

# ESTUDIO DEL ORIGEN DE INCLUSIONES EN EL REPARTIDOR DE COLADA CONTINUA DE TERNIUM SIDERAR

Alejandro Martín <sup>1</sup>  
Juan Andres Méndez <sup>2</sup>  
Michel Romero <sup>3</sup>  
Gustavo Di Gresia <sup>4</sup>  
Carlos Cicutti <sup>5</sup>

## Resumen

Para la producción de aceros con altas exigencias de calidad es indispensable conocer con precisión las distintas fuentes de generación de inclusiones, de modo de optimizar las prácticas metalúrgicas para minimizar su presencia. El uso de elementos trazadores en la escoria ha mostrado ser una herramienta eficaz para determinar el origen de las inclusiones en los productos de colada continua. En el presente trabajo se realizaron diferentes experiencias utilizando BaCO<sub>3</sub> para trazar la escoria de distribuidor. Empleando esta metodología se siguieron diferentes secuencias y se tomaron muestras de planchones en distintos momentos de las coladas. Las muestras fueron exhaustivamente analizadas por medio de microscopía óptica y electrónica de barrido. Se evalúan la densidad, distribución de tamaño y composición de las inclusiones observadas. Los resultados de estos análisis revelan la presencia de inclusiones con Ba en los planchones cercanos al momento del cambio de cuchara. En cambio, en las muestras correspondientes al período estacionario de la colada no se detectan este tipo de inclusiones. Las inclusiones con Ba se presentan con mayor frecuencia en las coladas avanzadas de secuencia y en aquellos casos donde el nivel de distribuidor tuvo un descenso más marcado en el momento del cambio de cuchara. Estos resultados sugieren que la emulsificación producida por el impacto de la corriente de acero líquido al abrir la nueva cuchara puede generar inclusiones que son arrastradas a los moldes. El efecto es más marcado cuando hay una mayor acumulación de escoria en el repartidor. Finalmente, se realizaron también distintas pruebas utilizando elementos modificadores de flujo dentro del distribuidor, analizándose su impacto en la generación y eliminación de las inclusiones.

**Palabras clave:** Inclusiones; Distribuidores; Escorias.

## STUDY ABOUT THE ORIGIN OF INCLUSIONS IN THE TUNDISH OF TERNIUM SIDERAR

### Abstract

For the production of steels with high quality standards is essential to know accurately the different sources that generate inclusions, in order to optimize the steelmaking practices and to minimize their frequency. The use of tracer elements in the slag has shown an effective tool to determine the origin of inclusions in continuous casting slabs. In the present study different experiences were performed using BaCO<sub>3</sub> like a tracer in the tundish slag. Using this methodology slab samples were taken at different times of the castings. The samples were exhaustively analyzed by optical microscopy and SEM/EDS. The density, size distribution and composition of the inclusions observed were evaluated. The results of this analysis revealed the presence of inclusions with Ba in the slab during the transitory state (ladle change). For another hand, samples from the stationary state did not detect this type of inclusions. Ba inclusions occur most frequently in advanced casting sequence and in those cases where the tundish level has a weight reduction during the ladle change. These results suggest that the emulsification produced by the impact of the flow of liquid steel can generate inclusions. The effect is more pronounced when there is a greater accumulation of slag in the tundish. Finally, various tests are also performed using flow modifiers within the tundish, analyzing their impact on the generation and elimination of non-metallic inclusions.

**Key words:** Inclusions; Tundishes; Slags.

<sup>1</sup>Ingeniero Metalúrgico, Investigador sector Acería, Instituto Argentino de Siderurgia, Av. Central y 19 Oeste, 2900 San Nicolás, Prov. de Buenos Aires, Argentina. E-mail: martin@siderurgia.org.ar

<sup>2</sup>Ingeniero em Materiales, Investigador sector Acería, Centro de Investigación Industrial, Tenaris Siderca, J. Simini 250 (2804) Campana, Prov. Buenos Aires, Argentina. E-mail: jmendez@tenaris.com

<sup>3</sup>Ingeniero Metalúrgico, Investigador sector Acería, Instituto Argentino de Siderurgia, Av. Central y 19 Oeste, 2900 San Nicolás, Prov. de Buenos Aires, Argentina. E-mail: romero@siderurgia.org.ar

