

Simulación de la precipitación de inclusiones en diferentes etapas del procesamiento del acero líquido

V. Carreño^(*), J.M. Cabrera^(**), R.D. Morales^(*), A. Romero^(*) y M. Hernández^(*)

Resumen Los procesos de fabricación de acero se mejoran constantemente en respuesta a las demandas del consumidor que exige un mayor control de limpieza del metal líquido en las diversas etapas de su elaboración. En las etapas de refinación, como son desoxidación y desulfuración, se promueve la formación de inclusiones de óxidos y sulfuros, que por otra parte son las más frecuentes en el acero líquido. En este trabajo se presenta un simulador matemático que predice la precipitación y composición de las inclusiones no metálicas que se encuentran en el acero líquido en diferentes etapas de su procesamiento, asumiendo que las inclusiones formadas por reoxidación también se pueden simular al incrementar arbitrariamente los niveles de oxígeno que deberán consumir los elementos residuales altamente oxidables (Al, Ca), y empezar la reacción con los desoxidantes menores (Si y Mn). De esta manera se simulan diferentes condiciones de operación. Las predicciones numéricas se comparan con los resultados obtenidos en productos industriales así como los encontrados en la literatura. Se pretende que este simulador permita proponer condiciones de operación y de composición química para mejorar la calidad del acero líquido.

Palabras clave: **Acería. Inclusiones no metálicas. Precipitación. Simulación.**

Precipitation modeling of inclusions at different stages of the steelmaking process

Abstract Steelmaking processes are continuously improved in order to attend the increasing requirements of the cleanness of the liquid metal. At the refining stages, as deoxidation and desulphuration, the formation of inclusions of oxides and sulphides is promoted, which on the other hand, are the most frequent inclusions. In this work a mathematical simulator of the precipitation and chemical composition of non-metallic inclusions at different steps of the steelmaking process is presented. To this purpose, it is assumed that inclusions formed by reoxidation can be simulated by increasing arbitrarily the oxygen levels consumed by the residual elements (aluminium, calcium, etc.) and starting the chemical reaction with less powerful deoxidants (silicium and manganese). Accordingly, different operative conditions can be simulated. Numerical predictions are compared with experimental results of industrial trials, as well as results included in the bibliography.

Keywords: **Steelmaking. Non-metallic inclusions. Precipitation. Simulation.**

1. INTRODUCCIÓN

Durante la fabricación del acero intervienen una gran cantidad de conceptos y cuidados, que se inician con la selección de las materias primas y finalizan con las prácticas de refinamiento

específicamente diseñadas para controlar el tipo, tamaño y distribución de las inclusiones no metálicas (1). Sin embargo, el medio circundante puede contaminar al acero líquido en diversas etapas del procesamiento, comúnmente durante el calentamiento y el vaciado. En este sentido, el distribuidor, o artesa, desempeña una función importante sobre la limpieza del acero. Una deficiente operación del distribuidor proporciona una amplia oportunidad para que el acero líquido se reoxide con el oxígeno del aire.

(*) Dpto. de Ingeniería Metalúrgica, ESIQIE - Instituto Politécnico Nacional, Ap. Postal 75-874, México DF., CP 07300, (México).

(**) Dpto. de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica, ETSEIB. Univ. Politécnica de Catalunya, Av. Diagonal 647, 08028-Barcelona (España).

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los aceros investigados (Tabla I), identificados como H1008 y HW304 en este trabajo, fueron producidos por la compañía Hojalata y Lámina, S.A. (HYLSA, en su planta de Puebla), la cual proporcionó 48 muestras, dos por colada, una a la salida del horno de refinación y otra a la salida del distribuidor. En las coladas 1 a la 9 se fabricó el acero HW304 y las coladas 10 a la 24 el acero H1008. En la identificación de inclusiones no metálicas se utilizaron un microscopio óptico Nikon 180 y uno electrónico de barrido JEOL JSM-35CF. En este último, se utilizó la unidad de microanálisis con detector de estado sólido, también conocido como EDS.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla II presenta el tipo de inclusiones que se encontraron en las muestras obtenidas a la salida del horno olla y a la salida del distribuidor, para los dos tipos de acero. Algunas inclusiones encontradas corresponden a silicatos, observándose altos contenidos de CaO, SiO₂ y Al₂O₃. El MgO observado en los microanálisis proviene del ladrillo refractario del horno olla y de fusión. Esta tabla muestra que las inclusiones están formadas básicamente por silicatos de calcio, aunque también se encuentran silicoaluminatos de calcio y silicatos de manganeso. La presencia de alúmina fue también preponderante en las muestras del horno de refinación para los dos tipos de acero. La mayoría de estas inclusiones está compuesta por prácticamente 100 % de aluminio. Las composiciones químicas de las inclusiones de silicato de calcio, se encuentran identificadas en la zona 2 del diagrama ternario de composiciones de la figura 1, mientras que los silicoaluminatos de calcio y las alúminas se encuentran localizadas en las zonas 1, 3 y 5 de la misma figura.

