

MEJORAMIENTO DE LA COLABILIDAD DE ACEROS BAJO CARBONO CALMADOS AL ALUMINIO Y TRATADOS CON ALAMBRE DE FERROCALCIO ALTAMENTE COMPACTADO

Francisco Ballesteros
Altos Hornos de México S.A.B. bballesterosc@gan.com.mx

Enrique Aguilar
Altos Hornos de México S.A.B. eaguilar@gan.com.mx

Juan Antonio Guajardo
Altos Hornos de México S.A.B. jaguajardorodriguez@gan.com.mx

Fernando Velázquez
Injection Alloys México S.A. de C.V. fernando.velazquez@injectionalloys.com

Adalid Ramirez
Injection Alloys México S.A. de C.V. adalid.ramirez@injectionalloys.com

Ramiro Becerra
Injection Alloys México S.A. de C.V. ramiro.becerra@injectionalloys.com

Resumen

La colabilidad de los aceros calmados al aluminio disminuye por las inclusiones de alúmina formadas durante la desoxidación del metal y ocasionan el obturamiento de las buzas del distribuidor, por lo que dichas inclusiones deben ser modificadas química y morfológicamente en aluminatos de calcio líquidos mediante la inyección de Calcio encapsulado. Estos aceros son difíciles de tratar con alambres convencionales de Calcio-Silicio debido al bajo contenido de Silicio del metal, y los alambres de calcio puro exhiben alta reactividad en el acero si no penetran lo suficiente en la olla de tratamiento. Este trabajo describe las pruebas realizadas por Altos Hornos de México en el tratamiento de los aceros calmados al Aluminio y de Silicio restringido, con un alambre de Ferro-Calcio altamente compactado que retarda la evaporación del calcio y beneficia su reacción con las inclusiones. La colabilidad mejoró notablemente, en términos de un incremento en la velocidad de colado de 1.2 a 1.35 m/min y se redujo en un 60 % las toneladas de acero regresado de máquina de colada continua por baja colabilidad. Las inclusiones de alúmina se modificaron adecuadamente a inclusiones del tipo Al_2O_3 -CaO líquidos y el rendimiento del alambre de Ferro-Calcio fue 32%.

Palabras Clave: Colabilidad, inclusiones, alúmina, Ferro-Calcio.

Introducción

La constante competencia que existe en la producción de aceros de alta calidad y la actual situación global ha llevado al productor de acero a optimizar sus procesos con el fin de disminuir sus costos y prevalecer en el mercado. Altos Hornos de México (AHMSA) consciente de esta situación ha ampliado su gama de productos desarrollando grados de acero bajo carbono calmados al aluminio (Low Carbon Aluminum Killed) y con Silicio restringido (0.03% máximo). Estos grados son desoxidados con Aluminio, por lo que el producto de desoxidación después del vaciado del convertidor es la alúmina (Al_2O_3) cuyo punto de fusión es de 2072°C . Durante el proceso de refinación secundaria en el horno olla (1580°C), dichas inclusiones de alúmina prevalecen en estado sólido y se aglomeran formando clústers de mayor tamaño [1,2] provocando baja colabilidad del metal que durante el proceso de colada continua se adhieren a las paredes de las buzas y a la barra tapón ocasionando el cierre prematuro de la olla. Estas inclusiones deben ser eliminadas del metal líquido modificándolas a aluminatos de calcio mediante la inyección del Calcio en alambre. La inyección de CaSi CCW en estos aceros se dificulta por su rendimiento y por el bajo contenido de Silicio requerido. Dicho alambre aporta Silicio al acero y si es inyectado en exceso para garantizar la adecuada modificación de las inclusiones, entonces el metal quedará fuera de especificación por alto contenido de Silicio. Por el contrario, para evitar sobrepasar este máximo % de Silicio si se inyectan bajas cantidades de alambre entonces el calcio será insuficiente para globulizar las inclusiones repercutiendo sobre la colabilidad del metal. Por esta razón se decidió realizar pruebas con un alambre de Ferro-Calcio con alta compactación que ayude a penetrar adecuadamente en la olla y retarde la evaporación del calcio, incrementando su rendimiento (mayor recuperación de ppm Ca) y no aporte Silicio al acero.

Antecedentes

AHMSA utiliza la ruta de aceración Convertidor Básico al Oxígeno - Horno Olla – Colada Continua. La capacidad de sus ollas de tratamiento es de 152 toneladas y produce planchones de acero grado comercial (grados hojalata sin Calcio) y aceros calmados al Aluminio y Silicio (Dual killed y “Gas amargo”) los cuales son tratados en el horno olla con CaSi CCW. Los nuevos grados de acero calmados al Aluminio y con Silicio restringido (0.03% máx) en un principio también eran desoxidados en el vaciado con Carburo de Calcio (además del aluminio) sin embargo el indicador de toneladas de acero regresado por baja colabilidad era mayor. Para lograr una eficiente desoxidación del metal previa al tratamiento de refinación en el Horno Olla y al tratamiento con FerroCalcio de alta compactación, fue necesario cambiar la práctica de vaciado incrementando el consumo de aluminio en posta desde 0.6 hasta 1.2 kg Al/ton y disminuyendo el de carburo de calcio de 1.4 hasta 0.4 kg de Carburo/ton. Con este cambio, la generación de inclusiones de alúmina fue mayor por lo que el tratamiento con Ferro-Calcio sería determinante para mejorar la colabilidad del metal. En la Figura 1 podemos observar la evolución de los consumos de estos desoxidantes y el indicador de toneladas de acero regresado de máquina de colada continua.