<sup>4</sup>Ingeniero Mecánico, Tecnólogo Colada Continua, Ternium-Siderar, Planta General Savio, Casilla de Correo 801, 2900 San Nicolás, Prov. de Buenos Aires, Argentina. E-mail: gdigresia@tenaris.com

<sup>5</sup>Dr. em Ciência de los Materiales, Tecnólogo Colada Continua, Centro de Investigación Industrial, Tenaris Siderca, J. Simini 250 (2804) Campana, Prov. Buenos Aires, Argentina. E-mail: ccicutti@tenaris.com

## I INTRODUCCIÓN

Ternium Siderar es la principal compañía productora de acero en la Argentina y la única que produce productos planos en el país, mediante la ruta alto horno, convertidor, horno cuchara y colada continua de planchones. Con el fin de obtener productos cada vez más confiables en términos de calidad, las prácticas metalúrgicas deben ser continuamente revisadas y optimizadas. En particular, para mejorar la limpieza interna del acero, resulta de gran importancia poder conocer con precisión las distintas fuentes que generan las inclusiones.

Luego de la implementación del horno cuchara, Ternium Siderar adoptó la práctica de inyección de calcio en todas las coladas, para mejorar la secuencialidad y la condición de flujo de acero en el molde, factores que impactan directamente en la calidad superficial y interna de los planchones. Esso significa que las inclusiones obtenidas al final del tratamiento son, básicamente, aluminatos de calcio con contenidos variables de otros componentes minoritarios, como MgO y S. Por lo tanto, esas inclusiones no pueden distinguirse fácilmente de otras generadas por el atrape o emulsión de escoria en las distintas etapas de elaboración.

Distintos trabajos de la literatura<sup>(1-8)</sup> han mostrado que el uso de elementos trazadores en las escorias puede ser una herramienta útil para investigar los orígenes de las inclusiones. El presente trabajo es llevado a cabo en conjunto entre el Instituto Argentino de Siderurgia, el Centro de investigaciones de Tenaris y Ternium Siderar. En el mismo se analiza la influencia de la escoria de repartidor como fuente de generación de inclusiones,<sup>(9,10)</sup> y se evalúa el efecto de elementos modificadores de flujo en el repartidor: barreras de argón y pieza anti-vortex.

## 2 ENSAYOS EN PLANTA

### 2.1 Utilización de Trazadores

Habitualmente, el material usado en Siderar para cubrir la superficie de acero líquido en el repartidor es cáscara de arroz calcinada (alto contenido de SiO<sub>2</sub>). Previo al primer seguimiento, se realizaron diferentes pruebas para optimizar los aspectos vinculados a la adición del BaCO<sub>3</sub>. Finalmente se determinó la metodología correcta de adición de BaCO<sub>3</sub> a fin de mantener constantes el tenor

de BaO durante varias coladas. Como resultado de estas pruebas se decidió apuntar a una relación 50/50% peso de BaO/SiO<sub>2</sub> de modo de obtener una escoria líquida a la temperatura de proceso. La Tabla I resume las condiciones de colado bajo la cuales se realizaron los cuatro seguimientos con adición de trazador en repartidor.

### 2.2 Pruebas con Barrera de Argón en Repartidor

El proveedor de la pieza refractaria realizó diferentes estudios preliminares empleando modelos matemáticos para determinar la posición óptima del tapón. Como resultado de estos análisis, se decidió colocarlo a una distancia de 1.100 mm de una de las líneas (Figura 1). La cañería de argón que transporta el gas se adhirió a la pared y se protegió con ladrillo refractario. Como se mencionó anteriormente, en estas experiencias el dispositivo se colocó en una de las mitades del repartidor, con el fin de comparar la limpieza inclusionaria obtenida en planchones de ambas líneas.

Las pruebas fueron realizadas inicialmente en dos secuencias de aceros de bajo carbono donde se buscó mantener similares condiciones de colado en ambas líneas (principalmente, ancho y velocidad de colada). La Tabla 2 resume las principales variables de proceso de las coladas seleccionadas en ambas secuencias para evaluar la limpieza inclusionaria.

