúrgica..... | 23 |
| 3 | Métodos y procedimientos..... | 29 |
| 3.1 | Recopilación de datos..... | 29 |
| 3.1.1 | Archivos generados automáticamente durante la producción..... | 29 |
| 3.1.2 | Datos obtenidos de fumistería..... | 30 |
| 3.1.3 | Datos de <i>nivel 1</i> | 32 |
| 3.2 | Procesamiento de datos y definición de variables relevantes..... | 34 |
| 3.3 | Balanza para el pesaje de cucharas y acero líquido sangrado..... | 36 |
| 3.4 | Organización del análisis..... | 39 |
| 3.4.1 | Bloque #1: peso de la cuchara vacía..... | 39 |
| 3.4.2 | Bloque #2: desgaste del revestimiento refractario y comparación entre proveedores..... | 40 |

| | | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.3 | Bloque #3: cambios en la capacidad de carga de la cuchara | 42 |
| 4 | Resultados..... | 45 |
| 4.1 | Bloque #1 - Peso de la cuchara vacía | 45 |
| 4.2 | Bloque #2 – Desgaste del revestimiento refractario | 50 |
| 4.2.1 | Resultados de la caracterización de los ladrillos refractarios..... | 50 |
| 4.3 | Bloque #3 – Cambios en el set point de carga de la cuchara..... | 53 |
| 5 | Aspectos económicos..... | 58 |
| 5.1 | Pérdidas por diferencia entre Peso Seteado Ideal y Real..... | 58 |
| 5.2 | Análisis de alternativas para descartar cucharas que han sufrido una bajada de set point..... | 58 |
| 5.3 | Modificación del diseño del revestimiento de trabajo | 61 |
| 6 | Conclusiones..... | 63 |
| 6.1 | Trabajo A Futuro | 64 |
| 7 | Referencias | 65 |

1 RESUMEN

1.1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA

Las cucharas utilizadas en la industria metalúrgica son recipientes que reciben el metal fundido, proveniente de altos hornos y hornos de arco eléctrico, para su posterior refinamiento. Este proceso, llamado “metalurgia secundaria”, consiste en el ajuste de todos los parámetros que impactan en la calidad del producto final. La regulación de la temperatura del acero líquido, la desoxidación y agregado de aleantes, son algunas de las operaciones realizadas en las cucharas (también llamadas “ollas” en otros países), que permiten obtener las diversas calidades de acero exigidas por los clientes [1].

En las últimas décadas, las cucharas de refinamiento pasaron de ser prácticamente inertes a convertirse en un componente clave en el proceso de obtención de diferentes tipos de acero. Las mejoras en el proceso de obtención del acero se deben, entre otras cosas, a que sus aplicaciones han evolucionado, y con ello las solicitaciones en servicio y ambientes a los que debe estar expuesto este material. Esto implica que el proceso de fabricación debe lograr producir aceros con un contenido de defectos e impurezas prácticamente nulo, con alto contenido de aleantes y tolerancias químicas estrechas [2]. La evolución en las acerías provocó también que la calidad del revestimiento refractario interno de las cucharas adquiriera cada vez más relevancia en este tipo de industrias.

Para el diseño del revestimiento refractario se tienen en cuenta numerosos factores críticos del proceso siderúrgico: el tiempo que está la cuchara en operación, el riesgo de falla, el desgaste del refractario a lo largo de las sucesivas cargas y descargas de acero (todos los ciclos de carga y descarga de acero, hasta la salida de operación de la cuchara para su reparación, conforman la *campana de la cuchara*), el aumento de volumen interno de la cuchara producto del desgaste del ladrillo en contacto con el acero y la escoria, y la calidad del producto terminado.

A grandes rasgos, una cuchara siderúrgica está conformada por una carcasa metálica externa y en su interior cuenta con dos revestimientos refractarios: uno de seguridad, en contacto con la carcasa, y otro en contacto tanto con el revestimiento de seguridad como con el acero líquido y la escoria del proceso, llamado “revestimiento de trabajo”. Para este último tipo de revestimiento, los ladrillos refractarios básicos de MgO-C son los más utilizados.

Existen diversos mecanismos que producen el desgaste de este revestimiento: corrosión por contacto con escoria líquida a alta temperatura [3], cambios de temperatura abruptos que originan tensiones térmicas [4], oxidación del grafito y ligantes carbonosos del refractario [5], etc. Estos mecanismos producen en general un desgaste gradual, que va aumentando el volumen interno de la cuchara y que puede predecirse para diseñar curvas que relacionan la capacidad de la cuchara (en toneladas de acero) en función de la vida de la cuchara en operación (avance de la campaña).

Hay otro tipo de desgaste del revestimiento de trabajo que se conoce como *abrupto*. Este es más dependiente de las condiciones operativas, ya sea por un mal armado del revestimiento o fallas en el ladrillo y ocurre cuando alguno de ellos se desprende y cae o cuando el desgaste sucede muy rápida o anormalmente en distintos sectores.

El desgaste del revestimiento refractario afecta directamente el proceso de fabricación del acero. Por ejemplo, el volumen interno de la cuchara y el nivel de acero que cabe dentro de ella se ven notoriamente afectados. Conocer el impacto del desgaste del revestimiento sobre el desempeño de la cuchara es de gran interés para las industrias siderúrgicas ya que permite establecer criterios para maximizar su capacidad y para sacarlas de servicio en el momento adecuado, evitando potenciales fallas (tales como perforaciones del revestimiento o desgaste excesivo en hiladas de ladrillo que obliguen a bajar el nivel de carga), lo que se traduce en el aumento de su capacidad productiva.

La evolución del peso de la cuchara vacía durante la vida en servicio de la cuchara, el espesor remanente del refractario y la composición de la escoria, junto con el análisis del ladrillo antes y después del uso y de otras variables de proceso, permiten determinar el desgaste del revestimiento. Para contar con esta información, se deben utilizar datos operativos, disponibles en varias fuentes y bases de datos. Esta información no siempre es sencilla de interpretar y se requiere de un cuidadoso análisis para evitar arribar a conclusiones erróneas.

En este trabajo, se procesaron y evaluaron datos operativos de la acería de *Tenaris Siderca*, una de las cinco acerías de Tenaris (las otras son *Tenaris Tamsa* en México, *Tenaris Dálmine* en Italia, *Tenaris Koppel* en EEUU y *Tenaris Silcotub* en Rumania), una de las empresas del Grupo Techint que se dedica a la fabricación de tubos, principalmente sin costura, y provisión de servicios a la industria de la energía. El sistema de fabricación de Tenaris abarca no solo el proceso de fabricación del acero en sus cinco acerías, sino también la laminación y conformado de tubos, el tratamiento térmico, roscado y acabado, además de contar con varios centros de Investigación y

Desarrollo en varias de las locaciones donde se encuentra. Tenaris cuenta con operaciones en 16 países y presencia corporativa en más de treinta. Por su parte, Tenaris Siderca se radica en la ciudad de Campana, provincia de Buenos Aires y su acería está en marcha desde hace más de 62 años.

Los datos utilizados corresponden a los años 2019 y 2020, y los principales son listados a continuación:

- *Número de cuchara*: único e identificador para cada cuchara.
- *Campaña de la cuchara*: un número que indica cuantas veces salió de servicio para su reparación, que puede ser parcial (con proyección de material castable sobre el ladrillo desgastado) o total (demolición del revestimiento completo con el uso de una retroexcavadora para su reconstrucción total).
- *Número de colada*: un número de cinco cifras que identifica al acero que contiene una cuchara en su interior. Este número permite realizar una trazabilidad, ya que cada colada se trata individualmente en cada estación.
- *Toneladas coladas*: total de acero que la cuchara recibió desde el horno de arco eléctrico.

1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es determinar y cuantificar el impacto del diseño y del desgaste del revestimiento refractario a lo largo de su campaña en el volumen y el nivel de acero de la cuchara, analizando las oportunidades de mejora que resulten de optimizar el control del volumen interno y nivel de acero.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las variaciones del volumen interno de la cuchara inicial (cuando ingresa a servicio) causadas por el diseño refractario, el tipo de instalación y las condiciones de reparación.
- Determinar el desgaste del revestimiento refractario en servicio a través de la evolución de parámetros operativos y de proceso.
- Abordar problemas reales de una empresa siderúrgica a través del análisis de datos operativos y variables medidas en planta.
- Caracterizar ladrillos refractarios de distintos proveedores de la acería de Tenaris Siderca.

2 ANTECEDENTES

El hierro es el segundo metal más abundante en la Tierra. Es también el metal más usado en la industria automotriz, de electrodomésticos, de construcción, entre otras. Para tomar dimensión de su utilización, su producción y la de sus aleaciones excede ampliamente a la producción del resto de los metales en todo el mundo.

Existen registros de que fueron los egipcios, entre los años 3000 y 4000 a.C., quienes comenzaron a usar hierro para herramientas y joyería básica. Por otro lado, los romanos comenzaron a operar hornos de fusión para producción a una mayor escala. Estos hornos eran de arcillas resistentes al fuego y se calentaban con carbón a temperaturas que permitían la fusión del óxido de hierro. Luego de un período de enfriamiento, se retiraba la pieza y se usaban martillos para quitar la capa de escoria y darle forma, lo cual era posible por el bajo contenido de carbono del hierro. El *acero al carbono* es la aleación de hierro con carbono hasta un 2% en peso. Cuando los valores de C van desde el 2% hasta 6.67% (valor en el cual se forma el compuesto intermetálico *Cementita*, Fe_3C) la aleación recibe el nombre de *fundición*. En la **Figura 1** se presenta el diagrama de fases hierro-carbono.

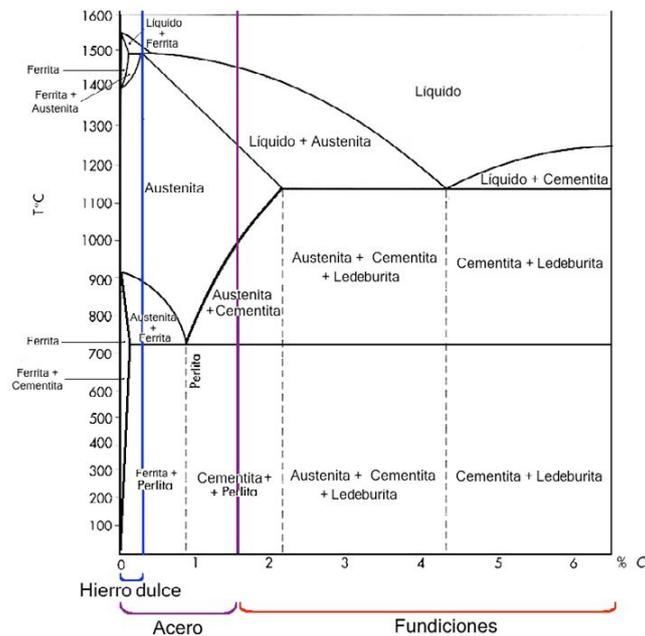


Figura 1. Diagrama de fases del sistema Hierro-Carbono.

El acero al carbono es hoy el metal más producido mundialmente, habiendo superado los 600 millones de toneladas anuales a principios de este siglo. Hoy en día, la industria

del acero es la segunda más importante a nivel mundial después de la industria Oil&Gas y se estima que se incremente la producción en un 50% para 2050, comparado a los niveles de estos últimos años [6].

2.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ACERO

La producción de acero líquido, también conocida como *aceración primaria*, puede realizarse casi en su totalidad por dos vías: en un alto horno o en un horno de arco eléctrico. El segundo caso es el método de producción de acero líquido en todas las acerías de Tenaris a lo largo del mundo, incluyendo a Tenaris Siderca. Por esta razón, el método de fusión por horno de arco eléctrico será explicado brevemente a continuación. Además, para complementar esta sección, se agrega en el **Anexo I** un folleto informativo, propiedad de Tenaris, en el cual se explica el proceso con imágenes.

El principal objetivo de la aceración primaria es fundir la materia prima, que en el caso de Tenaris Siderca es una mezcla de hierro esponja, obtenido mediante un proceso químico de reducción directa de mineral de hierro, y chatarra metálica. La mayoría de las acerías a lo largo del mundo utilizan únicamente chatarra metálica como materia prima para obtener acero líquido aún no refinado, que también recibe el nombre de *baño líquido*. La *fusión* se logra gracias al aporte de energía eléctrica y química. La primera se produce por la formación de un arco eléctrico entre tres electrodos de grafito, que alcanza temperaturas de alrededor de 5000°C en el centro del arco eléctrico, suficientes para que toda la materia prima se funda. La energía química se produce por la inyección de oxígeno gaseoso y carbón al baño líquido, los cuales reaccionan con diversos elementos generando calor. Estas reacciones, además, cumplen otras funciones como la *desfosforación*, proceso clave de esta etapa de la aceración. La remoción del fósforo se produce gracias a una serie de reacciones químicas favorecidas por la interacción del baño líquido con la escoria y por la introducción del carbón y oxígeno mencionados anteriormente, mediante lanzas ubicadas estratégicamente en varias zonas del horno. En la **Figura 2** se muestra un plano de la ubicación de las lanzas en un horno de arco eléctrico (no corresponde al horno de Tenaris Siderca). El diseño, cantidad y ubicación de las lanzas de oxígeno y carbón depende de cada acería, Tenaris Siderca cuenta con tres lanzas de carbón y oxígeno, mientras que la adición de cal para formar la escoria se realiza mediante un embudo ubicado en la parte superior del horno, al cual llega desde un silo mediante una cinta transportadora que dosifica la cantidad solicitada por los operadores del horno.

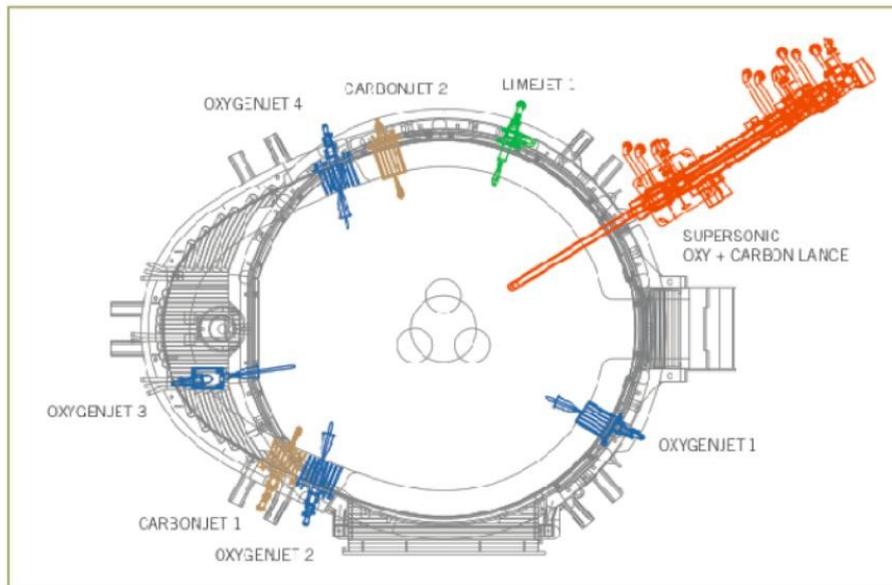


Figura 2. Esquema de lanzas de oxígeno y carbón en un horno de arco eléctrico [7]

La escoria del acero es una solución de óxidos que flota sobre el acero producto de su menor densidad, y se forma por la adición al baño líquido de cal cálcica (CaO) y cal dolomítica (CaO.MgO) en distintas proporciones. El fósforo, que proviene principalmente del hierro esponja, debe ser removido del acero (o reducido a valores tolerables) ya que su presencia provoca la fragilización de los bordes de grano austeníticos y ferríticos del acero por precipitación del fosfuro (FeMn)₃P, dando lugar así un acero frágil, especialmente a bajas temperaturas [8]. Altas concentraciones de fósforo también conducen a microsegregaciones de P durante el proceso de colada continua del acero. El fósforo se microsegrega en la zona interdendrítica, reduciendo allí su temperatura de líquidus y causando el defecto conocido como *desgarro en caliente*, que sucede por la torsión aplicada a la barra por el proceso de colada continua y también por la contracción térmica. [9]

El fósforo presente en el baño líquido sufre una serie de reacciones, detalladas en las Ecuaciones 1 y 2:



El fosfato tricálcico (Ca₃(PO₄)₂) es retenido por la escoria, y para que no se produzca su reversión al baño se debe remover la escoria saturada, un proceso conocido como *escoriado*, en el cual la escoria se vuelca en un pote ubicado en el sentido opuesto al

que se encuentra la cuchara que luego recibe el acero líquido. En la **Figura 3** se muestran los procesos que se llevan a cabo en un horno de arco eléctrico: carga de chatarra; escoriado y fusión, y colado o *tapping*. Como se puede observar, el horno tiene la capacidad de moverse o bascular hacia atrás y hacia adelante, para realizar el escoriado y el colado, respectivamente. El escoriado permite, como ya se mencionó, eliminar la escoria saturada en óxidos, para luego agregar más cal si fuera necesario seguir desfosforando. El contenido de fósforo admisible depende del tipo de acero que se quiera producir. Cabe destacar que las reacciones de desfosforación se producen si se cumplen las siguientes condiciones:

- temperatura del baño de entre 1540 – 1600°C,
- relación en peso CaO/SiO₂ en la escoria mayor o igual a 2,
- buen contacto del baño líquido con la escoria,
- porcentaje en peso de FeO en la escoria mayor a 25%.

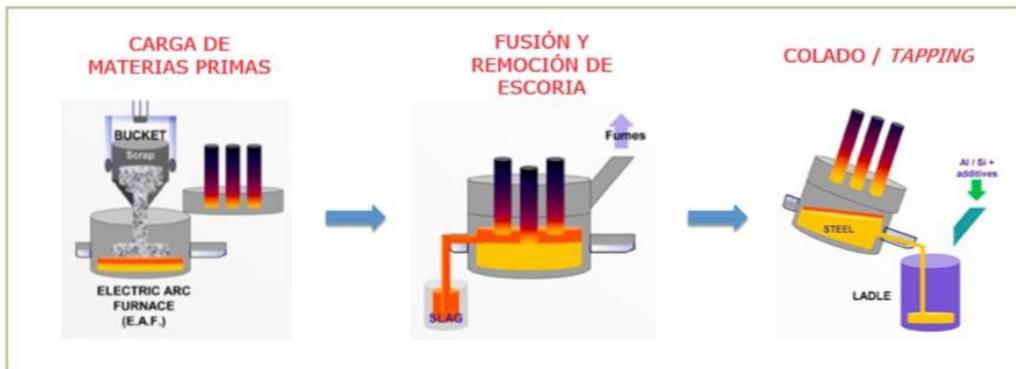


Figura 3. Procesos principales de un horno de arco eléctrico.

Previo al colado (también llamado *sangrado*) del acero líquido desde el horno de arco eléctrico hacia la cuchara, se realizan en el horno mediciones de temperatura, oxidación (en partes por millón de oxígeno) y composición química del acero. Esto permite determinar si la colada se encuentra dentro de los parámetros requeridos para el tipo de acero que está siendo fabricado. Por ejemplo, el muestreo de composición química permite saber si la desfosforación fue correcta, ya que el valor de fósforo debe ser inferior a un valor límite que surge de la aplicación para la cual se usará el acero que se está fabricando. Si el contenido de P excede ese límite, se debe seguir desfosforando en el horno, ya que este elemento no puede reducirse en las etapas posteriores de la aceración.

El proceso de aceración primaria finaliza cuando inicia el sangrado, y es justo a partir de este momento que comienza la etapa de aceración secundaria, o *metalurgia*

secundaria, en la que se agregan dentro de la cuchara cales (como formadores de escoria, distinta a la escoria del horno de arco eléctrico); aluminio, para desoxidar el acero, y ferroaleaciones para hacer un primer ajuste de la química del acero. La adición de estos materiales se realiza en simultáneo con la caída del acero a la cuchara, para poder aprovechar la energía potencial y la presión ferrostática para lograr una buena disolución y mezcla de los agregados. Durante este proceso la cuchara se encuentra apoyada en un carro que cuenta con una balanza incorporada que va censando el peso de acero colado. Una vez alcanzado el peso de acero preestablecido en la cuchara, esta se desplaza hacia el horno de afino.

El objetivo de la aceración secundaria es lograr la homogeneidad química y térmica del acero presente en la cuchara, así como obtener un producto *limpio*, es decir, con bajo contenido de inclusiones. Para ello se agregan ferroaleaciones y se calienta el acero con energía del tipo eléctrica (con la formación de un arco eléctrico entre tres electrodos, al igual que en el horno, pero con menor potencia). La homogeneidad se logra mediante el burbujeo de gas argón en el interior de la cuchara, a través de tapones porosos localizados en su parte inferior. Este gas inerte proviene de una red de cañerías que circula por la acería y llega hasta el proveedor.

Para realizar un control preciso de la temperatura y composición química del acero, se realizan mediciones continuas de ambos, así como se mide también la composición de la escoria. Cuando todos los parámetros y tiempos de procesamiento se han alcanzado, se avanza hacia la última etapa del proceso: la *colada continua del acero*.

Para alcanzar la máquina de colada continua, una grúa eleva la cuchara hacia una torre giratoria ubicada en la parte más alta del sector, allí se deposita la cuchara, que esperará a que se vacíe la cuchara que está en el extremo opuesto de la torre para girar y colocarse sobre el distribuidor o *tundish*. Una vez allí, se abre un orificio en el fondo de la cuchara y el acero fluye por gravedad hacia el distribuidor, que recibe el acero y luego lo reparte en los moldes o lingoteras ubicados inmediatamente debajo. Estos moldes son de cobre y están enfriados con agua, de forma tal de producir la solidificación inicial de una capa fina de acero. Esta capa, que todavía contiene acero líquido en su interior, se extrae lentamente gracias al movimiento de rodillos y movimientos verticales oscilatorios del propio molde, más rápidos hacia arriba que hacia abajo, produciendo así la extracción de la barra. A medida que desciende la barra, se sigue enfriando mediante la pulverización de agua en forma directa, lo cual produce el engrosamiento de la capa sólida hasta que se consigue solidificar la última gota de líquido en el centro de la barra. Finalmente, se la corta a la longitud deseada y se la dispone en un plano de

enfriamiento. En el caso de Tenaris, los moldes son cilíndricos (cuya sección transversal define el diámetro de la barra) y las piezas obtenidas se dirigen a los laminadores, donde se obtienen los tubos sin costura que luego serán vendidos a los distintos clientes de la compañía. Cuando se vacía la cuchara que se encuentra sobre el distribuidor, ya habrá otra esperando del otro lado de la torre giratoria para ocupar su lugar y de esta forma lograr la continuidad característica de este proceso. En la **Figura 4** se muestra un esquema de una máquina de colada continua de planchones de acero de sección rectangular.

