

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE PROCESO EN LA DISTRIBUCIÓN DE INCLUSIONES DURANTE LA PRODUCCIÓN DE ACEROS DE BAJO CARBONO CALMADOS AL ALUMINIO¹

Carlos Cicutti²
Silvio Alzari³
Mauro Martín⁴
Adolfo Gómez⁵
Jorgelina Pérez⁵
Roberto Donayo⁶

Resumen

La caracterización y el análisis de inclusiones en muestras de acero tomadas a lo largo del proceso han probado ser herramientas eficaces para optimizar las prácticas de elaboración del acero líquido. En este trabajo se analiza como varía la población inclusionaria a lo largo del proceso para diferentes condiciones operativas. En particular, se estudió la influencia de agregados de aluminio al final del tratamiento en el horno cuchara así como también de una adición anticipada del calcio. Los resultados de estos estudios muestran que la densidad de inclusiones disminuye en forma continua durante el proceso de refinación. El número de clusters o aglomeraciones de alúmina también decrece a lo largo del proceso, desapareciendo totalmente después del tratamiento con calcio. Para las condiciones de proceso actuales, la adición de cantidades moderadas de aluminio durante el proceso del LF no provocó un empeoramiento de la limpieza del acero. Después del tratamiento con calcio, se observa una modificación en la composición y la distribución de tamaño de las inclusiones. En las coladas donde el calcio fue agregado en forma anticipada, el tamaño de las inclusiones en el tundish resultó ser levemente mayor que en la práctica standard. Sin embargo, la densidad y la fracción de área aportada por las inclusiones fueron similares para ambas condiciones.

Palabras clave: Inclusiones; Metalurgia secundaria; Condiciones de proceso.

INFLUENCE OF PROCESS CONDITIONS ON THE DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS DURING THE PRODUCTION OF LOW CARBON ALUMINUM KILLED STEELS

Abstract

The characterization and analysis of inclusions in steel samples taken all along the process has proved to be an effective technique to optimize the refining practice. In the present work, the evolution of inclusion population in heats processed with different operating conditions was evaluated. In particular, the effect of later additions of aluminum wire during the LF process and the influence of an earlier calcium treatment were analyzed. Results of these studies showed that the density of inclusions continuously decreased during the refining process. The number and size of alumina clusters also dropped along the process and they completely disappeared after calcium treatment. For the actual process conditions, the addition of moderate amounts of aluminum during the LF process didn't show a worsening of the steel cleanliness. After calcium treatment, not only the composition of the inclusions but also their size distribution changed in a significant mode. In those heats where calcium was added before, the size of the inclusions in tundish turned out to be slightly larger than in the regular practice. However, the particles density and the fraction of area occupied by the inclusions were similar for both conditions.

Key words: Inclusions; Secondary metallurgy; Process conditions.

¹ *Contribución técnica presentada en el XXXVII Seminario de Aciaria, , 22 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS, Brasil*

² *Manager, Tecnología de Acería – Centro de Investigación Industrial Tenaris*

³ *Anteriormente, Investigador en el Centro de Investigación Industrial Tenaris. Actualmente, Ingeniero de Producto, Gerencia de Calidad, Siderar*

⁴ *Investigador Junior, Centro de Investigación Industrial Tenaris*

⁵ *Ingeniero de Procesos, Gerencia de Acería, Siderar*

⁶ *Jefe de Procesos, Gerencia de Acería, Siderar*

1 INTRODUCCIÓN

Los permanentes cambios introducidos en el proceso de elaboración para aumentar la productividad y reducir los costos operativos motivan la revisión continua de las prácticas empleadas, de modo de poder asegurar resultados metalúrgicos consistentes a lo largo del tiempo. En el caso de la limpieza inclusionaria del acero, las operaciones que se llevan a cabo en la etapa de metalurgia secundaria tienen un impacto decisivo en los resultados obtenidos. En este sentido, el análisis de las inclusiones en muestras tomadas en distintas etapas del proceso de fabricación ha mostrado ser una herramienta efectiva para conocer los fenómenos involucrados, evaluar cambios en las prácticas operativas e identificar oportunidades de mejoras.⁽¹⁻³⁾