Tabla I.— Composición química de las muestras estudiadas obtenidas de acero líquido, expresada en % en masa, excepto para N y Ca, que se expresan en ppm

TABLE I.— Chemical composition of the samples studied obtained from liquid steel, (mass % except for N and Ca, which are in ppm)

ACERO	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni
H1008	0,800	0,400	0,100	0,012	0,012	0,050	0,030
HW304	0,1	1,510	0,940	0,011	0,012	0,020	0,010
ACERO	Cr	Sn	Mo	V	Al	N	Ca
H1008	0,020	0,004	0,008	—	0,006	—	10
HW304	0,010	0,004	0,012	—	0,006	40	8

Tabla II.— Composición (% en masa) de las inclusiones analizadas del horno olla

TABLE II.— Composition (mass %) of inclusions analysed from samples taken from the ladle

ACERO	CaO	Al ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	MgO
HW304	52,98	7,07	2,91	34,58	2,46
HW304	41,54	18,34	1,11	24,35	14,47
HW304	24,74	30,89	2,47	41,90	—
HW304	65,47	12,40	0,90	20,18	1,06
H1008	65,47	14,40	0,90	20,18	1,058
H1008	34,17	17,29	2,20	31,75	13,50
H1008*	34,27	15,22	—	35,54	13,15
H1008	4,7	24,55	12,05	58,7	—
H1008*	8,358	15,659	28,64	38,551	1,053
H1008	11,30	9,90	32,67	46,13	—

*En estas muestras también se encontró CaS en pequeñas cantidades.

En la tabla III se muestran, para ambos aceros, los resultados de la caracterización de inclusiones encontradas en muestras tomadas a la salida del distribuidor. Se observó que algunas de las inclusiones están constituidas por silicoaluminatos, y otras por sílice, pero básicamente están constituidas por MnO·SiO₂. Esta tabla también muestra la existencia de alúmina en los dos tipos de acero, aunque es poco frecuente. Las composiciones químicas del MnO·SiO₂ se encuentran en la zona 1 de la figura 2, mientras que la alúmina está localizada en la zona 2 de esta misma figura. En estudios realizados por

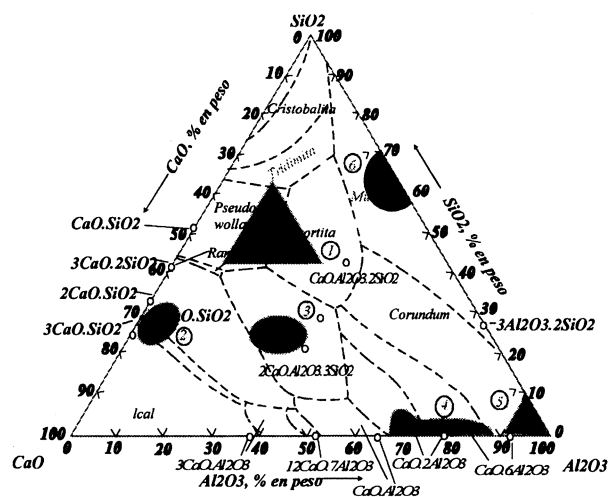


FIG. 1.— Diagrama ternario que representa la composición química de las inclusiones de muestras tomadas del H.O. para los aceros estudiados.

FIG. 1.— Ternary diagram representing the chemical composition of inclusions taken from samples from the ladle.