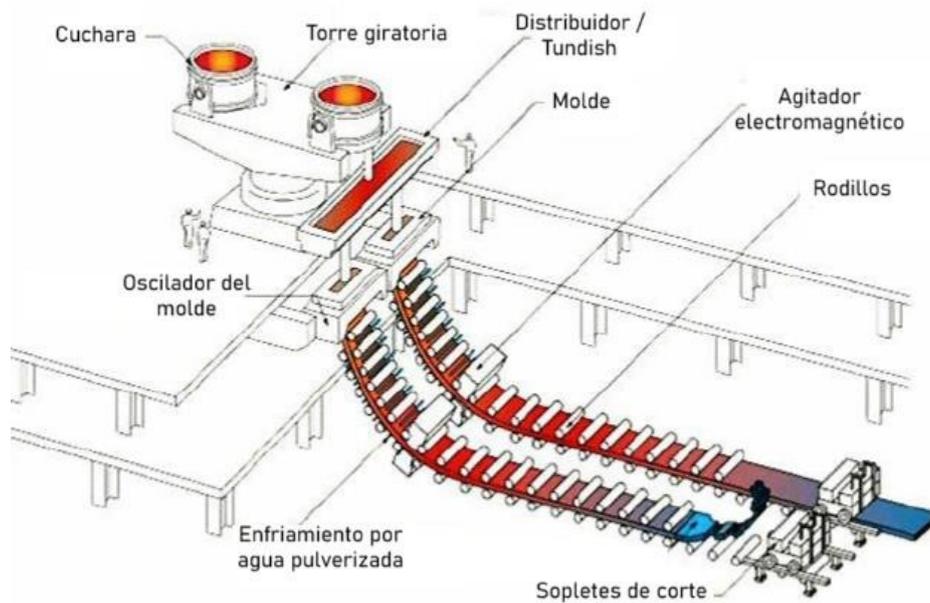


Figura 4. Proceso de colada continua.

2.2 CUCHARA SIDERÚRGICA

2.2.1 Rol en el proceso productivo

En sus inicios, la cuchara era un recipiente de transferencia de acero desde el horno a la colada, pero con el paso del tiempo y la evolución en las exigencias de las condiciones a las que se someten los productos que se obtienen con acero, comenzó a utilizarse como un reactor. En él se producen la mayoría de las reacciones metalúrgicas de afinado del acero. Esto dio lugar al *horno cuchara*, *horno de afinado* o “*LF*” (*Ladle Furnace*), que es la estación donde tiene lugar el proceso de metalurgia secundaria. Dada la cantidad de reacciones y procesos que ocurren en esta etapa, el revestimiento refractario debe ser capaz de soportar el desgaste térmico, químico y mecánico que se produce al estar en contacto con el acero líquido y la escoria.

La cuchara, como se mencionó en la introducción de este trabajo, se compone de una carcasa metálica, que da forma al recipiente, dos brazos en su periferia, que permiten levantarla con los ganchos de la grúa puente para su traslado dentro de la acería, y dos *revestimientos refractarios*: uno interno, que está en contacto con el acero y la escoria, y que se construye con distintos ladrillos según la zona de la cuchara (pared, piso, línea de escoria); y uno de seguridad, que se construye entre la carcasa y el revestimiento interno. El primero otorga estabilidad física y química en las condiciones de trabajo a la que es sometida, mientras que el de seguridad procura una contención del acero líquido en el caso de fallas en el revestimiento refractario interno. En la **Figura 5** se muestra un esquema básico del interior de una cuchara, en el que se identifican:

- *Zona/línea de escoria*: corresponde a las filas de ladrillos en contacto con la escoria. En esta zona también se produce la interacción de la escoria con el aire y el acero, y sufre un desgaste mayor al de otras zonas de la cuchara.
- *Zona de trabajo*: principalmente diseñada para soportar las temperaturas de trabajo y los ciclos térmicos dados por la carga y descarga del acero, que generan en esta zona solicitaciones termomecánicas.
- *Piso de trabajo*: debe soportar la presión ferrostática provocada por el impacto de la del acero desde el orificio de colado del horno (son más de 4 m en Tenaris Siderca).
- *Tapones porosos*: permiten el paso del gas argón para la agitación del acero, proceso clave para la homogeneización térmica y química. La posición del tapón sigue criterios de diseño definidos por cada planta. Siempre se busca optimizar el alcance del burbujeo a todas las zonas de la cuchara, evitando puntos muertos donde puedan generarse zonas frías o gradientes de composición química.
- *Orificio de colado*: consiste en un agujero que se rellena hacia el interior de la cuchara con una arena refractaria de cromita (FeCr_2O_4), que resiste las temperaturas del proceso sin degradarse ya que presenta una baja dilatación térmica y alta refractariedad. Esto permite contener el acero líquido dentro de la cuchara y evitar que se solidifique en el resquicio, garantizando el flujo del acero líquido cuando se realiza la apertura del orificio para transferirlo de la cuchara al tundish de la colada continua. El sistema de cierre del orificio está formado por dos placas: una fija, con un orificio central igual y alineado al de colado, adherida a la carcasa exterior de la cuchara y otra placa inferior móvil que también tiene el mismo orificio, pero no es concéntrico al de la placa fija. Cuando la cuchara se posiciona en la máquina de colada continua, un sistema hidráulico mueve

esta placa (de ahí el nombre de *placa móvil*) alineando su orificio con la placa fija, permitiendo el flujo de acero por la parte inferior de la cuchara hasta que queda vacía. Un esquema del sistema de apertura de cuchara se presenta en la **Figura 6**.

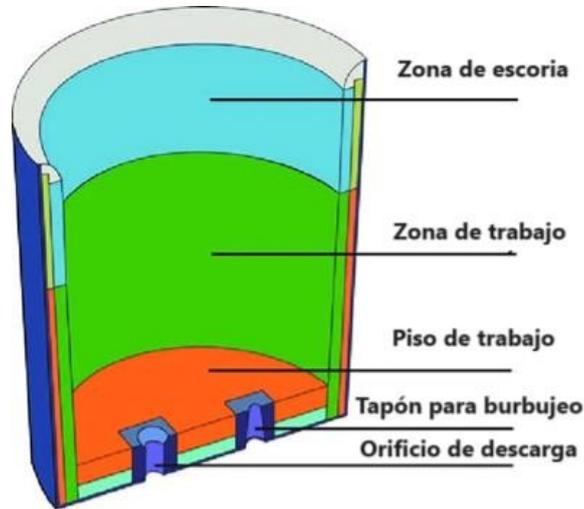


Figura 5. Esquema básico de las zonas de una cuchara.

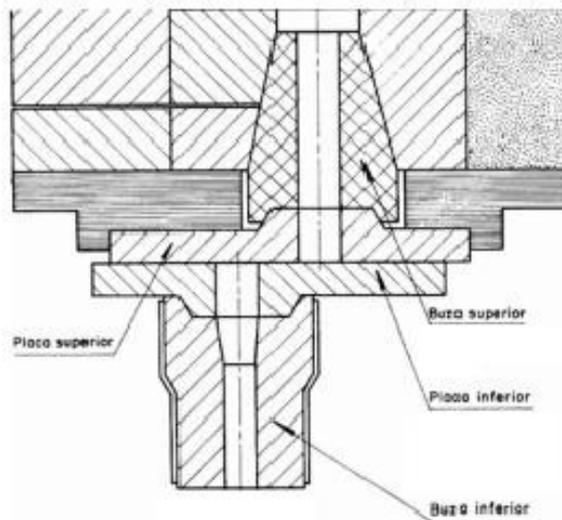


Figura 6. Esquema del sistema de placas para apertura de la cuchara. [10]

La resistencia termomecánica y química del revestimiento refractario brinda la posibilidad de contener el acero por largos períodos sin sufrir desgaste excesivo, evitando los inconvenientes operativos de realizar trasvases del acero de cuchara a cuchara de manera constante, haciendo al proceso productivo más versátil. Este tipo de prácticas tiene la desventaja de *ensuciar* el acero, oxidarlo y enfriarlo, ya que se mezcla la escoria con el acero y este capta oxígeno del aire en el traspaso de una cuchara a la otra. Existen, sin embargo, situaciones en las que el estado del revestimiento o la

extensión de los tiempos de permanencia del acero en la cuchara hacen inevitable la necesidad del trasvase. Puede observarse un proceso de trasvase en la **Figura 7**.



Figura 7. Cuchara inclinada para el trasvase (izquierda) y proceso de trasvase (derecha).

Así como se definen distintas zonas, también los materiales refractarios con los que se arman las cucharas difieren según la zona de aplicación.

De acuerdo al tipo de material o ladrillo refractario con el que se construyen las cucharas, se pueden identificar cuatro revestimientos:

- I. Revestimiento de seguridad (entre el revestimiento de trabajo y la carcasa de la cuchara): construido en hormigón (ver **Figura 12** y **Figura 14**) en Tenaris Siderca. Otras acerías los construyen con ladrillos refractarios.
- II. Revestimiento de trabajo del piso de la cuchara (en contacto con el acero): construido con ladrillos de base alúmina (alúmina-magnesia-carbono, *AMC*) y adheridos con mortero aluminoso.
- III. Revestimiento de trabajo de la pared de la cuchara (en contacto con el acero): constituido por ladrillos $MgO-C$.
- IV. Revestimiento de trabajo de la línea de escoria de la cuchara (en contacto con el acero y la escoria del acero): formado con ladrillos $MgO-C$ de calidad superior a los del resto de la pared.

El revestimiento de trabajo de cada sector se identifica en la **Figura 5**.

2.2.2 Capacidad de carga de las cucharas

Cada acería, de acuerdo con su diseño, presupuesto y expectativas de producción, posee diferentes capacidades de carga, tanto en la cuchara como en el horno de arco eléctrico.

En Tenaris Siderca, por cuestiones de diseño, las grúas puente que trasladan las cucharas llenas de acero desde el carro de sangrado hacia el carro que las introduce en el horno de afino y luego las lleva a la torre de colada continua, poseen una capacidad de 130 toneladas. Una cuchara vacía tiene un peso de aproximadamente 42 toneladas, mientras que la tapa que se coloca sobre la cuchara para reducir la pérdida de calor pesa aproximadamente 3 toneladas. De esta forma, el máximo a cargar de forma segura es 85 toneladas de acero. Es claro que, por cuestiones de seguridad e integridad de los equipos, no se puede operar sobre el límite de la capacidad de la grúa, por lo que el diseño de las cucharas busca que, a lo largo de su campaña, el peso varíe entre 75 toneladas para cucharas nuevas o reparadas, cuando el revestimiento refractario se encuentra nuevo y el peso de la cuchara vacía es máximo, hasta las 85 toneladas, cuando la cuchara va llegando al final de su campaña y el desgaste del revestimiento refractario ha avanzado, maximizando el volumen interno de la cuchara.

La clave en los procesos de colada continua es asegurar la secuencialidad del colado. Cuando se logra aumentar el volumen interno de las cucharas, sin detrimento en el desempeño de las mismas, se ganan más toneladas de acero por colada.

Maximizar la capacidad de carga de las cucharas no sólo permite una mayor producción (más acero por colada) sino que también mejoran los tiempos de tratamiento en el proceso de metalurgia secundaria, claves para lograr la homogeneidad térmica y química del acero. Esto es así porque, para un mismo diámetro de barra, una cuchara con más toneladas de acero tarda más en vaciarse, dado que la velocidad de extracción de las barras en la colada continua es prácticamente constante. Un tiempo más prolongado para la aceración secundaria se traduce en más tiempo por colada en el horno de afino, mejorando la homogeneidad química y favoreciendo la limpieza inclusionaria.

2.3 REVESTIMIENTO REFRACTARIO

El tipo de ladrillo que conforma el revestimiento refractario posee ciertas características que lo vuelven un elemento esencial para la operación a altas temperaturas y las condiciones químicas que prevalecen en el proceso de obtención de acero. Los hornos

y cucharas utilizados en esta industria alcanzan temperaturas en torno a los 1600 y 1700°C, lo que vuelve a la investigación y desarrollo de mejoras en los refractarios de aceria un aspecto clave en la evolución del proceso productivo.

2.3.1 Requerimientos del revestimiento refractario de una cuchara para su uso en siderurgia

Como se mencionó anteriormente, la cuchara es el recipiente donde se realiza el ajuste de la temperatura y la composición química del acero, y se logra la disminución del contenido inclusionario (por flotación de inclusiones a la escoria) y elementos perjudiciales para la óptima performance del producto final.

El acero contenido por la cuchara alcanza temperaturas que pueden superar los 1700°C, por lo que el revestimiento no sólo debe soportar esta condición térmica, sino que también debe ser capaz de resistir el choque térmico que se produce en los reiterados ciclos de carga desde el horno de arco eléctrico y descarga en la colada continua y en la operación de calentamiento del acero en el horno cuchara. Además del choque térmico y los esfuerzos mecánicos que se producen tanto por el impacto del acero fundido sobre el revestimiento como por la agitación que genera el gas argón dentro de la cuchara, el ladrillo refractario está expuesto al ataque químico por las reacciones que se producen en la interacción entre el acero y la escoria líquida en la etapa de afino y la mayor temperatura a la que esta última se encuentra con respecto al acero. Si la escoria se encuentra sobrecalentada por sobre su temperatura de líquido, su menor viscosidad se traducirá en un *lavado* de la pared de ladrillo refractario, acelerando su desgaste. Todos estos factores hacen que el proceso de desgaste del ladrillo refractario sea muy complejo y dependiente de múltiples variables [11].

La escoria en la cuchara se forma por el agregado de cales cálcica (que aporta CaO) y dolomítica (que aporta CaO y MgO) y, en Tenaris Siderca, la composición típica es la siguiente (p/p):

- CaO = 55 – 60%
- Al₂O₃ = 25 – 30%
- SiO₂ = 4 – 10%
- MgO = 5 – 10%
- FeO = 0 – 1%
- MnO = 0 – 0.50%

El aporte de alúmina (Al_2O_3) proviene de la desoxidación del acero, que se realiza mediante la adición de aluminio durante el sangrado. La reacción que provoca la desoxidación se muestra en la Ecuación 3:



El contenido de sílice (SiO_2) proviene del pasaje de la escoria del horno de arco eléctrico, rica en sílice y fósforo, y también de la oxidación del silicio que contienen algunas de las ferroaleaciones añadidas durante el sangrado (ferrosiliciomanganeso y ferrosilicio son las principales). Tanto el aluminio como el silicio son dos agentes oxidantes fuertes, como muestra el *Diagrama de Ellingham* que se incluye en el **Anexo II**. El valor de FeO, entre 0 y 1% p/p, se debe también a que el hierro metálico es levemente oxidado.

2.3.2 Ladrillos refractarios MgO-C

Los ladrillos MgO-C adquirieron un rol preponderante en la industria siderúrgica desde fines de la década de 1970. En aquel entonces, los ladrillos dolomita-C eran los más utilizados en la industria del acero, dado su menor costo de fabricación. Los refractarios MgO-C se volvieron protagonistas cuando se probó que su durabilidad en servicio superaba ampliamente a los de base dolomita, compensando con creces el mayor costo de producirlos.

Estos ladrillos están compuestos por magnesia, grafito, un ligante orgánico (comúnmente resinas) y aditivos, como los antioxidantes, de acuerdo a su aplicación principal.

La *magnesia* es el componente principal del ladrillo y su calidad determinará fuertemente su resistencia a la corrosión. Los parámetros que determinan la calidad de la magnesia son: pureza, tamaño de grano, relación CaO/SiO_2 en bordes de grano y porosidad. A mayor cantidad de bordes de grano (menor tamaño de grano), mayor concentración de impurezas y por ende menor resistencia química del ladrillo. En la **Tabla 1** se presentan ejemplos de diferentes calidades de magnesia de uso refractario [12].

Para esta clase de aplicaciones se utiliza tanto magnesia sinterizada como magnesia electrofundida: ambos procesos de fabricación se realizan a altas temperaturas, obteniendo baja porosidad y favoreciendo el crecimiento de grano.

El *grafito* que se usa en la fabricación de los ladrillos MgO-C es principalmente en forma de escamas. El contenido de este componente oscila entre un 10 y un 20% del peso del ladrillo. Su presencia mejora la resistencia al choque térmico por su alta conductividad térmica. Además, reduce el ataque y penetración de la escoria debido a su baja

mojabilidad. Por otro lado, la oxidación a altas temperaturas que sufre el grafito es una de las principales limitantes de la vida útil en servicio del ladrillo refractario. Esto ocurre por la reacción del C con el oxígeno del aire.

| | | Agua de mar | | Natural | |
|-------------------------------------------|------------------------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | | Electrofundida | Sinterizada | Electrofundida | Sinterizada |
| Composición química (%p/p) | SiO₂ | 0.2 | 0.22 | 1.29 | 1.96 |
| | Al₂O₃ | 0.06 | 0.06 | 0.12 | 0.09 |
| | Fe₂O₃ | 0.11 | 0.04 | 0.75 | 0.67 |
| | CaO | 0.57 | 0.51 | 1.19 | 0.98 |
| | MgO | 99.07 | 99.13 | 96.55 | 95.46 |
| | B₂O₃ | 0.02 | 0.04 | - | - |
| Porosidad aparente (%) | | 2.6 | 1.5 | 1.1 | 8 |
| Densidad global (g/cm³) | | 3.46 | 3.4 | 3.54 | 3.2 |

Tabla 1. Características típicas de distintas calidades de magnesia de uso refractario.

El ligante orgánico usado en este tipo de ladrillo une las partículas que componen la matriz (partículas finas de tamaño inferior a 100 µm) y los agregados (partículas gruesas, de tamaño mayor a 100 µm) favoreciendo una distribución uniforme de las mismas durante el procesamiento [13]. Las *resinas fenólicas* (novolaka o resol) están entre los ligantes más comúnmente usados, en porcentajes entre 3 y 7% del peso del ladrillo.

Como aditivos se encuentran los agentes antioxidantes, entre los cuales el aluminio es hoy el de uso más extendido, principalmente por su bajo costo y fácil disponibilidad. Se incluye en forma de polvo, con una granulometría menor a 100 µm, y en cantidades inferiores al 5% en peso. El objetivo de estos agentes es reducir la decarburación del ladrillo en contacto con el aire, dado que son más reductores que el carbono. Otros aditivos antioxidantes son Mg, Si, boruros, nitruros y carburos, entre otras aleaciones metálicas.

La manufactura de los ladrillos MgO-C ligados con resina comprende varias etapas:

- I. Clasificación de las materias primas y separación de acuerdo a su tamaño
- II. Mezclado de las materias primas.
- III. Conformado, generalmente por prensado uniaxial.
- IV. Curado a temperaturas bajas (aproximadamente 200/300°C).
- V. Inspección visual para detectar defectos superficiales.
- VI. Empaquetado y transporte al cliente.

2.3.3 Degradación del revestimiento refractario en cucharas siderúrgicas

2.3.3.1 Desgaste del revestimiento

A la hora de abordar este trabajo, se hizo especial hincapié en el desgaste del ladrillo refractario que forma el revestimiento de trabajo de la cuchara. Hay dos tipos de desgaste que podemos encontrar en una cuchara siderúrgica: el gradual y el abrupto.

El *desgaste gradual*, es aquel que se produce normalmente durante la producción. Los ciclos de carga y descarga constantes, sumados a la alta temperatura y la agresividad química del acero y la escoria provocan que, de manera constante, se pierda material del ladrillo, disminuyendo su espesor [14]. La reducción del espesor del revestimiento equivale al peso de ladrillo refractario que pierde la cuchara a medida que es usada.

Como consecuencia lógica, a medida que avanza la campaña de la cuchara, aumenta la capacidad de carga de acero porque la reducción de espesor se traduce en un mayor volumen libre. Considerando estas relaciones, se desarrollan *curvas teóricas de carga de acero en cuchara*. Estas curvas definen cuál es la cantidad de acero, en toneladas, que debe contener la cuchara de acuerdo a cuántas coladas hayan pasado por ella desde que se puso en operación. Esta cantidad objetivo es lo que se conoce como *Set Point*, y, en otras palabras, representa a las toneladas [t] que debe sangrar el horno de arco eléctrico en la cuchara. Las curvas de carga se han construido con datos empíricos, considerando que las condiciones de procesamiento en cada colada son similares, por lo cual el desgaste que se produce tiende a ser el mismo en cada una de ellas. La **Figura 8** muestra una curva de carga teórica obtenida a partir de los datos de la **Tabla 2**. Todas las cucharas de Tenaris Siderca tienen la misma curva teórica de carga.

| Coladas de la campaña | Set Point [t] |
|-----------------------|---------------|
| 1 a 9 | 75 |
| 10 a 14 | 76 |
| 15 a 19 | 77 |
| 20 a 24 | 78 |
| 25 a 29 | 79 |
| 30 a 34 | 80 |
| 35 a 39 | 81 |
| 40 a 44 | 82 |
| 45 a 54 | 83 |
| 55+ | 84 |

Tabla 2. Capacidad de la cuchara en función de la cantidad de coladas.

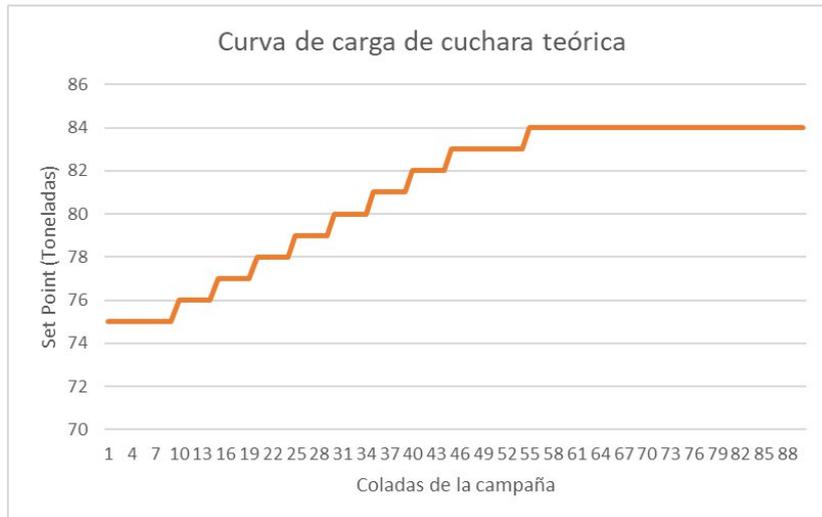


Figura 8. Curva de carga teórica.

Por otro lado, el *desgaste abrupto* es más difícil de predecir, sino imposible. Es aquel que se produce cuando ocurren situaciones puntuales tales como defectos en un ladrillo, errores en el armado de la cuchara o condiciones de escoria y/o acero muy agresivas. Esto provoca el desgaste acelerado de un ladrillo o hilera de ladrillos, incluso su caída, poniendo en riesgo la integridad del revestimiento y con ello la seguridad de la operación. Si no se detecta a tiempo, puede ocurrir una filtración de acero que sobrepase el revestimiento de seguridad y llegue a la carcasa, generando un agujero y cayendo acero líquido y/o escoria al suelo. Esto tiene implicancias tanto económicas como de seguridad y de planificación. En la **Figura 9** se muestra una perforación de cuchara por desgaste abrupto, que ocasionó la caída del ladrillo en la zona por donde se filtró el acero por fuera de la cuchara, mientras que la **Figura 10** muestra el caso del desgaste excesivo del revestimiento en la línea de escoria.



Figura 9. Vistas de una cuchara con filtración de acero por caída de ladrillo.



Figura 10. Ladrillos de línea de escoria con desgaste excesivo.