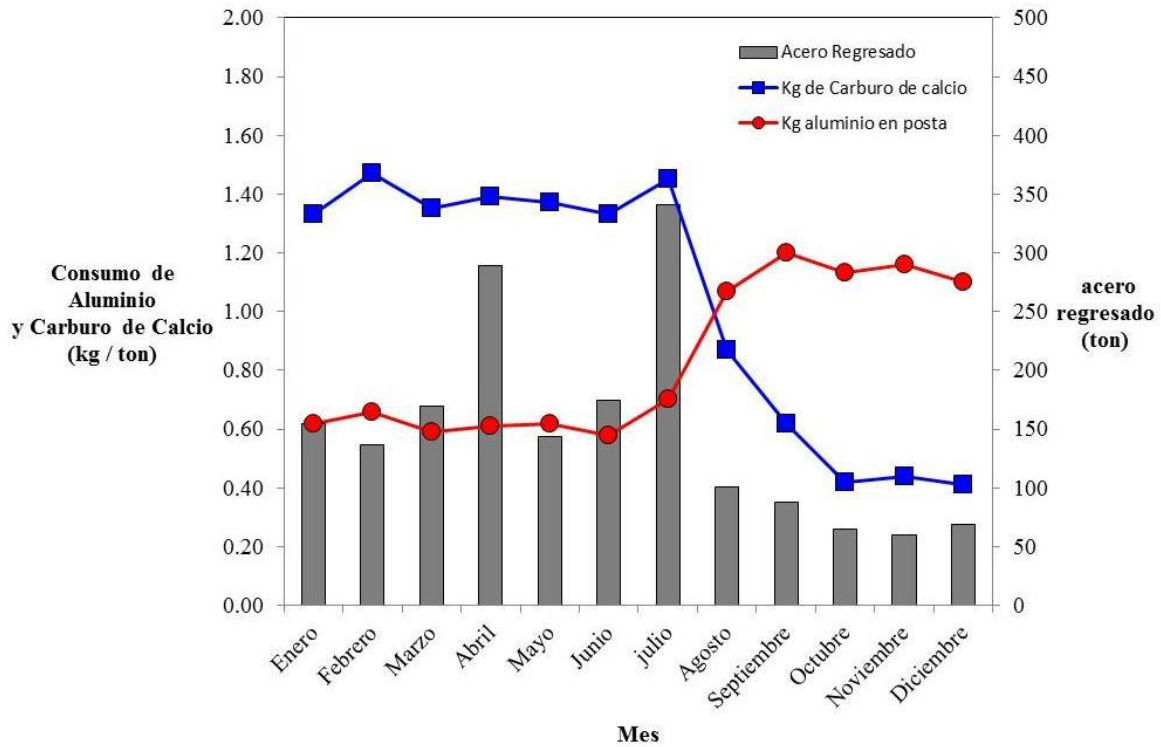


Figura 1.

Desarrollo de pruebas

Se realizaron las primeras pruebas con Ferro-Calcio de alta compactación en el Horno Olla 3 de AHMSA en una secuencia de 11 coladas de acero calmados al aluminio con silicio restringido. Este alambre de Ferro-Calcio altamente compactado (100%) tiene un diámetro de 14 mm y el espesor de la lámina es de 1.0 mm. El llenado del alambre es de 280 gr/m de polvo de Ferro-Calcio con una pureza de Ca de 30% y 70% de Fe. El objetivo recuperación de Ca en el Horno Olla fue de 16 ppm, por lo que se determinó inyectar una longitud constante de alambre de 90 metros por colada a una velocidad de 130 m/min. Con esta longitud de alambre el consumo de Calcio por tonelada fue 0.050 kg. A medida que las pruebas avanzaron se realizó un ajuste en la velocidad de inyección a 120 m/min con el objetivo de optimizar el rendimiento del alambre.

Resultados y Discusión

Rendimiento vs Velocidad de inyección

La Figura 2 muestra la evolución del rendimiento del alambre de Ferro-Calcio altamente compactado con la velocidad de inyección. Podemos notar que en la mayoría de las coladas tratadas el rendimiento osciló entre 28 y 36% independientemente de la velocidad de inyección y hubo dos coladas que tuvieron rendimiento de 23%.