TABLA III.— Composición (% en masa) de las inclusiones analizadas procedentes de muestras del distribuidor

TABLE III.— Composition (mass %) of inclusions analysed from samples taken from the tundish

ACERO	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
HW304	26,6	68,67	3,25	----	1,52
HW304	28,43	64,01	5,45	1,56	0,55
HW304	33,56	62,03	3,24	0,89	0,29
HW304	30,96	64,32	2,87	1,38	0,47
HW304	30,60	64,71	3,06	1,66	----
HW304	37,18	56,61	3,7	2,09	----
H1008	33,56	62,02	0,89	3,24	0,28
H1008	43,37	56,03	----	0,6	----
H1008	----	96,32	3,68	----	----
H1008	26,62	68,68	3,25	----	1,45
H1008	----	3,98	95,08	0,56	----
H1008	28,43	64,01	5,45	1,56	0,55
H1008	----	64,67	34,75	0,58	----
H1008	53,43	44,64	1,35	0,058	----
H1008	30,57	64,71	3,06	1,66	----

otros autores (2) se encontró que el MnO·SiO₂ está presente en aceros semicalmados con aluminio. Entre las diversas fuentes que incrementan el nivel de oxígeno, está el rompimiento de la capa de escoria,

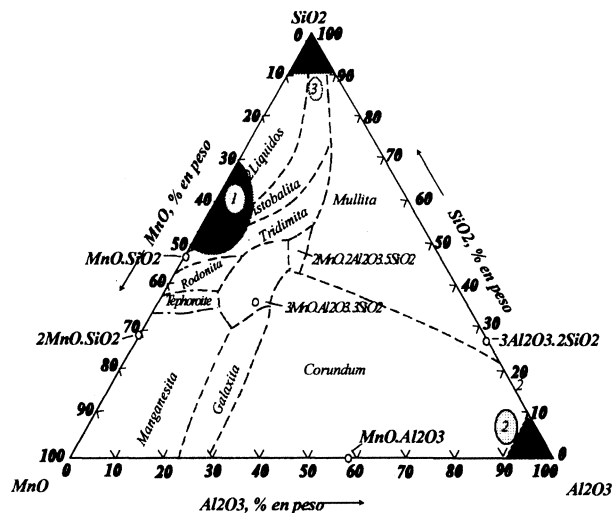


FIG. 2.— Diagrama ternario que representa la composición química de las inclusiones de muestras tomadas del distribuidor para los aceros investigados.

FIG. 2.— Ternary diagram representing the chemical composition of inclusions taken from samples from the tundish.

lo que produce una reoxidación atmosférica que incrementa la cantidad de oxígeno y de óxidos en el acero. Otras causas que incrementan el contenido de oxígeno en el acero son el vaciado de la olla en el distribuidor sin protección, el vaciado con un bajo nivel de acero en el distribuidor, tener escoria de cobertura del distribuidor sobre una región turbulenta alrededor de la buza y el vaciado sin tener sumergida la buza olla-distribuidor. La eliminación de las inclusiones de alúmina mejora con una escoria básica en el distribuidor, pero el acero se puede contaminar debido a la sílice (2).

3.1. Comparación entre inclusiones del horno olla y distribuidor

Al comparar los análisis de las muestras extraídas del distribuidor con los obtenidos del horno olla se encontró que los silicatos detectados en el horno olla son de calcio, mientras que los silicatos identificados en el distribuidor son de manganeso. El contenido de silicatos y su tamaño es mayor en el distribuidor. Se encontró mayor cantidad de alúmina en el horno de afino que en el distribuidor. De acuerdo con Fruehan (3), la fisicoquímica y el mecanismo de formación indican que las inclusiones no metálicas generadas por reoxidación contienen elementos involucrados en la desoxidación, pero difieren significativamente de las inclusiones provocadas por la desoxidación en composición y tamaño. El tamaño de las inclusiones originadas por la reoxidación puede variar desde 50 hasta más de 600 μm de tamaño.

3.2. Comparación entre las inclusiones formadas durante la fabricación del acero y las obtenidas con el simulador

Mediante un simulador matemático (4) se examinaron varias etapas de procesamiento del acero y se determinaron las causas que dieron origen a las inclusiones no metálicas. Durante el vaciado del acero del horno de fusión a la olla, se desoxida el acero líquido. De acuerdo con Venkatadri (5), la alúmina es el producto de desoxidación estable cuando se desoxida con aluminio durante el vaciado. Fruehan (3) encontró que los elementos adicionales reaccionan con el acero líquido y con el medio ambiente, como es el caso del aluminio. Aunque también existen pérdidas debido a las reacciones de los elementos adicionados con los óxidos inestables de la escoria protectora y con los óxidos inestables del ladrillo refractario. El resultado de simular el comportamiento de los elementos desoxidantes durante el vaciado, desde el punto de