Luego de detectarse un desgaste abrupto, debe reducirse el nivel de carga de la cuchara, para evitar que el acero y la escoria interactúen entre sí en la zona que ha sufrido el desgaste. Esto se logra, en primera instancia, modificando los valores de Set Point, como se muestra en la **Tabla 3** para el caso del desgaste excesivo mostrado en la **Figura 10**, debido a una escoria muy agresiva. En este caso, la curva se vio afectada luego de la colada N°34 por el desgaste acelerado de los ladrillos de la línea de escoria, lo que obligó a bajar el peso objetivo de carga para que el contacto de la escoria se produzca en una fila de ladrillos por debajo de la hilada dañada, de forma tal de evitar una infiltración de acero a través del revestimiento. Esto se conoce como “bajada de Set Point” o “bajada de nivel” y, en muchas ocasiones, se quita la cuchara de circulación antes que alcance la cantidad de coladas estándar de la campaña, ya que no resulta conveniente, tanto económica como operativamente, seguir utilizándola con una capacidad menor a la que debería tener y con el riesgo latente de una filtración.

| Coladas de la campaña | Set Point [t] |
|-----------------------|---------------|
| 1 a 9 | 75 |
| 10 a 14 | 76 |
| 15 a 19 | 77 |
| 20 a 24 | 78 |
| 25 a 29 | 79 |
| 30 a 34 | 80 |
| 35 a 39 | 78 |
| 40 a 44 | 78 |
| 45 a 54 | 78 |
| 55+ | 76 |

Tabla 3. Curva de carga objetivo real de una cuchara en la que ocurrió una bajada de nivel.

Así como la **Tabla 2** representa la curva teórica de carga de todas las cucharas de la planta, la **Tabla 3** es un caso particular de una cuchara en la cual fue necesario modificar el set point. Entonces, para otra cuchara que sufra desgaste abrupto puede requerirse una bajada de nivel antes o después que en este caso, o bien puede ser menor el tonelaje al que se baje el set point. Se debe tener en cuenta que para mantener la productividad de la acería, se espera que una cuchara respete la curva de carga teórica hasta el fin de su campaña.

2.3.3.2 Corrosión de ladrillos refractarios MgO-C

La degradación de este tipo de ladrillos es un proceso que se produce dadas las severas condiciones de servicio a las cuales están expuestos, siendo un desafío permanente para la industria y la investigación en materia de materiales refractarios lograr extender la vida útil de estos productos. Existen dos tipos de degradación en los ladrillos MgO-C utilizados en la siderurgia: termomecánica y química. El mecanismo que determine la vida útil del material dependerá de las condiciones de operación y prácticas vigentes en la planta, que pueden diferir a lo largo del tiempo.

La degradación termomecánica puede tener su origen en varios factores: precalentamiento brusco de la cuchara, mal armado, mala calidad del revestimiento refractario o impacto del acero líquido a alta temperatura en cucharas que han pasado muchas horas sin acero en su interior y han perdido lo que se conoce como *régimen térmico*. También puede considerarse la abrasión que pueda generarle la escoria al ladrillo por su movimiento constante en las hileras que comprenden la *línea de escoria*.

La degradación química, o el desgaste producido por procesos químicos, se conoce como *corrosión*. La corrosión es, frecuentemente, el mecanismo que limita el tiempo de vida útil del ladrillo refractario de MgO-C. Esto se debe principalmente a las temperaturas a las cuales se realiza el procesamiento del acero, que aceleran la reactividad del material. Los distintos agentes que interactúan con el ladrillo refractario en servicio, líquidos (metal o escoria) y gaseosos (O_2 , CO, CO_2), todos en condiciones de alta temperatura, pueden ser incompatibles termodinámicamente con los componentes del ladrillo MgO-C, a partir de lo cual se producen reacciones químicas para alcanzar el equilibrio. Es el caso de la oxidación del grafito en la cara caliente y la disolución del MgO en la escoria que ha penetrado al interior del ladrillo. La disolución del MgO de los ladrillos es considerada la causa principal del desgaste de los mismos, y consecuentemente, la limitante de la vida de las cucharas [15].

Estos mecanismos de degradación tienen influencia en determinados sectores de la cuchara, ya que las solicitaciones a las que se somete el refractario difieren según cuál sea la zona. En la línea de escoria y la parte superior de la cuchara, ocurren procesos mayoritariamente de desgaste termoquímico, mientras que en el piso y los ladrillos de la pared que están en contacto permanente con el acero y no con escoria ni el aire, predominan los efectos termomecánicos de desgaste. Es por ello que se usan distintos tipos y calidades de ladrillos refractarios en el armado de una cuchara [16].

2.3.4 Armado del revestimiento refractario de una cuchara siderúrgica

La construcción de una cuchara o su reconstrucción (total o parcial) en el caso de haber salido de servicio, se realiza en su totalidad por personal tercerizado contratado por Tenaris Siderca. A su vez, los controles de las cañerías a través de las cuales circula el gas argón para el burbujeo de la cuchara y de integridad mecánica de la cuchara, son realizados por personal de mantenimiento propio de la compañía.

2.3.4.1 Control y limpieza previa

Una vez que la cuchara sale de operación, sin acero remanente en su interior, pasa a un período de enfriamiento, durante el cual se registra el estado de reparación previo de cada sector de la cuchara y se define cuál será reparado y cual reconstruido. Las distintas zonas son:

- I. Revestimiento de trabajo del piso.
- II. Revestimiento de trabajo de la pared.
- III. Revestimiento de seguridad de la pared.
- IV. Zona de impacto.

Cabe destacar que estas zonas son las que se definen para la reconstrucción del revestimiento refractario de una cuchara, por lo que no son iguales a las presentadas en la sección 2.2.1, donde se definieron de acuerdo al tipo de material refractario utilizado en cada una.

Aquella zona de la cuchara que deba ser reconstruida pasa primero por un proceso de demolición, en el cual se retira totalmente el material refractario, como se muestra en la **Figura 11**.

Luego de la demolición, la cuchara se posiciona en un bancal para inspección y control por parte del personal de mantenimiento mecánico de Tenaris Siderca. Después se vuelca la cuchara con el fin de que el revestimiento refractario demolido caiga sobre un volquete específico para este residuo. Una vez que la grúa ha volcado la cuchara, la

coloca en posición vertical en una de las fosas de reconstrucción, como muestra la **Figura 12**.



Figura 11. Demolición del revestimiento refractario de una cuchara.

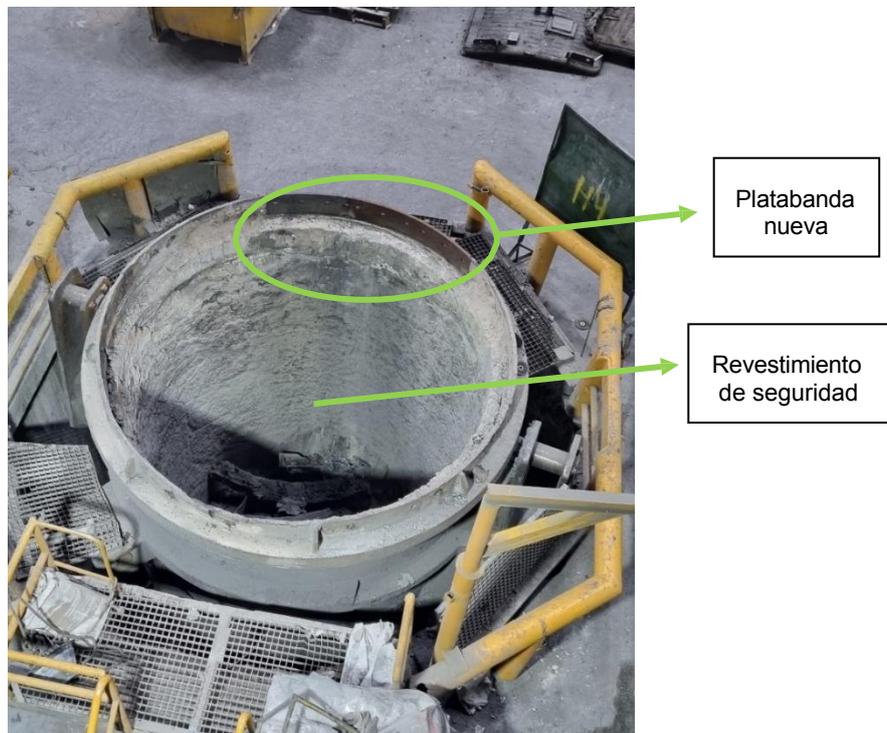


Figura 12. Cuchara con revestimiento de piso y pared de trabajo demolidos, colocada en una de las fosas de reconstrucción (el revestimiento remanente es el de seguridad).

El primer trabajo que se realiza es la limpieza de las platabandas (**Figura 12**), que son unas bandas metálicas que se ubican en la parte más alta de la cuchara para dar soporte a los ladrillos que se ubican en la hilada superior. Aquellas que se encuentren en mal estado o desprendidas corren riesgo de caerse en operación, quedando el ladrillo que estaba en contacto con la platabanda sin soporte superior. Si debe realizarse el cambio de alguna de estas platabandas, se hará al final del armado de la cuchara.

La tarea posterior es la inspección visual por parte del supervisor de la empresa contratista de reparación de refractarios, quien determina si quedaron zonas donde falte demoler restos de revestimiento. Además, inspecciona el revestimiento de seguridad de la pared en busca de grietas o filtraciones de acero (que se manifiestan como láminas de acero solidificado entre el revestimiento). Finalizada la inspección, el operario comienza demoliendo los portatapones (donde se colocan luego los tapones porosos por los cuales ingresa gas argón para realizar el burbujeo del acero dentro de la cuchara) y el portabuza (en este se coloca la buza refractaria por la cual se descarga el acero de la cuchara en el distribuidor de la colada continua), ambos ubicados en el piso de la cuchara. Luego, demuele las áreas que el supervisor determinó en la inspección previa. Para ello, utiliza un martillo neumático cuando el trabajo es en el piso de la cuchara, mientras que, si debe trabajar sobre el revestimiento de seguridad o de trabajo de la pared, se ayuda con un aparejo eléctrico y una eslinga, tal de poder sostener el martillo neumático en posición horizontal. Todas estas tareas, en las cuales hay un operario dentro de la cuchara, se realizan con una persona que actúa como observador o *vigía*, para garantizar que la misma se realice de forma segura.

Finalizada esta etapa, la grúa vuelve a levantar la cuchara y realiza una basculación para que caigan los restos de ladrillo refractario y de acero (si hubiese) al contenedor.

2.3.4.2 Reconstrucción refractaria del piso de trabajo y revestimiento de seguridad de la pared

Luego de las demoliciones necesarias y la limpieza previa, se realiza la reconstrucción refractaria:

- Total: se cambian todo el revestimiento de seguridad y de trabajo.
- Parcial: se realiza un cambio parcial o reparación del revestimiento de seguridad y/o de trabajo.

Si hubiera que reconstruir completamente el revestimiento refractario de seguridad, se coloca un molde, como el que muestra la **Figura 13**, en el interior de la cuchara. Primero se reconstruye el piso de trabajo, lo cual incluye de una serie de tareas:

- I. Se arma una *camisa* de seguridad, colocando placas aislantes de 10 mm sobre la carcasa de la cuchara, adheridas con mortero. Sobre estas placas, se instala un piso constituido por ladrillos 70% alúmina adheridos entre sí con mortero aluminoso para evitar filtraciones. La altura de la camisa alcanza los 73 mm.
- II. Se nivela la altura con hormigón magnesítico.

- III. Se arma un anillo de ladrillos de 114mm adheridos con mortero, sobre el cual se hace colocan ladrillos de 229 mm de altura, formando un anillo de 343 mm.
- IV. Se construye la *zona de impacto*, con ladrillos de 300 mm unidos con mortero.



Figura 13. Molde para realizar el colado del revestimiento refractario de seguridad de la pared de la cuchara.

Una vez reconstruido el piso, se introduce el molde dentro de la cuchara, se centra y se tensa, y se vierte el hormigón en el espacio entre el molde y la cuchara. Se deja orear por 24 horas como mínimo, luego de lo cual se retira el molde y se inspecciona el estado del revestimiento de seguridad, ya que debe carecer de grietas para poder continuar con el armado del revestimiento de trabajo, aquel que estará en contacto con el acero líquido. La **Figura 14** muestra el revestimiento de seguridad reconstruido. Finalizado el revestimiento de seguridad de la pared de la cuchara, se colocan los nuevos porta tapones y el portabuza y se controla su centrado.



Figura 14. Revestimiento refractario de seguridad interno de la cuchara reconstruido a nuevo.

2.3.4.3 Reconstrucción refractaria de la pared de trabajo

La última parte de este proceso consta del armado de los anillos correspondientes a la pared de trabajo de la cuchara. La forma de los ladrillos y las dimensiones con las que se identifican se muestran en la **Figura 15**.

Los ladrillos quedan separados del revestimiento de seguridad por un espacio de 10 mm, que se rellena con refractario magnésítico seco apisonado. Lógicamente, se va construyendo desde abajo hacia arriba. Los anillos que están en la línea de escoria se construyen con un ladrillo diferente al del resto de la pared que sólo interactúa con el acero líquido. En la **Figura 16** se muestra una cuchara en la etapa final de armado.

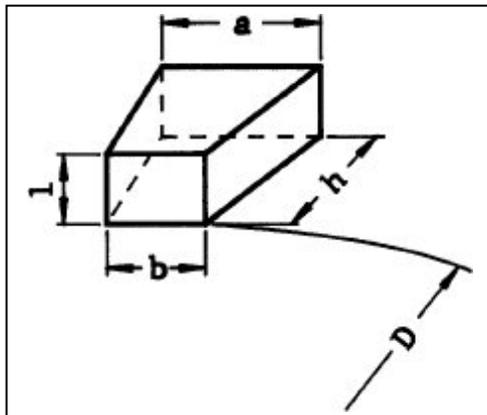


Figura 15. Geometría del ladrillo refractario que se usa en la pared de trabajo.



Figura 16. Etapa final de colocación de ladrillos refractarios nuevos en la cuchara (izquierda) y cuchara con revestimiento refractario nuevo (derecha).

Finalizado el último anillo de ladrillos, se colocan las platabandas nuevas y se realiza el hormigonado del perímetro superior de la cuchara. La **Figura 16** también muestra la imagen de una cuchara luego de finalizada la reconstrucción. En la **Figura 17** se observa el revestimiento refractario de trabajo de la pared y el piso reconstruidos a nuevo, y también se pueden identificar los tapones para burbujeo y el orificio por donde el acero es transferido al distribuidor de la colada continua.

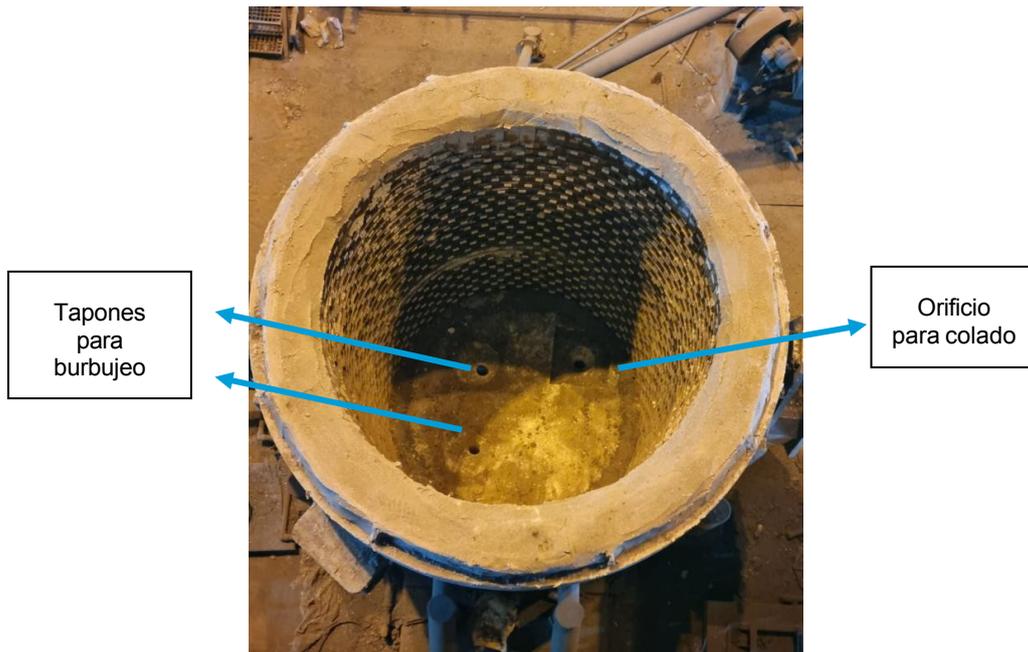


Figura 17. Vista superior del revestimiento de trabajo reconstruido a nuevo: ladrillo refractario en las paredes y hormigón castable en el piso.

3 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

3.1 RECOPIACIÓN DE DATOS

Para la realización de este trabajo, se reunió la información referente a todas las coladas realizadas durante el año 2019 más una parte correspondiente al mes de enero de 2020 (antes del período de Reparaciones Extraordinarias, llamado REX, en el cual se detiene toda la producción de la planta durante aproximadamente un mes) de 16 cucharas.

Los datos fueron obtenidos de diversas fuentes, la mayoría de éstos como información “cruda”, sin refinamiento, por lo que debieron ser interpretados y clasificados luego de su recepción.

Fueron consultadas diversas bases de datos correspondientes a varios sectores de la acería para obtener la información necesaria, que se describen a continuación.

3.1.1 Archivos generados automáticamente durante la producción

Se genera una serie de datos en automático para cada colada realizada. De esta base se extrajeron:

- Número de cuchara: esta cifra identifica a cada cuchara en operación. En Tenaris Siderca existen, al momento de la elaboración de este trabajo, 16 cucharas en operación. En la planta se puede identificar el número de la cuchara observando sus “brazos”, como muestra la **Figura 9**.
- Campaña de la cuchara: es un número que, como ya se mencionó previamente, corresponde al ciclo que realiza una cuchara desde que entra en operación hasta que se la retira para su reparación. Una campaña completa abarca, generalmente, entre 80 y 90 coladas. Si ocurre algún problema con el revestimiento refractario, como puede ser desgaste excesivo o caída de algún ladrillo por mal armado, la cuchara puede salir de operación antes de alcanzar esa cantidad de coladas. En contrapartida, también puede extenderse a algunas coladas más de 90 si su estado lo permite. Luego de este ciclo, la cuchara sale de servicio para la reparación del revestimiento con material refractario proyectable (por sobre el ladrillo desgastado) o para la demolición y reemplazo del ladrillo desgastado por nuevos. Entonces, una cuchara que salió de operación y finalizó su campaña número 24, por ejemplo, cuando vuelva al circuito operativo con los ladrillos de la pared de trabajo nuevos (ya sea con el

revestimiento de trabajo del piso nuevo o reparado, o también con el revestimiento de seguridad de la pared nuevo o reparado), lo hará con el número 25.

- Colada: un número que identifica a cada colada y permite realizarle el seguimiento completo para analizar todas las variables de proceso de los distintos sectores de acería. En el caso de Tenaris Siderca, es un número de 5 cifras.
- Fecha y hora a la que sangró la colada (desde el horno de arco eléctrico) en la cuchara.
- Peso Objetivo: también se le llama *Set Point*, y es el valor objetivo al que se debe sangrar la colada en la cuchara. Este valor es igual al que surge de la **Tabla 2**, siempre y cuando la cuchara no sufra una *bajada de Set Point*, en cuyo caso será inferior.
- Peso Colado Real: peso medido, en toneladas, por una balanza situada en el carro en el que se apoya la cuchara antes de recibir el acero que cuela el horno de arco eléctrico. Cuando la grúa apoya la cuchara vacía, la balanza mide su peso, pero luego se tara a cero automáticamente para poder registrar exclusivamente el peso colado real.

Existen otros datos que se registran de manera automática durante el proceso, que no fueron utilizados para este trabajo, pero que son de relevancia en la acería: temperatura del acero antes del sangrado, tiempo de acero en cuchara (medido como los minutos transcurridos desde que la cuchara recibe el acero del horno hasta que abre el orificio en su parte inferior para pasar el acero al distribuidor de la máquina de colada continua) kilogramos de ferroaleantes agregados al sangrado, oxidación del acero (medida como partes por millón de oxígeno disuelto en el baño y utilizada para estimar los kilogramos de aluminio que se deben agregar al acero durante el sangrado para su desoxidación), etc.

3.1.2 Datos obtenidos de fumistería

Fumistería es el nombre que recibe el sector que se encarga del armado y reparación de las cucharas. Es un servicio tercerizado por Tenaris Siderca. Cada zona de la cuchara (definidas en la **Figura 5**) tiene un desgaste diferente en operación y se repara con diferentes materiales bajo condiciones de armado y reparación específicas, como fue descrito en la sección 2.3.4.

Para cada cuchara y cada una de sus campañas, los encargados de los materiales refractarios informan si se utilizaron ladrillos nuevos o si se reparó la zona con hormigón proyectable. De tales informes se extrajeron los siguientes datos:

- Número de cuchara
- Número de campaña
- Estado del ladrillo para cada zona, que se indica con un número, de acuerdo a la siguiente descripción:
 - 1 = corresponde al revestimiento nuevo.
 - 2, 3, 4, etc. = designa al revestimiento desgastado, sobre el cual se ha proyectado hormigón refractario a modo de *reparación*. Esto se realiza debido a que este procedimiento tiene un costo menor que demoler y reemplazar por un revestimiento nuevo cada vez que finaliza la campaña de la cuchara. Dependiendo de la zona, se puede reparar una sola vez, para lo cual se usa el número 2 (primera proyección sobre el ladrillo de piso original o sobre el hormigón de seguridad de la pared original) o varias. En este último caso se usa desde el número 3, si es una segunda reparación y se asigna 4 en adelante para las proyecciones subsiguientes. Es importante remarcar que esta reparación no implica una merma en la vida de las cucharas, siendo la opción más rentable para la compañía.

3.1.2.1 Consideraciones acerca de los datos obtenidos de fumistería

Las zonas de la cuchara que están expuestas al contacto con el acero líquido son sólo el piso y la pared de trabajo, con lo cual los datos de ambas zonas fueron los relevados para evaluar el desgaste de la cuchara en función del armado de la cuchara.

El piso de trabajo puede estar construido con ladrillos nuevos, o bien puede estar reparado con hormigón refractario proyectable, como se mencionó anteriormente. Para referenciar estas dos condiciones se indican los números mencionados al inicio de este apartado. Cabe destacar que la reparación del piso de trabajo puede realizarse sólo una sola vez, luego de lo cual debe retirarse la cuchara para instalar ladrillos nuevos. Sin embargo, en algunas ocasiones puede realizarse una segunda reparación con material proyectable, por ejemplo, si la cuchara sale de operación con pocas coladas por desgaste excesivo en las paredes. En este trabajo, esta segunda reparación se

referenció también con el número 2, como si fuera la primera reparación, porque los casos fueron muy pocos.

Otro aspecto a destacar de la reparación del piso es que, cuando se proyecta el hormigón o se *enrasa*, la altura a la que queda el piso no es la misma que la que alcanza con el ladrillo nuevo, de 300 mm de espesor, sino que es un poco menor, aproximadamente entre unos 25 y 50 mm menos. Esto se debe a que se *enrasa* a la altura de lo que se conoce como *portabuza*, como muestra la **Figura 18**.