### 2.3 Pruebas con Pieza Anti Vortex en Repartidor

La pieza anti vórtice es del tipo aleta y fue colocada en el lateral del repartidor solo en la línea 1, de modo de poder comparar los resultados de limpieza inclusionaria en los planchones de ambas líneas. En la Figura 2 se observa la ubicación de la pieza mencionada.

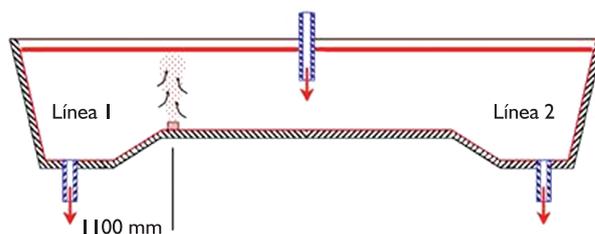


Figura 1. Ubicación del tapón poroso en el distribuidor.

Tabla I. Resumen condiciones de las secuencias muestreadas

Secuencia	V <sub>c</sub> (m/min)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Acero	Coladas estudiadas
S1	1.6-1.9	950-1.500	200	Bajo C	2-6-7-8-9
S2	1.0-1.9	930-1.650	200	Bajo C	2-6-7-8-9
S3	1.4-1.8	1.240-1.500	200	Bajo C	2-5-6-7-8-9
S4	0.8-1.0	1.020-1.500	200	Bajo C	2-5-6-7-8-9

Las pruebas fueron realizadas inicialmente en dos secuencias donde se buscó mantener similares condiciones de colado en ambas líneas (principalmente, ancho y velocidad de colada). Para determinar el origen de las inclusiones encontradas se adicionó además trazador ( $\text{BaCO}_3$ ) a la escoria de repartidor.

La Tabla 3 resume las principales variables de proceso de las coladas seleccionadas en ambas secuencia para evaluar la limpieza inclusionaria. En todos los casos las muestras fueron tomadas del primer planchón.

## 2.4 Muestreo

Se extrajeron muestras de planchón del tercio superior donde, por la curvatura de la máquina, la mayoría de las inclusiones, flotan y quedan retenidas durante la solidificación (Figura 3). Con el fin de evaluar si la emulsificación de escoria del repartidor durante el cambio de

cuchara generaba inclusiones en el producto, se extrajeron muestras del primer planchón de la nueva colada, lo más cercano a este evento. Adicionalmente, se tomaron muestras también del quinto planchón de la colada, representativo del estado estacionario.

## 2.5 Análisis de Muestras

La metodología de estudio consistió en cortar las probetas (Figura 3) y pulir a espejo para evaluar las inclusiones presentes. Se comenzó con una primera observación en el microscopio óptico. Para esta evaluación se inspeccionaron probetas de aproximadamente  $12 \text{ cm}^2$ , donde se identificaron todas las inclusiones mayores a  $30 \mu\text{m}$ , las que fueron posteriormente analizadas por EDS para determinar su composición. En una segunda etapa, se realizaron conteos usando el analizador automático de partículas del microscopio electrónico de barrido.

**Tabla 2.** Condiciones de proceso para las distintas pruebas realizadas

N° Secuencia - Colada	Vc (m/min)		Ancho (mm)		Flujo Ar (L/min)	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
S1 C1	1,17	1.20	1.000	1.000	20	-
S1 C2	1,30	1.31	1.000	1.000	20	-
S1 C3	1,24	1.35	1.000	1.000	20	-
S1 C4	1,34	1.35	1.000	1.000	20	-
S1 C5	1,14	1.28	1.000	1.000	20	-
S2 C1	1,12	1.11	1.240	1.240	20	-
S2 C2	1,12	1.03	1.240	1.240	20	-
S2 C3	0,83	0,82	1.240	1.240	20	-
S2 C4	0,83	0,82	1.240	1.240	20	-
S2 C5	0,90	0,90	1.240	1.240	20	-
S2 C6	1,09	1,09	1.240	1.240	20	-



**Figura 2.** Montaje de la pieza anti vórtice en L1.

**Tabla 3.** Condiciones de proceso para los dos seguimientos realizados

Secuencia	Colada	Velocidad (m/min)		Ancho (mm)	Mínimo peso repartidor en cambio de cuchara (Tn)
		L1	L2	L1/L2	
Secuencia 1	S1C1	1.76	1.75		17.5
	S1C2	1.74	1.77	1.240	24.5
	S1C3	1.76	1.77		25.0
Secuencia 2	S2C1	1.83	1.84		23.0
	S2C2	1.83	1.84	1.220	25.9
	S2C3	1.82	1.84		19.1

