

## Eliminación de atrape de escoria y gotas frías en colada continua de palanquillas de acero<sup>(\*)</sup>

B. Santillana\*, J. Madías\*, M. Dziuba\*, M. Oropeza\*\* y E. Fernández\*\*

**Resumen** Durante el año 2000, palanquillas de diversos grados de acero producidas en la colada continua de palanquillas de la Planta SIDETUR Casima, Venezuela, presentaron un defecto clasificado *a priori* como atrape de escoria. Se llevó a cabo un estudio para definir la causa del problema y tomar acciones para resolverlo. En este trabajo se presenta el estudio metalográfico llevado a cabo, demostrando que el defecto no era solo un problema de atrape de escoria, sino que estaba asociado a gotas frías y porosidad. Se realizaron observaciones microscópicas y análisis SEM. Se discute el mecanismo de formación y atrape de nata, basado en la literatura estudiada, y se construye un modelo termodinámico del sistema Fe-Si-Mn-O. Se sugiere un mecanismo de formación de las gotas frías y el atrape de escoria basado en los resultados del estudio metalográfico. Las acciones tomadas en la planta para disminuir el problema y los resultados en términos de rechazos de las palanquillas, se detallaron antes y después de aplicar las acciones correctivas. El análisis consistió en un estudio metalográfico de las muestras de palanquillas. De acuerdo a los resultados, el defecto consistía en una mezcla de gotas frías, atrapés de nata y porosidad. La formación de la nata es normal para estos grados de acero, pero el atrape de la misma depende de la relación Mn/Si y la temperatura del acero. Las gotas frías se pudieron originar por la reacción del aceite.

**Palabras clave** Atrape de escoria. Gotas frías. Porosidad. Palanquillas. Aceros de bajo carbono.

## Elimination of slag entrapment and cold drops in continuous casting steel billets

**Abstract** During the year 2000, billets of several steel grades produced in the billet caster of Sidetur Casima Works, Venezuela, presented a defect classified *a priori* as slag entrapment. Due to this fact, a study was carried out in order to define the root cause for the problem to solve it. In this paper the metallographic study of the defects in the billets is presented, revealing that the defect was not only pure slag entrapment, but that it was associated with cold drops and porosity. Different etchants were used for microscopical observation, SEM analysis was also performed. The mechanism for scum formation and entrapment is discussed, based on the literature and on a thermodynamic model of the Fe-Si-Mn-O system. A mechanism for formation and entrapment of cold drops is suggested, based on the findings of the metallographic study. The actions taken in the plant to cope with the problem are summarized. The results in terms of billet rejection before and after the actions had been taken are detailed. The analysis consisted in a metallographic study of billet samples. According to results, the defects consisted in a mixture of cold drops, scum and porosity. Scum formation is normal for this steel grades, and entrapment depends on Mn to Si ratio and steel temperature. Cold drops and porosity could be originated by oil reaction.

**Keywords** Slag entrapment. Cold drops. Porosity. Billets. Low carbon steels.

(\*) Trabajo recibido el día 28 de noviembre de 2001 y aceptado en su forma final el día 7 de mayo de 2002.

(\*) Instituto Argentino de Siderurgia, Av. Central y Calle 19 Oeste, 2900 San Nicolás, Prov. de Buenos Aires, Argentina.

(\*\*) SIDETUR Casima, Av. Fuerzas Armadas, Pla. 22 y 23, Vía Los Caribes, Puerto Ordaz, Venezuela.

## 1. INTRODUCCION

Los defectos que se producen en la producción de palanquillas se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Defectos de forma, que incluyen todos los defectos que modifican o distorsionan la forma normal de la palanquilla.
- Defectos internos, como macroinclusiones, porosidad, etc.
- Defectos superficiales, que incluyen grietas transversales y *off corner*, *pin-holes*, incrustaciones de escoria y gotas frías.

En este trabajo se discute la presencia de una asociación de varios defectos, atrape de escoria, gotas frías, falta de material y porosidad.

En palanquillas de diversos grados de acero, producidas bajo varias condiciones operativas en la máquina de colada continua de SIDETUR Casima, Venezuela, se presentaron, durante el año 2000, varios defectos clasificados *a priori* como atrape de escoria. Por esta razón, se comenzó un estudio con vistas a caracterizar el defecto, determinar su origen y tomar medidas para su minimización.