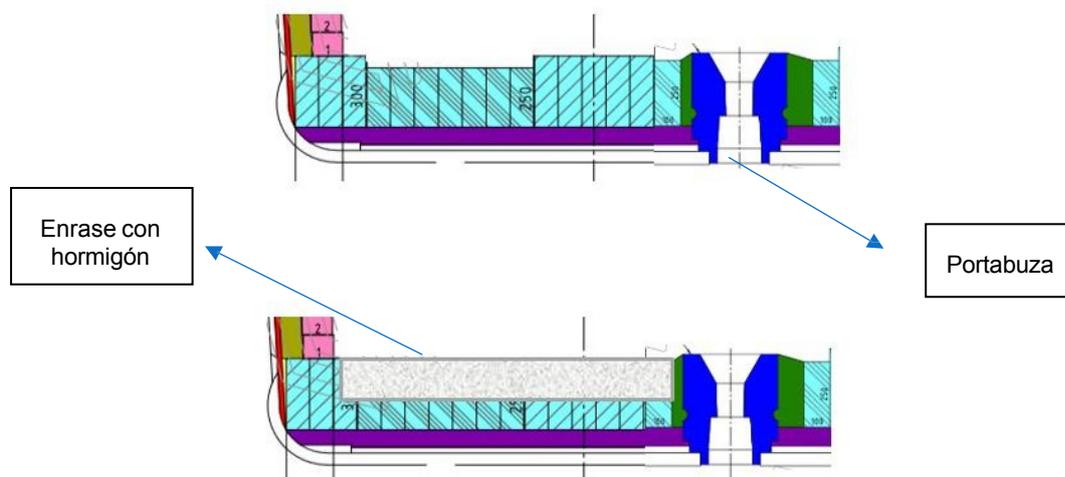


Figura 18. Esquema del piso nuevo de la cuchara (imagen superior) y del enrase con hormigón refractario a la altura del portabuza (imagen inferior).

Con el revestimiento de la seguridad de la pared sucede lo mismo, con la diferencia de que se pueden realizar varias reparaciones con hormigón refractario antes de que la cuchara sea retirada para que se demuelan por completo los ladrillos viejos y se reemplacen por nuevos. Aquí también se identificó el estado nuevo y las sucesivas reparaciones con números que van desde el 1 (revestimiento nuevo) hasta el 6 (5 proyecciones). Cabe destacar que los casos en los que se realizaron 5 reparaciones son muy pocos.

3.1.3 Datos de *nivel 1*

Estos datos se encuentran en los distintos sistemas de gestión de Tenaris Siderca, como se muestra en el ejemplo de la **Figura 19**. Los valores se registran de manera continua (generalmente cada un segundo) mediante un sensor, que los envía a un Controlador Lógico Programable (PLC), de forma tal que luego se obtienen los datos de a pares,

siendo uno de ellos el tiempo de registro, mientras que el otro es el que mide el sensor o adquirente de datos correspondiente, ya sea peso, temperatura, posición, etc.

El PLC es un dispositivo utilizado en la automatización de procesos industriales, que recibe señales de distintos tipos de sensores (peso, temperatura, presión, etc). Cuenta con un CPU con un programa interno, el cual procesa estas señales y envía órdenes a actuadores, que son elementos eléctricos que permiten realizar acciones como abrir una válvula (o regularla), mover una máquina de un lugar a otro, encender una luz, etc. También pueden enviar las señales recibidas a programas que realizan gráficos en línea de variables relevantes para el proceso y permiten realizar monitoreo, control y análisis de estos datos.

Se recurrió a estos datos para obtener la información sobre el peso de la cuchara vacía, un valor que permite medir el desgaste del ladrillo refractario a lo largo de la campaña. Como se mencionó en el apartado 3.1.1., cuando la cuchara se apoya en el carro de sangrado, la balanza a bordo del carro registra el peso de la cuchara vacía, pero luego automáticamente se tara a cero para poder medir el Peso Colado Real, sin conservar el valor previo en ningún reporte, ya que no es un dato que se utilice comúnmente en los análisis del sector. Pero, dada la relevancia para este trabajo, fue necesario extraer esta información.



Figura 19. Gráfico de datos de temperatura de un panel de refrigeración del horno vs tiempo calendario.

El software que contiene la información del peso de la cuchara vacía se usa en la compañía desde hace más de 30 años. En este programa, los datos almacenados se encuentran en pares “peso” – “tiempo”. El tiempo, por razones que se desconocen, está contabilizado en segundos a partir del día 1/1/1970 (se cree que es la fecha de creación o de inicio de recolección de datos del software utilizado).

Para convertir los datos de tiempo en fechas y horas reales se aplicaron fórmulas de corrección en Microsoft Excel, mediante las cuales se transformaron los valores de segundos a datos con formato *día/mes/año* y *horas:minutos:segundos*.

De esta manera, se obtuvieron pares de datos “peso de cuchara vacía” – “fecha y hora de medición”, que luego se emparejaron con otra base de datos para hacer la correlación con el Número de Colada, el Número de Cuchara y el Número de Campaña correspondientes a la medición de peso de cuchara vacía, ya que el número de colada es único e irrepetible para la campaña.

3.2 PROCESAMIENTO DE DATOS Y DEFINICIÓN DE VARIABLES RELEVANTES

Como sucede en muchas bases de datos de un proceso industrial, no toda la información resulta útil o se encuentra de forma adecuada para su análisis inmediato. Esto hace que se necesiten fórmulas y correlaciones para poder disponer de datos confiables y precisos.

En primer lugar, se dividió la información de la siguiente manera: número de cuchara, número de campaña, cantidad de coladas de la campaña.

- Número de cuchara: como ya se mencionó, hace referencia a cada cuchara en operación, cuyos números son: 25, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42 y 43.
- Número de campaña de la cuchara: como se estableció en la sección 3.1.1., es el número que identifica un ciclo completo desde que la cuchara entra al circuito operativo, con el revestimiento refractario nuevo o con reparación del mismo con material proyectable, hasta que sale de servicio para una nueva reparación o para su demolición y rearmado.
- Cantidad de coladas de la campaña: es el total de coladas que pasan por una cuchara a lo largo de una campaña, antes de que deba salir de operación para el cambio completo de los ladrillos de MgO-C que constituyen el revestimiento de trabajo de la pared. Este valor es un número que va desde el 1, para la primera colada de la campaña, hasta el valor correspondiente a la última colada de la campaña (generalmente, entre 80 y 90), por lo que no se debe confundir con el Número de Colada.

Se muestra en la **Tabla 4** un ejemplo resumido de la división de los datos para mejor comprensión. A cada una de las coladas de la campaña se la identifica con el *Número de Colada*, definido en 3.1.1.

| Numero de Cuchara | Número de Campaña | Cantidad de coladas por campaña |
|-------------------|-------------------|---------------------------------|
| 25 | 172 | 78 |
| 25 | 173 | 71 |
| 29 | 163 | 87 |
| 29 | 164 | 92 |
| 37 | 55 | 90 |
| 37 | 56 | 89 |

Tabla 4. Ejemplo de ordenamiento de los datos.

Con referencia a estos parámetros, se calcularon otros de relevancia para el trabajo de investigación. Para poder determinar cuántas toneladas de acero se colaron en cada una de las campañas de cada cuchara, se calculó el “Peso Colado” como la sumatoria del Peso Colado Real (mencionado en 3.1.1) en cada colada de la campaña. A su vez, se calculó el “Peso Seteado Ideal”, y el “Peso Seteado Real”, que serán explicados a continuación.

El “Peso Seteado Ideal” se obtiene de hacer la sumatoria de los pesos de la **Tabla 2** y representa las toneladas que debería cargar una cuchara durante toda su campaña, ideal y teóricamente, si no sufre un desgaste excesivo de los ladrillos refractarios.

El “Peso Seteado Real” es la sumatoria del Peso Objetivo (definido en 3.1.1) de cada colada de la campaña. Como ya se mencionó, si la cuchara no ha sufrido un desgaste acelerado, este valor será igual al que surge de la **Tabla 2** (curva de carga teórica): el “Peso Seteado Ideal”. Por el contrario, si una cuchara sufre un desgaste excesivo, como fue explicado en la sección 2.3.3.1, el operador del sector de cucharas modifica el valor objetivo a sangrar, reduciéndolo a uno en el cual el nivel de acero en la cuchara no interactúe con la zona degradada. Esto se traduce en menos toneladas que lo que la curva de carga teórica indicaría para la ubicación de la colada en la campaña.

El Peso Seteado, sea Ideal o Real, difiere del Peso Colado, ya que el primero representa las toneladas a las que se debe apuntar a colar en la cuchara, mientras que el segundo es el valor medido por la balanza a bordo del carro de sangrado. El sangrado es un proceso que realizan manualmente los operarios, en el cual deben mover o bascular el horno con el uso de un manipulador para trasvasar el acero desde el horno de arco eléctrico a la cuchara. El horno posee un orificio en la parte inferior, no centrado sino

excéntrico, a través del cual el acero “sangra” hacia la cuchara. Este orificio, comúnmente llamado por su denominación en inglés *Tap Hole*, se encuentra cerrado por una clapeta que se acciona hidráulicamente y se abre sólo en el momento del sangrado. Que el sangrado sea excéntrico permite no vaciar por completo el horno, ya que la altura del orificio es superior a la del fondo del horno y por ello se requiere ir basculándolo progresivamente (desde 3° hasta 12° en los hornos de Tenaris Siderca), hasta alcanzar el tonelaje requerido en la cuchara. También, el sangrado excéntrico permite que no ocurran pasajes de escoria del horno a la cuchara.

Al retornar el horno, no se hace hasta la posición en la cual trabaja (0°), sino que se lo bascula hasta un ángulo negativo (-8° aproximadamente), ya que esta es la forma de evitar que siga pasando acero por el orificio de sangrado. Durante el retorno del horno a esa posición, sigue pasando acero a la cuchara; la cantidad que pasa depende del diámetro del orificio de colado: como está construido de material refractario, va desgastándose con los sucesivos sangrados por la erosión producida por el acero que pasa a través del orificio. De esta manera, un *tap hole* nuevo tiene un pasaje de acero aproximado de 3 toneladas desde que se acciona el retorno, mientras que uno de vida avanzada puede alcanzar las 7 toneladas de pasaje durante el retorno. Este valor se tiene en cuenta por el operador ya que debe oprimir el botón de retorno antes de alcanzar el Peso Seteado Real, porque se alcanzará con el tonelaje que pase al bascular el horno hacia atrás.

La variabilidad en el pasaje de acero durante el retorno del horno y la reacción del operador para accionar el retorno en el momento justo son dos motivos por los cuales puede diferir el Peso Colado del Peso Seteado Real.

Luego del sangrado, el horno conserva un remanente de acero llamado “pie líquido”, que se deja para evitar que en el sangrado pase escoria del horno a la cuchara, además de brindar un aporte de energía extra para la fusión de la chatarra que será cargada en la siguiente colada.

En el **Anexo I** puede visualizarse el orificio de sangrado – *Tap Hole* – y el proceso de sangrado del horno.

3.3 BALANZA PARA EL PESAJE DE CUCHARAS Y ACERO LÍQUIDO SANGRADO

El Peso de la Cuchara Vacía fue el valor más relevante utilizado para este trabajo. Como se explicó anteriormente, se obtiene al posicionar la cuchara sin acero en el carro de sangrado, que posee a bordo una balanza. Si bien es el Peso Colado el dato más

relevante para la acería, se puede extraer el Peso de la Cuchara Vacía, ya que corresponde al valor previo a la tara. Distintos carros de sangrado (también llamados *carros porta cuchara*) se muestran en la **Figura 20**.

Las balanzas utilizadas en los carros de Tenaris Siderca son de la marca ABB, cuyo esquema se presenta en la **Figura 21**.

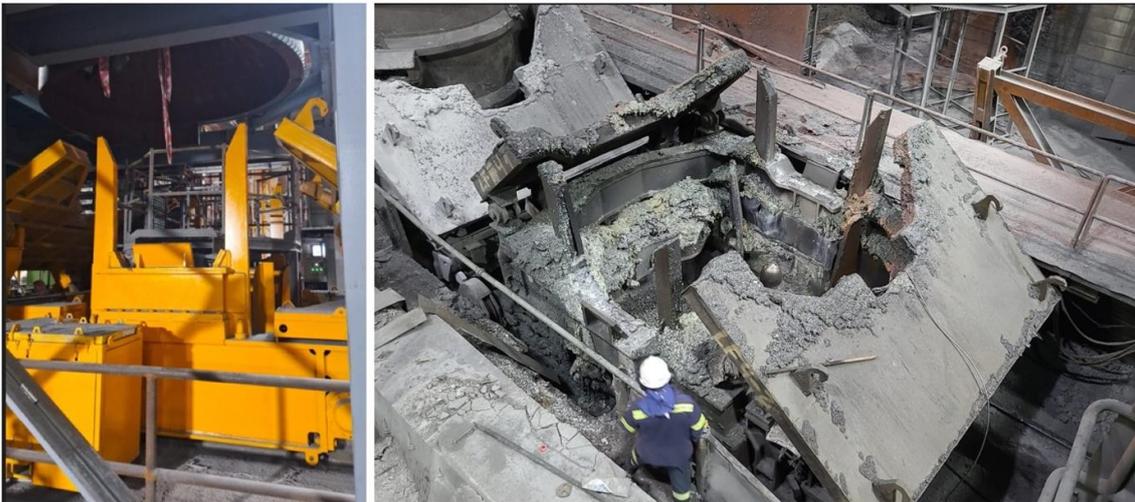


Figura 20. Carros porta cuchara.

Se compone de cuatro celdas de carga, una caja sumadora y una unidad de control o cabezal, desde el cual configura la balanza y en el que se puede ver el peso medido. Este valor luego es recibido por el PLC y se almacena en una base de datos.

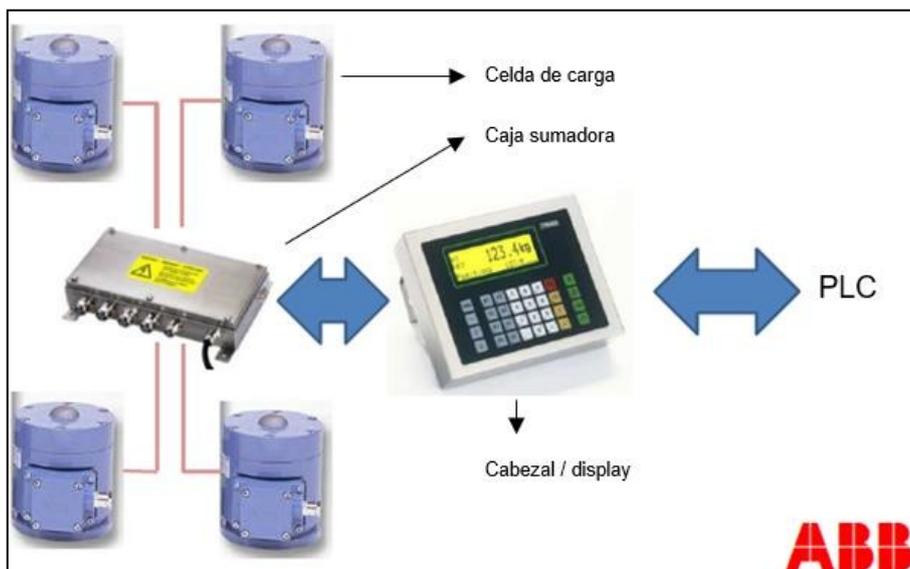


Figura 21. Esquema de balanza a bordo del carro de sangrado.

Las celdas reciben la carga mediante unas placas de presión de goma, y cuentan con un extensómetro en su interior. El extensómetro es un elemento que, ante una deformación, sufre una variación en su resistencia eléctrica. Gracias a este principio, la caja sumadora excita el circuito de cada celda con una tensión conocida, y luego mide la tensión que el extensómetro le retorna. Esta tensión depende de la resistencia eléctrica que, como ya se mencionó, varía con la deformación. De esta forma, la caja sumadora recoge las señales de las cuatro celdas y envía por comunicación una señal al cabezal, que de acuerdo a la característica de las celdas (dadas por el proveedor y calibradas para cada condición de carga), traduce el valor de tensión a un valor de peso.

Un esquema del interior de la celda de carga se presenta en la **Figura 22**. Además de contener el extensómetro en su centro, la celda completa es un desarrollo mecánico capaz de transmitir el esfuerzo de compresión hacia la zona de medición de forma tal de obtener una medición precisa. Debe asegurarse la ausencia de fuerzas laterales en el punto de aplicación de la carga, así como controlar que la placa de presión sea la adecuada para soportar la temperatura y carga a la que se va a someter. Además, como el peso medido es función de la medición de cuatro celdas, se debe controlar la verticalidad y el paralelaje entre ellas.

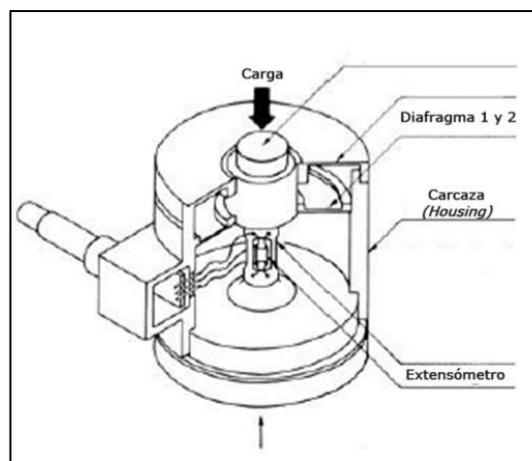


Figura 22. Esquema de una celda de carga.

La calibración de la balanza se lleva a cabo realizando lo que se conoce como medición de “cero y cien”. Primero se realiza una imposición del “cero” cuando el carro se encuentra sin carga, y luego se apoya una pesa patrón de peso conocido y se determina el “cien”; este procedimiento se realiza desde el cabezal o *display*. En Tenaris Siderca la calibración se hace cada dos meses, pudiendo realizarse otra dentro de ese período si se detectan o se sospecha de errores de medición. Además, periódicamente se hacen

controles e inspecciones del tendido de cables y limpieza de los apoyos de la cuchara sobre el carro de sangrado para evitar fuerzas laterales en la celda.

3.4 ORGANIZACIÓN DEL ANÁLISIS

El análisis de los datos se dividió en tres bloques. Cada uno abarcó un aspecto relevante en lo que se refiere a los diferentes parámetros operativos de la cuchara siderúrgica.

En el *Bloque #1* se analizó cómo afectan el armado y las reparaciones de la cuchara al peso de la cuchara vacía al inicio de la campaña.

En el *Bloque #2* también se evaluó el efecto del armado y las reparaciones de cuchara, pero en este caso en el desgaste gradual del revestimiento refractario de la cuchara en servicio, colada a colada. En este bloque se incluyó la caracterización en laboratorio de dos ladrillos de distintos proveedores utilizados en el armado de las cucharas, y una comparación del rendimiento en servicio de ambos.

En el *Bloque #3* se desarrolló el análisis de parámetros operativos como el Peso Colado, Peso Seteado Real e Ideal y Tamaño de Colada, con el objetivo de cuantificar las pérdidas productivas ocasionadas por las bajadas de nivel de acero en cuchara a lo largo de cada campaña.

Finalmente, se integraron los resultados obtenidos para cada bloque en una conclusión general que comprende también un análisis del impacto económico de los hallazgos de este proyecto, y algunas propuestas de mejora para implementar en planta.

3.4.1 Bloque #1: peso de la cuchara vacía

Como ya fue mencionado, el *peso de la cuchara vacía*, es decir, el peso de la cuchara cuando no posee acero líquido dentro, se extrajo específicamente de una de las bases de datos: los *datos de nivel 1*. De aquí se obtuvieron pares de datos “peso de cuchara (P_{CUCH})” – “fecha y hora de toma de medición”.

Este último parámetro permitió vincular P_{CUCH} con la base de datos mencionada en la sección 3.1.1. Aquí se indica, entre otras cosas, la fecha y hora de sangrado de la colada, y a qué cuchara y campaña pertenece.

También se definió el *orden de la colada en la campaña* (N_{COL}), ordenando todas las coladas que tenían el mismo Número de Cuchara y Número de Campaña de acuerdo a su fecha y hora de sangrado, y a partir de ahí, enumerándolas desde la primera colada de la campaña hasta la última.

En resumen, se definió qué coladas pertenecían a cada campaña de cuchara y también qué lugar ocupaban en dicha campaña.

Con estos datos se graficó el peso de la cuchara vacía en función del orden de la colada en la campaña (P_{CUCH} versus N_{COL}). De acuerdo con la tendencia manifestada por estos datos, los mismos se ajustaron mediante regresión lineal por el método de mínimos cuadrados. El valor de la pendiente de la recta (que resultó negativa en todos los casos) correspondió al desgaste del revestimiento refractario por colada, mientras que con el valor de la ordenada al origen se definió el peso de la cuchara vacía en el inicio de campaña.

Realizando la correlación entre el Número de Cuchara y Número de Campaña con los *datos obtenidos de fumistería*, se identificaron los casos donde el revestimiento era nuevo y donde se realizó una reparación, ya sea en el revestimiento de trabajo del piso o de la pared.

Luego, se compararon los valores de peso de cuchara vacía al inicio de campaña para cada caso, con el objetivo de determinar si existieron diferencias en lo que respecta al armado y la reparación del revestimiento de la cuchara.

En el apartado 4.1 se presentan y analizan los resultados obtenidos.

3.4.2 Bloque #2: desgaste del revestimiento refractario y comparación entre proveedores

En este caso, se evaluó la pendiente de los gráficos “Peso de cuchara vacía” vs “Orden de colada en la campaña” (P_{CUCH} versus N_{COL}), que representa el desgaste que sufre el revestimiento refractario de la cuchara en cada colada, dentro de cada campaña. En otras palabras, la pendiente mide cuántos kilogramos de revestimiento se “pierden” colada a colada.

Con la correlación con los *datos obtenidos de fumistería* se analizó si el desgaste fue diferente entre aquellas campañas que tuvieron revestimiento refractario nuevo respecto de aquellas en las que se realizó una reparación con hormigón refractario colable.

Además, se caracterizaron dos ladrillos refractarios provistos por diferentes proveedores de Tenaris Siderca, a los que se refiere en este trabajo como *Proveedor A* y *Proveedor B*. Finalmente, se comparó el desgaste determinado en cucharas revestidas con ladrillos de uno u otro proveedor, con el objetivo de comparar estos resultados con las diferencias y similitudes surgidas de la caracterización.

3.4.2.1 Caracterización de ladrillos refractarios de los distintos proveedores

Para la caracterización se evaluaron dos ladrillos sin uso (virgen) de los proveedores A y B, que se usan para el revestimiento de la línea de escoria de las cucharas en Tenaris Siderca. En las **Figura 23** y **24** se muestran ladrillos refractarios provistos por el Proveedor A y el Proveedor B, respectivamente.



Figura 23. Ladrillo refractario del Proveedor A.



Figura 24. Ladrillo refractario del Proveedor B.

En el **Anexo III** se incluyen las hojas técnicas de los ladrillos, provistas por cada proveedor, donde se informan las principales propiedades de cada producto.

Además, los ladrillos fueron caracterizados en el Instituto Argentino de Siderurgia (IAS), mediante las siguientes determinaciones [17,18]:

- Densidad global y porosidad aparente;
- Resistencia a la oxidación;
- Composición química por FRX;

- Composición mineralógica por DRX;
- Resistencia a la compresión en frío (CCS);
- Análisis térmico ATD-TG;
- Análisis microestructural por microscopía óptica y electrónica.

