

(03-027) - Evaluation of cast non-conformities in a steel mill

García-Menéndez, David ¹; Morán-Palacios, Henar ¹; Álvarez Cabal, Jose Valeriano ¹;
Terrados Cristos, Marta ¹

¹ Universidad de Oviedo

Steel making is a complex process of composition adjustment, in which the carbon content of the pig iron is reduced, and additions of alloying agents, fluxes and other elements are made. It is a discontinuous process in which, for many reasons, the expected requirements are not achieved. Non-conformities, or mismatches, occur when the composition or casting temperature deviates from the steel quality requirements. Mismatches are detected in intermediate tests performed throughout the process and compared to the expected values. When the casting is out of adjustment, the operator must define if it is possible to fix it and what is necessary to do to achieve it. This paper describes and identifies the casting mismatches, classifying them according to their relevance. For this purpose, data from the analysis and production process of hundreds of castings in a steel plant have been collected over several years. This classification will allow plant operators and technologists to improve the efficiency of the process and increase the economic and environmental sustainability of the steel mill.

Keywords: continuous casting; non conformity; quality control

Evaluación de las no conformidades en el proceso de una acería

La transformación de arrabio en acero es un proceso complejo de ajuste de composición, en el que se reduce el contenido de carbono y se realizan adiciones de aleantes, fundentes y otros elementos. Es un proceso discontinuo, en el que, por múltiples causas, no se alcanzan los requisitos deseados. Las no conformidades, o desajuste, se producen cuando la composición o la temperatura de colada se desvían de los requisitos de calidad del acero. Los desajustes se detectan en los ensayos intermedios que se realizan a lo largo del proceso y que se comparan con los valores esperados. Cuando la colada va desajustada, el operador debe definir si es posible revertirlo y que es necesario hacer para conseguirlo. En esta ponencia se describen e identifican las no conformidades de las coladas, clasificándolas en función de su relevancia. Para ello se han ido recogiendo a lo largo de varios años, datos de los análisis y del proceso productivo de cientos de coladas en una acería. Esta clasificación permitirá a los operadores y tecnólogos de la planta mejorar la eficiencia del proceso aumentando la sostenibilidad económica y medio-ambiental de la instalación.

Palabras clave: colada continua; no conformidad; control de calidad

Correspondencia:

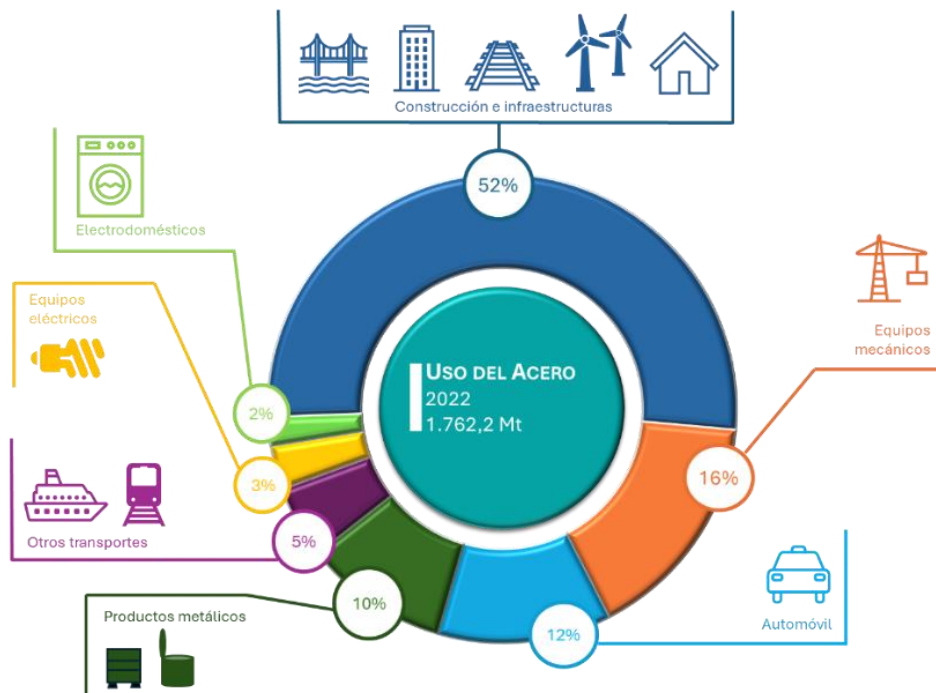


©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El acero es una aleación de hierro y carbono, y es esencial en diversos sectores industriales, siendo fundamental para el crecimiento económico global debido a su versatilidad y uso extendido. Destaca por sus propiedades mecánicas y bajo costo de procesamiento, su demanda es alta en la construcción e infraestructuras, así como en la industria automotriz, tal y como se ve en la **Figura 1**. En el año 2022, el sector de la construcción e infraestructuras fue el que más consumió acero a nivel mundial (52%), siendo una de las industrias más importantes, el 16% de acero se empleó en el sector del equipamiento mecánico, seguido del sector del automóvil con un consumo del 12% (WSA, 2023).