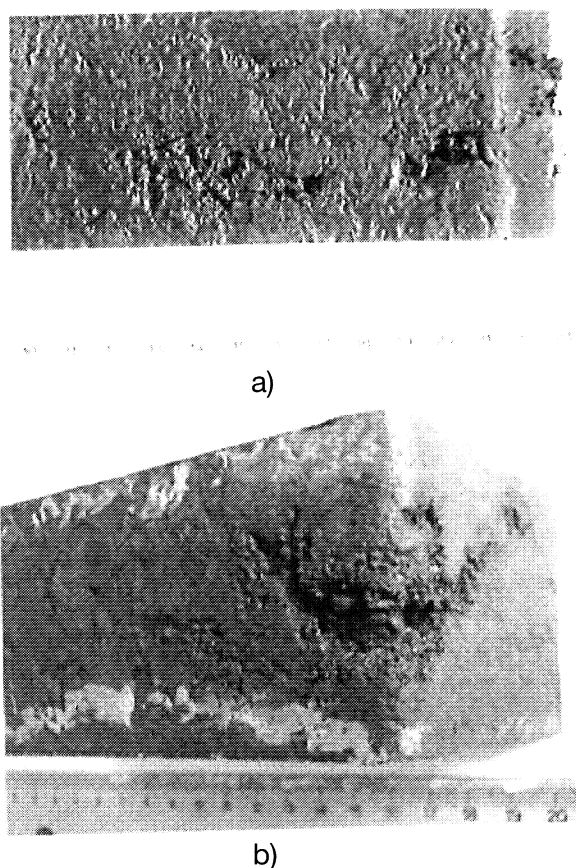
En este trabajo se presenta el estudio metalográfico de estos defectos, se discuten los mecanismos para la formación y atrape de escoria y para explicar la presencia de gotas frías y porosidad asociada con éstas. Se resumen las medidas tomadas en la planta, en base a las conclusiones del estudio, y se presentan los resultados obtenidos en términos de disminución de los rechazos por atrape de escoria.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1. Muestras

Detalles del equipamiento y operación de la planta de SIDETUR Casima pueden encontrarse en literatura específica<sup>[1 y 2]</sup>. Se estudiaron muestras enviadas por Sidetur, provenientes de dos palanquillas de 150×150 mm de acero grado 50, similar al SAE 1020. En la figura 1 se presenta el aspecto, a simple vista, de los defectos observados en las muestras.

El defecto se observaba, más acentuadamente, en las esquinas y, a simple vista, parecía falta de material. Las muestras enviadas por Sidetur ya estaban cortadas, pero cabe aclarar que el defecto se



**Figura 1.** Aspecto, en las palanquillas, de los defectos calificados *a priori* como atrape de escoria. a) muestra 1, proveniente de la cara interna de la palanquilla; b) muestra 2, proveniente de un ángulo de la palanquilla.

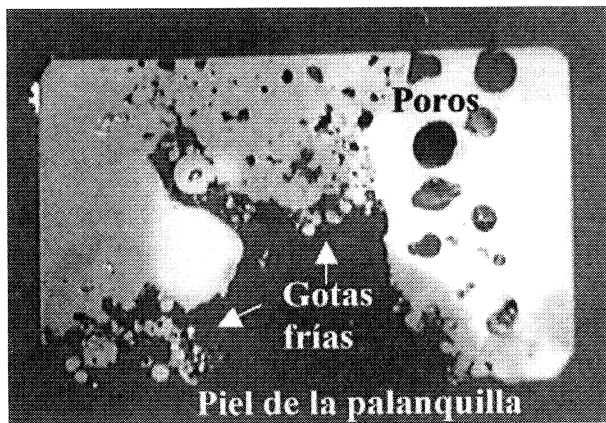
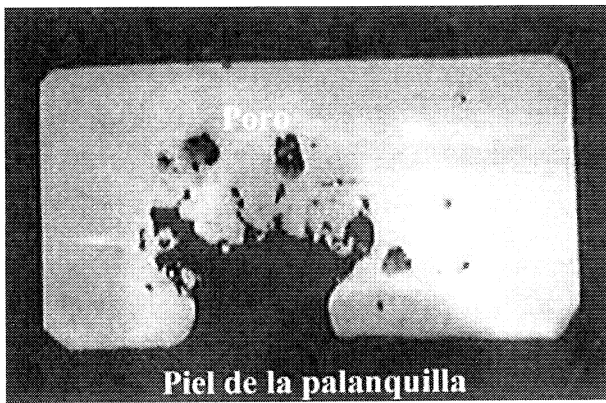
*Figure 1. Aspect of the defects a priori assessed as slag entrapment in the billets.*

producía en cualquier lugar de la palanquilla. En este caso, una de las muestras provenía de la cara interna y la otra de uno de los ángulos de la palanquilla. En el ángulo estaba orientado en forma de V ascendente (Fig. 1b). En la inspección con lupa se pudieron distinguir pequeñas bolas de acero. A simple vista no se detectó material no metálico.