3.4.3 Bloque #3: cambios en la capacidad de carga de la cuchara

El objetivo de este bloque fue analizar comparativamente la curva real de carga de la cuchara y la curva teórica de carga (que fue presentada previamente en la **Figura 8**) con respecto a la curva real de carga. Se evaluó el impacto de las bajadas de nivel a lo largo de cada campaña de cada cuchara, tanto económico como productivo (en toneladas de acero). Esto es importante ya que el objetivo de la acería es que el Peso Objetivo de cada colada sea igual al que define la curva de carga teórica durante toda la campaña, y cuando este Peso Objetivo es menor (en la práctica se conoce a esto como *bajada de set point* o *bajada de nivel*) se generan pérdidas de toneladas de acero que, idealmente, se espera que se cuelen.

Para el análisis se calculó la diferencia entre el “Peso Colado” y el “Peso Seteado Real”. Se presentaron las siguientes situaciones:

- *Peso Colado > Peso Seteado Real*, implica una “ganancia” en toneladas por colada. Esto no es positivo, ya que, si el *Peso Colado* es mayor que el *Peso Seteado Real* en más de una tonelada (que es el valor admisible), puede que el operador encargado de colar el acero desde el horno en la cuchara haya cometido un error en la maniobra de colado. Trabajar con alto nivel de acero en cuchara “desplaza” la fila de ladrillos donde se da la interacción del acero con la escoria. El *Peso Seteado* tiene en cuenta que esta interacción se produzca en determinadas filas de ladrillos. Si se cuela con un nivel de acero más alto al establecido, se puede producir desgaste acelerado por involucrar a los ladrillos de la parte superior de la cuchara, denominados “de cierre”, cuyo diseño no es el mismo que los que conforman la línea de escoria. En el caso extremo, pueden ocurrir rebalses por exceso de nivel de acero. Una diferencia menor a una tonelada es admisible, porque el nivel de acero, si bien es mayor, continúa sobre la misma línea de escoria.
- *Peso Colado = Peso Seteado Real* ($\pm 0,1$ toneladas, dado que el equipo de medición tiene una precisión de 1 dígito decimal) implica que no hubo errores en el colado y que no se perdió carga.

- *Peso Colado* < *Peso Seteado Real*, el operador probablemente detuvo antes el colado desde el horno. Como se mencionó en la Sección 3.2, es difícil alcanzar el peso exacto por la variabilidad en el pasaje de acero durante el retorno del horno. Puede ocurrir también que el operador accione el retorno tempranamente (por error o falta de atención), o que varíe el desgaste en el orificio de colado.

Además de calcular la diferencia entre el *Peso Colado* versus el *Peso Seteado Real*, que permite medir la eficiencia de la operación de colado de acero en la cuchara, se calculó la pérdida (en toneladas de acero) ocasionada por realizar una *bajada de Set Point* de la cuchara (explicado en la sección 2.3.3.1), es decir, *Peso Seteado Ideal* menos *Peso Seteado Real*. Este valor es de gran importancia ya que permitió medir la pérdida de eficiencia ocasionada por bajar el objetivo de carga.

Durante la realización de este trabajo, se observó que la curva de carga presentada en la **Tabla 2** mantenía constante el valor de *Peso Objetivo* a partir de la colada número 55 de la campaña. Al investigar las causas se determinó que se debía, principalmente, a usos y costumbres de la planta. Entonces, de acuerdo con el desgaste gradual que sufre la cuchara a lo largo de su campaña, se planteó la posibilidad de aumentar también el *Set Point* hacia el final de la campaña. De esta forma, se diseñó una prueba de planta con una nueva curva de carga, presentada en la **Tabla 5**, en la cual se modificaron los valores de *Set Point* a partir de la colada número 50. Los criterios para establecer los nuevos valores fueron dos: (1) que el peso total que puede levantar la grúa de Tenaris Siderca no puede exceder las 130 toneladas (este peso se compone del de la cuchara vacía, el cual para una cuchara nueva es de aproximadamente 43 toneladas, la tapa, que pesa entre 2 y 3 toneladas, y el acero líquido dentro de la cuchara) y (2) que deben quedar 50 centímetros libres desde el nivel que alcanza el acero hasta el límite superior de la cuchara, delimitado por las platabandas. Una vez definidas las condiciones de contorno, se utilizó un software propiedad del equipo de Investigación y Desarrollo de Tenaris Siderca que permitió, con estas restricciones y definiendo una tasa fija de desgaste de la cuchara, diseñar una curva en la cual el *Peso Seteado Ideal* sea el máximo posible.

Dado que durante la prueba de planta, el nivel de acero en la cuchara se mantuvo entre los ladrillos de la línea de escoria, se optó por reemplazar a la curva anterior (que se presentó en la **Tabla 2**) por esta nueva configuración.

| Coladas de la campaña | Set Point [t] |
|-----------------------|---------------|
| 1 a 9 | 75 |
| 10 a 14 | 76 |
| 15 a 19 | 77 |
| 20 a 24 | 78 |
| 25 a 29 | 79 |
| 30 a 34 | 80 |
| 35 a 39 | 81 |
| 40 a 44 | 82 |
| 45 a 49 | 83 |
| 50 a 59 | 84 |
| 60 a 64 | 84.5 |
| 65+ | 85 |

Tabla 5. Modificación de curva de carga original, provista en la Tabla 2.

En este bloque, entonces, se calculó la ganancia obtenida a lo largo de la campaña de la cuchara para esta nueva curva de carga teórica (**Tabla 5**), comparándola con la anterior (**Tabla 2**).

Para evaluar la eficacia de la modificación en la curva de carga teórica, se calculó el valor de *Tamaño de Colada*. Este parámetro se define como el promedio de acero líquido en cuchara por colada, y se calcula para un período de tiempo determinado. En este caso se hizo para los ejercicios contables 18-19, 19-20, 20-21, 21-22 y 22-23. Los ejercicios contables en Tenaris Siderca comienzan en julio de un año y terminan en junio del próximo. Entonces, el ejercicio 18-19 abarca desde el 1° de julio del 2018 al 30 de junio de 2019. En este trabajo, el tamaño de colada se calculó no sólo por ejercicio, sino también por cuchara, y se analizó cómo se modificó el parámetro luego de la introducción de la curva de carga teórica modificada (**Tabla 5**).

El Tamaño de Colada es uno de los parámetros más monitoreados por la dirección de Tenaris. Esto se debe a que, dado que los tiempos de procesamiento en el horno de arco eléctrico y el horno de afino son prácticamente los mismos para los distintos tonelajes que puede tener una cuchara, un mayor tamaño de colada implicará mayor productividad. Para dimensionar el impacto económico del tamaño de colada, basta con el siguiente cálculo: por mes se producen alrededor de mil coladas entre los dos hornos de acería, y si el tamaño de colada cambia de 80.0 a 79.9 toneladas de un mes al siguiente, a un valor estándar de US\$600 por tonelada de acero, se “pierden” US\$60.000.

4 RESULTADOS

4.1 BLOQUE #1 - PESO DE LA CUCHARA VACÍA

Con los parámetros P_{CUCH} y N_{COL} se construyeron gráficos “peso de cuchara vacía” versus “número de colada en la campaña” para cada campaña de cada cuchara, como se muestra en la **Figura 25** para la campaña 175 de la cuchara 28. La regresión lineal por mínimos cuadrados de los puntos del gráfico evitó que la ausencia de datos de peso de cuchara vacía para uno de los hornos afectara el análisis.

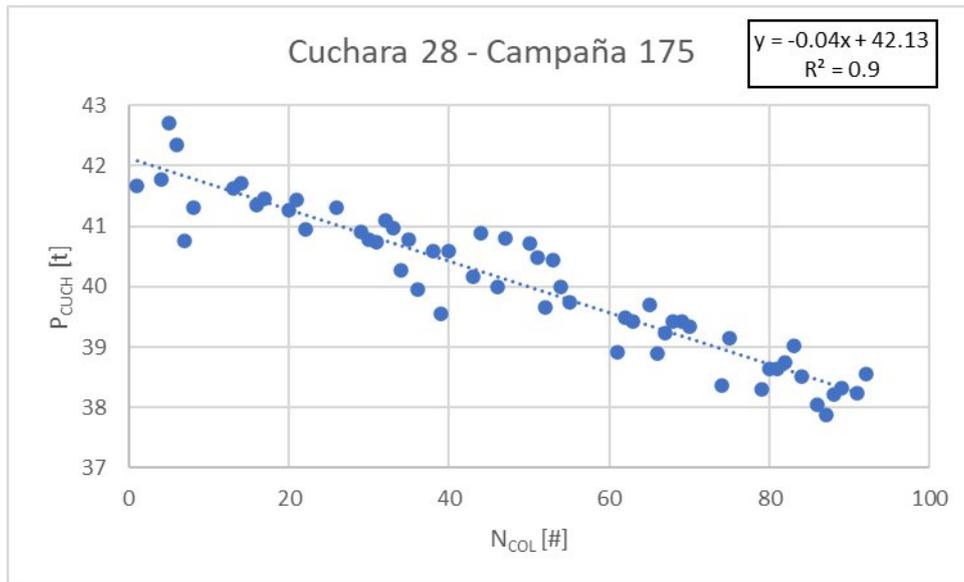


Figura 25. Peso de cuchara vacía vs Orden de colada en la campaña para la cuchara 28, campaña 175; la línea punteada corresponde a la de ajuste.

De la línea de ajuste se extrajeron los valores de la pendiente y la ordenada al origen. Con estos valores y los datos de *fumistería*, se construyó la **Tabla 16** del **Anexo IV**, que relaciona, entre otras variables, la pendiente y la ordenada al origen con el régimen de armado de la cuchara (piso y pared nuevos o reparados) para cada campaña de cuchara.

El valor promedio de R^2 fue de 0.7, con una desviación estándar de 0.1. Este valor se puede explicar por dos motivos principales: el error asociado al dato del peso de cuchara vacía (calibración de las balanzas, diferencias entre las distintas carcasas de las cucharas, casos particulares de cucharas sucias con escoria en la parte superior, etc.), y a que el desgaste no sólo depende del orden de la colada en la campaña sino de las condiciones específicas en las que se llevó a cabo (principalmente el tiempo, la

temperatura de tratamiento y la composición de la escoria). Como los valores de desgaste obtenidos son en decenas de kilogramos por colada cuando las cucharas vacías pesan entre 40 y 43 toneladas, tanto el valor como la desviación estándar de R^2 se consideraron aceptables.

El valor de la ordenada al origen se consideró equivalente al peso de la cuchara vacía antes de que entre en operación. El análisis de este parámetro en función de los diferentes casos de reparación de revestimiento que se mencionaron anteriormente, permitió evaluar aspectos referentes a la construcción de la cuchara, y si tienen algún efecto en el peso que registra la balanza.

En primer lugar, se evaluó el efecto del estado de reparación del piso de trabajo en el peso de la cuchara vacía. Se separaron los valores de ordenada al origen obtenidos de las curvas “peso de cuchara vacía” vs “orden de colada en la campaña” en dos grupos. El primero corresponde a las campañas en las que el piso de trabajo de cuchara estaba reconstruido a nuevo, referenciadas con un número 1; mientras que el segundo incluye aquellas campañas en las que se había llevado a cabo la reparación del piso con hormigón refractario (también llamado *recapado*), identificadas con el número 2. Posteriormente, se promediaron los valores de las ordenadas al origen dentro de cada grupo obteniéndose los resultados reportados en la **Tabla 6**, que se muestra a continuación:

| Piso | Ordenada al origen [t] | Desviación Estándar [t] |
|------|------------------------|-------------------------|
| 1 | 42.8 | 0.8 |
| 2 | 42.3 | 0.9 |

Tabla 6. Variación del peso de cuchara vacía según el estado de reparación de piso.

Como ya se mencionó en la sección 3.1, la reparación del piso se hace a la altura del portabuza, lo cual genera una merma en aproximadamente 25 – 50 mm en comparación con la altura que alcanzan los ladrillos nuevos recién colocados.

Para calcular cuánto peso significa esa pérdida, se realizó primero el cálculo del volumen en la *Ecuación 4*. Se consideró una densidad (ρ) del hormigón refractario usado en la reparación de 3000 kg/m³ y el diámetro (D) de la cuchara en esa zona, de 2.12 metros. Este es el diámetro establecido por el plano de construcción de las cucharas de Tenaris Siderca para la zona del piso de trabajo. El peso perdido por el enrase se muestra en la *Ecuación 5*.

$$Volumen = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * H = \pi * (1.06m)^2 * 0.05m = 0.176m^3 \quad (Ecuación 4)$$

$$Peso\ perdido\ por\ engrase = \rho * V = 3000 \frac{kg}{m^3} * 0.176m^3 = 529.5kg \quad (Ecuación 5)$$

Esta diferencia es coincidente con la que se obtiene de restar los valores de Peso de Cuchara Vacía al inicio de la campaña de la cuchara (la ordenada al origen) entre las cucharas con piso nuevo (1) y las cucharas con piso reparado (2), calculada en la *Ecuación 6*:

$$Diferencia = 42.8\ ton - 42.3\ ton = 0.5\ ton \quad (Ecuación 6)$$

En este primer análisis, se observó entonces que las cucharas pierden 500kg de peso cuando se repara su piso de trabajo. Esto ocurre por el engrase a la altura de la buza, que disminuye el espesor del piso de trabajo en aproximadamente 50mm. Los resultados teóricos y los medidos en la planta avalan esta conclusión. Esto demuestra que una cuchara con el piso reparado aumenta su capacidad de carga en aproximadamente media tonelada.

En segundo lugar, se evaluó el efecto del armado y reparación de la pared de seguridad de la cuchara. Para descartar el efecto del armado del piso, se trataron por separado los datos para las condiciones de piso nuevo (identificado con el número 1) y reparado (número 2).

Se confeccionaron gráficos de “peso de cuchara vacía” vs “número de reparaciones de pared”, uno para cada estado del piso (1 ó 2), que se muestran en la **Figura 26** y la **Figura 27**, respectivamente. Cada una de las figuras mencionadas contiene también la ecuación que surge de realizar un ajuste lineal por el método de mínimos cuadrados a los valores obtenidos.

Los promedios graficados en la **Figura 26** y la **Figura 27** se reportaron en la **Tabla 7** y la **Tabla 8**, respectivamente, junto con la desviación estándar de cada valor.

Además, en la **Tabla 9** se reportan los valores de pendiente y ordenada al origen que surgen del ajuste lineal por mínimos cuadrados.

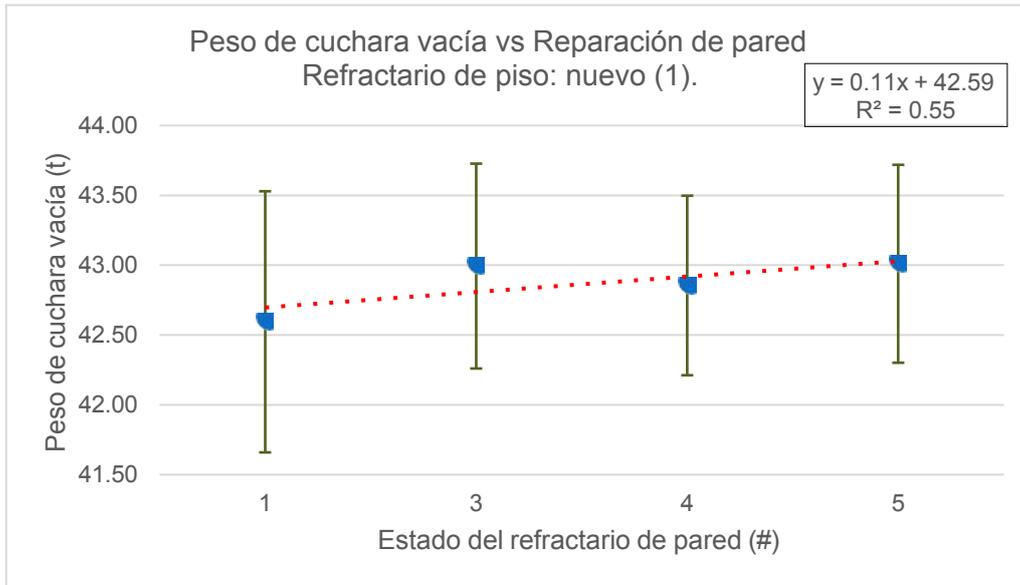


Figura 26. Peso de cuchara vacía en función del número del estado del refractario de pared cuando el piso se encuentra nuevo (1).

| Estado del refractario de pared | Ordenada al origen (peso de cuchara vacía) [t] | Desviación estándar [t] |
|---------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|
| 1 (nuevo) | 42.6 | 0.9 |
| 3 | 43 | 0.7 |
| 4 | 42.8 | 0.6 |
| 5 | 43 | 0.7 |

Tabla 7. Valores de peso de cuchara vacía, junto con su desviación estándar (utilizados para la gráfica de la Figura 26).

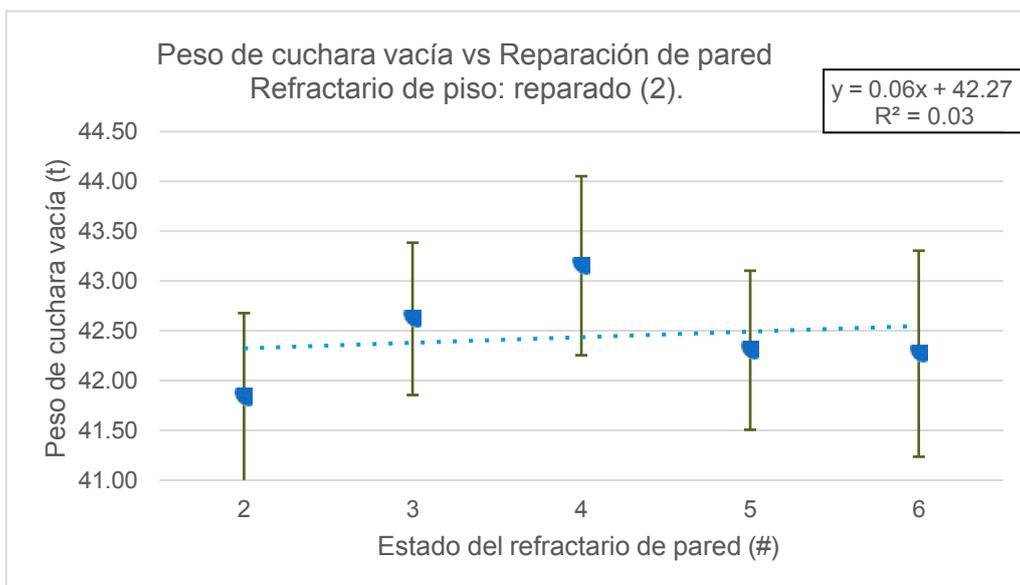


Figura 27. Peso de cuchara vacía en función del número del estado del refractario de pared cuando el piso se encuentra reparado (2).

| Estado del refractario de pared | Ordenada al origen (peso de cuchara vacía) [t] | Desviación estándar [t] |
|---------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|
| 2 (una reparación) | 41.8 | 0.8 |
| 3 | 42.6 | 0.8 |
| 4 | 43.1 | 0.9 |
| 5 | 42.3 | 0.8 |
| 6 | 42.3 | 1.0 |

Tabla 8. Valores de peso de cuchara vacía, junto con su desviación estándar (utilizados para la gráfica de la Figura 27), y la cantidad de datos para cada estadío (cantidad de campañas).

| | Pendiente [t/reparación] | Ordenada [t] |
|---------------|--------------------------|--------------|
| Piso 1 | 0.11 | 42.6 |
| Piso 2 | 0.05 | 41.3 |

Tabla 9. Parámetros del ajuste lineal de los datos graficados en las Figuras 25 y 26.

No hay una tendencia clara en la dependencia del peso de la cuchara con el estado de la pared, sobre todo cuando ya se han hecho reparaciones en el piso, lo cual impide hacer algún ajuste de los datos experimentales. La variabilidad de los datos se debe a que las reparaciones se realizan de forma manual, a diferencia de cuando la cuchara es totalmente nueva, que se hace por plano. Se puede interpretar del análisis de los gráficos que la primera reparación de pared es menos “profunda” que las posteriores, para cualquier estado del piso, dado que el peso de la cuchara vacía es inferior para la primera reparación que para las reparaciones posteriores. Esto puede deberse a que, a partir de la segunda reparación de pared, se agrega material por demás para asegurar que la cuchara reparada no sufra problemas, debido a los grandes inconvenientes operativos y económicos que puede traer una reparación deficiente. Entonces, la cuchara vacía pesa más a partir de la segunda reparación simplemente porque se proyecta mayor cantidad de hormigón refractario.

Consecuentemente, no se puede afirmar que el efecto de las reparaciones de pared en el peso de la cuchara vacía sea distinto cuando el piso es nuevo o reparado. Muy probablemente, el carácter artesanal del proceso de reparación hace que el resultado en sí sea variable e impide que los datos sigan una tendencia clara.

De esta forma, se puede concluir que las reparaciones de pared no afectan significativamente el peso de la cuchara vacía y, consecuentemente, su volumen interno, más allá del leve incremento observado a medida que aumentan las reparaciones de la pared refractaria.

4.2 BLOQUE #2 – DESGASTE DEL REVESTIMIENTO REFRACTARIO

Partiendo de los mismos gráficos analizados en el Bloque #1, esta vez el enfoque se puso en el valor de la pendiente del ajuste lineal, es decir, el valor de desgaste del revestimiento por colada. Como ya se mencionó anteriormente, no existen referencias bibliográficas sobre análisis de este tipo para poder hacer comparaciones, por lo que los resultados se interpretaron y compararon junto con las prácticas de planta y suposiciones teóricas.

La **Tabla 10** reporta los valores de desgaste de acuerdo con los distintos regímenes de reparación de las cucharas. Estos valores surgen de agrupar las distintas campañas de cuchara de acuerdo a su estado de reparación del revestimiento refractario, y, una vez realizada esta separación, promediar los valores obtenidos de desgaste (pendiente) para cada grupo.

| Cuchara | Desgaste [t/col] | Desviación Estándar [t/col] |
|---------------------------|------------------|-----------------------------|
| Nueva | 0.042 | 0.008 |
| Piso nuevo pared reparada | 0.04 | 0.01 |
| Piso y pared reparados | 0.042 | 0.007 |

Tabla 10. Valor de desgaste en función de la reparación de la cuchara.

No se encontraron diferencias significativas en el desgaste en función de las reparaciones realizadas en el piso y las paredes, lo cual está dentro de lo esperable.