Figura 1. Uso del acero en millones de toneladas (Mt)

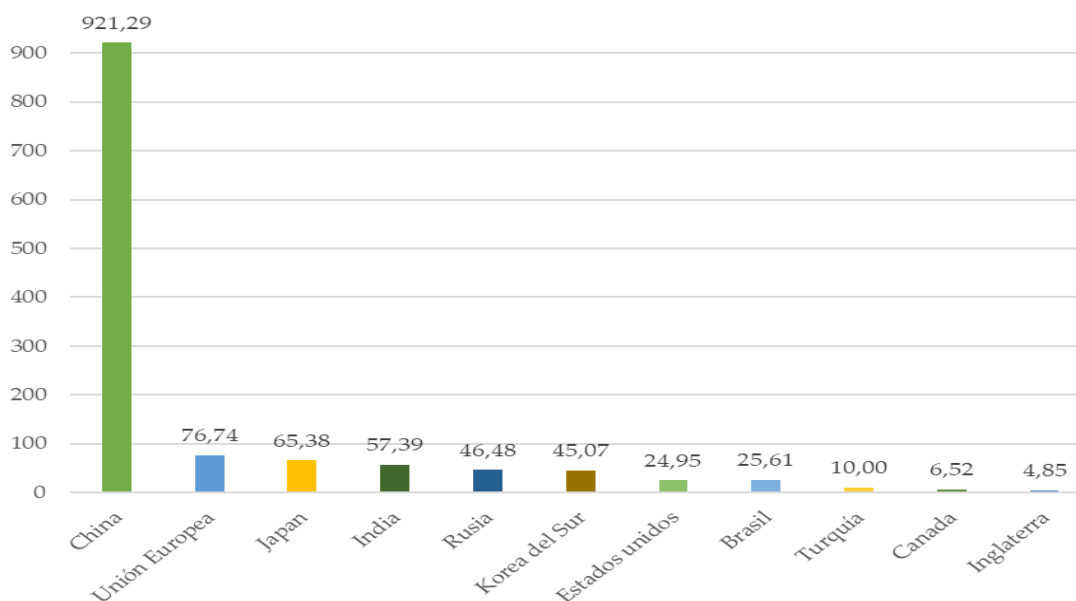


En Europa, más de 160 millones de toneladas de acero se producen anualmente en más de 500 plantas, siendo un componente fundamental en tecnologías innovadoras que promueven la eficiencia y el desarrollo sostenible (Eurofer, 2021a). A pesar de ser un sector maduro, el proceso de producción del acero enfrenta desafíos ambientales debido al alto consumo de materiales y energía, lo que ha resultado en regulaciones más estrictas y una necesidad de adoptar prácticas más sostenibles para mantener la competitividad en un mercado global.

El acero, además de por su abundancia y bajo precio, es completamente reciclable, lo que reduce significativamente el consumo de energía y el impacto ambiental (Ma et al., 2014; Nechifor et al., 2020; Pauliuk et al., 2012). En el año 2021, se reciclaron 680 millones de toneladas a nivel mundial (WSA, 2024), con una tasa de recuperación del 70%, reutilizándose más del 97% de sus subproductos. Se estima que en sectores como el automotriz y la maquinaria se recupera hasta el 90% del acero, mientras que en la construcción y los aparatos eléctricos y domésticos, los porcentajes son del 85% y 50%, respectivamente (WorldSteel Association, 2021). Esto favorece la economía circular y permite una gestión más eficiente de los procesos de producción, reduciendo los costos. Además, la fabricación de nuevos aceros avanzados contribuye a reducir la cantidad de materias primas necesarias, la energía y los residuos, por ejemplo, los aceros de ultra-alta resistencia en la construcción reducen la emisión de CO₂ en un 30% y 20% respectivamente (WSA, 2024).

La producción de acero se realiza principalmente mediante la ruta integral, que implica la obtención de arrabio en un horno alto (BF por sus siglas en inglés) y luego la conversión en acero en Hornos Básicos de Oxígeno (BOF por sus siglas en inglés) o convertidores, conocida como BF-BOF, generando acero de alta calidad (Eurofer, 2021b; WorldSteel Association, 2021). Aunque la producción mundial ha disminuido en general, ha aumentado en países asiáticos. En 2022, la Unión Europea produjo 76,74 millones de toneladas de acero por la ruta integral (BF-BOF), representando aproximadamente el 56,3% del total mundial. El 71,5% del acero a nivel mundial se fabricó mediante el proceso BOF. En la Figura 2 se observa el reparto de países por esta ruta, China lideró la producción mundial de acero en 2022, con 921,29 Mt seguida por la Unión Europea con 76,74 Mt y Estados Unidos con 24,95 Mt (WSA, 2023).