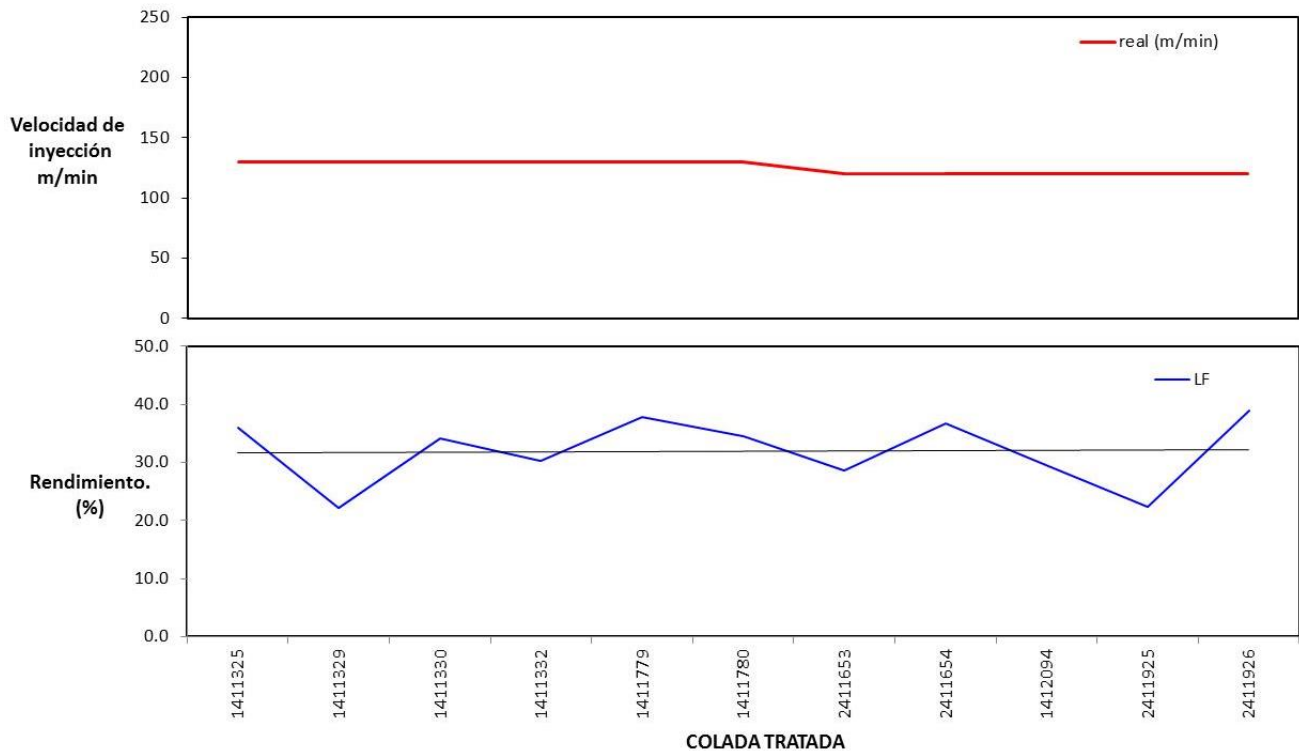


Figura 2.

La Tabla I muestra los resultados de las pruebas realizadas en estos grados de acero bajo C calmados al aluminio. El rendimiento promedio del alambre de Ferro-Calcio altamente compactado fue 31.9% con una desviación estándar de 5.8. El contenido de calcio promedio al final del tratamiento en el LF fue 16 ppm Ca y el consumo específico de Calcio por tonelada fue 0.050 kg Ca/ton, es decir, 25.2 kg polvo de Ferro-Calcio por colada (7.5 kg Ca por colada).

TABLA I RESULTADOS GENERALES										
	coladas tratadas	metros inyectados / colada	Velocidad de inyección (m/min)	Kg FeCa/colada	Kg Ca /colada	kg Ca/ton	ppm Ca	Desvest	Rendimiento (%)	Desvest
TOTAL	11	90	120 - 130	25.2	7.5	0.050	16	3.1	31.9	5.8

En las dos coladas que tuvieron rendimiento de 23% se revisaron las condiciones de proceso y se encontró que antes de la inyección del Ferro-Calcio altamente compactado, el contenido de aluminio en el acero era menor a 0.025% Al, es decir que el acero aún no estaba suficientemente desulfurado (0.0081% S en la colada 1411329) por lo que el Ca trabajó como desulfurante. Además se inyectó alambre de Aluminio (50 kg) para ajustar el análisis químico por encima 0.035% de Al, y dicha inyección se realizó menos de 5 minutos antes de la inyección de Ferro-Calcio, razón por la cual, el Aluminio seguía desoxidando (formando Alúmina) y no hubo tiempo suficiente para que el vapor de Ca reaccionara con estas partículas resultando en una recuperación baja de ppm Ca (11 ppm). En el resto de las coladas el contenido de Al en el acero ya se encontraba ajustado arriba de 0.030% y en aquellas en las que se inyectó alambre, solo fueron 13 kg de Aluminio por colada y se realizó con suficiente tiempo para desoxidar y desulfurar el acero (más de 5 minutos antes de la inyección de alambre).

La Figura 3 muestra los contenidos de Al y S en el acero antes de la inyección del Ferro-Calcio. En general se observa que las coladas que tuvieron rendimiento mayor a 30%, fueron aquellas en las cuales dichos elementos tuvieron niveles propicios para la formación de aluminatos de Calcio líquidos (símbolos verdes debajo de curva azul) y en aquellas coladas con rendimiento menor a 30%, sus niveles de azufre S estaban por encima de esa curva (símbolos rojos), es decir, tuvieron condiciones propicias para formar aluminatos de Ca sólidos y CaS.