En el presente trabajo se analiza como varía la cantidad, distribución de tamaño y composición de las inclusiones a lo largo del proceso de elaboración, tanto para la práctica convencional usada en Siderar como para diferentes condiciones de prueba. En particular, se estudió la influencia de un retraso en el agregado de aluminio en el horno cuchara así como también el adelantamiento del tratamiento con calcio del acero. Un retraso en la adición del aluminio permitiría un mejor control del contenido de este aleante al final del proceso, reduciendo los costos originados por un agregado en exceso. Por otro lado, se ha sugerido⁽⁴⁾ que un tratamiento con calcio anticipado puede traer ventajas desde el punto de vista de la limpieza inclusionaria.

2 TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1 Descripción del Proceso y Extracción de las Muestras

Siderar produce aceros de bajo y medio carbono destinados a la producción de chapas laminadas en caliente y frío para diferentes aplicaciones. El proceso de fabricación del acero sigue la ruta: Alto Horno – Aceración al oxígeno – Metalurgia de Cuchara – Colada Continua de planchones.

Normalmente, el acero es calmado completamente al aluminio durante el vaciado del convertidor. Junto con el aluminio se agregan también los ferroaleantes requeridos y los fundentes que forman la escoria. En la práctica convencional, el aluminio se ajusta al comienzo del proceso del horno cuchara (LF) y no se vuelve a agregar más en todo el tratamiento. En esta etapa del proceso se realiza el calentamiento del acero, junto con un agitado fuerte con argón a través de dos tapones porosos para desulfurar y homogeneizar el baño. También se ajusta la composición de la escoria, realizando los agregados de fundentes requeridos.⁽⁵⁾ Una vez finalizada esta etapa, la cuchara se desplaza a una estación de tratamiento,⁽⁶⁾ donde se realiza un agitado suave para promover la flotación de las inclusiones. Al final del proceso, se agrega calcio en forma de alambre envainado relleno con polvo de SiCa o eventualmente AlCaSi.⁽⁷⁾

La Figura 1 indica las distintas etapas del proceso y los lugares donde se tomaron las muestras para el análisis de las inclusiones. En todos los casos se usaron muestreadores sin calmante, para evitar interferencias con las inclusiones presentes. En la misma Figura 1 se muestra también, en forma esquemática, las pruebas realizadas en este estudio. En el primer caso, se retrasó el ajuste de aluminio realizado en el horno cuchara y en el segundo caso se adelantó la inyección de calcio en la estación de tratamiento. Ambas condiciones fueron evaluadas separadamente y comparadas con la práctica 'standard'.

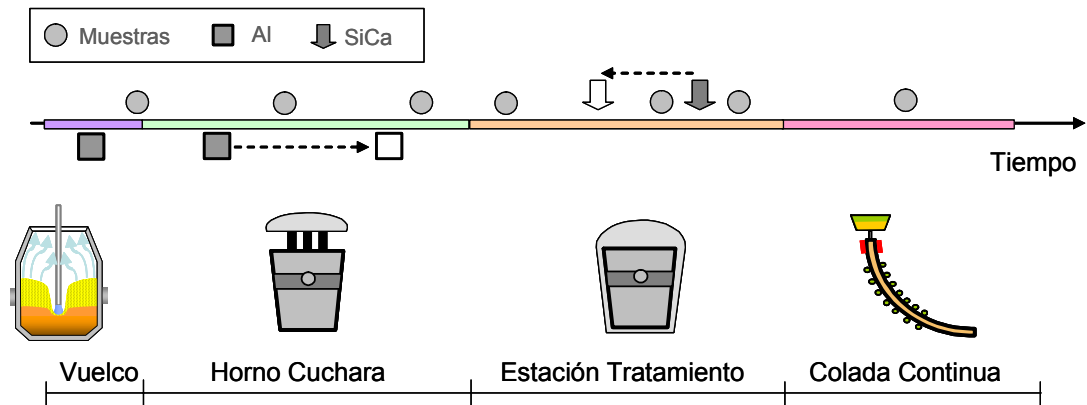


Figura 1. Esquema general del proceso, indicando los lugares donde se tomaron muestras para análisis de las inclusiones.