Figura 2. Principales productores de acero a nivel mundial



En Europa, la producción de acero se concentra principalmente en Alemania (27%), seguido de Italia (15,8%), Francia (9%) y España (8,4%). La producción de acero se divide en productos planos, principalmente chapa laminada en frío, y productos largos, con una mayor fabricación de alambión (Eurofer, 2023) como se puede ver en la siguiente figura.

Figura 3. Producción de acero total acabado en UE por tipo de producto



En España, las plantas siderúrgicas desempeñan un papel crucial en la industria del acero, proporcionando empleo a miles de personas y contribuyendo al desarrollo económico local. Estas plantas realizan procesos que abarcan desde la producción de hierro primario hasta la

transformación de acero en una amplia gama de productos finales, como chapa y productos estructurales. Las operaciones en estas plantas requieren tecnología avanzada, mano de obra especializada y un enfoque meticuloso para garantizar la calidad del producto final.

2. Objetivos,

Este estudio se centra en la parte del proceso en la que se obtiene acero a partir de arrabio, siendo este un proceso semicontinuo, que tiene lugar en acerías de gran tamaño en las que se produce una amplia gama de grados de acero y con composiciones químicas variables. Además de la composición, los tratamientos posteriores a los que se somete el acero determinan sus propiedades mecánicas, ya que cada grado de acero es adaptado para satisfacer las aplicaciones específicas o los requisitos mecánicos requeridos por el cliente (Birat, 2016; W.Cramb, 2017). Con lo cual, la acería es programada en función de los tratamientos y adiciones requeridos para cada grado de acero.

Aunque los procesos industriales ya se encuentran muy optimizados, el proceso de una acería es sumamente complejo y siempre tiene lugar para nuevas mejoras. Se trata de instalaciones que requieren enormes inversiones con ciclos de vida muy extensos y numerosas actualizaciones. Por ejemplo, la actualización en 2015 de la acería LD III que supuso poder trabajar con coladas de mayor ancho supuso una inversión de 100 millones de euros. Su elevado ritmo de producción y la complejidad del proceso hacen que estén en una situación de continuo trabajo de mejora. Ese gran volumen de producción, de varios millones de toneladas por instalación hace que lo que parecen pequeñas mejoras supongan impactos económicos y medioambientales muy importantes.

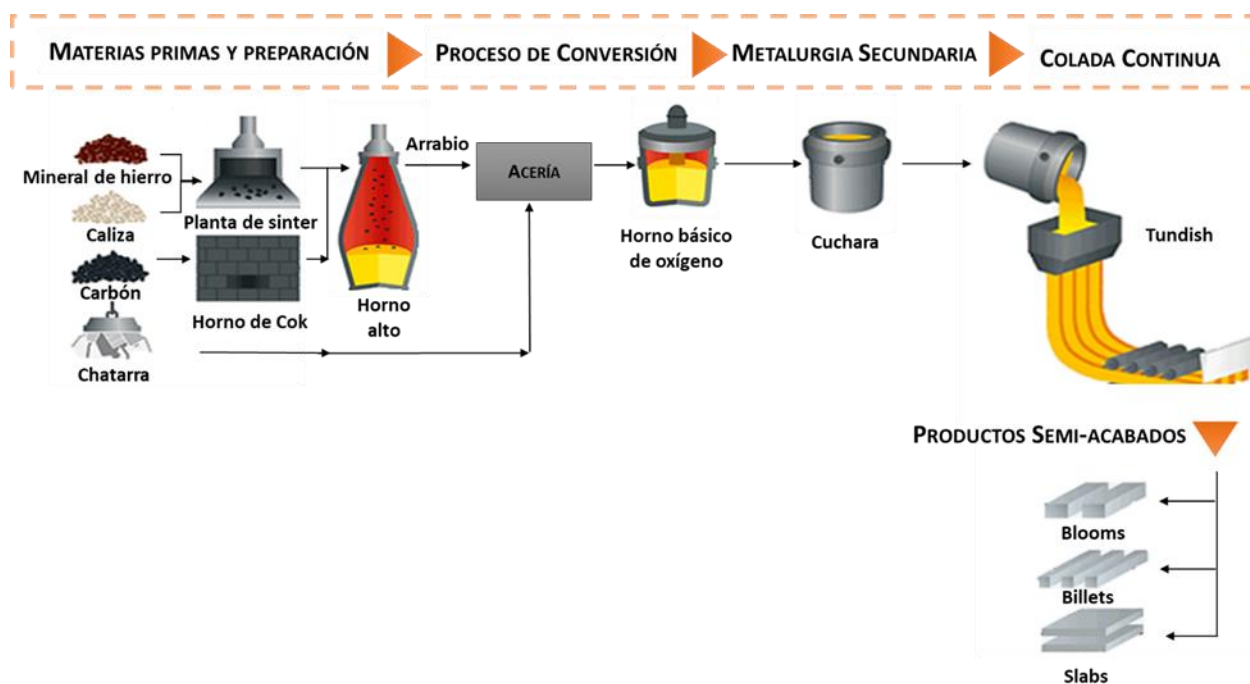
Los trabajos realizados que se presentan en esta comunicación se centraran en los problemas de desajuste de composición en las coladas producidas en una acería de colada continua. El acero es una aleación de hierro, carbono y otros elementos metálicos. Se debe tener en cuenta en primer lugar, que el acero no es un único producto, sino que se dispone de cientos de especificaciones con límites muy estrictos. Las pequeñas diferencias en la composición afectan a las propiedades mecánicas y al coste de cada acero. Mediante el análisis y la clasificación de las diferentes calidades obtenidas, se pretende mejorar las decisiones de los operadores y abrir nuevas posibilidades que permitan un mejor aprovechamiento del acero cuando no alcanza una calidad perfecta. El trabajo se realiza sobre los datos de producción de una acería situada en el Sur de Europa, con un tecnología considerada. El objetivo final es sentar las bases para mejorar la eficiencia del proceso de acería desde el punto de vista económico y medioambiental.