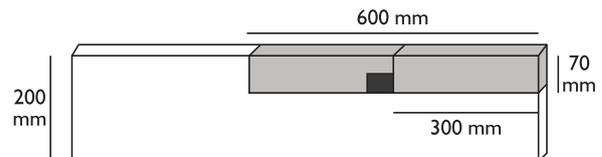
## 3 RESULTADOS

### 3.1 Escoria de Repartidor

Los resultados de los análisis de escoria mostraron un contenido de Ba comprendido entre 5% y 10%. De acuerdo a los resultados previos publicados en la literatura, estos valores son adecuados para detectar su presencia en las inclusiones no metálicas. En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos sobre las muestras de escoria analizadas.

### 3.2 Inclusiones

Dado que todos los aceros producidos en Ternium Siderar son calmados al aluminio y posteriormente tratados con calcio, las inclusiones normalmente encontradas en el producto final son aluminatos de calcio con cantidades variables de MgO y S.



**Figura 3.** Muestreo de planchón.

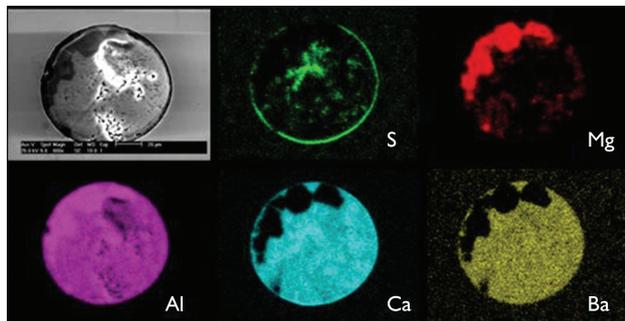
Sin embargo en este caso algunas de ellas presentaron Ba en su composición, un mapeo de composición de una inclusión con trazador se puede ver en la Figura 4, en la que se puede apreciar la matriz compuesta por aluminato de calcio y bario ( $x\text{Al}_2\text{O}_3.y\text{CaO}.z\text{BaO}$ ) y la presencia de fases precipitadas, tanto de espinela ( $\text{MgO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como de sulfuro de calcio ( $\text{CaS}$ ). Este último se ubica principalmente recubriendo la inclusión.

En la Tabla 5 se presentan los resultados cuantitativos de algunas de las inclusiones con Ba halladas en los planchones.

Respecto a la densidad y distribución de tamaños, dado que las inclusiones más nocivas para el producto final son las de mayores dimensiones, el presente trabajo se focalizó sólo en el análisis de las partículas mayores a  $30\ \mu\text{m}$ .

**Tabla 4.** Análisis de las escorias muestreadas durante los seguimientos (%p)

Coladas	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	CaO	BaO
S1 C7	9.0	16.0	48.0	16.0	7.0
S1 C8	7.0	14.0	54.0	14.0	7.0
S1 C9	7.0	17.0	42.0	19.0	10.0
S2 C6	7.3	16.9	41.4	23.3	7.0
S2 C7	10.5	20.6	43.2	17.2	5.6
S2 C8	7.4	17.9	34.9	25.8	9.6