4.2.1 Resultados de la caracterización de los ladrillos refractarios

Los resultados obtenidos en la caracterización de los ladrillos de los dos proveedores evaluados se presentan en la **Tabla 11**.

| | | Unidad | Proveedor A | Proveedor B |
|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------|-------------|
| Densidad global | Virgen | [g/cm ³] | 2.91 | 2.93 |
| | 1150°C, 4 h | [g/cm ³] | 2.83 | 2.86 |
| Porosidad aparente | Virgen | [%v/v] | 4.2 | 3.3 |
| | 1150°C, 4 h | [%v/v] | 10.7 | 8.8 |
| Espesor decarburado (1150°C, 4 h) | | [mm] | 8.5 | 6.7 |
| Resistencia a la compresión | Virgen | [MPa] | 27.5 | 21.5 |
| | 1150°C, 4 h | [MPa] | 21.3 | 13.6 |
| Contenido de C (950°C) | | [%p/p] | 14.9 | 15.1 |
| Partículas MgO | Proporción sinterizada | [%] | 20 | 20 |
| | Tamaño de grano | [µm] | 80 – 350 | 100 – 350 |
| | Proporción electrofundida | [%] | 80 | 80 |
| | Tamaño de grano | [µm] | 350 – 1400 | 350 – 1300 |
| | Relación CaO/SiO ₂ | | 1.1 – 1.8 | 0.8 – 2 |
| Antioxidantes | | | Al | - |

| | | | |
|-------------------------------------------------|--------|------|------|
| Pérdida de masa por pirólisis de la liga resina | [%p/p] | 4.6 | 2.3 |
| Pérdida de masa por oxidación del grafito | [%p/p] | 11.7 | 12.1 |

Tabla 11. Datos de la caracterización de los ladrillos de ambos proveedores.

El análisis de los difractogramas (**Figuras 28 y 29**) confirmó en ambas muestras la presencia de picos de fases cristalinas comunes: óxido de magnesio (MgO), carbono (grafito) y merwinita (CaMgSiO_4). En ambos casos, periclasa y grafito son las fases cristalinas principales. Como diferencia principal, sólo en el ladrillo del Proveedor A se identificaron picos correspondientes al aluminio usado como antioxidante.

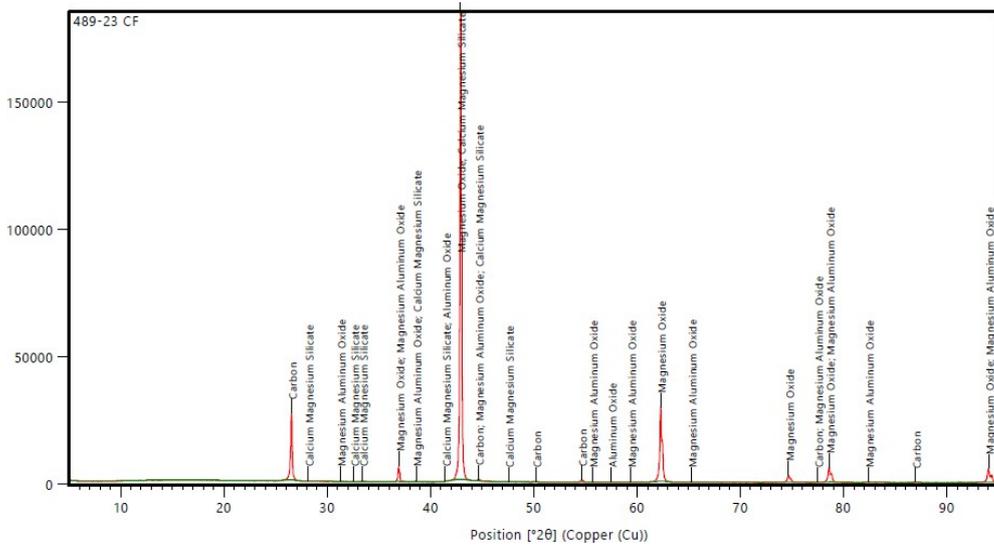


Figura 28. Difractograma del ladrillo del *Proveedor A*.

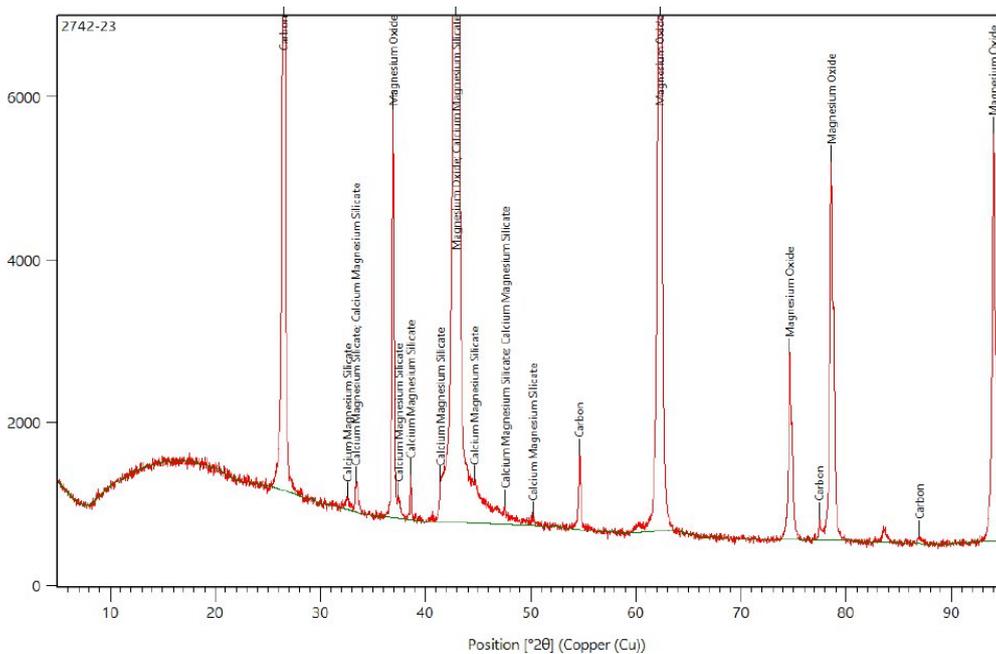


Figura 29. Difractograma del ladrillo del *Proveedor B*.

A pesar de las diferencias en algunos componentes, como la presencia de antioxidantes en el ladrillo del *Proveedor A*, los valores de densidad tanto para los ladrillos vírgenes como luego de un coquizado por 4 horas a 1150°C arrojaron valores semejantes en ambos casos. Si bien la porosidad abierta es algo mayor en el ladrillo del *Proveedor A*, lo cual podría ser la causa del mayor espesor decarburado, el aumento de la porosidad luego de la coquización también fue similar en los dos ladrillos analizados, resultando entre 1.5 y 1.6 veces mayor que la original.

Otro aspecto común es la distribución del tipo de las partículas de MgO presentes en el ladrillo: 20% de magnesia sinterizada y 80% de magnesia electrofundida, cuyos tamaños varían entre 100 y 350 µm y de 350 a 1300 µm (llegando a 1400 µm en el ladrillo del *Proveedor A*), respectivamente.

Finalmente, se realizó una comparación de los valores de desgaste de las cucharas revestidas con ladrillos refractarios del *Proveedor A* y aquellas revestidas por ladrillos del *Proveedor B*. Con este objetivo se promediaron todas las campañas de las cucharas construidas con ladrillos del *Proveedor A*, por un lado, y todas las campañas de cucharas armadas con ladrillos del *Proveedor B*, por el otro (sin considerar el estado de la reparación de la cuchara). En la **Tabla 12** se reportan los resultados obtenidos.

| Proveedor | Pendiente [t/col] | Desviación estándar [t/col] | Ordenada [t] | Desviación estándar [t] |
|-----------|-------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|
| A | -0.043 | 0.011 | 42.6 | 0.9 |
| B | -0.041 | 0.005 | 42.8 | 0.7 |

Tabla 12. Valor de desgaste (pendiente) y peso de cuchara vacía (ordenada) por proveedor.

Como se observa en los datos de la **Tabla 12**, el desgaste no varía significativamente cuando cambia el proveedor del ladrillo. La diferencia de solamente 2 kg en el desgaste por colada es prácticamente nula dada la desviación estándar de las pendientes. Este valor también se encuentra dentro de lo esperable para este trabajo.

De esta forma, no existen diferencias entre los dos proveedores de ladrillos refractarios del mismo tipo, al menos en el desgaste por colada y el peso de la cuchara vacía. Considerando los resultados de la caracterización de los ladrillos, se concluye que la adición de aluminio, que se presenta como la principal diferencia entre los dos productos, no parece afectar significativamente el desgaste del revestimiento, lo cual posiblemente tenga relación con su mayor porosidad abierta y el mayor espesor decarburado que se determinó en este material.

Estos resultados concuerdan con que, si bien cada proveedor aplica su tecnología y capacidad de producción de manera de generar un producto que se destaque por sobre el resto, no es común que dos productos ofrecidos por diferentes proveedores para la misma aplicación tengan diferencias significativas en su comportamiento.

La mayoría de las veces, la elección de uno u otro proveedor responde a otros factores como: rapidez en la entrega del producto, presencia de fábricas o centros logísticos del proveedor en áreas cercanas, respuesta ante reclamos, asistencia técnica, provisión de productos para varias partes del proceso y también la experiencia propia de la compañía con el proveedor a lo largo del tiempo.

4.3 BLOQUE #3 – CAMBIOS EN EL SET POINT DE CARGA DE LA CUCHARA

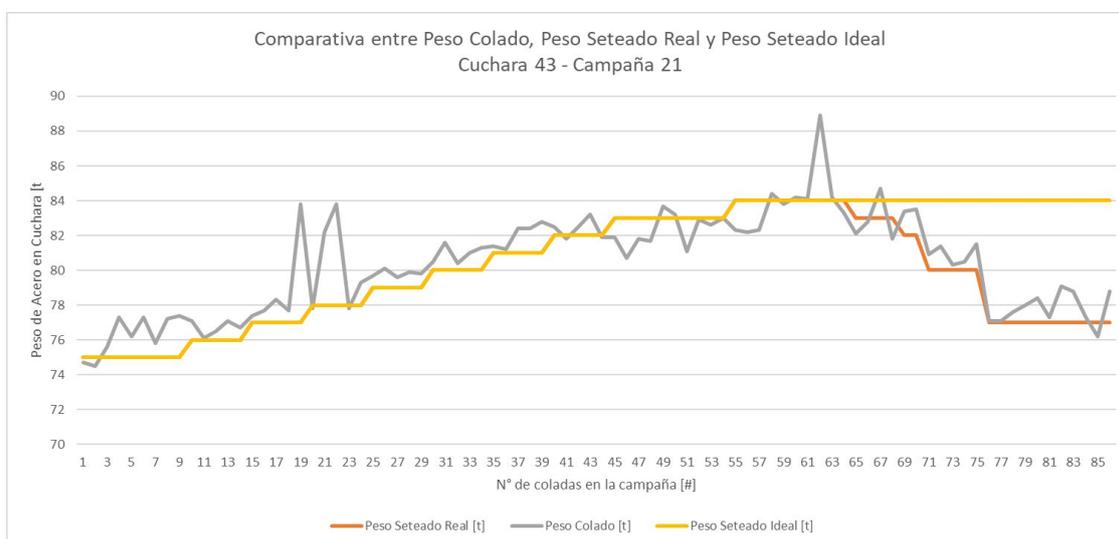


Figura 30. Gráficos de Peso Colado, Peso Seteado Real y Peso Seteado Ideal, para la campaña 21ª de la cuchara 43.

En la **Figura 30** se presentan las curvas de Peso Seteado Ideal, (la que surge de la **Tabla 2**), Peso Seteado Real y Peso Colado para el caso particular de la campaña N° 21 de la cuchara 43. La diferencia entre la curva amarilla (Peso Seteado Ideal) y la naranja (Peso Seteado Real) se da a partir de la colada N°65, cuando se realiza una bajada de set point y el Peso Seteado pasa de 84 toneladas (Ideal) a 83 toneladas (Real). De ahí en adelante, se producen sucesivas bajadas de nivel, llegando el Peso Seteado a 80 toneladas en la colada número 71 de la campaña, y luego vuelve a bajarse el set point a 77 toneladas en la colada número 76, manteniéndose con ese valor hasta que la cuchara sale de servicio, con 86 coladas. Esto muestra que el Peso Seteado Real puede ser diferente para cada cuchara, ya que en este caso la primera bajada de nivel ocurrió en la colada N°65 de la campaña, mientras que en el caso de la **Tabla 3** ocurrió

en la colada N°34. La suma de estas diferencias para todas las campañas de cada cuchara dio lugar a la **Tabla 13**. Otros gráficos como los de la **Figura 30** se presentan en el **Anexo V**.

| Cuchara [#] | Peso Seteado Real – Peso Seteado Ideal [t] | Peso Colado - Peso Seteado Real [t] |
|--------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|
| 25 | -557 | 227 |
| 28 | -145 | 232 |
| 29 | -615 | 378 |
| 30 | -432 | 240 |
| 31 | -1040 | 365 |
| 33 | -781 | 342 |
| 34 | -1066 | 288 |
| 35 | -897 | 412 |
| 36 | -322 | 266 |
| 37 | -734 | 255 |
| 38 | -660 | 396 |
| 39 | -933 | 359 |
| 40 | -365 | 297 |
| 41 | -305 | 190 |
| 42 | -1233 | 328 |
| 43 | -426 | 197 |
| Total | -10511 | 4772 |

Tabla 13. Diferencias entre los pesos de cuchara analizados.

Los resultados arrojaron una pérdida, en todo el período evaluado, de más de 10000 toneladas de acero por las reiteradas bajadas de set point. Por otra parte, aunque parezca que se “recuperaron” 4772 toneladas por haber colado un tonelaje mayor al seteado, este valor es engañoso, porque, como se mencionó anteriormente, sangrar a una cuchara más cantidad de acero que el objetivo (lo que se llama en la práctica “colada con alto nivel”), puede generar futuras bajadas de nivel de acero en cuchara por desgaste acelerado del refractario en la zona de interacción con la escoria. En la **Figura 31** se muestran dos cucharas sangradas correctamente, mientras que en la **Figura 32** se muestran otras dos cucharas sangradas con alto nivel de acero. En esta última figura, la imagen de la izquierda muestra un caso de rebalse de la escoria por alto nivel del acero, mientras que en la de la derecha se ve la zona de interacción acero/escoria en contacto con los ladrillos de cierre de la cuchara, que no son de la misma calidad que los de la línea de escoria.



Figura 31. Cucharas con nivel de acero adecuado.

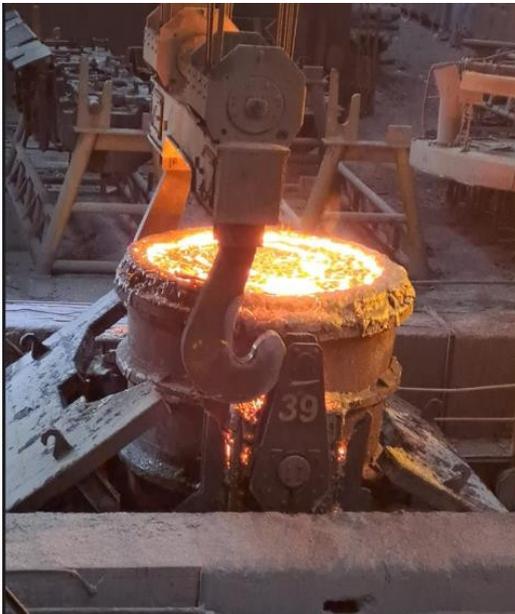


Figura 32. Cucharas con alto nivel de acero: rebalse (izquierda) y zona acero/escoria en contacto con los ladrillos de cierre (derecha).

Con respecto al análisis del impacto de la modificación en la curva de carga original, en la **Tabla 14** se muestran los valores de *Tamaño de Colada* (toneladas de acero líquido por colada promedio) por cuchara, divididos por ejercicio contable de Tenaris Siderca. Desde el ejercicio 21-22 la curva de carga pasó de la original, reportada en la **Tabla 2** a la modificada (**Tabla 5**). De acuerdo con los datos de la **Tabla 14**, no se produjeron cambios en el tamaño de colada por la implementación de la nueva curva de carga. Esto es un indicio de que, si bien en la totalidad de la campaña se ganan teóricamente más toneladas con esta nueva modificación, el impacto de la modificación es bajo en comparación con el impacto producido por los eventos que originan las bajadas de set

point en una cuchara. Se presentan algunos números comparativos al final de este bloque.

De hecho, en el primer ejercicio en que se introdujo la modificación disminuyó el Tamaño de Colada total en 0.53 toneladas, mientras que el ejercicio 22-23 subió 1.12 toneladas con respecto al ejercicio previo. En la **Figura 33** se muestra la evolución por cuchara del tamaño de colada.

| Cuchara [#] | Acero líquido promedio [t] por ejercicio | | | | |
|--------------|------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 18-19 | 19-20 | 20-21 | 21-22 | 22-23 |
| 25 | 80.17 | 79.75 | 79.56 | - | - |
| 28 | 81.32 | 81.39 | - | - | - |
| 29 | 80.45 | 80.45 | 79.23 | 78.47 | 79.64 |
| 30 | 80.37 | 80.16 | 78.08 | 78.52 | 79.66 |
| 31 | 79.96 | 80.07 | 79.42 | 78.95 | 80.38 |
| 33 | 79.90 | 79.68 | 79.84 | 79.48 | 80.15 |
| 34 | 81.01 | 79.54 | 79.54 | 79.17 | 79.84 |
| 35 | 80.39 | 79.91 | 79.42 | 78.95 | 79.67 |
| 36 | 80.16 | 80.83 | 79.37 | 77.94 | 79.88 |
| 37 | 80.17 | 80.50 | 79.80 | 78.64 | 80.38 |
| 38 | 80.53 | 80.55 | 79.06 | 79.10 | 80.16 |
| 39 | 80.02 | 80.08 | 78.89 | 79.05 | 80.15 |
| 40 | 80.48 | 80.02 | 79.89 | 78.67 | 79.99 |
| 41 | 80.82 | 80.43 | 80.10 | 79.65 | 79.99 |
| 42 | 80.88 | 79.73 | 79.47 | 79.00 | 80.34 |
| 43 | 79.52 | 80.34 | 80.16 | 79.33 | 80.59 |
| 44 | - | - | 79.08 | 79.31 | 80.53 |
| 45 | - | - | - | 78.97 | 79.93 |
| TOTAL | 80.35 | 80.15 | 79.49 | 78.96 | 80.08 |

Tabla 14. Tamaño de colada, por cuchara y total, dividido por ejercicios.

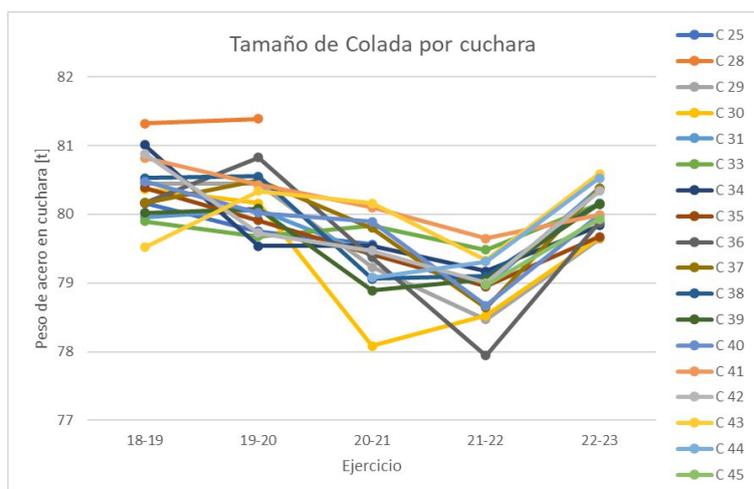


Figura 33. Evolución del tamaño de colada, por cuchara y ejercicio.

Para poner en números el impacto, tanto de la modificación de la curva de carga como el de una bajada de set point, se puede observar que:

- Una campaña estándar de 90 coladas con la curva de carga original contabiliza 7294 toneladas. Este valor surge de la sumatoria del Peso Seteado Ideal durante toda la campaña.
- Para la curva modificada (**Tabla 5**) esta sumatoria totaliza 7328 toneladas; sólo 34 toneladas más por campaña que con la curva original.
- Si se considera en cambio la curva de la **Tabla 3**, donde se muestra el Peso Seteado Real de una cuchara que sufrió una bajada de set point a partir de la colada N°35, la sumatoria del Peso Objetivo para las 90 coladas de la campaña fue de 6921 toneladas. Esto representa una pérdida de 373 toneladas en una campaña, comparando con la curva de carga original.

La conclusión más importante que puede extraerse de este apartado, entonces, es que el verdadero impacto lo provocan las bajadas del nivel de acero en cuchara. Como ya se mencionó, los tres principales factores que las producen son: mal armado, ataque químico de la escoria en los ladrillos de línea de escoria y sangrados a un nivel mayor que el objetivo.

Si se acompaña la modificación en la curva de carga con una reducción en el espesor de los ladrillos, lo que garantizaría un mayor volumen interno, podrían alcanzarse buenos resultados, lo cual será analizado en el próximo apartado.

5 ASPECTOS ECONÓMICOS

5.1 PÉRDIDAS POR DIFERENCIA ENTRE PESO SETEADO IDEAL Y REAL

Se calculó con la Ecuación 7 cuánto representan, económicamente, las toneladas que se perdieron por las bajadas de set point, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el Bloque #3, considerando el *costo marginal* de una tonelada de acero líquido no producida por Tenaris Siderca en US\$120. Cabe aclarar que se consideró el costo marginal y no el valor del acero (que ronda los US\$600/tonelada) por lo siguiente: el acero que produce Tenaris puede hacerlo en la planta de Siderca o en las otras cuatro acerías del grupo que se encuentran en otros países. La acería local se encuentra al 100% de su capacidad, ya que es la que menor costo de producción tiene de las cinco. Entonces, el acero que deja de producirse en Tenaris Siderca, deberá producirse en la acería que le sigue en cuanto a menor costo de producción. Esa diferencia en el costo de producción entre la acería de Campana y que le sigue es de US\$120 por tonelada, y es lo que se conoce como *costo marginal*.

$$\text{Pérdida económica} = 10771 \text{ t} * 120 \frac{\text{US\$}}{\text{t}} = \text{US\$ } 1.292.520 \quad (\text{Ecuación 7})$$

De esta manera, las 10771 toneladas perdidas por las bajadas de set point implicaron una pérdida estimada de casi 1.3 millones de dólares en un año. No se consideró como recuperado el valor obtenido de hacer “Peso Colado” menos “Peso Seteado Real” porque, como ya se mencionó, esto repercute en futuras bajadas del valor de carga objetivo por desgaste acelerado de la línea de escoria, cuyo impacto excede el alcance de este trabajo.

5.2 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA DESCARTAR CUCHARAS QUE HAN SUFRIDO UNA BAJADA DE SET POINT

La pérdida económica calculada previamente invita a analizar si existe un punto en el cual sea más conveniente descartar una cuchara que sufrió una bajada de set point, antes que mantenerla hasta el final de su vida nominal, debido a que sumaría muchas coladas recibiendo sangrados con un peso menor al estipulado teóricamente.

En primer lugar, no es tan simple quitar una cuchara del circuito porque sufrió una bajada de set point. Esto es así porque el circuito de las cucharas de Tenaris Siderca funciona de la siguiente manera:

- I. El total de cucharas en Tenaris Siderca es 16.
- II. Se necesitan 8 cucharas operativas para mantener el proceso sin generar interrupciones. Las interrupciones se miden en minutos de horno de arco eléctrico parado.
- III. Aparte de esas 8 cucharas, siempre hay 2 en proceso de demolición (fin de campaña), 2 en proceso de armado/reconstrucción refractaria, 2 en proceso de secado luego del armado y 2 en precalentamiento, que son las próximas a ingresar.
- IV. Cuando el proceso queda con 7 cucharas, generalmente por eventos de desgaste abrupto u otras cuestiones no ligadas al ladrillo (como problemas con los sistemas de burbujeo), se generan interrupciones porque no se llega a colocar una cuchara en el carro de sangrado cuando el horno está listo para colar, ya que el circuito está saturado y la próxima cuchara a ingresar todavía se encuentra en etapa de secado o precalentamiento. Se genera 1 hora diaria de interrupción, aproximadamente, cuando se cuenta con 7 cucharas.