Para explicarlo en esta comunicación, se hará una breve descripción del proceso de acería y las etapas donde se identifican las no conformidades o desajustes de colada y su tipo. A continuación, se analizan los resultados de las coladas recogidas de proceso presentando los resultados obtenidos, para posteriormente indicar las conclusiones obtenidas.

3. El proceso de acería

El estudio se enfoca en la producción de acero a través de unidades de horno de oxígeno básico (BOF, Basic Oxygen Furnace) que transforman el arrabio en acero ajustando su composición química a la deseada. El proceso que se puede ver en la Figura 4, incluye tres etapas: conversión, metalurgia secundaria y colada continua.

Figura 4. Proceso de fabricación del acero



La etapa de conversión se realiza en un convertidor donde se vierte el arrabio, chatarra, magnesio, aleantes y cal para la formación de escoria. El arrabio tiene un contenido inicial de carbono de aproximadamente 4 a 4.8%, y se reduce a menos del 1%. La chatarra, proveniente de acero reciclado, actúa como agente refrigerante y representa entre el 15% y el 25% de la carga total, dependiendo de factores como la temperatura y la composición del hierro fundido. La cal y dolomía forman una capa de escoria que arrastra impurezas y preserva la temperatura. El calor necesario en el proceso se produce por las reacciones exotérmicas que se producen, precisando inyección de oxígeno.

Previo al proceso, se analiza la composición del arrabio y se clasifica la chatarra según su origen y propiedades. Luego, se carga en el convertidor junto con fundentes para formar escoria, que ayuda en la reducción del hierro fundido. Durante el proceso de soplado, se busca reducir los porcentajes de carbono (C), silicio (Si) y manganeso (Mn) por debajo de los niveles deseados, para luego ajustarlos en la metalurgia secundaria mediante adiciones.

Después del soplado, se verifica la descarburización adecuada y la temperatura del acero obtenido. En caso de no cumplir con los objetivos establecidos de composición, se pueden realizar soplados adicionales de oxígeno antes del vaciado. Durante el vaciado, se agrega la cantidad necesaria de ferroaleaciones para alcanzar la composición final del acero. La composición al inicio de la metalurgia secundaria se determina mediante muestras obtenidas antes del vaciado y el cálculo de los materiales agregados durante este proceso.

El acero líquido obtenido en el convertidor LD aún no es el producto final. En la metalurgia secundaria, que se realiza en el denominado horno cuchara, se ajusta su composición y se eliminan las inclusiones no metálicas de azufre (S), fósforo (P), nitrógeno (N), oxígeno (O) e hidrógeno (H) (W.Cramb, 2017). En esta etapa existen diferentes tratamientos, seleccionados según la composición en el convertidor y el grado de acero deseado. Los principales procesos son:

- Desulfurización y desfosforización: eliminación de azufre (S) y fósforo (P) utilizando escoria que captura estos elementos.

- Homogeneización de la temperatura y composición química del acero: calentamiento controlado mediante electrodos y soplado de gas inerte para facilitar la mezcla homogénea.
- Ajuste de elementos de aleación, mediante adiciones controladas.
- Desgasificación: reducción de las concentraciones de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno utilizando métodos como RH (Ruhrstahl-Hausen) o RH-OB en los cuales el acero circula a través de una cámara de vacío para capturar gases.

La homogeneización en temperatura y composición se logra mediante soplado, favoreciendo las reacciones líquido-sólido y la absorción de S y P en la escoria. A lo largo de la metalurgia secundaria, se pueden realizar diferentes procesos, cada uno de los cuales implica un ciclo de calentamiento, adición y pruebas. Típicamente, durante el proceso se realizan hasta dos análisis químicos y cuatro pruebas de temperatura para garantizar la adición adecuada de elementos.