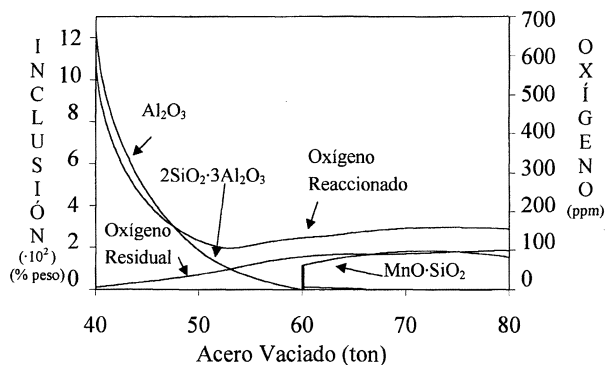


FIG. 3.— Simulación del vaciado de los aceros H1008 y HW304, con una eficiencia de aluminio del 80 %.

FIG. 3.— Simulation of the casting of H1008 and HW304 steels, with an aluminium efficiency of 80 %.

vista termodinámico, se muestra en la figura 3. Esta figura es el resultado de simular un rendimiento del 80 % para el aluminio, del 70 % para el carbono y del 84 % para el oxígeno. Estos aceros se vacían con un contenido medio de oxígeno disuelto de 700 ppm, mientras que el contenido de aluminio es constante (60 ppm). Cabe mencionar que se utiliza la misma secuencia de adiciones para los dos aceros. Dentro de las inclusiones encontradas está la alúmina, Al_2O_3 , y los compuestos $MnO \cdot SiO_2$ y $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. El contenido de oxígeno residual está acorde con el proceso. Las inclusiones Al_2O_3 y

$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ son negativas para la fluidez del acero líquido y para la deformabilidad del alambro. La inclusión $MnO \cdot SiO_2$ es líquida a la temperatura de aceración. Las composiciones químicas de las inclusiones se encuentran localizadas en las zonas 1 y 2 de la figura 4a y en la zona 3 de la figura 4b.

Cuando se adicionan elementos desoxidantes (aluminio, silicio y manganeso) durante el vaciado se disminuye la actividad del oxígeno en el metal al ligar a este elemento en los compuestos estables, como es la Al_2O_3 . Fruehan (3) y Aritomi (6) mencionan que las inclusiones que se forman por desoxidación y que permanecen en el acero son esféricas y muy pequeñas, como es el SiO_2 . También se hace notar que el aluminio proporciona niveles más bajos de oxígeno disuelto en el acero que el silicio y el manganeso juntos, pero el producto de la desoxidación tiene que ser eliminado o modificado.

3.3. Simulación de las inclusiones formadas en la refinación

El tratamiento y ajuste de la composición química del acero se inicia cuando éste llega a la zona de refinación. La temperatura del metal líquido es de aproximadamente 1.600 °C, el aluminio oscila entre 60 ppm, mientras que el oxígeno disuelto es ajustado a 50 ppm. Estos aceros se tratan mediante inyección de Ca-Si con el principal propósito de desulfurar el acero y eliminar las inclusiones de alúmina, lo que da como resultado una reducción del contenido de oxígeno. El resultado que se obtiene al