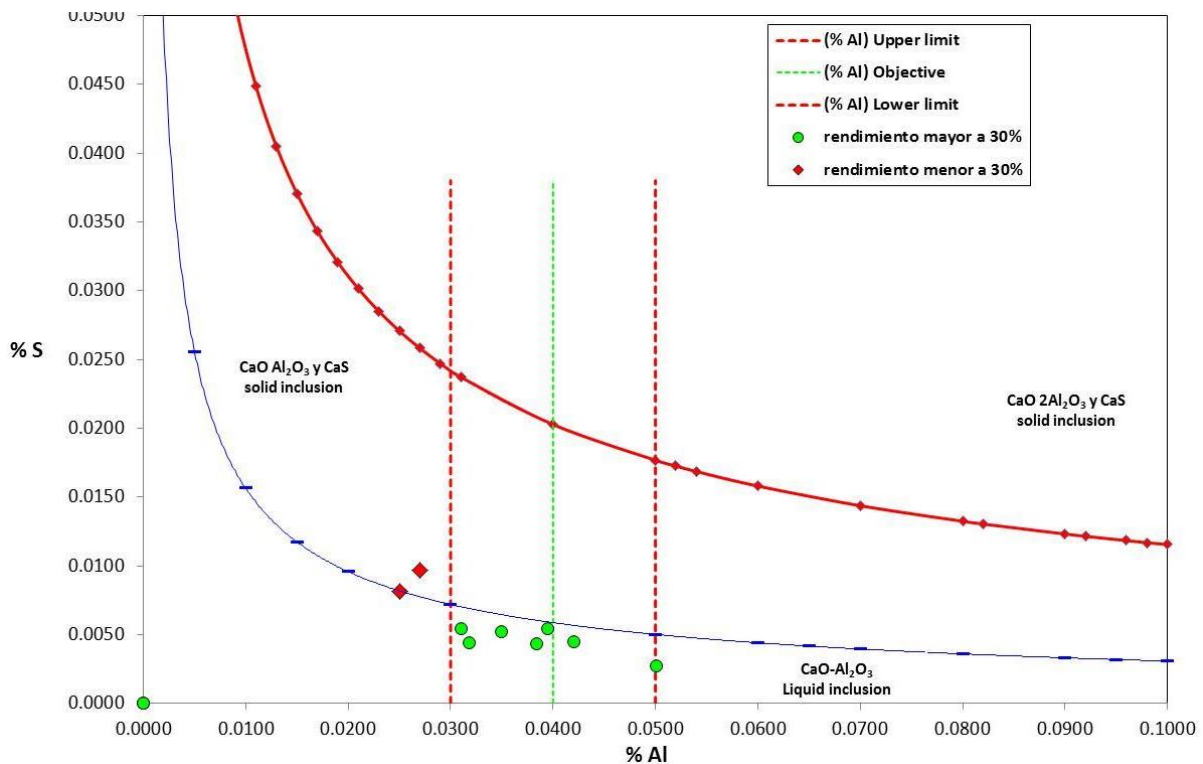


Figura 3.

Recuperación de Calcio y contenidos de Al y S después del tratamiento con Ferro-Calcio altamente compactado

La Figura 4 muestra las recuperaciones de Ca y los contenidos de Al y S en el sistema Fe-Al-S-Ca-O a 1600°C, después de la inyección de Ferro-Calcio altamente compactado en el Horno Olla 3. En dicha figura se observa que teóricamente, con recuperaciones de Ca de 10 a 22 ppm, y con niveles de Al entre 0.035 y 0.050% (350 a 500 ppm), fue efectiva la modificación de inclusiones de alúmina a aluminatos de Calcio líquidos con contenidos de CaO entre 45 y 55%, propiciado una adecuada colabilidad del acero. En la parte izquierda de dicha Figura (Diagrama Ca-S) se observa que en la mayoría de las coladas inyectadas con Ferro-Calcio, los niveles de S finales fueron inferiores a 60 ppm (0.0060% S) y con recuperaciones de calcio que no propiciaron la formación de CaS que afectara la colabilidad del acero. Sin embargo en las 2 coladas que tuvieron alto contenido de S (mayor 0.0090%) antes de la inyección del alambre, los niveles de S finales quedaron cerca de la línea de equilibrio para la formación de CaS por lo que posiblemente una fracción de estos aluminatos de calcio tenían sulfuros.

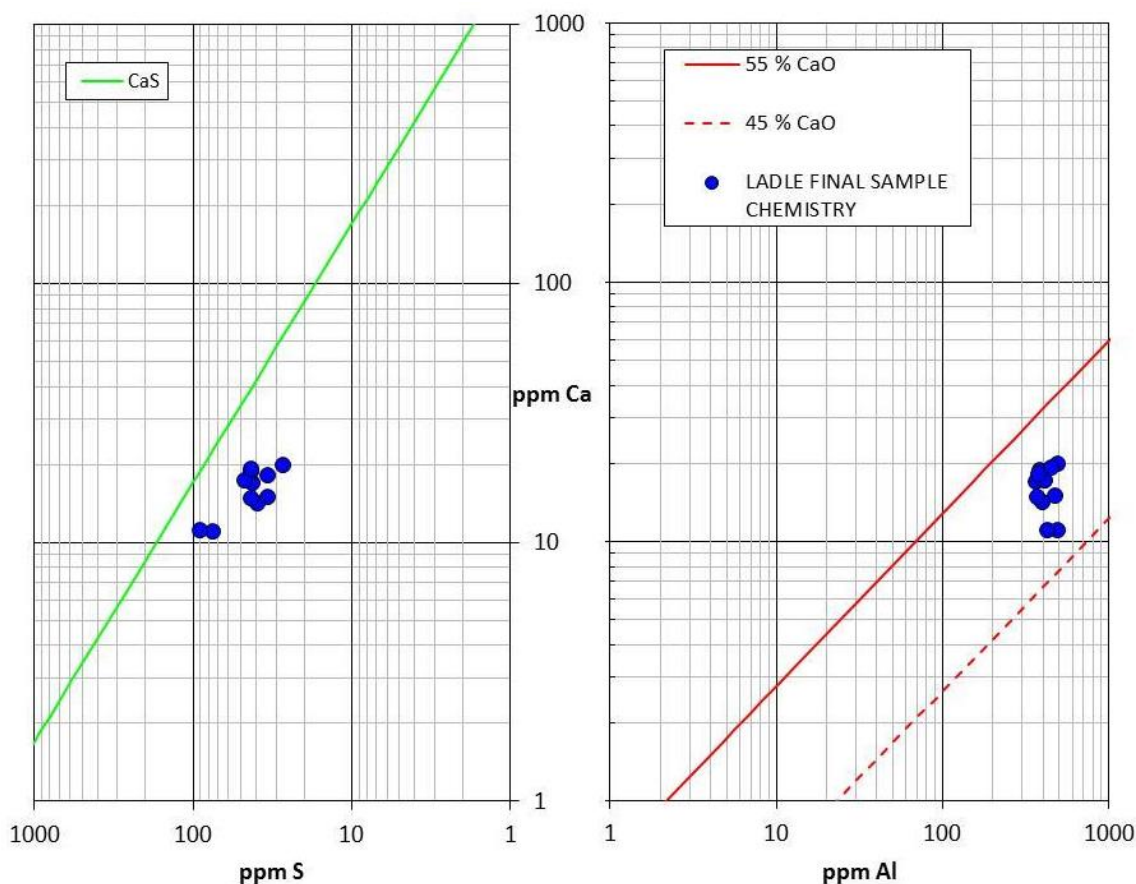


Figura 4.