**Figura 4.** Mapeo de una inclusión con Ba.

**Tabla 5.** Resultados de los análisis EDS sobre las inclusiones halladas en los planchones (% peso)

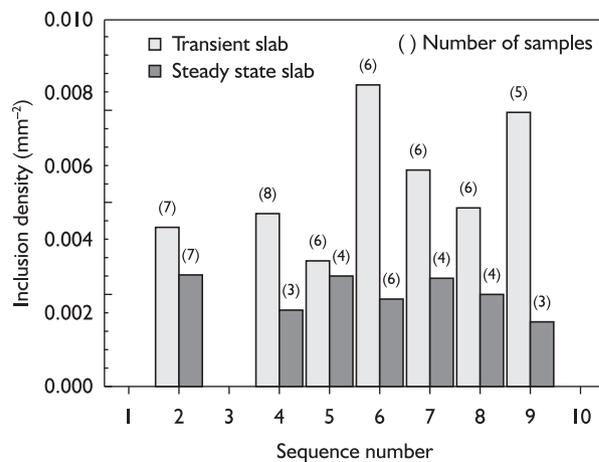
Inclusión	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	CaO	BaO
#1	10.1	52.8	1.6	28.3	7.2
#2	8.4	55.0	2.0	27.3	7.3
#3	9.5	56.4	2.1	26.9	5.1
#4	10.6	54.3	1.3	24.7	9.2
#5	8.5	58.2	2.1	27.1	4.1
#6	8.6	51.2	1.9	31.8	6.3
#7	10.7	59.9	3.6	21.1	4.6
#8	10.9	57.7	0.7	25.8	4.8
#9	10.6	59.5	1.5	23.5	4.9
#10	6.6	53.7	2.2	29.8	7.8

### 3.3 Efecto de la Escoria de Repartidor en la Generación de Inclusiones

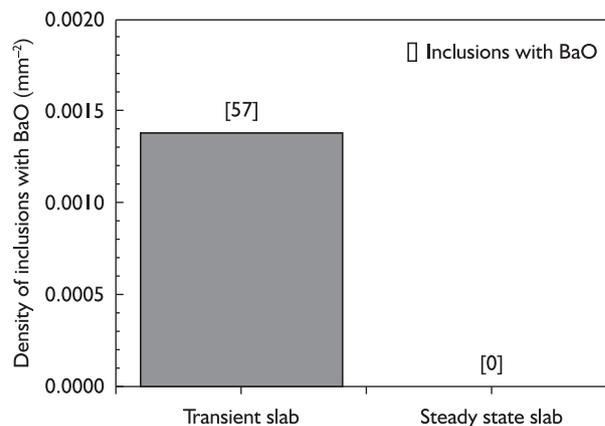
La presencia de Ba en las inclusiones indica una gran influencia de la escoria de repartidor en la generación de inclusiones. La densidad medida en todas las muestras analizadas se resumen en la Figura 5.

En general, una mayor densidad de partículas se observa en los planchones correspondientes al momento del cambio cuchara (transición) en comparación con los del período de estado estacionario. Además, el número de inclusiones en estos planchones tiende a aumentar a medida que la posición en la secuencia se incrementa.

En la mayoría de los ensayos realizados utilizando como trazador BaO en escoria de repartidor (Tabla 1), las inclusiones con Ba fueron detectadas en las muestras tomadas del planchón de transición, no así en muestras de planchón correspondiente al estado estacionario (Figura 6). Por otra parte, en los planchones de transición, las inclusiones que contienen Ba fueron generalmente más grandes. A modo de ejemplo, la Figura 7 se muestra la proporción de inclusiones con Ba para diferentes tamaños de partículas en una de las series analizadas.



**Figura 5.** Evolución de la densidad inclusionaria de la secuencia en estado de transición y estacionario.



**Figura 6.** Frecuencia de inclusiones con Ba en estados transitorio y estacionario.

El hecho de que las inclusiones con Ba son más grandes sugiere que son introducidas por emulsificación de escoria y no endógenas es decir formada por la reacción con [Ba] disuelto en el acero líquido. Desde el punto de vista de la calidad del acero, estas inclusiones más grandes pueden ser más perjudiciales para el producto.

Todos estos resultados indican que la escoria de distribuidor puede ser una fuente importante de inclusiones durante el proceso de cambio de cuchara. Aunque la cantidad de escoria de cuchara que pasa sea poca, la acumulación a lo largo de la secuencia proporciona una fuente de inclusiones no metálicas durante los períodos de inestabilidad. Un mecanismo posible es la emulsificación de escoria producida durante la apertura de cuchara. Otra posibilidad es que la escoria de distribuidor sea arrastrada hacia los moldes por el vórtice formado alrededor de la barra tapón durante el descenso de nivel de acero.

Ambos mecanismos han sido confirmados en ensayos modelo de agua.<sup>(11,12)</sup> Sin embargo, para las condiciones de proceso de esta planta, el primer mecanismo parece más probable.