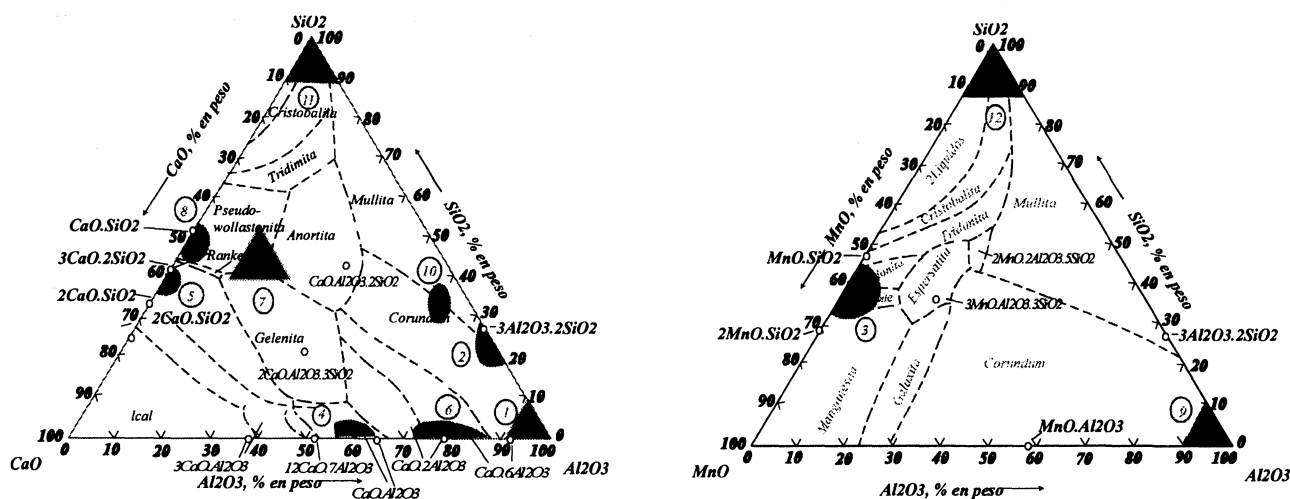


FIG. 4.— a) Diagrama ternario que representa las inclusiones que predice el modelo matemático en las diferentes etapas simuladas para el acero H1008. b) Diagrama ternario que representa las inclusiones que predice el modelo matemático en las diferentes etapas simuladas para el acero H1008.

FIG. 4.— a) Ternary diagram representing the inclusions predicted by the mathematical model at the different simulated stages for H1008 steel. b) Ternary diagram representing the inclusions predicted by the mathematical model at the different simulated stages for H1008 steel.

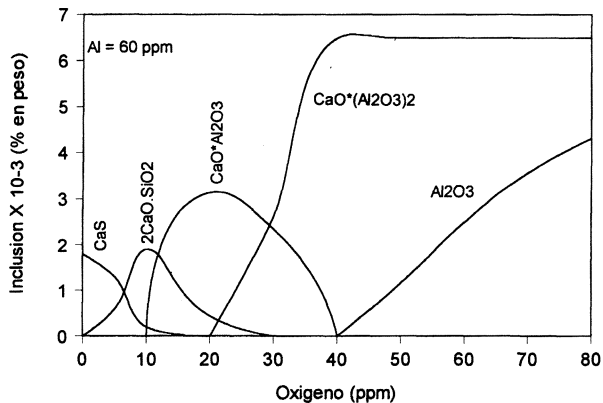


FIG. 5.— Simulación del tratamiento en el horno de afino para el acero HW1008.

FIG. 5.— *Simulation of the treatment in the ladle of HW1008 steel.*

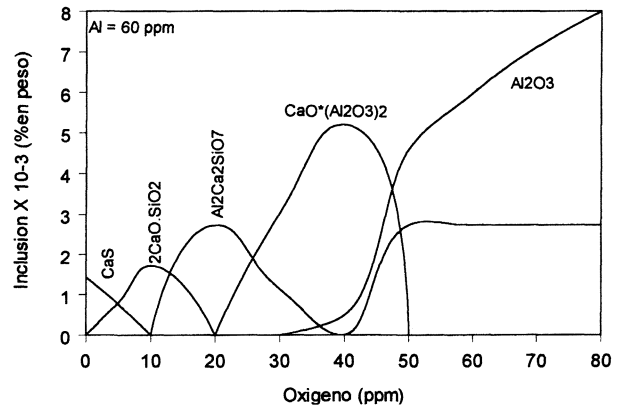


FIG. 6.— Simulación del tratamiento en el horno olla para el acero HW304.

FIG. 6.— *Simulation of the treatment in the ladle of HW304 steel.*

simular estas condiciones, variando la concentración del oxígeno disuelto, se muestra en las figuras 5 y 6 para los aceros H1008 y HW304, respectivamente.