Análisis químico y morfológico de las inclusiones

Para confirmar la eficiente modificación de inclusiones con la inyección Ferro-Calcio de alta compactación y comparar el estado inclusionario en coladas sin tratamiento de Calcio, muestras de acero obtenidas al final del tratamiento en el Horno Olla fueron analizadas por Microscopia electrónica de Barrido. La Tabla II presenta las condiciones de tratamiento de las coladas que fueron muestreadas y analizadas para este estudio

TABLA II			
Colada	Estación de tratamiento	Cantidad de <i>Ferro-Calcio</i> inyectado	(%) <i>Ca LF</i>
<i>1412093</i>	Horno Olla 2	Sin Calcio	0.0002
<i>1412094</i>	Horno Olla 3	25.2 kg Ferro-Calcio Altamente compactado	0.0015

Preparación metalográfica.

Las muestras de acero fueron seccionadas y preparadas metalográficamente, y en condición de pulido se observaron en un microscopio óptico a fin de localizar inclusiones representativas [3,4]. Se utilizó un microscopio electrónico marca PHILIPS modelo XL30ESEM equipado con un microanalizador EDX para el análisis químico de inclusiones utilizando un voltaje de aceleración de 20 kV y un tiempo de análisis vivo de 30 seg. La cuantificación del número y fracción en área de inclusiones se realizó con un analizador de imágenes acoplado a un microscopio óptico Olympus Vanox Mod. AHMT3. Estas estimaciones se realizaron sobre la superficie en condición de pulido en dos etapas. Primero se evaluaron 50 campos a 200 X, enseguida la muestra se preparó nuevamente desde la operación de desbaste y se analizaron 50 campos más. El área total analizada representó 40.8 mm². El software utilizado para el tratamiento de imágenes fue el Image Pro Plus Versión 4.1.

Colada 1412093 sin tratamiento de Calcio

Fueron analizadas 10 inclusiones representativas, de las cuales se obtuvo su composición química y la micrografía correspondiente. Se encontraron: 6 inclusiones de Alúmina (más de 92 % Al₂O₃) con trazas de MgO o CaO (menores a 8%), con morfología irregular y de tamaño menor a 10 µm; 2 espinelas (Al₂O₃ – MgO) de morfología irregular y de tamaño menor a 10 µm, las cuales son resultado de la interacción de la alumina con el recubrimiento refractario de la olla [5] y 2 inclusiones de Alúmina con bajos CaO (sólidas con menos de 20 % CaO) con morfología semi-esférica también de menos de 10 µm.

Colada 1412094 tratada con Ferro-Calcio altamente compactado

En esta muestra se analizaron 4 inclusiones modificadas a aluminatos de calcio líquidos, 2 de ellas con 65 % Al₂O₃ – 35% CaO, y las otras 2 inclusiones con 65% Al₂O₃ – 29% CaO – 6%

MgO, todas de morfología globular y tamaño menor a 10 μm ; 3 inclusiones en proceso de modificación a aluminatos de calcio líquidos (tratando de alcanzar el equilibrio), con 69 % Al_2O_3 , y contenidos variables de CaO (7%, 11% y 19%) y MgO (14%, 19% y 21%), de morfología semi-esférica y tamaño menor a 5 μm ; y 3 espinelas de composición típica (76% Al_2O_3 – 24%CaO), menores a 10 μm y de morfología globular. En la Figura 5 se grafican en el diagrama ternario Al_2O_3 – CaO – MgO, ambas muestras de acero, con Ferro-Calcio altamente compactado y sin Calcio. La línea discontinua roja representa la zona de líquidus en el corte isotérmico de 1600 $^\circ\text{C}$, temperatura de trabajo en el Horno Olla. En dicha Figura se observa la clara modificación de las inclusiones de alúmina y espinelas a aluminatos de calcio líquidos, en la muestra de la colada 1412094, inyectada con 25.2 kg de Ferro-Calcio y que tuvo una recuperación de 0.0015% Ca (15 ppm). En contraste, en la muestra de la colada 1412093, que no se inyectó con alambre de Calcio, solo se presentan inclusiones ricas en Alúmina y con trazas de MgO y CaO.