2.2 Análisis de las Inclusiones

Las muestras fueron analizadas en el SEM/EDAX utilizando un detector automático de partículas incorporado al microscopio. Con esta herramienta es posible barrer un área relativamente grande de la probeta y analizar la cantidad, tamaño y composición de un gran número de inclusiones.⁽¹⁻²⁾ Para este estudio, se analizaron las inclusiones superiores a $2.5 \mu\text{m}$ en un área de aproximadamente $50\text{-}100 \text{ mm}^2$. Como se discute más adelante, en algunos casos específicos se realizaron también conteos considerando un tamaño mínimo de partícula de $1 \mu\text{m}$. En estos casos, el área inspeccionada fue de $2\text{-}3 \text{ mm}^2$. Una vez realizado el conteo de las partículas en cada probeta se realizó un post-procesamiento de la información de modo de filtrar indicaciones que no son inclusiones y convertir la composición de las partículas a óxidos y sulfuros. Asimismo, se analizó también la fracción de área ocupada por las inclusiones y su distribución de tamaño. Finalmente, se desarrolló un procedimiento para identificar y cuantificar los clusters de inclusiones en las probetas.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Clasificación de las Inclusiones

En líneas generales, se encontraron tres tipos de inclusiones (ver Figura 2): (a) pequeñas partículas compactas que son las mayoritarias en todas las etapas del proceso, (b) aglomeraciones o 'clusters' normalmente de inclusiones de Al_2O_3 y (c) partículas de mayores dimensiones de origen exógeno (atrapes de escoria o productos de reoxidación), cuya presencia es más frecuente en las etapas iniciales del proceso.

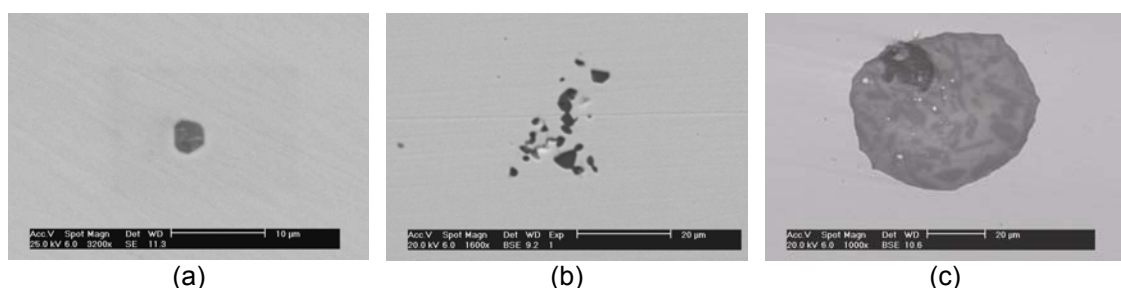


Figura 2. Tipos de inclusiones observadas
(a) Compactas (b) Clusters (c) Exógenas

3.2 Evolución de la Densidad de Inclusiones en la Cuchara

La Figura 3-a muestra como varía la densidad de inclusiones a lo largo del proceso para la condición standard de operación y para el caso en que se agregó una cantidad moderada de aluminio al final del LF. Puede observarse que, en ambos casos, la densidad de inclusiones disminuye a medida que avanza el proceso, no detectándose diferencias significativas entre ambas condiciones.

La misma tendencia se observa al analizar la evolución en la densidad de clusters para las distintas probetas analizadas (Figura 3-b). Se observó que, no sólo la densidad, sino también el tamaño de las aglomeraciones disminuyen a medida que avanza el proceso. Prácticamente no se detectaron clusters de inclusiones después del tratamiento con calcio.