Para reducir costos de energía y riesgos de contaminación por carbono, se busca disminuir el tiempo de procesamiento en el horno cuchara. Normalmente, las cargas permanecen allí durante 60-70 minutos, con dos análisis químicos. Si la carga permanece más tiempo, se realizan más análisis para evitar exceder los límites de carbono por la degradación de electrodos. La desgasificación, si es necesaria, se hace en la estación RH, donde el acero se somete a vacío. Se prueba el acero para detectar hidrógeno, repitiendo el tratamiento si es necesario. Una disminución del porcentaje de carbono en la primera colada en la estación RH requiere el proceso de MS para ajustarlo.

Después de la metalurgia secundaria, el horno cuchara se coloca en una torre giratoria con capacidad para dos cucharas. Mientras una cuchara vierte acero en el denominado tundish, la otra se prepara. Cuando la cuchara precedente se vacía en el tundish, la torre gira, permitiendo que la cuchara recién llegada llene el tundish. El acero fluye gradualmente hacia el tundish y se distribuye a través de sus boquillas a las líneas de colada continua. El tundish actúa como buffer para garantizar la continuidad de la colada durante el cambio de cucharas. Se toma una muestra final de acero líquido dentro del tundish antes de que solidifique, proporcionando una indicación representativa de la composición final del acero. La velocidad de colada se ajusta según el tipo de acero y la temperatura. Una temperatura alta en el tundish requiere una colada más lenta para evitar la solidificación prematura y prevenir perforaciones en la línea de colada. Por otro lado, temperaturas bajas en el tundish requieren una colada más rápida para evitar bloqueos en la línea debido a la solidificación prematura del acero en las boquillas o en el tundish.

Antes de iniciar la colada continua (CCM), se debe preparar el tundish calentándolo junto con las boquillas para evitar el choque térmico al comenzar la colada. Este proceso de precalentamiento puede tomar varias horas y también se necesita tiempo para reemplazar el tundish antiguo con uno nuevo. Dado que el acero líquido no puede almacenarse sin perder temperatura, las coladas están siempre en estaciones de procesamiento o en tránsito entre ellas. La caída de temperatura en la cuchara después de la colada continua puede provocar la solidificación prematura del acero en el tundish, lo que puede obstruir la línea de colada.

4. Análisis de situaciones de desencaje en el proceso de acería

Como se ha descrito en el anterior apartado, la programación en una acería implica etapas discontinuas como la conversión y la metalurgia secundaria, junto con la etapa continua de solidificación en máquinas de colada. Dos salidas intermedias son cruciales: la colada y el tundish. La colada representa la producción de acero en etapas previas, mientras que el tundish sirve como receptáculo para el acero líquido, alimentando la máquina de colada continua. Mantener un suministro constante de cargas es fundamental para evitar tiempos de inactividad del recipiente de colada. Los fallos en el proceso o en las adiciones pueden

provocar no conformidades donde la composición de las coladas no cumple las calidades deseadas. En estas situaciones, se debe decidir si se procede al paso a la colada continua o si se descarta el material como chatarra. Dado que cada carga puede representar unas 100 tn, es una decisión muy relevante en la que un error supone una gran pérdida, ya que los procesos por los que ha pasado representan un esfuerzo económico y unos consumos energéticos y emisiones importantes.

Conocer los orígenes de estas no conformidades y en qué etapas del proceso ocurren, permitirá mejorar las respuestas disminuyendo las pérdidas y los impactos ambientales producidos en el proceso. Se dice que la colada se encuentra desencajada cuando su composición o temperatura no cumple con los requisitos del grado de acero, establecidos por regulaciones internacionales o por las propias especificaciones de la acería. Estar fuera de estos límites resulta en un producto no conforme desde el punto de vista del control de calidad.

En la situación actual es el operador el que determina que hay que hacer ante una colada desencajada en composición una vez que culmina la metalurgia secundaria. En general, se trata de maximizar la producción y se tiende a priorizar el colar, asumiendo el riesgo de utilizar más recursos y energía en el proceso para obtener como resultado un producto que deberá ser rechazado posteriormente. Únicamente, no se cuela cuando se trata de la primera o de la última colada del tundish. Además, debido a la naturaleza del proceso y la mezcla de acero de diferentes coladas en el tundish para obtener una colada continua, una colada de no-primer calidad o chatarra afecta parcialmente tanto a la colada anterior como a la siguiente.

Durante las diversas etapas del proceso, que van desde la conversión hasta la colada continua, se realizan múltiples análisis de composición del acero. El primer análisis que tiene lugar es en la etapa de conversión, donde se busca verificar si los porcentajes de carbono (C), manganeso (Mn) y silicio (Si) están dentro de los límites requeridos por el grado de acero.