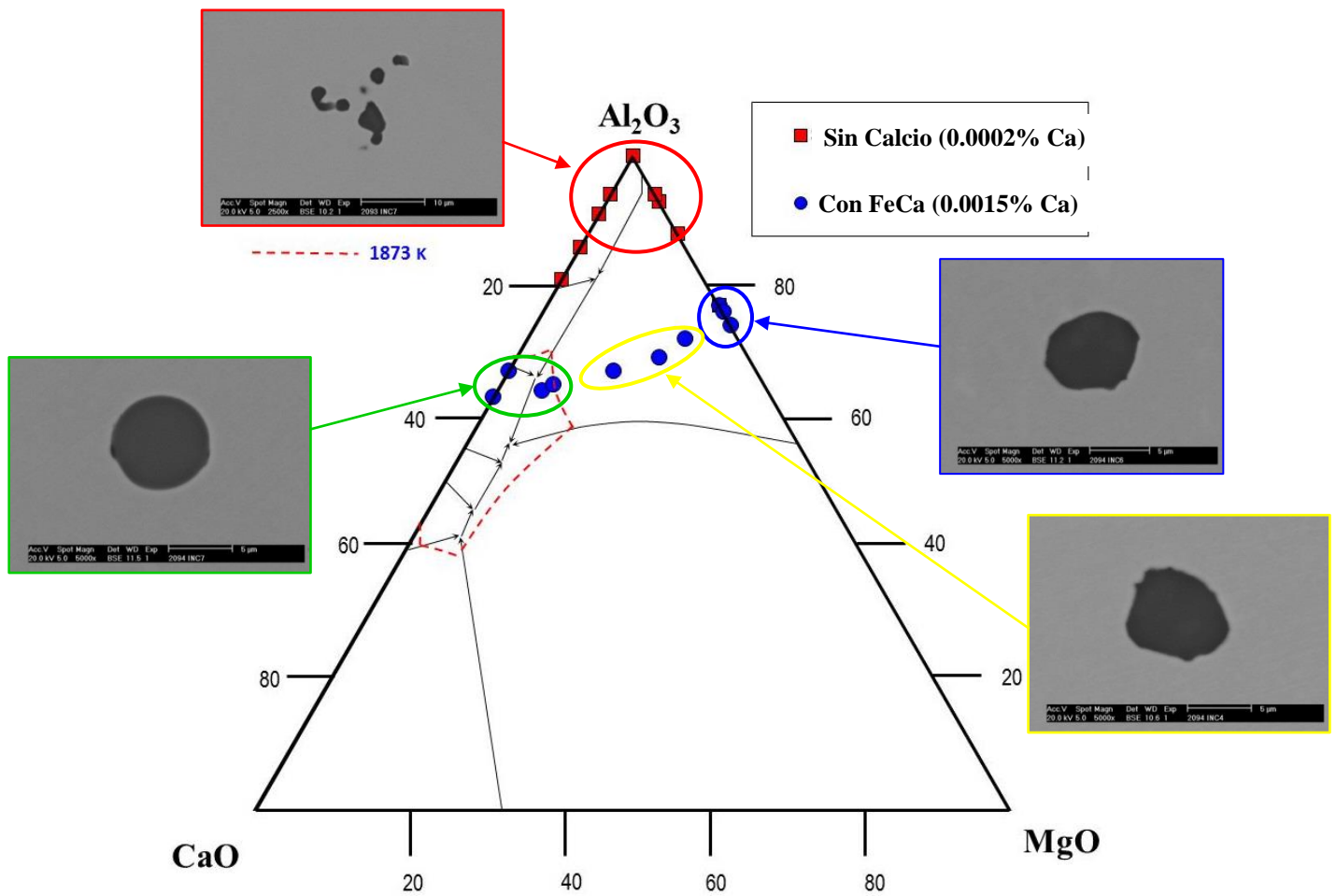


Figura 5.

Cuantificación de Inclusiones

Inclusiones por mm^2 y Fracción en área

Con respecto a la cuantificación de inclusiones realizada en el analizador de imágenes en ambas muestras de acero, se observa que ambas coladas (1412093 sin Calcio y 1412094 con 25.2 kg de Ferro-Calcio altamente compactado) tienen valores similares de Número de inclusiones por mm^2 , 5.7 y 5.0 respectivamente. Sin embargo, el tratamiento con Ferro-Calcio de la colada 1412094 marcó una diferencia en el nivel de limpieza del acero, representado por un valor más bajo de fracción en área de las inclusiones (0.0066 vs 0.0125), lo cual representa casi la mitad del tamaño de partícula. Lo anterior significa que a pesar de tener casi el mismo número de inclusiones por mm^2 , las inclusiones de la muestra sin Calcio fueron principalmente alúminas y espinelas sin modificar del doble de tamaño que las inclusiones de aluminatos de calcio líquidos globulares de la colada tratada Ferro-Calcio. En la Figura 6 se muestran los valores de fracción en área y Numero de inclusiones por mm^2 en ambas muestras analizadas.

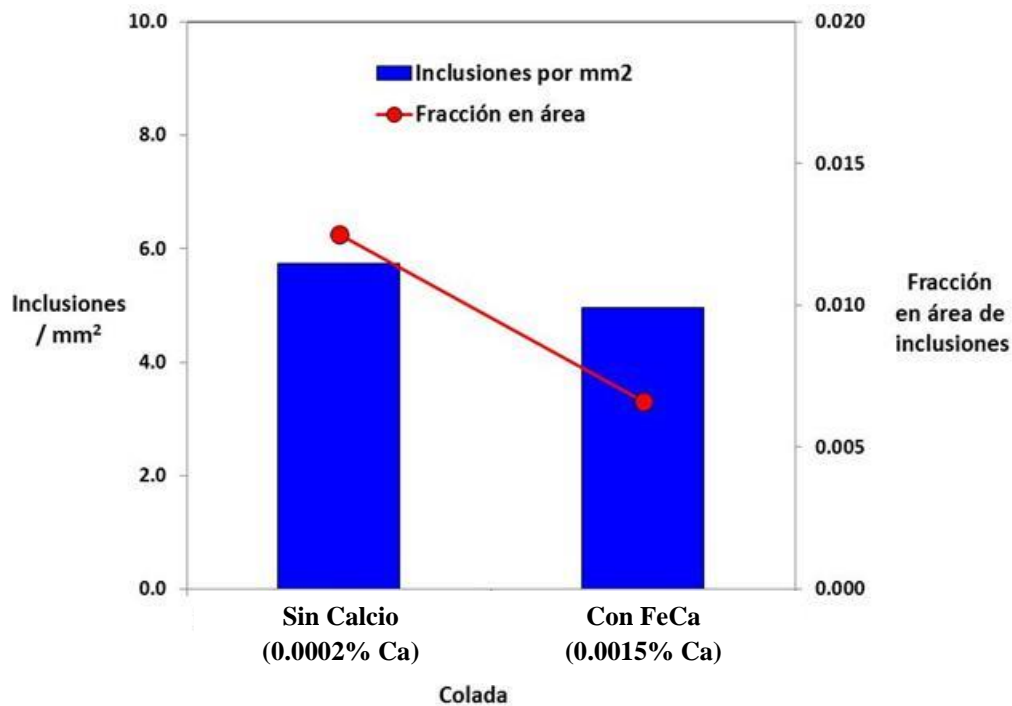


Figura 6.