A medida que la secuencia avanza, la cantidad de escoria acumulada en repartidor aumenta y la probabilidad de generación de inclusiones por emulsificación también. Basándose en los resultados anteriores, las acciones adoptadas en planta para minimizar la formación de este tipo de inclusiones fueron, por un lado evitar una excesiva acumulación de escoria y por otro reducir la velocidad de colado durante el cambio de cuchara, apuntando a disminuir la variación de peso en el repartidor y aumentar el tiempo de residencia del acero en el mismo.

### 3.4 Efecto del Uso de Barrera de Argón en la Limpieza del Acero

La densidad de las inclusiones mayores a 30 μm en la línea con barrera de argón fue claramente inferior, en la Figura 8 se puede ver la comparación para los dos ensayos realizados y los efectos positivos de la barrera de argón sobre las inclusiones de mayor tamaño. Estos resultados están en buen acuerdo con los valores reportados en la literatura.<sup>(13,14)</sup>

### 3.5 Influencia de la Pieza Anti-vortex en la Limpieza del Acero

En la Figura 9 se presenta las densidades de inclusiones mayores a 30 μm medidas en los planchones de ambos seguimientos. Como puede observarse, no se detectan diferencias importantes en la cantidad de inclusiones medidas en la línea I (con pieza anti-vortex) y la

línea 2 (sin pieza). En consecuencia, para las condiciones utilizadas en estas pruebas, no se pudo verificar una mejora en la limpieza del acero con la utilización de este dispositivo.

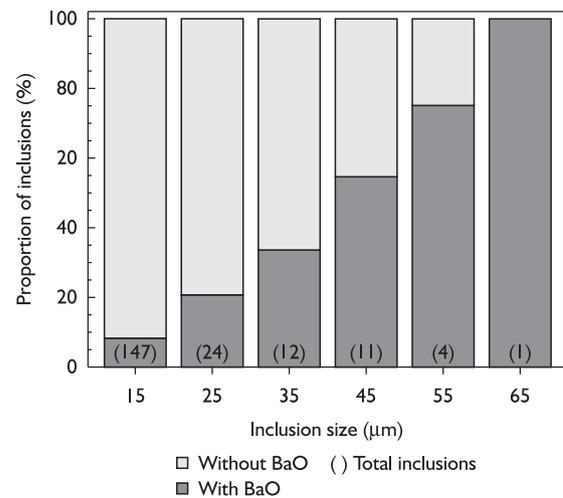


Figura 7. Distribución de tamaños de inclusiones con Ba.

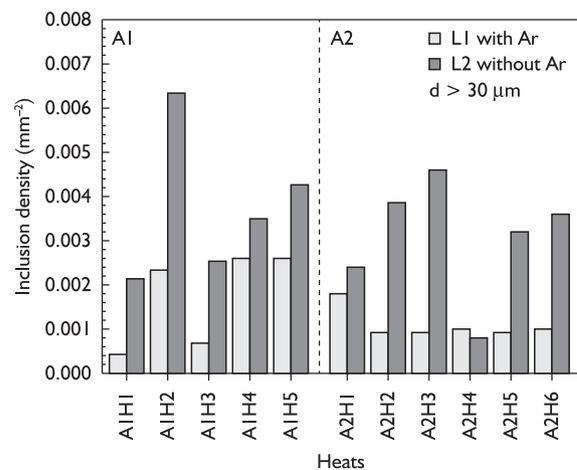


Figura 8. Efecto de la barrera de argón sobre inclusiones mayores a 30 μm.

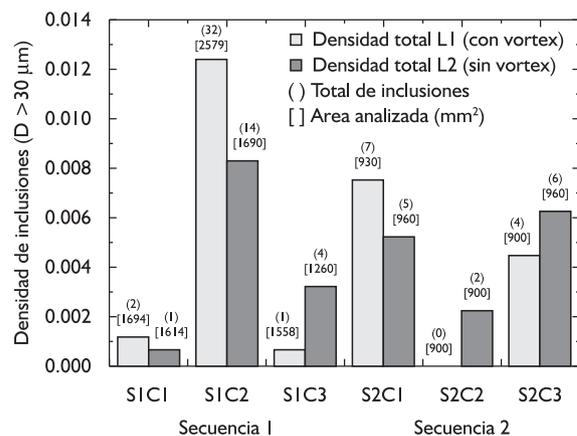


Figura 9. Efecto de la pieza anti vortex sobre la densidad de inclusiones mayores a 30 μm.