La figura 5 muestra que para 50 ppm de oxígeno disuelto, el $\text{CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3)_2$ precipita en mayor proporción y en menor cantidad Al_2O_3 . A la misma concentración de oxígeno, pero en la figura 6, se observa que precipitan en mayor cantidad las inclusiones de Al_2O_3 y $\text{Al}_2\text{Ca}_2\text{SiO}_7$ y ligeramente el $\text{CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3)_2$. La única inclusión deseable es la fase $\text{Al}_2\text{Ca}_2\text{SiO}_7$ deformable y con bajo punto de fusión. La formación de Al_2O_3 puede provocar problemas de bloqueo en las boquillas del distribuidor, además de reducir la deformabilidad del material (2). La ventaja que presenta la alúmina se debe a los grandes valores de la tensión superficial que tiene en el límite metal-inclusión de alúmina, lo cual permite su rápida flotación mediante la agitación con argón. Así, también se observa en las dos gráficas que en un acero muy desoxidado (entre 0 y 10 ppm de O) precipita el CaS, el cual tiene un alto punto de fusión de alrededor de 2.500 °C y, por tanto, afecta negativamente a la fluidez y la colabilidad del acero. Esta comparación también indica que al incrementar la adición de calcio se promueve la formación de sulfuros. Con un acero más oxidado, precipitan otras especies de silicato de calcio no deformables y que afectan a la colabilidad del acero, tal y como muestran las figuras 5 y 6. Debido a los contenidos de calcio y alúmina, la influencia que se observa del silicio es mínima, mientras que el manganeso no reacciona. Finalmente, las composiciones químicas de las inclusiones, para el acero H1008, se encuentran dibujadas en las zonas 1, 4, 5 y 6 de la figura 4a, mientras que para el acero HW304 se encuentran localizadas en las zonas 1, 2, 3, 4 y 5 de la figura 7a.

Al comparar la composición química de los microanálisis (Fig. 1) con las inclusiones obtenidas por simulación del acero en el horno de afino, se encontró que las obtenidas por simulación del vaciado y refinación del acero (Figs. 3 y 6) mostraron composiciones similares a las obtenidas por microscopía electrónica en ambos aceros estudiados. Se observa buena concordancia en cuanto a la localización de la alúmina (zona 5 de la figura 1 y zona 1 de las figuras 4a y 7a). En la figura 3 esta fase precipita en mayor cantidad durante el vaciado. Se presenta la misma concordancia para el $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ al encontrarse localizada en las mismas áreas, zonas 4 y 6 (Fig. 4a) y zona 2 (Fig. 7a) y zona 4 de la figura 1. La inclusión $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ sufrió un ligero desplazamiento originado por la unión de las inclusiones $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ y Al_2O_3 (zona 4 de la figura 1); entre estas hay gran humectación (3), lo que posibilita su unión. Este tipo de inclusión puede eliminarse por flotación, pues entre este precipitado y el metal líquido hay débil humectación, por lo que dicha inclusión emergerá y se evacuará con mayor rapidez que cuando la humectación entre ellos es buena. Los tratamientos de refinación de acero tienen gran efecto sobre la limpieza del acero, pero, de acuerdo con las gráficas, se necesita tener gran cuidado en el tipo de reacción que ocasionan.

3.4. Simulación de las inclusiones formadas en el distribuidor

De acuerdo con Venkatadri (5), la eliminación de la reoxidación del acero líquido es un paso principal para mejorar la limpieza del acero. Los resultados que se obtienen al simular la reoxidación de los aceros H1008 y HW304 se muestran en las figuras 8 y 9. Para el caso del acero H1008, una