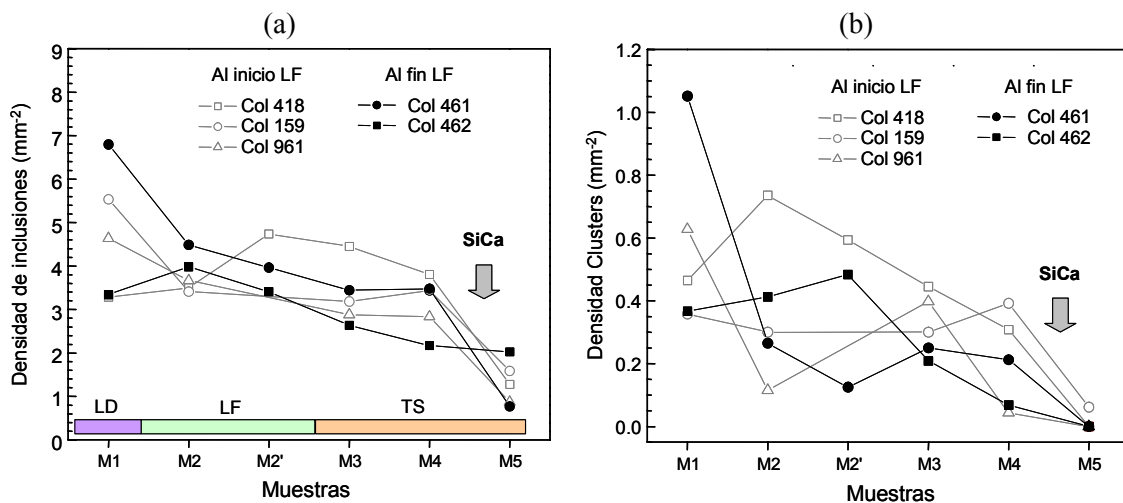


Figura 3. Evolución de la densidad de inclusiones y clusters a lo largo del proceso. Comparación entre la práctica convencional y el caso de agregado de aluminio al final del LF

3.3 Distribución de Tamaño de las Inclusiones

La Figura 4 presenta la distribución de tamaño de las inclusiones en las distintas muestras tomadas a lo largo del proceso para dos de las coladas estudiadas (una con la práctica standard y la otra con el agregado de aluminio al final del LF). En todos los casos se observa que la densidad de inclusiones disminuye al incrementarse el tamaño de las partículas, siguiendo una ley logarítmica. En la mayoría de las muestras analizadas predominan las inclusiones con diámetros inferiores a 5 μm . Por otro lado, también se puede apreciar que no hay diferencias significativas en la distribución de tamaño de las inclusiones de las dos coladas. El mismo resultado se repitió en otras coladas donde se comparó la condición standard con el agregado de aluminio al final del LF.

Es importante notar que en los dos casos mostrados en la Figura 4 la densidad de las inclusiones comprendidas entre 3-5 μm se incrementa al pasar de la cuchara al tundish. El mismo patrón se observó también en el resto de las coladas analizadas. Dado que no se encontraron evidencias de reoxidación (como ser caídas significativas de aluminio entre las muestras de cuchara-repartidor o presencia de inclusiones atribuibles a este origen), esta variación podría estar asociada a un cambio en la distribución de tamaño de las inclusiones. Para verificar esta hipótesis, se realizaron nuevos conteos de inclusiones, considerando un tamaño mínimo de 1

μm . Los resultados se muestran en la Figura 5, donde puede observarse que, efectivamente, la distribución de tamaño de las inclusiones se modifica. En las muestras tomadas inmediatamente después del tratamiento con calcio hay una mayor densidad de inclusiones chicas ($< 2 \mu\text{m}$.), las cuáles crecen al avanzar el proceso, dando lugar a la mayor proporción de inclusiones observadas en el rango de 2-5 μm en las muestras de tundish. Los análisis realizados muestran que la densidad total de partículas disminuye levemente al pasar de la cuchara al tundish, lo que indicaría que el cambio observado en la distribución de tamaño está asociado a un crecimiento de las inclusiones.