### 2.2. Estudio metalográfico

Se cortaron muestras en los supuestos atrapés y se prepararon probetas para estudio metalográfico. En la figura 2 se presenta el aspecto de dos de las probetas pulidas.

Como puede observarse, hay falta de material asociada a gotas frías y una importante porosidad. Ésta se desarrolla hasta una profundidad de entre 10 y 16 mm hacia el interior de la palanquilla, localizada alrededor del defecto principal.



**Figura 2.** Aspecto, a simple vista, de los defectos en probetas pulidas. Se observa falta de material, gotas frías y poros.

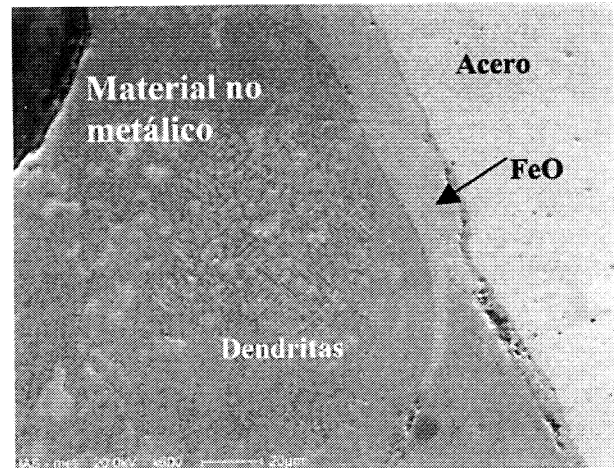
*Figure 2. Appearance of the defects on the as polished samples, with naked eye. Lack of material, as well as cold drops and porosity are observed.*

### 2.2.1. Material no metálico

La presencia de material no metálico en la zona del defecto sólo se pudo detectar mediante observación con microscopio óptico y electrónico, no a simple vista ni con el uso de la lupa. Aparecía en diversas formas: como incrustaciones, rodeando al acero y en forma de macroinclusiones. También se observó decarburación y gotas frías.

En la figura 3 se presenta una fotografía de una de las incrustaciones tomada en el microscopio electrónico. El análisis con espectrometría de energía dispersiva (Energy Dispersive Spectrometer) reveló que se trataba de silicato de manganeso con una cubierta de óxido de hierro y dendritas ricas en FeO precipitadas en su interior. En la tabla I se presenta el análisis EDS correspondiente.

También había silicato de manganeso o de manganeso e hierro rodeando al acero. Formaba una delgada capa de 20 a 50 micras bordeando el



**Figura 3.** Incrustación de silicato de manganeso con dendritas de óxido de hierro. Observación en el microscopio electrónico de barrido a 600 aumentos.

*Figure 3. Non metallic incrustation: manganese silicate with iron oxide dendrites. SEM back-scattered electrons, 600 X.*

**Tabla I.** Análisis EDS de las incrustaciones de silicato de manganeso con dendritas de óxido de hierro, expresado como FeO

*Table I. EDS analysis of the non metallic material*

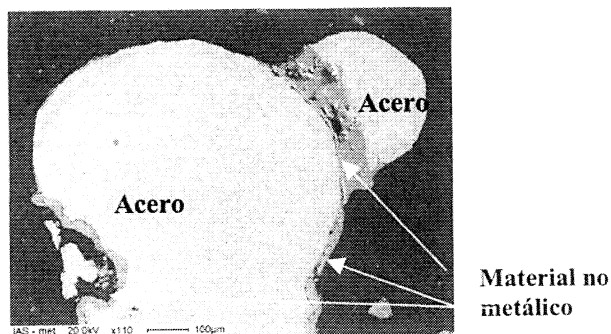
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	S	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO
Global	2,6	55,5	0,6	0,8			40,5	
Global	3,7	58,9	1,3	1,4	1,2		33,4	
Dendritas		2,5				1,0	20,6	75,9
Matriz		27,9		1,1			32,9	38,2

defecto (Fig. 4) y, en algunos casos, se encontraba uniendo partes de material metálico.