El segundo análisis ocurre después del sangrado, una vez añadidas las ferroaleaciones. En las etapas posteriores, se realizan adiciones de elementos para alcanzar la composición deseada y, si hay un exceso, corregirlo mediante un nuevo soplado, pero solo si se realiza antes del sangrado. Durante el sangrado, se añaden ferroaleaciones por debajo del objetivo de composición final, permitiendo ajustes finos en metalurgia secundaria.

En la metalurgia secundaria (MS), se analiza la composición en el horno cuchara para garantizar la calidad de la colada. Corregir un desencaje debido a un exceso de algún elemento es difícil, excepto para el carbono (C), que puede eliminarse en un proceso de desgasificación. En caso de errores en la adición de C, el operador puede ajustar el soplado para consumir el exceso. Si no se alcanzan los mínimos de algún elemento, se puede corregir fácilmente. Problemas como obstrucciones en las tolvas o cualquier otro problema que reduce las adiciones sobre lo previsto se pueden causar desencajes irresolubles. Otra situación que puede producir coladas de no-primer calidad son los problemas de soplado, como fallos en las canalizaciones o roturas de los latiguillos, ya que la homogeneización es deficiente. O se forman las llamadas "bolas de hierro" en las que los aditivos de la cuchara tardan en disolverse. En estos casos las muestras para análisis pueden considerarse poco representativas o fiables y los operadores pueden seguir el modelo calculado de adiciones sin confiar en los análisis intermedios, considerando que todas las adiciones estimadas son adecuadas en cantidad y rendimiento. Se siguen procedimientos similares cuando hay problemas con la obtención de muestras, el envío o el procesamiento en el laboratorio, e incluso cuando hay problemas con el ordenador del proceso.

La temperatura, también, es crucial en todo el proceso de producción de acero y por ello se va comprobando a medida que transcurre el mismo, esto incluye la etapa de colada continua, donde debe mantenerse dentro de ciertos rangos. Si la temperatura es demasiado baja, existe el riesgo de solidificación prematura, causando obstrucciones en las boquillas y pérdida de líneas en el tundish, lo que reduce la productividad (incluso la pérdida completa del tundish si

se cierran varias líneas). Por otro lado, si la temperatura es demasiado alta, la solidificación se ralentiza, lo que puede resultar en perforaciones en la línea de colada continua perdiendo la línea de producción e incluso provocando daños en la propia máquina.

Ya que en acería el objetivo principal es maximizar el volumen de producción (toneladas de acero), el rendimiento en la misma se mide en términos de ritmo de trabajo y cuando aparece una colada desajustada, el procedimiento de actuación se basa en la fiabilidad de la muestra y en qué fase se encuentra. Si la muestra es poco fiable pero las adiciones son correctas, la colada continúa normalmente; si la muestra es fiable (o no lo es, pero las adiciones no son correctas), se procede con la colada excepto en la primera o última de una secuencia. Esto último es así, porque cuando la máquina está parada o a punto de pararse, es más rentable detener la producción ya que se evita el coste del tundish. Sin embargo, si en etapas anteriores ya es detectado el exceso en la presencia de algún elemento, como no se puede corregir, se considera directamente un desajuste sin más análisis, haciendo que la reprogramación sea más rápida. Este esquema de funcionamiento en la acería podría mejorarse si la decisión se basara en una combinación de datos de producción teniendo en cuenta las calidades que corresponden a cada clase de acero y no solo la tasa de producción.

5. Potencial de mejora en el tratamiento de coladas desajustadas

Para desarrollar e implementar un sistema de toma de decisiones que incorpore información de proceso, de planificación de la planta, los resultados de los análisis, etc se debe conocer que un sistema de estas características supone un ahorro potencial importante. Para ello se ha realizado un análisis de la operación de la acería a lo largo de cuatro años, recabando datos de todas las coladas desencajadas (más de 3.000). De aquellas que fueron coladas y se trataron como chatarra, no hay datos sobre su composición real, por lo que no resulta sencillo evaluar si se hubieran podido usar como segunda calidad. De ahí, que se descarten los datos correspondientes, quedando información sobre 2.905 coladas. Estas fueron efectivamente coladas, y se conoce cuál fue su composición final, y el uso que se les dio. Los elementos cuya composición se evalúa son carbono(C), manganeso (Mn), nitrógeno (Ni), hidrógeno (H) y silicio (Si). El resto se agruparon bajo el término "otros", ya que los posibles desajustes en los metales (cromo (Cr), vanadio (V), níquel (Ni)...) presentan un comportamiento similar independientemente del elemento desajustado.

Como se ha dicho anteriormente, los datos analizados incluyen cerca de 3.000 casos de coladas con una muestra previa desencajada. No se tuvieron en cuenta los desajustes causados por exceso o defecto de temperatura, ya que esta cuestión está más vinculada a los hornos de recocido de los trenes de laminación.