De aquí surge que sacar una cuchara de operación antes de que cumpla su vida estipulada (90 coladas) tiene consecuencias en la productividad diaria de la acería. Si el total de coladas de la campaña se reduce en 10 coladas (es decir, si se saca la cuchara con 80 coladas), se estará un día con 7 cucharas en operación, lo que implica aproximadamente 60' de interrupción. Consecuentemente, si la campaña dura 20 coladas menos que el estándar, serán dos días con 7 cucharas en operación, totalizando 120' de interrupción.

Siguiendo esta lógica, se definió en la *Ecuación 8* una fórmula para calcular la pérdida económica por sacar de servicio una cuchara, P_{FS} , según la cual:

$$P_{FS}(X) = I * \frac{(C_E - X)}{10} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Siendo:

- I = costo de una hora de interrupción de horno = US\$30.000;
- C_E = coladas estándar de una campaña = 90;
- X = coladas con las que finalizaría la campaña de la cuchara que se quiere sacar de servicio.

Reemplazando, se obtiene la *Ecuación 9*:

$$P_{FS}(X) = US\$30.000 * \frac{(90 - X)}{10} \quad (\text{Ecuación 9})$$

En segundo lugar, y como consecuencia de lo explicado anteriormente, para tomar la decisión de sacar de servicio una cuchara, la pérdida de producción que ocurre por las bajadas de set point debe ser mayor que la pérdida por sacar una cuchara de servicio. La *Ecuación 10* permite calcular la pérdida económica en una campaña por la bajada de nivel, P_{BN} :

$$P_{BN}(C_{BN}) = (C_E - C_{BN}) * \Delta tn * D_t \quad (\text{Ecuación 10})$$

Siendo:

- C_E = coladas estándar de una campaña = 90;
- C_{BN} = Colada en la que se realiza la bajada de nivel;
- Δtn = Diferencia, en toneladas por colada, entre Peso Colado Ideal y Peso Colado Real para la colada donde se realiza la bajada de nivel;
- D_t = valor del acero en Tenaris Siderca = US\$600/t.

Reemplazando en la *Ecuación 10*, se obtiene la *Ecuación 11*:

$$P_{BN}(C_{BN}) = (90 - C_{BN}) * \Delta tn * US\$600/t \quad (\text{Ecuación 11})$$

Si se quiere sacar la cuchara de operación en la misma colada en la que se realiza la bajada de set point, entonces $X = C_{BN}$, con lo cual se puede igualar la *Ecuación 9* con la *Ecuación 11* para determinar el valor de Δtn a partir del cual tiene sentido hacerlo, económicamente, como se muestra en la *Ecuación 12*:

$$US\$30000 * \frac{(90 - X)}{10} = (90 - X) * \Delta tn * US\$600/t \quad (\text{Ecuación 12})$$

Operando resulta que $\Delta tn \geq 5$ t/colada.

Esto quiere decir que, si la bajada de set point es de 5 toneladas por colada o más, conviene sacar la cuchara de circulación pagando el costo de la interrupción por estar con 7 cucharas en servicio.

Es importante remarcar que a este valor se llega asumiendo que la bajada de Set Point es fija desde la colada en la que ocurre y hasta la colada final de la campaña, algo que no siempre es así. Cabe destacar también que muchas veces se coordina en la planta realizar actividades en días donde ocurre una parada programada y prolongada, como

un feriado, a fin de no afectar la producción. En este caso, se puede sacar de circulación una cuchara por bajada de set point o por otro inconveniente, sin generar interrupciones por faltante de cuchara.

5.3 MODIFICACIÓN DEL DISEÑO DEL REVESTIMIENTO DE TRABAJO

Durante el desarrollo de este trabajo, se implementó en una de las cucharas de la acería un nuevo tipo de revestimiento refractario en la pared de trabajo. Esta prueba se impulsó desde el sector de Cucharas y uno de los proveedores de ladrillos refractarios. Para realizar la prueba, se utilizaron ladrillos con la mitad del espesor que poseen los de uso regular. Lógicamente, al ser de menor espesor, el volumen interno de la cuchara es mayor, entonces admite una mayor cantidad de acero desde la primera colada. La curva de carga teórica con la que se hizo la prueba se muestra en la **Tabla 15**.

| Coladas de la campaña | Set Point [t] |
|-----------------------|---------------|
| 1 a 9 | 80 |
| 10 a 14 | 81 |
| 14 a 19 | 82 |
| 20 a 24 | 83 |
| 25 a 29 | 84 |
| 30 + | 85 |

Tabla 15. Curva de carga para cuchara con ladrillos de menor espesor.

Las primeras pruebas han sido satisfactorias, con lo cual se ha implementado este tipo de ladrillos de menor espesor en una de las cucharas de la acería para hacer una evaluación más extensa en el tiempo. La principal incertidumbre, por el momento, es si la vida en servicio de la cuchara es igual a la vida estándar actual. De lograrse este objetivo, se puede estimar el impacto económico que tendría trasladar esta configuración a todas las cucharas de la acería (considerando los costos de fabricar una mayor cantidad de acero), producto de la diferencia del Peso Seteado Ideal para la nueva curva de carga teórica y el Peso Seteado Ideal actual, calculado a partir de la **Tabla 5**.

- Peso Seteado Ideal para prueba de ladrillos de menor espesor = 7555 t
- Peso Seteado Ideal actual en Tenaris Siderca = 7327.5 t
- Diferencia = 227.5 t

- Ganancia Ideal = Diferencia x Costo Marginal = $227.5 \text{ t} * 120 \text{ US\$/t} = \text{US\$}27.300$
por campaña de 90 coladas
- Producción de Tenaris Siderca en un ejercicio = 13500 coladas, que corresponden a 150 campañas
- *Ganancia anual potencial aproximada = US\$4.095.000*

6 CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo fue posible determinar las variaciones que se produjeron en el peso de la cuchara vacía, y consecuentemente, en el volumen interno de la cuchara, debido al armado del revestimiento refractario, para lo cual fue necesario compilar, organizar y generar datos a partir de la información recopilada en planta. También se logró definir un desgaste del revestimiento refractario promedio, por colada, tanto a nivel general como para cada uno de los dos proveedores de ladrillos refractarios de Tenaris Siderca, y relacionar los resultados con las características de estos productos. Finalmente, se cuantificó la pérdida de producción (económica y en toneladas de acero) debido a las bajadas de nivel a lo largo de cada campaña, y cómo evolucionó el Tamaño de Colada en los últimos ejercicios.

El análisis llevado a cabo permitió arribar a las siguientes conclusiones:

- ✓ La reparación del piso de trabajo de la cuchara provoca una disminución de 500 kg en el peso de la cuchara vacía, aumentando su volumen interno. Esto puede dar lugar a la creación de curvas de carga diferentes entre cucharas que tienen ladrillos de piso nuevos y las que reingresan a operación con el piso de trabajo reparado, para aprovechar ese volumen extra con el que cuentan las cucharas con el piso reparado.
- ✓ No se producen aumentos significativos en el peso de la cuchara vacía al realizar reparaciones de la pared de seguridad.
- ✓ No se determinan diferencias significativas en el desgaste del revestimiento de la cuchara al usar alternativamente los ladrillos refractarios de los dos proveedores de Tenaris Siderca.
- ✓ Se “perdieron”, en el lapso de un año de análisis, aproximadamente 1.3 millones de dólares por las bajadas del objetivo de carga teórico de la cuchara, que exceden las diez mil toneladas.
- ✓ La nueva curva de carga no produjo aumentos significativos y sostenidos en el tamaño de colada. Se deben adoptar otras medidas para poder aumentar este valor y que sea sostenible en el tiempo, tales como las que se mencionan en la sección próxima.

- ✓ Se determinó una ganancia potencial de aproximadamente 4 millones de dólares si las pruebas de ladrillos de menor espesor resultan satisfactorias y pueden aplicarse a todas las cucharas de la acería.

6.1 TRABAJO A FUTURO

A partir de los resultados obtenidos hasta el momento, se plantea como trabajo a futuro:

- I. Continuar con las pruebas utilizando ladrillos refractarios de menor espesor en el revestimiento de la pared de trabajo de la cuchara.
- II. Estudiar el efecto del sangrado a alto nivel en el desgaste acelerado de la línea de escoria de cuchara y cuantificar la pérdida en tonelaje asociada.
- III. Analizar cómo las escorias de la metalurgia secundaria afectan el desempeño del ladrillo, tanto su composición química como la temperatura de trabajo.

7 REFERENCIAS

- [1] J.L. Enriquez Berciano, E. Tremps Guerra. Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte II. Metalurgia secundaria (2007).
- [2] R.K. Koley, A. V. Rao, S. Askar, S.K. Srivastava. Development and application of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$ refractory for secondary refining ladle. *Proceedings of the UNITECR'01 (2001)*
- [3] E. Benavidez, E. Brandaleze, L. Musante, P. Galliano (2013). Corrosion Study of MgO-C Bricks in Contact with a Steelmaking Slag. *Procedia Materials Science*; 8, 228-235.
- [4] P. Galliano, L. Martorello, L. Musante, T. Simaro, M. Rossi, H. Ernst, D. Johnson (2014). Modeling and In-plant Evaluation of Thermal Stresses in Steelmaking Ladles. *Advances in Science and Technology (2014)*, Vol 92, pp 310-318.
- [5] L. Musante, C.E. Cicutti, C. Capurro, P. Galliano (2016). Ladle thermal conditions during long non-working periods: impact on lining performance
- [6] A.W. Cramb, M. Amuda. (2017) Steel Production and Refining.
- [7] Foro web. *Products4Steelmaking*.
- [8] H. K. D. H. Bhadeshia, D. Suh (2015). Is low phosphorous content in steel a product requirement? *Ironmaking & Steelmaking*.
- [9] I. Kapoor, C. Davis, Z. Li (2021). Effects of residual elements during the casting process of steel production: a critical review. *Ironmaking & Steelmaking. Processes, products and applications*.
- [10] J. Madías, R. Varela, H. Reggiardo, V. Pagliano (1989). Obturación de buzas de cuchara: casos de aceros de alto C calmados al Si-Mn-Al. *Siderurgia 50 (1991)*.
- [11] C. Junfeng (2023). Deterioration mechanism of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ refractory castable in RH refining ladle. *Open Ceramics*.
- [12] Y. Tsutsui, K. Katou, S. Umeda (2020). Magnesia-Carbon Refractories for Converters. *Nippon Steel Technical Report N°125*.
- [13] J.M. Robin, Y. Berthaud, N. Schmitt, J. Poirier, D. Themines (1998). Thermomechanical behaviour of megnesia-carbon refractories. *British Ceramic Transactions. Vol. 97*.

[14] F. Fuhr, P. Galliano, C. Cicutti, V. Aranda, G. Torga, E. Salgado (2002). Estudio de las escorias y su influencia en el desgaste de los refractarios de cuchara. *Centro de Investigación Industrial (CINI), Tenaris Siderca*.

[15] F. Huang, C. Liu, N. Maruoka, S.Y. Katamura (2015). Dissolution behaviour of MgO based refractories in CaO-Al₂O₃-SiO₂ slag. *Ironmaking & Steelmaking Vol 42*.

[16] C. Alvarez, E. Criado, C. Baudin (1992). Refractarios de magnesia-grafito. *Bol. Soc. Esp. de Cerámica y Vidrios. Vol. 31 – Num. 5*.

[17] S. Camelli, M. Dignani, N. Marsiglia (2023). Caracterización de una calidad de ladrillo de línea de escoria de cuchara de acero de Tenaris Siderca. *Instituto Argentino de Siderurgia*.

[18] S. Camelli, M. Dignani, A. Vazquez (2023). Estudio post mortem del ladrillo de línea de escoria de cuchara de acero de Tenaris Siderca. *Instituto Argentino de Siderurgia*.

ANEXO I. FOLLETO DE PRESENTACIÓN DE LA ACERÍA TENARIS SIDERCA

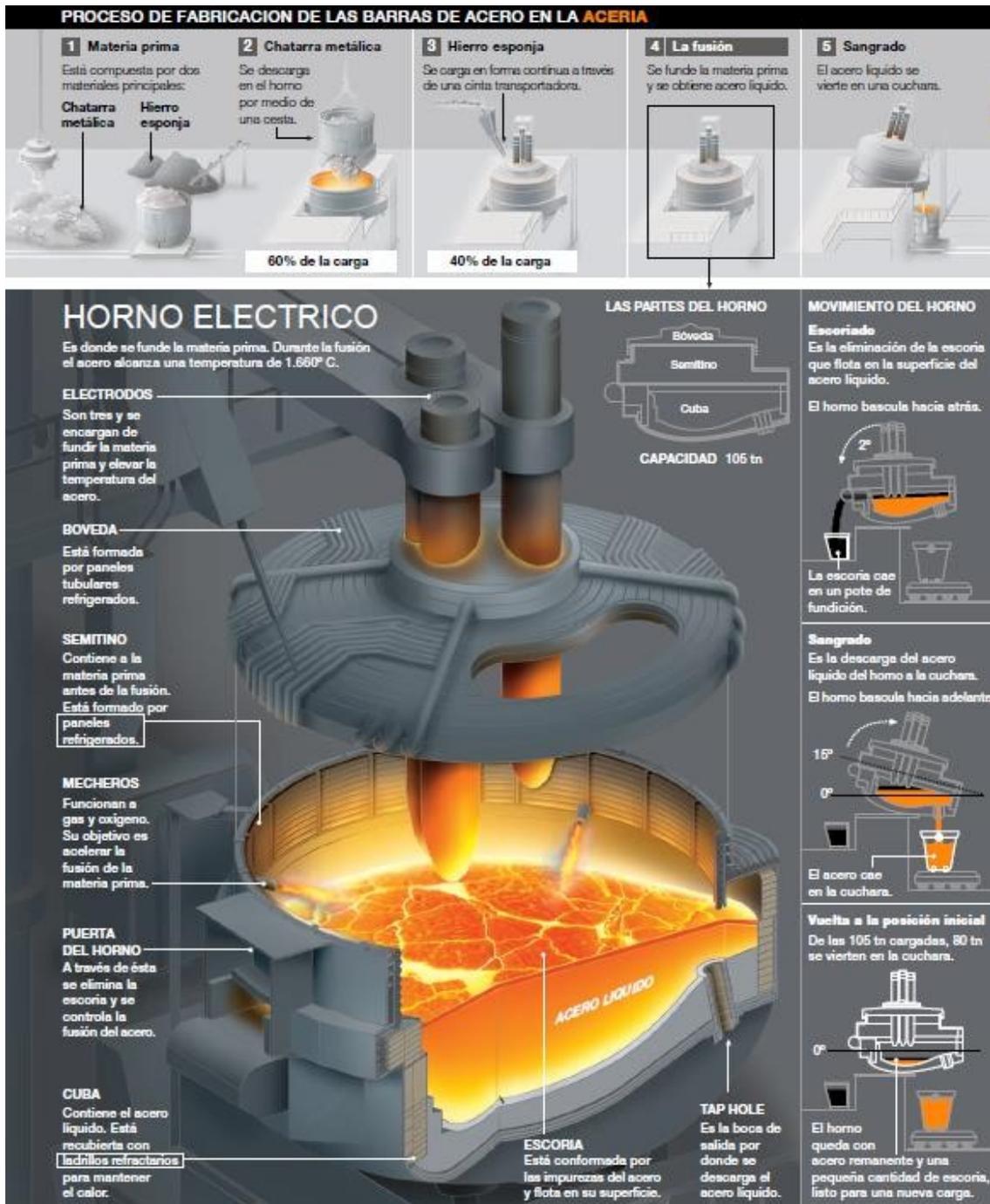


Figura 34 a. Folleto de presentación de la acería de Tenaris Siderca. Horno de Arco Eléctrico.

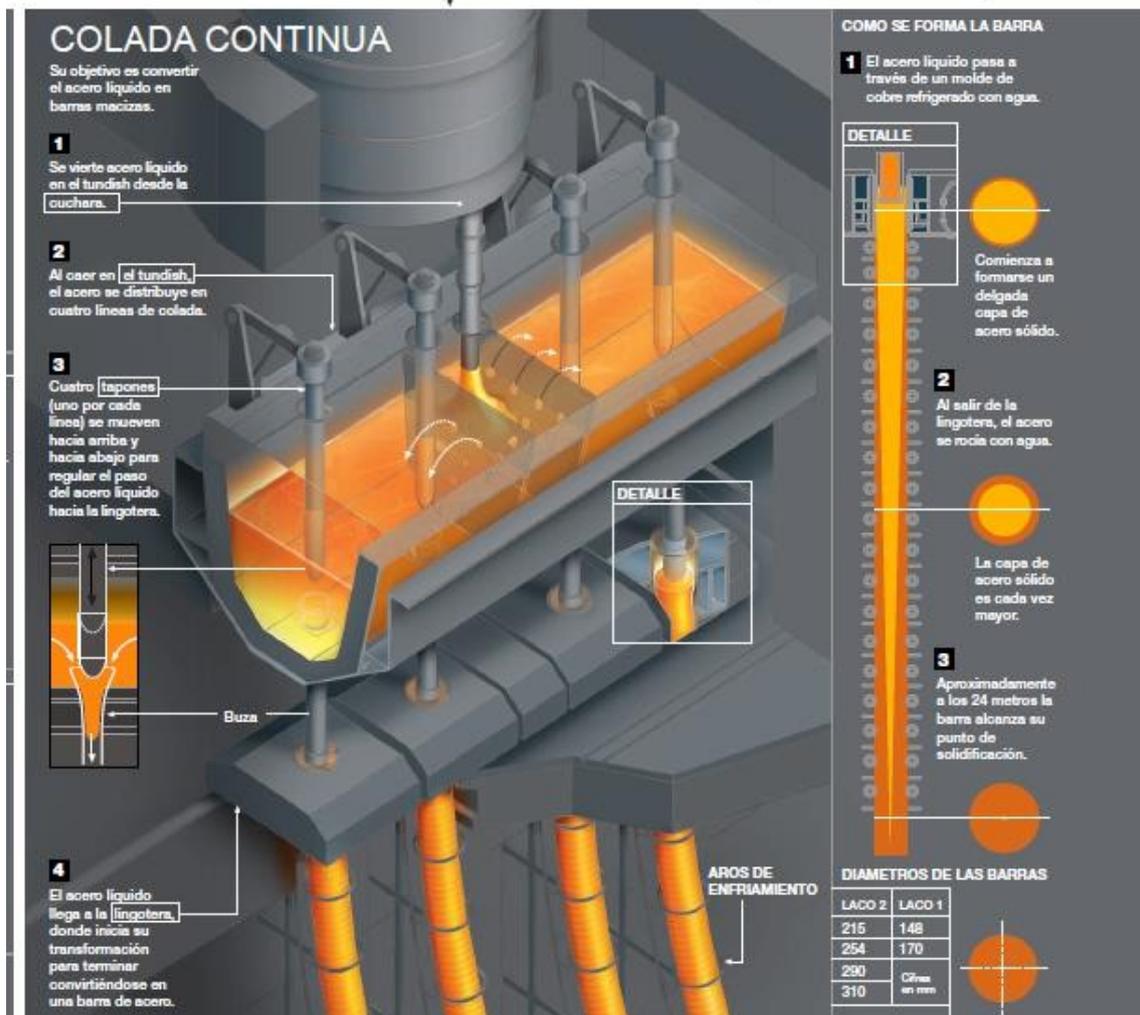
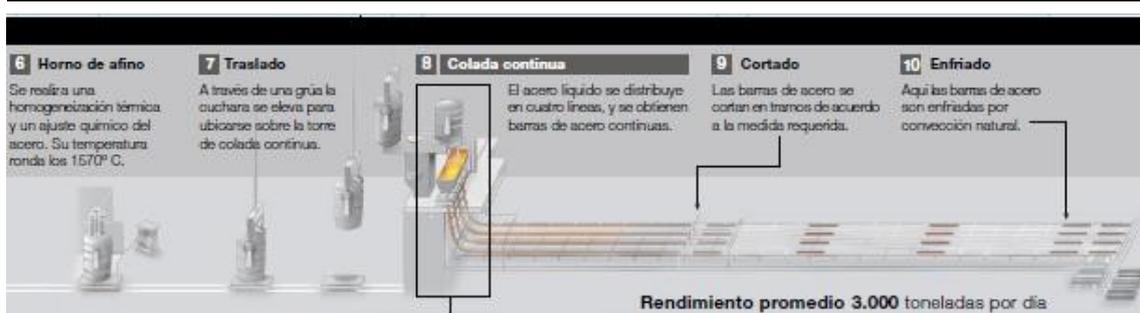


Figura 34 b. Folleto de presentación de la acería de Tenaris Siderca. Colada Continua del acero.

ANEXO II. DIAGRAMA DE ELLINGHAM

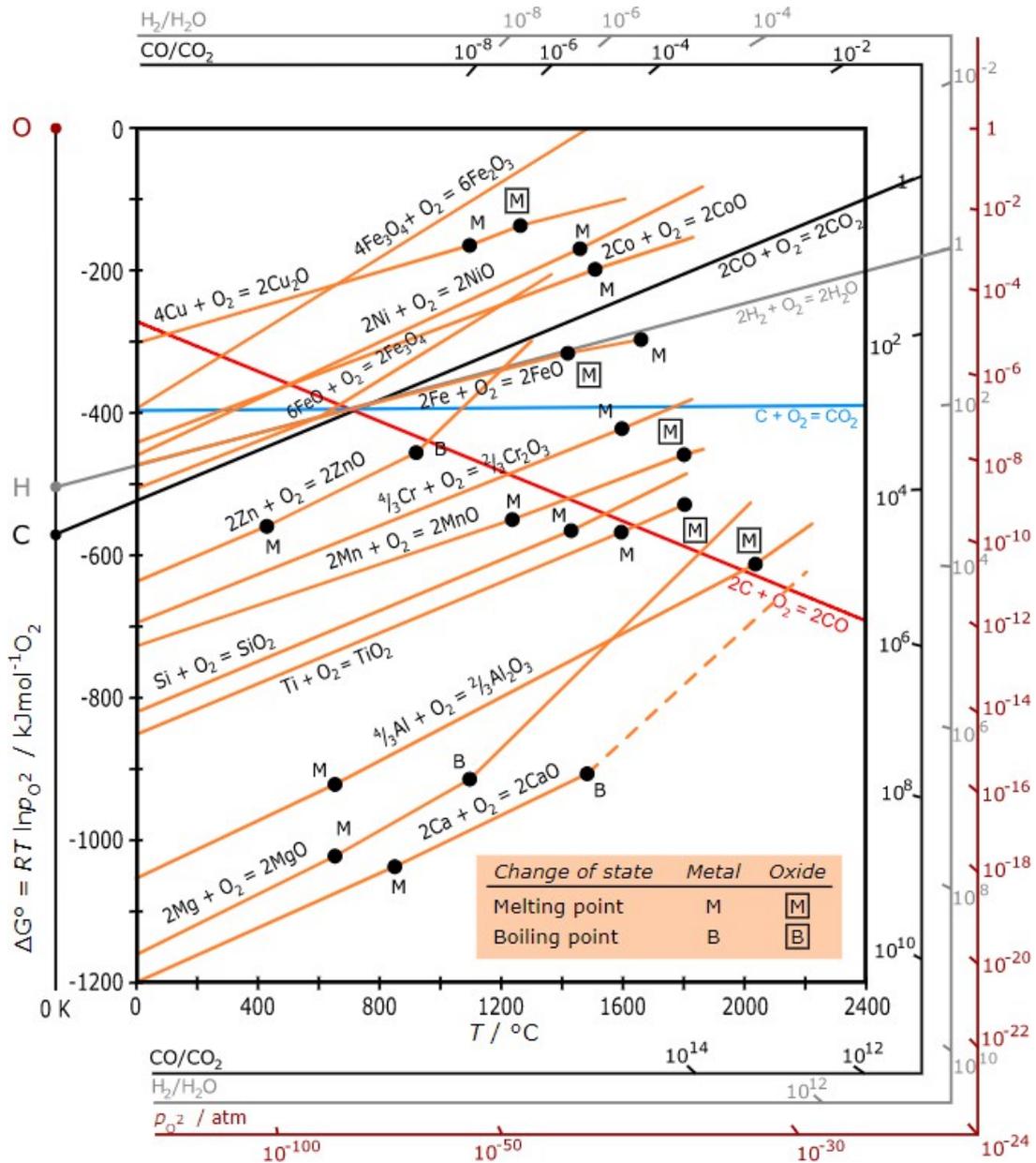


Figura 35. Diagrama de Ellingham.