En las muestras se encontraron varias macroinclusiones globulares. Se trataba de silicatos de manganeso homogéneos, silicatos de manganeso con agujas de rodonita y silicatos de manganeso con rosetas de cristobalita (Fig. 5). Por su composición provenían de reoxidación por contacto con el aire. Las composiciones estequiométricas están en la tabla II.

### 2.2.2. Gotas frías

En la figura 6 se presenta el aspecto de las gotas frías que estaban presentes en el defecto, vistas en muestras pulidas. Algunas, están aisladas, en tanto que, otras, se han refundido pero, los bordes son revelados por el ataque con nital.



**Figura 4.** Silicato de manganeso e hierro bordeando el acero. Observación en el microscopio electrónico de barrido, a 110 aumentos.

Figure 4. Manganese silicate and iron oxide surrounding the steel. SEM back-scattered electrons, 110X.

**Tabla II.** Composición de las macroinclusiones globulares

Table II. Globular macroinclusions composition

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MnO
No metálico	1,81	53,3	0,68	42,75
No metálico	2,43	53,86	1,32	40,52
No metálico	1,92	46,54	0,85	47,74
No metálico	2,44	39	1,76	55
No metálico	3,72	58,95	1,39	33,4

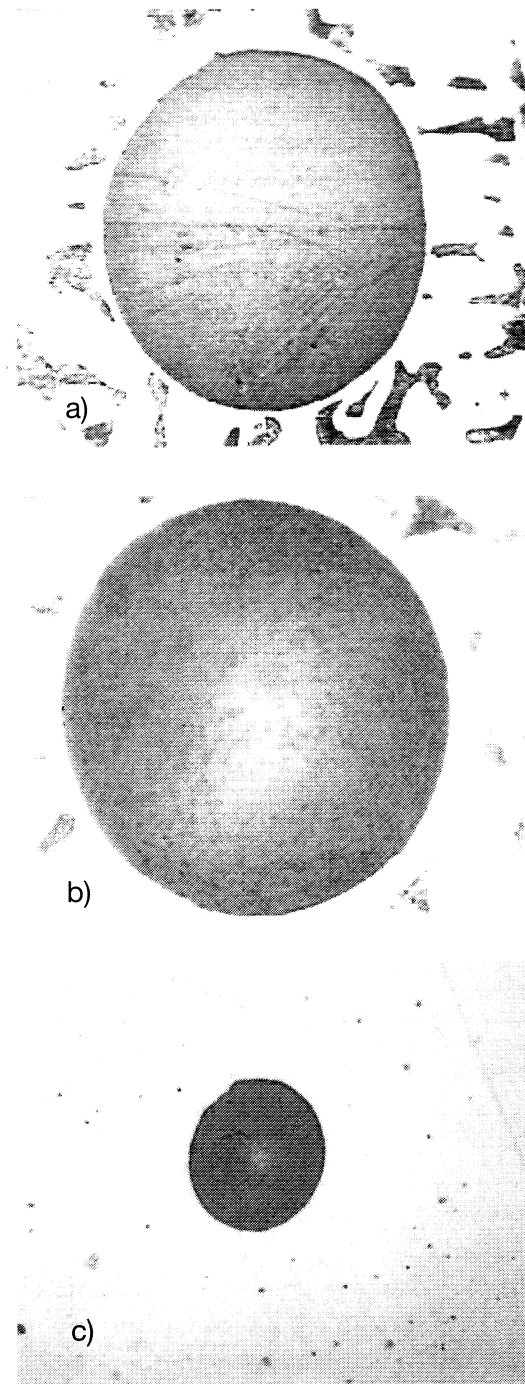
Cabe mencionar que en diversas zonas del defecto se observaba decarburación; particularmente, donde el material no metálico rodeaba al acero. Esta decarburación se evidenciaba por la estructura ferrítica encontrada, tal como se muestra en la figura 7.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El estudio metalográfico muestra que no se trata de un problema puro de atrape de escoria, sino de un defecto complejo, que incluye: porosidad profunda, gotas frías y relativamente escaso material no metálico. A continuación se discute, separadamente, la formación y atrape de escoria o nata, el mecanismo de formación y atrape de las gotas frías y la generación de la porosidad asociada.