#### 4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se estudia la influencia de la escoria de repartidor en la generación de inclusiones mediante el uso de trazadores (BaO). Los resultados de estos ensayos muestran que las inclusiones con Ba se hallaron en su mayoría en los planchones afectados por el cambio de cuchara.

También se observa que la densidad de estas inclusiones se incrementa según progresa la secuencia de coladas. Esto es debido a la acumulación de escoria en el repartidor seguido de una posible emulsión durante la apertura de la cuchara, generando inclusiones que pueden llegar al molde y quedar atrapadas en los planchones.

Se adoptaron prácticas metalúrgicas para minimizar este efecto durante las operaciones diarias. La utilización de barreras de argón en la flotación de inclusiones muestra importantes reducciones de densidad inclusionaria en las partículas grandes ( $>30 \mu\text{m}$ ). Como consecuencia de estos resultados, el dispositivo se está utilizando cuando es necesario producir acero con altos requisitos de limpieza.

La colocación de una pieza anti-vortex en el repartidor, bajo las condiciones de proceso ensayadas, no proporcionó mejoras en la limpieza inclusionaria independientemente del tamaño de partículas.

#### REFERÊNCIAS

- 1 BYRNE, M.; CRAMB, A.; FENICLE, T. The source of exogenous inclusions in continuously cast: aluminum killed steels. *ISS Steelmaking Conference Proceedings*, v. 68, p. 49-56, 1985.
- 2 CRAMB, A.; BYRNE, M. Tundish slag entrainment at Bethlehem's Burns Harbor (Indiana) slab caster. *Iron and Steelmaker*, v. 15, n. 12, p. 49-56, 1988.
- 3 KASUNUMA, J. et al. Continuous casting of highly clean steel slab. *ISS Steelmaking Conference Proceedings*, v. 67, p. 17-19, 1984.
- 4 PRABHU, N.; PINKOWSKI, J. Measuring cold rolled surface quality based on data collected at the caster. *ISS Steelmaking Proceedings*, v. 73, p. 491-5, 1990.
- 5 ENGLISH, T. et al. The use of rare earth oxide tracers in the determination of inclusion sources and origins at British Steel, Scunthorpe Works, *Clean Steel 4*, v. 1, p. 262-82, 1992.
- 6 NAM, S. et al. Improvement of steel cleanliness in ladle exchange period. *ISS Steelmaking Proceedings*, v. 78, p. 551-6, 1995.
- 7 KIM, D. et al. Improvement of cleanness in melt of ferritic stainless steel by control of stirring power. *ISS Steelmaking Proceedings*, v. 84, p. 343-55, 2001.
- 8 FUHR, F. et al. Application of slag tracers to investigate the source of non-metallic inclusions. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 34, n. 6, p. 463-70, 2007. <http://dx.doi.org/10.1179/174328107X174609>
- 9 MARTÍN, A.; MARTÍN, M.; CICUTTI, C. *Utilización de trazadores para determinar origen de macroinclusiones: informe 1º*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Siderurgia, 2008. (Reporte interno. PRO 08 058)
- 10 MARTÍN, A. et al. *Utilización de trazadores en la escoria de repartidor para evaluar el origen de macroinclusiones (seguimiento 3)*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Siderurgia, 2009. (Reporte interno. PRO 09 025)
- 11 RAY, S. et al. Modelling of tundish slag entrainment during ladle change. In: AISTECH CONFERENCE, 2008, Pittsburgh. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2008. v. 2.
- 12 SOLORIO-DÍAZ, G. et al. Fluid dynamics of vortex formation in tundish operations: physical modeling. *Steel Research International*, v. 78, n. 3, p. 248-53, 2007.
- 13 SATISH KUMAR, D. et al. Forced flotation of inclusions in tundish. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 36, n. 6, p. 470-5, 2009. <http://dx.doi.org/10.1179/174328108X393849>
- 14 KITANO, Y. et al. Technology of reducing non-metallic inclusions in tundish in continuous casting. In: ISS ELECTRIC FURNACE CONFERENCE, 56., 1988, New Orleans. *Proceedings...* S.n.t. p. 419-423.

Recebido em: 19/09/2011

Aceito em: 05/04/2012