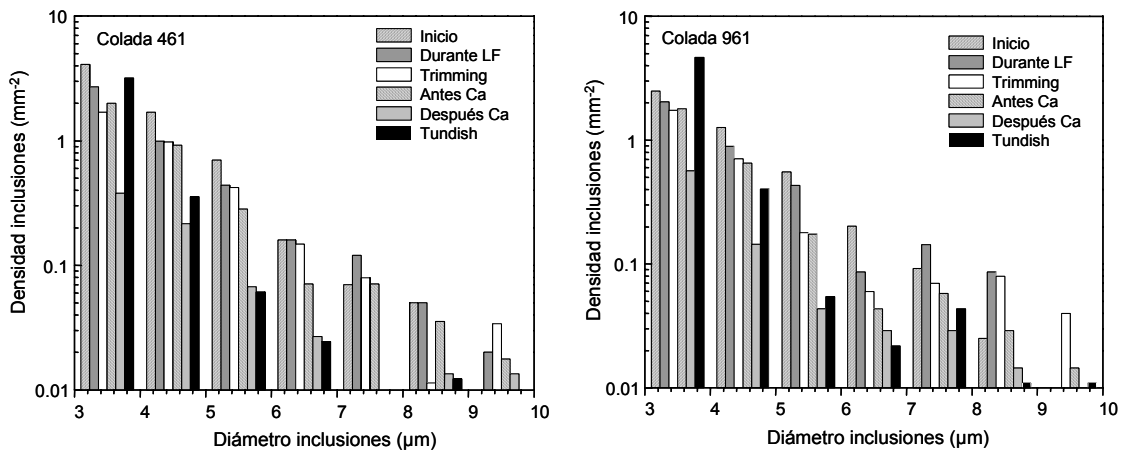


Figura 4. Distribución de tamaño de las inclusiones en dos de las coladas analizadas

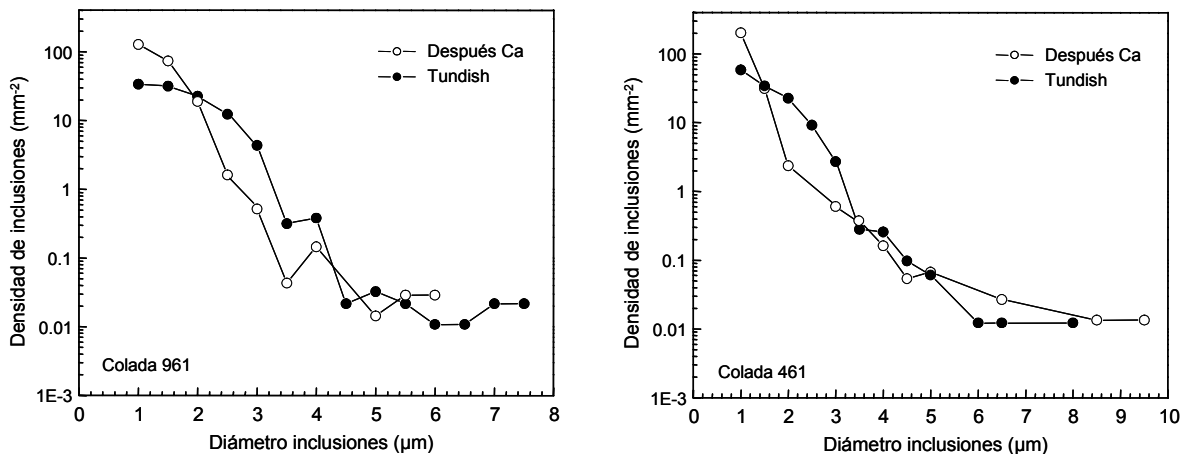


Figura 5. Distribución de tamaño extendida para las muestras tomadas después del tratamiento con calcio y en el repartidor.