Distribución de tamaño de inclusiones

En la Figura 7 se presenta la distribución de tamaños de todas las inclusiones cuantificadas en las 2 muestras de acero. En esta gráfica se observa que en la muestra de la colada 1412093 sin tratamiento de Calcio, un 73% de las inclusiones cuantificadas fueron menores a $10\ \mu\text{m}$, mientras que la muestra de la colada 1412094 inyectada con Ferro-Calcio altamente compactado, 94% de las inclusiones son menores a este tamaño, confirmando de esta manera que esta colada presento un mejor nivel de limpieza.

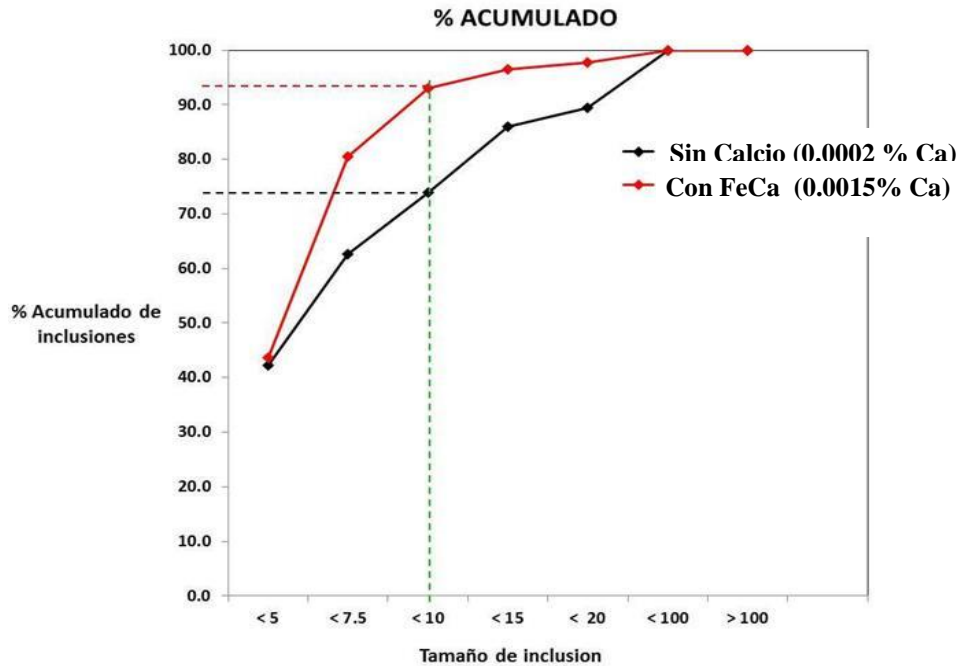


Figura 7.

Disminución de acero regresado de MCC por baja colabilidad

En la Figura 8 podemos observar la clara disminución de las toneladas de acero regresadas de colada continua al mes por baja colabilidad, a partir del uso del Ferro-Calcio altamente compactado en el tratamiento de modificación de inclusiones en los aceros calmados al Aluminio con restricción de Silicio. Este indicador disminuyó un 60% (desde 200 a 76 ton regresadas promedio al mes) en función del incremento del consumo de calcio por tonelada a 0.056 kgCa/ton (a partir del mes de Agosto de 2014) cuando el alambre Ferro-Calcio comenzó a usarse.

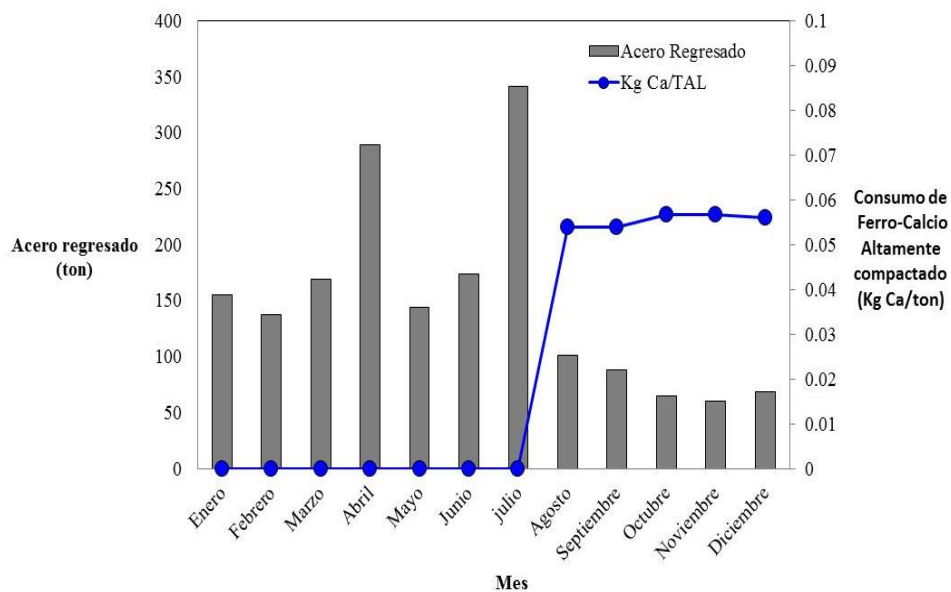


Figura 8.