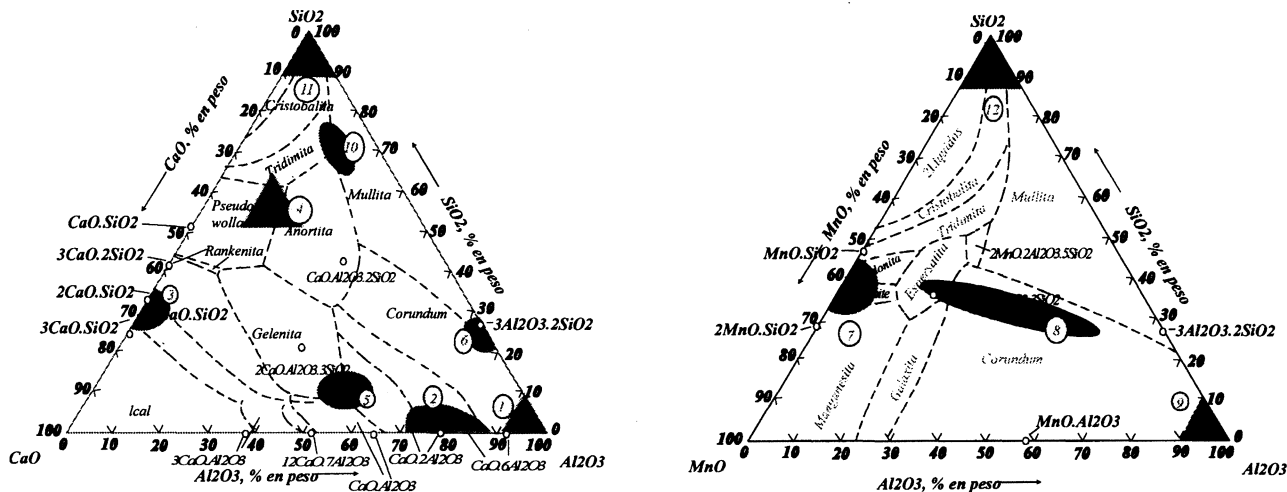


FIG. 7.— a) Diagrama ternario que representa las inclusiones que predice el modelo matemático en las diferentes etapas simuladas para el acero HW304. b) Diagrama ternario que representa las inclusiones que predice el modelo matemático en las diferentes etapas simuladas para el acero HW304.

FIG. 7.— a) Ternary diagram representing the inclusions predicted by the mathematical model at the different simulated stages for the HW304 steel. b) Ternary diagram representing the inclusions predicted by the mathematical model at the different simulated stages for HW304 steel.

reoxidación menor a 110 ppm de oxígeno disuelto sólo consume el aluminio y el calcio, formando Al_2O_3 , $CaO \cdot (Al_2O_3)_2$ y $Al_2Ca_2SiO_7$. El $MnO \cdot SiO_2$ precipita con una concentración de oxígeno de 170 ppm y se forma muy rápidamente a mayores contenidos de oxígeno. En el acero HW304, que tiene mayor cantidad de manganeso, la inclusión de $MnO \cdot SiO_2$ empieza a formarse con 110 ppm de oxígeno disuelto en el baño, y su precipitación se incrementa en forma lineal conforme se reoxida más el acero. Las composiciones químicas de las inclusiones, para el acero H1008, se representan gráficamente en las zonas 2, 7, 8 y 10 de la figura

4a y en la zona 9 de la figura 4b, mientras que para el acero HW304 se encuentran localizadas en la zona 6 de la figura 7a y las zonas 7, 8 y 9 de la figura 7b. La única inclusión deseable en los dos aceros estudiados es la fase $Al_2Ca_2SiO_7$, pero, a los niveles de reoxidación a los que se forma, se originan otras inclusiones no deformables, como son Al_2O_3 y $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. A concentraciones mayores de 210 ppm de oxígeno, precipitan considerables cantidades de inclusiones, principalmente, de $MnO \cdot SiO_2$ para ambos aceros. Se observa en estas figuras que el manganeso desempeña un importante papel en la formación de

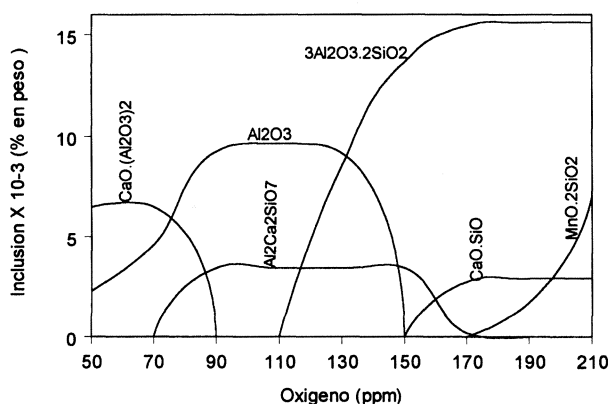


FIG. 8.— Simulación de la reoxidación en el distribuidor para el acero H1008.

FIG. 8.— Simulation of the reoxidation practice at the tundish for H1008 steel.

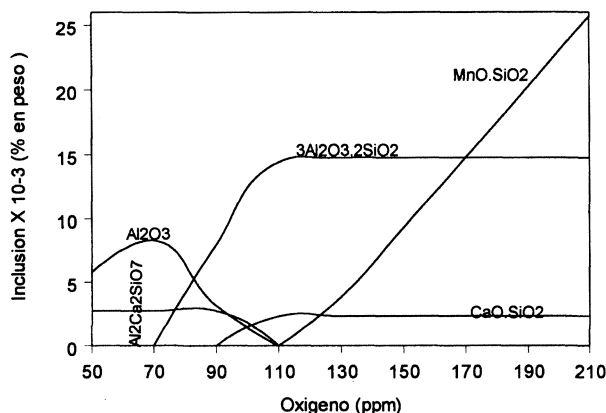
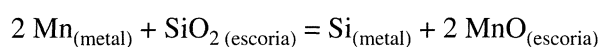
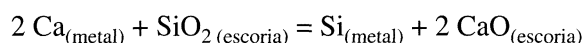
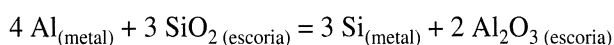


FIG. 9.— Simulación de la reoxidación en el distribuidor para el acero HW304.