3.4 Composición de las Inclusiones

Similarmente a lo observado en estudios anteriores,^(3,7-8) las inclusiones están constituidas principalmente por Al_2O_3 , CaO y MgO . Por lo tanto, para representar los cambios de composición ocurridos durante el proceso se tomó este sistema como referencia. La Fig. 6 muestra las composiciones observadas en las distintas etapas del proceso. Inmediatamente después del vuelco del convertidor, las inclusiones están compuestas, en su gran mayoría, por alúmina. A medida que avanza el proceso, estas inclusiones se van enriqueciendo en MgO desplazándose la composición en la dirección de las espinelas (aunque sin llegar a la ubicación de

este compuesto). Este incremento de MgO de las inclusiones puede estar asociado a diferentes factores (1): contaminación con Mg del aluminio usado en la desoxidación, interacción del acero con la escoria de cuchara y reacción del acero con los materiales refractarios en contacto.

Durante el tratamiento con calcio, las inclusiones se enriquecen en CaO, moviendo la composición hacia la región líquida del sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$. Los análisis realizados muestran una presencia importante de sulfuros de calcio en las inclusiones, posiblemente debido a la reacción con el azufre del acero producido en el enfriamiento y solidificación de la muestras.⁽⁹⁾

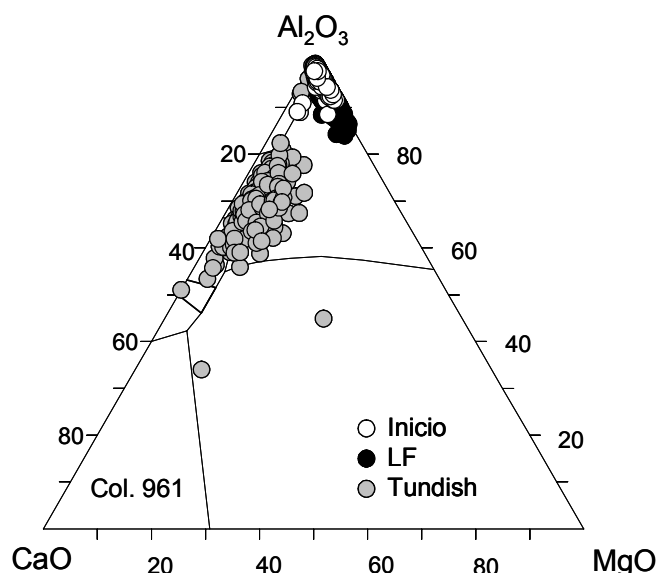


Figura 6. Evolución de la composición de las inclusiones durante el proceso

3.5 Influencia de un Adelantamiento en el Agregado de Calcio

Como se indicó más arriba, se realizaron pruebas adelantando el tratamiento con calcio para verificar si esto permitía reducir la densidad de inclusiones al final del proceso. Las pruebas se realizaron adelantando el tratamiento en 15 minutos y tomando tres muestras luego del mismo.

La Figura 7 indica como varía la densidad total y el diámetro medio de las inclusiones luego del agregado de calcio para las coladas con la práctica convencional y con el tratamiento adelantado. En ambos casos se observa una leve caída de la cantidad de inclusiones después del tratamiento, obteniéndose niveles similares en el tundish para las dos condiciones analizadas. En cambio, se puede observar que el tamaño medio de las inclusiones aumenta con el tiempo transcurrido después del tratamiento, siendo este efecto más marcado en las coladas donde se agrega el calcio anticipadamente. Esto da como resultado una distribución de tamaño de las inclusiones en el tundish desplazada hacia mayores diámetros en el caso del tratamiento con calcio adelantado (Figura 8-a). Los cálculos realizados muestran que este crecimiento en las inclusiones puede producirse por un mecanismo de coalescencia por difusión, similar al propuesto en otros trabajos de la literatura.⁽¹⁰⁾