Incremento en la velocidad de colada vs Consumo de KgCa/ton

Otro indicador de la mejora en la colabilidad de los aceros calmados al Aluminio con restricción de Silicio con el uso del alambre de Ferro-Calcio de alta compactación, fue el incremento de la velocidad de colado desde 1.2 a 1.35 m/min. Este comportamiento se muestra en la Figura 9.

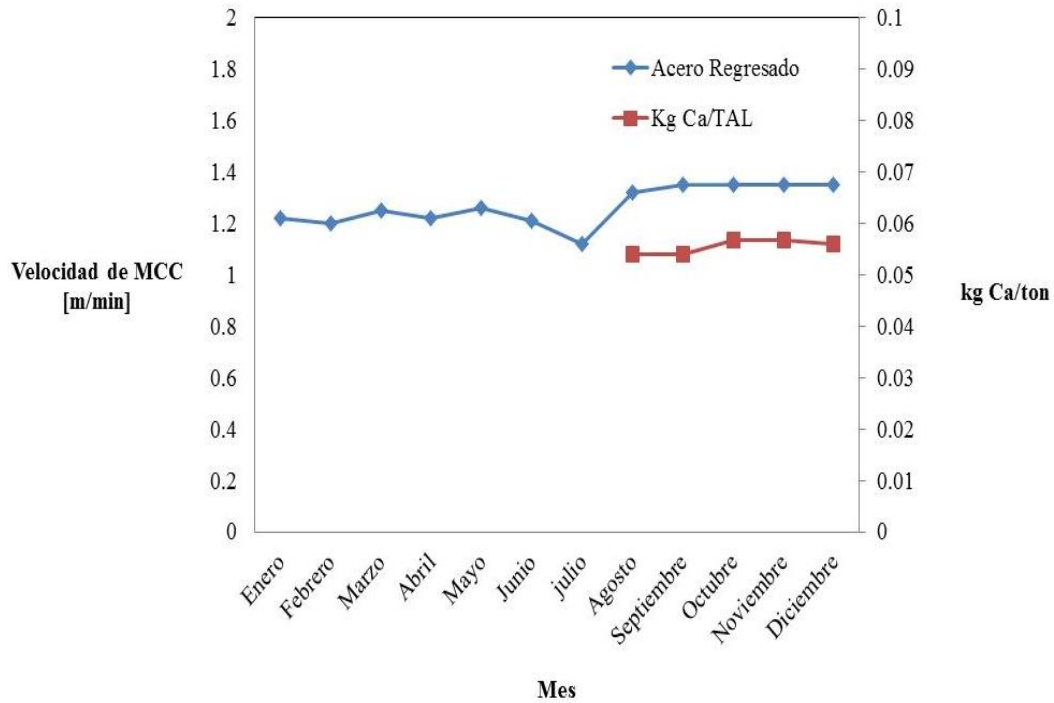


Figura 9.

Conclusiones

De las pruebas realizadas con la inyección de Ferro-Calcio altamente compactado para la mejora de la colabilidad en aceros Bajo C calmados al Aluminio y con Silicio restringido se concluye lo siguiente:

1. Se redujeron en un 60% las toneladas de acero regresadas de MCC por baja colabilidad
2. En el Horno Olla 3 se obtuvo un rendimiento promedio de 31.9% del alambre de Ferro-Calcio altamente compactado, con una adecuada recuperación de Calcio de 16 ppm en el horno olla.
3. La velocidad de colada continua se incrementó de 1.2 a 1.35 m/min con el consumo estable de 0.056 kg Ca/ton (90 metros de alambre por colada)
4. Se resalta la importancia de desoxidar y desulfurar adecuadamente el metal antes de inyectar Ferro-Calcio altamente compactado para evitar que éste trabaje como desulfurante y tenga bajo rendimiento.

5. Se determinó la velocidad de inyección óptima de Hi-FeCa entre 120 y 130 m/min.
6. El splash del acero inyectando Hi-FeCa en estas pruebas fue aceptable.
7. Las coladas inyectadas con Ferro-Calcio altamente compactado presentaron una eficiente modificación de inclusiones de Alúmina a Aluminatos de Calcio globulares con tamaños menores a 10 μm
8. Con respecto al nivel de limpieza del acero en las muestras analizadas, se concluye que la muestra de la colada tratada con Ferro-Calcio altamente compactado presentó mejor nivel de limpieza inclusionaria, expresado en una mayor cantidad de inclusiones menores a 10 μm , comparada con la colada sin tratamiento de Calcio que presentó muchas inclusiones mayores a este tamaño.

Agradecimientos

Altos Hornos de México agradece a los Ingenieros Luis Jorge Velez Name y Luis Jaime Carrión por la confianza brindada en desarrollo de este proyecto y al personal Técnico Microscopia electrónica de Barrido del CINVESTAV Unidad Saltillo por el apoyo en la caracterización inclusionaria de las muestras. AHMSA también reconoce el esfuerzo y agradece las facilidades otorgadas por parte de todos los operadores del Horno Olla para la realización de las pruebas y al Personal técnico de Injection Alloys Mexico por la asistencia técnica brindada durante el desarrollo de las mismas.

Referencias

1. H. Tozawa, Y. Kato, K. Sorimachi and T. Nakanishi: *ISIJ Int.* 1999, **39**, 426-434.
2. K. Wasai, K. Mukai and A. Miyanga: *ISIJ Int.* 2002, **42**, 459-466.
3. L. Hollappa, M. Hamalainen, M. Liukkonen and M. Lind: *Ironmaking and Steelmaking*, 2003, **30** 111-115.
4. M. Herrera, M. Castro, H. Solis and E. Guzman: *Scand. J. Metall.*, 1998, **27**, 233-239.
5. F. Castro, M. Herrera, M. Castro, H. Solis, M. Barbaro and A. Castella: *Proc. 14th IAS Steelmaking Conf.*, Argentina, 2003, 663-672.