Se realizó una evaluación de la información suministrada intentando detectar que parámetros y en que situaciones, se podría realizar un tratamiento específico de los desencajes en composición. En principio, se utilizó como elemento para valorar el interés el Ahorro Promedio (AP), entendiéndolo como tal ahorro de costes que se hubiera producido de haber tomado la decisión contraria a la tomada inicialmente. El ahorro promedio se midió en euros por tonelada, para tener en consideración las posibles diferencias en el peso de la carga promedio.

Se analizaron factores relativos al proceso, pero no se encontraron patrones significativos. Los fallos son muy variados y las consecuencias no dependen solo de cuál es el fallo sino de las cantidades afectadas y del tipo de acero. Pero si se encontró un claro elemento diferenciador en la clase de acero, con resultados muy diferentes en cuanto a la clase. Hay cientos de clases de acero con su formulación específica, pero resulta más informativo ceñirse a las familias de acero. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Ahorro promedio en función del tipo de acero

| Familia de acero | Uso final | Número Coladas | Ahorro Promedio (€/ton) |
|------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------|
| AA | Railes Alta Velocidad | 317 | 51.91 |
| AK | Rail cabeza endurecida | 1.005 | 9.84 |
| BE | Alambre de estampación rico en boro | 89 | 33.93 |
| CT | Alambrón pre-tensionado | 518 | 9.74 |
| HA | Alambrón para cables y muelles | 207 | 8.29 |
| HL | Alambrón para aro de neumático | 403 | 21.33 |
| HN | Alambrón para neumáticos | 242 | 20.55 |
| RK | Rail (norma AREMA) | 124 | 9.99 |
| Total | | 2.905 | 17.53 |

En el caso de los aceros para railes para trenes de alta velocidad, la mejora del IEY es muy elevada. La razón principal es que, para las aplicaciones ferroviarias convencionales, se puede utilizar un acero de segunda calidad, lo que permite dar uso a lo que fue colado y no usarlo como chatarra. Pero no ocurre así, cuando se trata de producto orientado a la alta velocidad, en el que las coladas desencajadas se trataron como chatarra. Por ello, la decisión de colar aun estando desencajada implica un grave riesgo de pérdida, suponiendo una mejora evidente en este caso y un gran ahorro promedio (de casi 5.000 €) por colada, el intentar ajustar la decisión y solo colar las que tengan una alta probabilidad de estar ajustadas.

El acero utilizado para el alambre de estampación, aunque es diseñado para una aplicación muy específica (debido a la necesidad de adición de boro), es fácilmente reutilizable como acero de segunda calidad. La adición de boro se produce de forma tardía en el proceso y las etapas iniciales son bastante similares a las de otros tipos de acero comunes, lo que facilita su reutilización con una pérdida de valor muy leve. Además, la escasa contaminación cruzada que podría producirse favorece la secuenciación de aceros de otras familias, reduciendo la necesidad de rearmar con frecuencia los tundish.

En cuanto a los usos del acero para carriles de cabeza endurecida, alambrón pretensado y alambrón para cables y muelles, los resultados no son tan buenos. Los aceros para carriles de cabeza endurecida se alean con cromo (Cr), para evitar su degradación. A diferencia de las adiciones de boro, la presencia de cromo hace casi imposible adaptar la colada a otro grado de acero. Además, la disparidad entre las normas europeas y americanas para el acero templado en caliente para carril de cabeza endurecida complica su reutilización debido a los distintos requisitos de composición.

En el caso del alambrón para cables y muelles, el bajo contenido de carbono imposibilita la reutilización de una colada desajustada como segunda calidad. Sin embargo, en el caso de las dos aplicaciones del acero para alambres de neumáticos, tanto para la conformación de láminas de caucho y acero como para la obtención de anillos metálicos para aros de neumáticos, a pesar de los diferentes objetivos de composición de carbono, la reutilización entre las dos familias es significativa. Esto supone una oportunidad de evitar pérdidas utilizando la colada desencajada como segunda calidad. Sin embargo, los beneficios no son

tan significativos como en el caso del ferrocarril de alta velocidad, ya que cada aplicación de alambre de neumático sólo se alinea con un extremo de los objetivos de composición de carbono, sin ventaja en las coladas desajustadas del otro.