Como se señaló más arriba, el tratamiento con calcio modifica en forma significativa la composición de las inclusiones. Sin embargo, en las coladas donde se adelantó el agregado de calcio al acero, la composición de las inclusiones no se modifica con el tiempo transcurrido después del tratamiento (Figura 8-b). Este resultado coincide con lo observado en estudios anteriores en esta planta.⁽⁷⁻⁸⁾

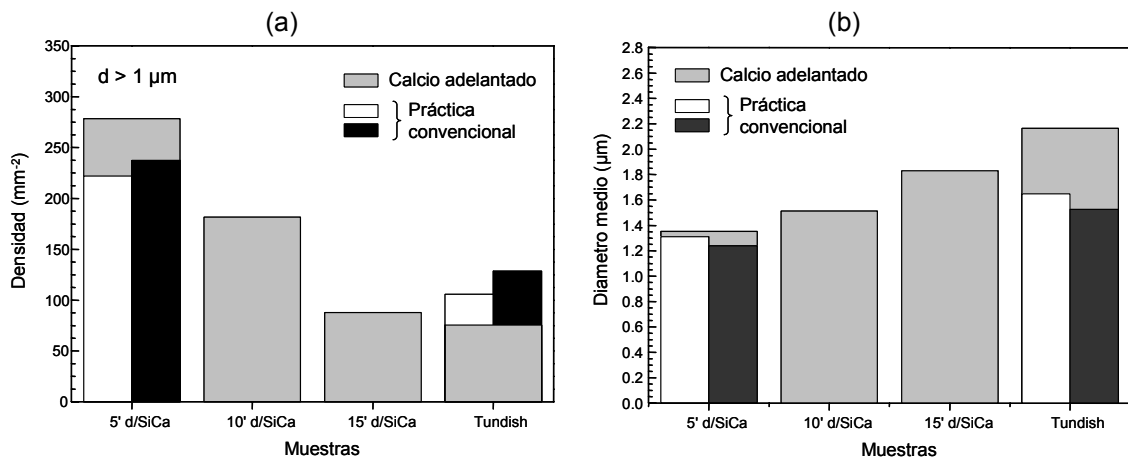


Figura 7. Efecto del tratamiento de calcio adelantado: a) Densidad de inclusiones b) Diámetro medio

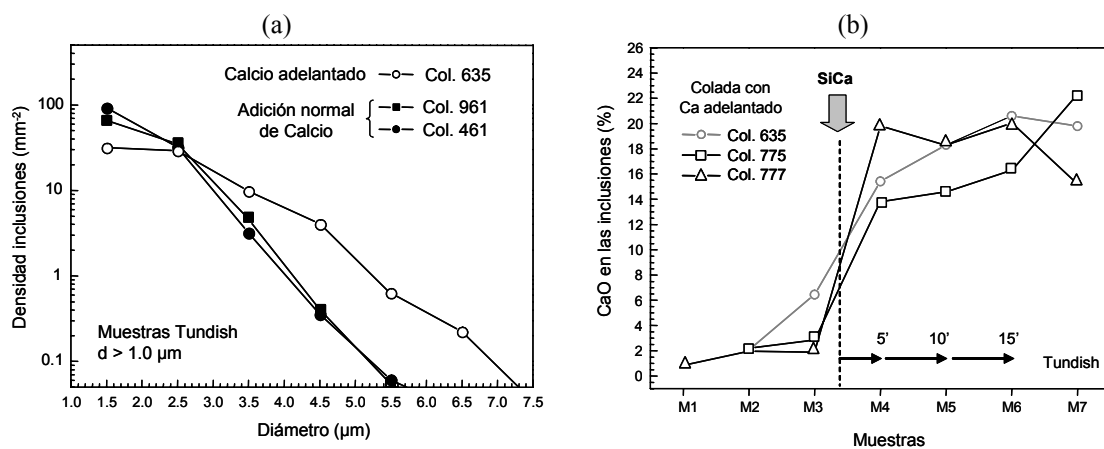


Figura 8. Influencia del tratamiento adelantado de calcio en las inclusiones: (a) Distribución de tamaño (b) Composición