Un diagrama de Ellingham es un diagrama que muestra la dependencia de la estabilidad de los compuestos con la temperatura. Este análisis se utiliza generalmente para evaluar la facilidad de reducción de óxidos y sulfuros de metales. Estos diagramas fueron construidos por primera vez por Harold Ellingham en 1944.

El Diagrama de Ellingham, originalmente construido para óxidos, es una herramienta para encontrar una variedad de datos termodinámicos rápidamente, sin la necesidad de cálculos repetitivos.

El diagrama es esencialmente un gráfico que representa la fuerza motriz termodinámica para que ocurra una reacción particular, en un rango de temperaturas. Con los datos para varias reacciones trazados en el mismo gráfico, se pueden ver las estabilidades relativas de diferentes elementos con respecto a, por ejemplo, sus óxidos. También es posible comparar la fuerza motriz relativa de un elemento para oxidación o sulfuración en un ambiente que contiene tanto oxígeno como azufre como reactivos.

ANEXO III. HOJAS TÉCNICAS DE LOS LADRILLOS REFRACTARIOS ENSAYADOS

| General information | |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Classification | Magnesia-carbon product type MC95/10 ISO 10081-3 |
| Main raw material components | Graphite, High quality fused magnesia |
| Bonding type | Resin bonded |
| Main Application(s) | Casting/treatment ladle, Converter (BOF), Electric arc furnace |
| Additional Information | tempered |

| Chemical analysis | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------|------------------|--|--|
| MgO | Fe ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | | |
| 95,1% | 0,8% | 1,5% | 1,0% | | |
| Determination on fired substance (1025 °C / 1877 °F) acc. to ISO 12677 | | | | | |
| C | | | | | |
| 14,0% | | | | | |

| Physical properties | | | |
|-----------------------------------------------------|------|----------------------|-------------|
| Bulk Density | 2,99 | [g/cm ³] | ISO 5017 |
| Bulk Density red.atm.(1000 °C / 1832 °F) | 2,90 | [g/cm ³] | ISO 5017 |
| Apparent Porosity | 4,0 | [vol%] | ISO 5017 |
| Apparent Porosity red.atm.(1000 °C / 1832 °F) | 11,0 | [vol%] | ISO 5017 |
| Cold Crushing Strength | 35,0 | [N/mm ²] | ISO 10059-1 |
| Cold Crushing Strength red.atm. (1000 °C / 1832 °F) | 20,0 | [N/mm ²] | ISO 10059-1 |

Figura 36. Hoja Técnica del ladrillo refractario del *Proveedor A*.

| Physikalische Daten Physical Properties | Lieferzustand as supplied | verkokt nach coked according to ASTM C 831 | |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|
| | Rehdichte Bulk Density | >2.99 | >2.85 |
| Offene Porosität Apparent Porosity | <7 | <11 | Vol.-% |
| Kaltdruckfestigkeit Cold Crushing Strength | >30 | >15 | N/mm ² |
| Kohlenstoffgehalt Carbon Content | >14 | | Gew.-% weight % |
| Chemische Analyse der Magnesia Chemical Analysis of Magnesia | | | Gew.-% weight % |
| MgO | 97-99 | | |
| Al ₂ O ₃ | < 0.2 | | |
| Fe ₂ O ₃ | < 0.4 | | |
| CaO/SiO ₂ -Verhältnis CaO/SiO ₂ -Ratio | >1.9 | | |

Figura 37. Hoja Técnica del ladrillo refractario del *Proveedor B*.

ANEXO IV. TABLA PARA ANÁLISIS DE BLOQUE 1.

| Cuchara | Campaña | Piso | Pared | Proveedor | Pendiente [kg/colada] | Ordenada [toneladas] |
|---------|---------|------|-------|---------------|-----------------------|----------------------|
| 25 | 174 | 1 | 4 | A | | |
| 25 | 175 | 1 | 5 | A | -0.036 | 41.94 |
| 25 | 179 | 1 | 1 | A | -0.049 | 42.9 |
| 25 | 181 | 1 | 3 | A | -0.038 | 42.16 |
| 28 | 172 | 1 | 1 | A | -0.051 | 41.5 |
| 28 | 174 | 1 | 3 | A | -0.041 | 42.93 |
| 29 | 160 | 1 | 4 | A | -0.041 | 41.82 |
| 29 | 161 | 1 | 1 | B | | |
| 29 | 164 | 1 | 4 | B | -0.039 | 41.92 |
| 29 | 166 | 1 | 1 | A | -0.032 | 41.63 |
| 29 | 168 | 1 | 3 | A | -0.032 | 41.11 |
| 30 | 170 | 1 | 4 | A | -0.047 | 42.64 |
| 30 | 172 | 1 | 1 | A | | |
| 30 | 174 | 1 | 1 | A | -0.047 | 41.8 |
| 30 | 177 | 1 | 3 | A | -0.029 | 42.51 |
| 30 | 179 | 1 | 5 | A | -0.069 | 42.17 |
| 31 | 179 | 1 | 1 | A | -0.03 | 41.31 |
| 31 | 182 | 1 | 4 | A | -0.035 | 43.38 |
| 31 | 183 | 1 | 5 | A | -0.025 | 42.87 |
| 31 | 185 | 1 | 1 | A | -0.058 | 43.19 |
| 31 | 187 | 1 | 1 | A | -0.05 | 42.17 |
| 33 | 55 | 1 | 4 | A | -0.05 | 42.64 |
| 33 | 58 | 1 | 1 | A | -0.054 | 41.1 |
| 33 | 60 | 1 | 3 | A | -0.044 | 43.75 |
| 33 | 62 | 1 | 5 | A | -0.033 | 43.43 |
| 33 | 64 | 1 | 1 | A | -0.062 | 42.9 |
| 34 | 48 | 1 | 4 | A | -0.06 | 42.43 |
| 34 | 51 | 1 | 1 | A | -0.033 | 43.22 |
| 34 | 53 | 1 | 3 | A | -0.032 | 43.91 |
| 34 | 54 | 1 | 1 | A | -0.043 | 43.57 |
| 35 | 52 | 1 | 4 | A | -0.046 | 43.72 |
| 35 | 55 | 1 | 1 | A | -0.033 | 42.48 |
| 35 | 57 | 1 | 3 | A | -0.041 | 42.94 |
| 35 | 59 | 1 | 5 | Prueba Prov C | -0.033 | 42.91 |
| 36 | 50 | 1 | 1 | A | -0.049 | 41.12 |
| 36 | 51 | 1 | 1 | B | -0.038 | 42.68 |
| 36 | 53 | 1 | 3 | B | -0.036 | 43.34 |
| 37 | 52 | 1 | 4 | A | -0.057 | 43.38 |
| 37 | 55 | 1 | 1 | B | -0.04 | 42.4 |
| 37 | 57 | 1 | 3 | B | -0.045 | 42.89 |

| | | | | | | |
|----|-----|---|---|---|--------|-------|
| 38 | 52 | 1 | 6 | A | -0.045 | 43.6 |
| 38 | 53 | 1 | 1 | A | -0.038 | 43.2 |
| 38 | 54 | 1 | 1 | A | -0.03 | 42.19 |
| 38 | 56 | 1 | 3 | A | -0.035 | 43 |
| 39 | 51 | 1 | 4 | A | -0.047 | 43.63 |
| 39 | 53 | 1 | 1 | A | -0.029 | 43.31 |
| 39 | 55 | 1 | 3 | A | -0.04 | 43.15 |
| 39 | 57 | 1 | 5 | A | -0.024 | 43.56 |
| 40 | 50 | 1 | 1 | A | -0.052 | 44.16 |
| 40 | 52 | 1 | 3 | A | -0.043 | 42.87 |
| 40 | 53 | 1 | 3 | A | -0.037 | 43.69 |
| 40 | 55 | 1 | 5 | A | | |
| 40 | 56 | 1 | 1 | A | -0.041 | 43.94 |
| 41 | 44 | 1 | 3 | A | -0.049 | 42.51 |
| 41 | 46 | 1 | 5 | A | -0.037 | 44.08 |
| 41 | 48 | 1 | 1 | A | | |
| 42 | 29 | 1 | 4 | A | | |
| 42 | 30 | 1 | 4 | A | -0.04 | 42.97 |
| 42 | 32 | 1 | 1 | A | -0.044 | 43.71 |
| 42 | 34 | 1 | 4 | A | -0.029 | 42.87 |
| 43 | 22 | 1 | 1 | A | | |
| 43 | 24 | 1 | 3 | A | -0.069 | 43.66 |
| 43 | 26 | 1 | 5 | A | -0.057 | 43.12 |
| 25 | 172 | 2 | 2 | A | -0.04 | 40.57 |
| 25 | 173 | 2 | 3 | A | -0.071 | 42.43 |
| 25 | 176 | 2 | 6 | A | -0.047 | 42.07 |
| 28 | 171 | 2 | 6 | A | -0.049 | 42.02 |
| 28 | 173 | 2 | 2 | A | | |
| 28 | 175 | 2 | 4 | A | -0.043 | 42.12 |
| 29 | 162 | 2 | 2 | B | | |
| 29 | 163 | 2 | 3 | B | -0.043 | 42.07 |
| 29 | 165 | 2 | 5 | A | -0.049 | 42.19 |
| 30 | 171 | 2 | 5 | A | | |
| 30 | 176 | 2 | 2 | A | -0.032 | 42.22 |
| 31 | 180 | 2 | 2 | A | -0.055 | 42.78 |
| 31 | 181 | 2 | 3 | A | -0.047 | 41.31 |
| 31 | 184 | 2 | 6 | A | -0.031 | 44.05 |
| 33 | 57 | 2 | 5 | A | -0.052 | 42.64 |
| 33 | 59 | 2 | 2 | A | -0.057 | 42.83 |
| 33 | 61 | 2 | 4 | A | -0.041 | 43.75 |
| 34 | 50 | 2 | 6 | A | -0.028 | 41.66 |
| 35 | 51 | 2 | 3 | A | -0.045 | 42.89 |
| 35 | 53 | 2 | 5 | A | -0.049 | 41.06 |
| 35 | 54 | 2 | 6 | A | | |
| 35 | 56 | 2 | 2 | A | -0.029 | 42.24 |

| | | | | | | |
|-----------|----|---|---|---|--------|-------|
| 36 | 48 | 2 | 5 | A | -0.051 | 43.46 |
| 36 | 49 | 2 | 6 | A | -0.04 | 41.06 |
| 37 | 51 | 2 | 3 | A | -0.041 | 42.79 |
| 37 | 53 | 2 | 5 | A | | |
| 37 | 54 | 2 | 6 | A | -0.043 | 42.76 |
| 38 | 48 | 2 | 3 | B | -0.047 | 43.8 |
| 38 | 50 | 2 | 4 | B | | |
| 38 | 51 | 2 | 5 | A | | |
| 39 | 50 | 2 | 3 | A | -0.037 | 43.31 |
| 39 | 52 | 2 | 5 | A | | |
| 39 | 54 | 2 | 2 | A | -0.059 | 42.52 |
| 39 | 58 | 2 | 2 | A | | |
| 40 | 48 | 2 | 3 | A | -0.041 | 42.36 |
| 40 | 51 | 2 | 2 | A | -0.045 | 40.84 |
| 41 | 43 | 2 | 2 | A | -0.055 | 41.11 |
| 41 | 45 | 2 | 4 | A | -0.046 | 43.59 |
| 42 | 27 | 2 | 2 | A | -0.039 | 41.08 |
| 42 | 28 | 2 | 3 | A | | |
| 42 | 31 | 2 | 5 | A | -0.039 | 42.53 |
| 43 | 21 | 2 | 5 | A | -0.038 | 41.95 |
| 43 | 23 | 2 | 2 | A | -0.05 | 42.13 |

Tabla 16. Datos obtenidos.

ANEXO V. GRÁFICOS PARA EVALUAR CAMBIOS EN EL SET POINT DE LA CUCHARA

Se presentan algunos de los gráficos utilizados para validar la variación tanto en el Peso Colado como en el Peso Seteado Real de la cuchara, con respecto al Peso Seteado Ideal, de acuerdo con el avance de su vida en la campaña.

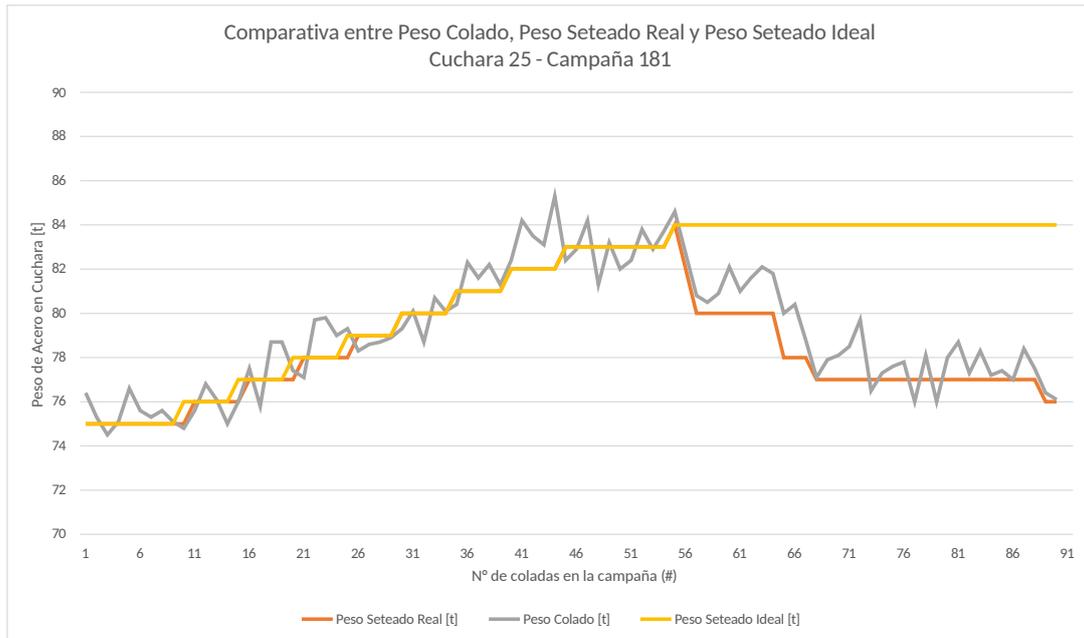


Figura 38 a. Gráficos de Peso Colado, Peso Seteado Real y Peso Seteado Ideal, para la campaña 181 de la cuchara 25.

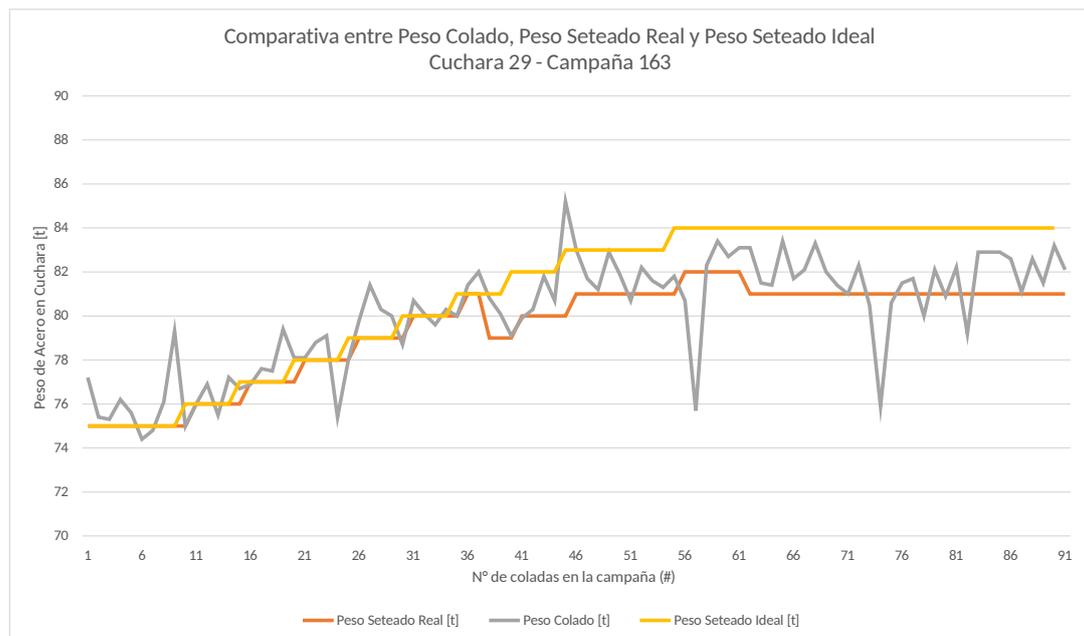


Figura 38 b. Gráficos de Peso Colado, Peso Seteado Real y Peso Seteado Ideal, para la campaña 163 de la cuchara 29.

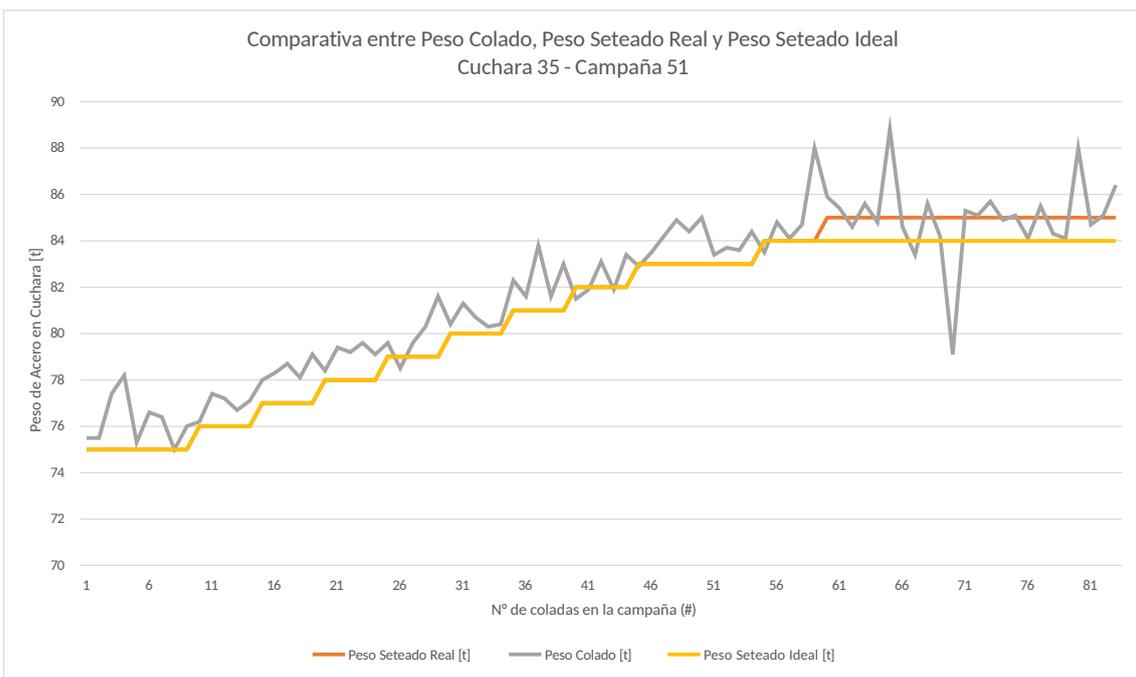


Figura 38 c. Gráficos de Peso Colado, Peso Seteado Real y Peso Seteado Ideal, para la campaña 51 de la cuchara 35.

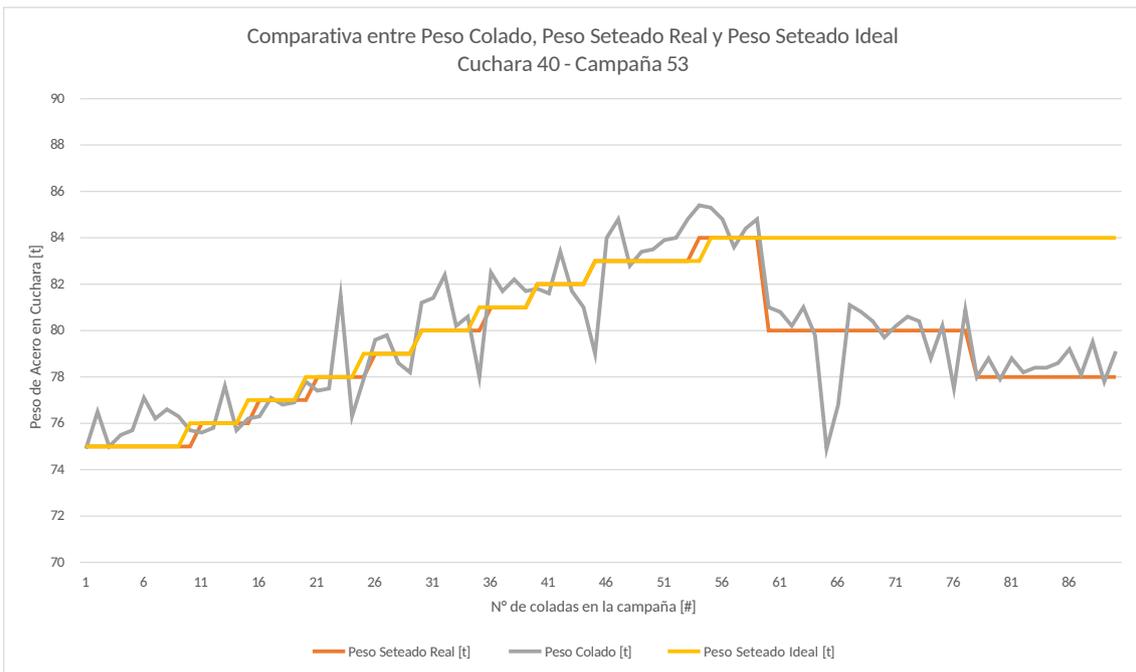


Figura 38 d. Gráficos de Peso Colado, Peso Seteado Real y Peso Seteado Ideal, para la campaña 53 de la cuchara 40.