6. Conclusiones.

La producción del acero en las acerías continuas con proceso BOF, es un proceso discontinuo en el que se pueden reconocer tres etapas. En ellas el arrabio es descarbonizado y afinado en su composición. Durante el proceso se deben realizar adiciones de materiales, y procesos que se ajustan a cada tipo de acero por un modelo físico incorporado en el ordenador de proceso. Durante el proceso se realizan una serie de análisis de composición intermedio que permite realizar ajustes al modelo inicial para conseguir los resultados deseados. En la práctica, dado que se trata de cargas de unas 100 tn que se encuentran a temperaturas muy elevadas, los análisis realizados pueden no ser fiables. Por las dificultades en el control y no disponer de pruebas fiables hace que se produzcan coladas desajustadas en composición. En general, se tiende a pasarlas a colada continua por varias razones: maximizar la producción para cumplir los objetivos previstos para la instalación, la idea de que el error puede estar en la prueba de composición y que se podrá utilizar como segunda calidad o incluso, a veces, como primera calidad; y por último, y muy relevante, evitar el coste que supone el tundish que habría que desechar y la posibilidad de un fallo de secuencia (que obligaría a las siguientes cargas a esperar a que se caliente otro tundish). Del estudio realizado se advierte que, con el número de análisis que se realiza se podría realizar una estimación mejor de cuál es la probabilidad de que la colada sea o no aprovechable. Esta sería una línea de desarrollo muy interesante, pero solo en los casos que suponga un ahorro relevante. Por ello, se ha realizado un estudio del ahorro que supondría una mejor elección en cuanto a si la carga se lleva a colada continua o no. Se ha basado en un estudio sobre las coladas desenchajadas producidas en cuatro años de operación de una acería. Los resultados más interesantes se presentan cuanto el estudio se realiza en función del tipo de acero. Hay tipos de acero, como el alambón pretensado, entre otros, en los que no hay márgenes para el uso de segundas calidades y los desenchajados conllevan un uso como chatarra en buena parte de los casos. Pero en otros como los carriles de alta velocidad se producirían ahorros muy significativos. En general, aplicado a todos se produciría un ahorro en promedio, pero se ha encontrado que, al menos, considerar esta opción, para algunas familias de acero mejoraría de forma muy importante el tratamiento de las coladas desenchajadas.

7. Referencias

- Birat, J.-P. (2016). Steel cleanliness and environmental metallurgy. *Metallurgical Research & Technology*, 113, 201. <https://doi.org/10.1051/metal/2015050>
- Eurofer. (2021a). *European Steel in Figures 2021* (p. 72) [Data covering 2020]. The European Steel Association. <https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2021/European-Steel-in-Figures-2021.pdf>
- Eurofer. (2021b). *What is steel and how is steel made?* [Com]. Eurofer. The European Steel Association. <https://www.eurofer.eu/about-steel/learn-about-steel/what-is-steel-and-how-is-steel-made/>
- Eurofer. (2023). *European Steel in figures 2023*. The European Steel Association. https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2023/FINAL_EUROFER_Steel-in-Figures_2023.pdf

- Ma, S., Wen, Z., Chen, J., & Wen, Z. (2014). Mode of circular economy in China's iron and steel industry: A case study in Wu'an city. *Journal of Cleaner Production*, 64, 505-512. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.008>
- Nechifor, V., Calzadilla, A., Bleischwitz, R., Winning, M., Tian, X., & Usubiaga, A. (2020). Steel in a circular economy: Global implications of a green shift in China. *World Development*, 127, 104775. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104775>
- Pauliuk, S., Wang, T., & Müller, D. B. (2012). Moving Toward the Circular Economy: The Role of Stocks in the Chinese Steel Cycle. *Environmental Science & Technology*, 46(1), 148-154. <https://doi.org/10.1021/es201904c>
- W.Cramb, A. (2017). High Purity, Low Residual, and Clean Steels. En *Impurities in Engineering Materials* (pp. 49-89). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203751190-4>
- WorldSteel Association. (2021). *Raw materials in the steel industry* (World Steel Association Publications, p. 2) [Fact sheet]. World Steel Association AISBL. <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:16ad9bcd-dbf5-449f-b42c-b220952767bf/fact%2520sheet%2520raw%2520materials%25202021.pdf>
- WSA. (2023). *World Steel in Figures 2023*. World steel Association. <https://worldsteel.org/publications/bookshop/world-steel-in-figures-2023/>
- WSA. (2024, marzo 6). *Circular Economy. Steel - the permanent material in the circular economy* [Association]. Worldsteel.Org. <https://worldsteel.org/circular-economy/>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible



Esta comunicación se alinea con el objetivo 12 de desarrollo sostenible, de producción y consumo responsables, ya que, mediante la eficiencia en el uso de recursos: Se menciona la necesidad de mejorar la eficiencia del proceso para reducir las no conformidades en la transformación de arrabio en acero. Al identificar y clasificar estas no conformidades, se busca optimizar el uso de recursos, como materias primas y energía, lo que contribuye a una gestión más sostenible de los recursos. Al mencionar la importancia de aumentar la sostenibilidad medioambiental de la instalación, se indica un interés en reducir el impacto ambiental del proceso. Esto puede implicar la minimización de emisiones, la gestión adecuada de residuos y la adopción de prácticas más respetuosas con el medio ambiente en la producción de acero.