4 CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis realizados permiten destacar los siguientes aspectos:

- La densidad de inclusiones disminuye a medida que avanza el proceso debido a la flotación producida en las distintas etapas de la metalurgia secundaria. La cantidad y área aportada por los clusters sigue una tendencia similar. Las pruebas realizadas agregando cantidades moderadas de aluminio al final del proceso en el LF no mostraron diferencias con respecto a la práctica convencional.
- Después del vuelco del convertidor las inclusiones están compuestas casi exclusivamente por alúmina. A medida que avanza el proceso se enriquecen levemente en MgO y, después del tratamiento con calcio, aumenta el contenido de CaO desplazando la composición hacia la región líquida del sistema Al_2O_3 -CaO-MgO.
- El tratamiento con calcio modifica la distribución de tamaño de las inclusiones, aumentando el tamaño medio de las partículas. Las pruebas realizadas adelantando el tratamiento con calcio mostraron un leve incremento en el tamaño medio de las inclusiones observadas al final del proceso. No se observaron diferencias significativas en la densidad ni en la fracción de área de las inclusiones respecto a la práctica convencional.

REFERENCIAS

- 1 F. Fuhr, C. Cicutti, G. Walter, G. Torga, "Relationship between nozzle deposits and inclusion composition in the continuous casting of steel", *Iron and Steelmaker*, 2003, N°12, p. 53-58.
- 2 C. Cicutti, C. Espinosa, F. Fuhr, P. Galbiati, E. Guzmán, L. Ferro, "Evolution of non-metallic inclusions and ladle slag composition along the process in Tenaris-Tamsa", 14° *Steelmaking Conference*, IAS, Argentina, 2003, p. 673-681.
- 3 R. Ares, R. Panelli, J. Petroni, C. Cicutti, M. Valdez, T. Pérez, "Evolution of steel cleanliness during the process in Siderar's Ladle Furnace", 12° *Seminario de Acería IAS*, Buenos Aires, Argentina, 1999, p. 211-219.
- 4 Gueussier, F. Pellicani, R. Szezensky, "Improvement of clean steels practice in Vallourec Saint Saulve using CaSi cored wire", *Scaninject V*, 1989, Part II, p. 395-404.
- 5 Cicutti, M. Valdez, J. Petroni, R. Ares, R. Donayo, A. Gómez, "Development of Ladle slag practices at Siderar", *ISSTech International Technology Conference Proceeding*, 2003, p. 865-874.
- 6 Cicutti, M. Valdez, T. Pérez, R. Panelli, J. Azcuaga, J. Petroni, L. Ferro, "Developments to optimize the calcium addition in the new Siderar's trimming station", 55° *Congresso da ABM*, Rio de Janeiro, 2000.
- 7 Cicutti, M. Valdez, T. Pérez, R. Ares, R. Panelli, J. Petroni, "Optimization of calcium treatment to improve castability", *ISS Process Technology Conference*, Baltimore, USA, 2001, p. 871-882.
- 8 M. Valdez, C. Cicutti, T. Pérez, R. Panelli, R. Ares, J. Azcuaga, J. Petroni, "Influence of the time elapsed after calcium treatment in the steel and inclusion composition", XXXI *Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais*, ABM, Vitória - Brasil, 2000, p.187-196.
- 9 Y. Wang, M. Valdez, and S. Sridhar, "Formation of CaS on Al₂O₃-CaO inclusions during solidification of steels", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2002, Vol. 33B, p. 625-632.
- 10 S. Kuiry, A. Ganguly, "Elucidation of inclusion distribution mechanism in continuously cast AISI 316L stainless steel blooms", *Ironmaking and Steelmaking*, 2001, Vo. 28, N° 6, p. 465-469.