FIG. 9.— Simulation of the reoxidation practice at the tundish for HW304 steel.

la inclusión $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$. El manganeso tiene menor afinidad química por el oxígeno que el silicio, pero su actividad se ve incrementada conforme aumenta su contenido en el acero.

Durante la fabricación de estos dos aceros, el distribuidor se recubrió con cascarilla de arroz, rica en sílice, que estuvo en contacto directo con el acero líquido, por lo que fue una fuente segura de contaminación. En algunas investigaciones (2 y 7) se indica que el aluminio, el calcio y el manganeso disueltos reaccionan con la sílice de la escoria del distribuidor mediante las reacciones siguientes:



Al correlacionar las inclusiones obtenidas con el programa de las diferentes etapas simuladas con los resultados obtenidos experimentalmente del horno de fusión y del distribuidor, se encontró que la alúmina se origina, principalmente, en el vaciado. La aplicación del tratamiento con calcio para la modificación de óxidos produjo básicamente dos tipos de inclusiones: 1) $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$. Esta inclusión es sólida a la temperatura de fabricación de acero, es globular y mantiene la misma geometría en el laminado, porque no es deformable, y 2) $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$. Esta inclusión es líquida a la temperatura de fabricación del acero. La globularidad, tamaño y no deformabilidad son iguales a la inclusión anterior.

Las causas que dan origen a la formación de la sílice son, principalmente: la contaminación del acero con escoria del distribuidor, la reoxidación del acero en el distribuidor y la reacción del aluminio disuelto en el acero líquido con la escoria.

Aunque la inclusión de $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ se produce básicamente por la reoxidación del acero en el distribuidor, también se encontró que su formación se debe a la práctica de vaciado. El Al_2O_3 también se forma en el distribuidor debido a la reacción entre el aluminio y los compuestos fácilmente reducibles, como el MnO y el SiO_2 . Hay que tener en cuenta que los silicatos formados "mojan" bien al hierro (menor tensión superficial en el límite metal-inclu-

sión); como consecuencia, es más difícil separar la inclusión del metal, por lo que la eliminación de inclusiones de silicatos del metal está relacionada con dificultades adicionales (2 y 3).

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un simulador matemático que permite predecir con exactitud la formación de inclusiones no metálicas en diferentes etapas del procesamiento del acero líquido. Los tratamientos de afino del acero tienen un gran efecto sobre la limpieza del mismo, pero se requiere gran cuidado en el tipo de reacción que producen. Los niveles de limpieza pueden mejorarse significativamente mediante el adecuado tratamiento del horno olla.

Agradecimiento

VCG agradece la concesión de una beca doctoral por parte de la CONACYT (México) y JMC agradece la financiación mediante una acción integrada Catalunya-México concedida por el Comissionat per a Universitats de la Generalitat de Catalunya. Los autores agradecen la amable cooperación de HYLISA-Puebla (México) en el suministro del material. Se hace también un reconocimiento especial a las instituciones SNI y COFAA (México) por su permanente ayuda a las labores de investigación.

REFERENCIAS

- (1) WINTZ, M., BOBADILLA, M., LEHMANN, J. y GAYE, H. *ISIJ Intern.*, 35, 1995: 715-722.
- (2) MCPHERSON, N.A. y MCLEAN, A., en *Continuous Casting*, Vol. 7. Eds McPherson, N.A. y McLean, A., The Iron and Steel Society of AIME. (EE.UU.), 1995: 1-56.
- (3) FRUEHAN, R.J., en *Ladle Metallurgy Principles and Practices*, Ed. Book Crafters, Inc. (EE.UU.), 1985: 1-110.
- (4) CARREÑO, V. Tesis Doctoral. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. (México), 1998.
- (5) VENKATADRI, A.S. *Trans. ISIJ*, 18, 1978: 591-600.
- (6) ARITOMI, N. y GUNJI, K. *Trans. ISIJ*, 23; 1983: 530-538.
- (7) KUDRIN, V.A., en *Metalurgia del Acero*, Ed. Mir, Moscú (Rusia), 1984.