#### 3.1. Formación y atrape de la escoria o nata

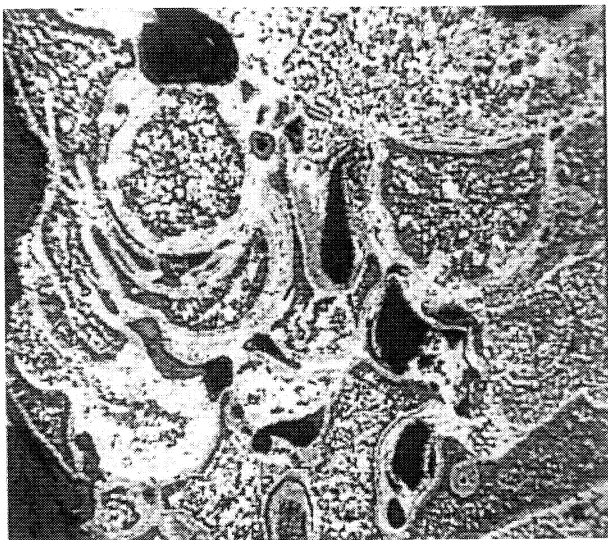
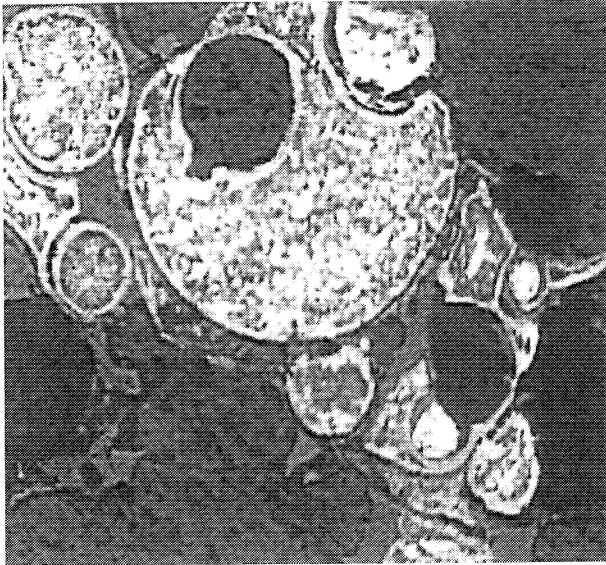
La formación de nata sobrenadando en el menisco de acero líquido del molde de colada continua se debe, primordialmente, a la reoxidación del acero durante el proceso de colada<sup>[3]</sup>. En términos generales, si la nata permanece líquida y con baja



**Figura 5.** Macroinclusiones globulares del tipo silicatos de manganeso. a) con agujas de rodonita; b) con rosetas de cristobalita; c) vítreo.

Figure 5. Globular macroinclusions. a) Manganese silicate with rodonite needles; b) Manganese silicate with cristobalite dendrites, c) Vitreous manganese silicate.

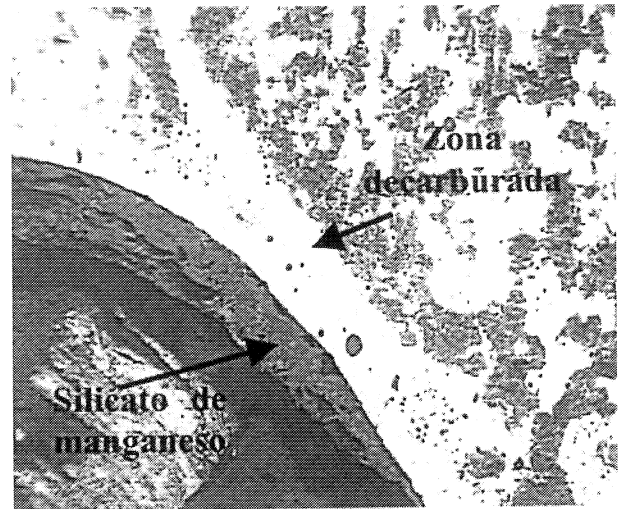
viscosidad, se infiltra entre la palanquilla y el molde, como si fuera polvo colador, y no da lugar a problemas ulteriores, salvo que la cantidad de nata formada fuera excesiva, con lo que podría dar lugar a su emulsificación y la consiguiente formación de macroinclusiones<sup>[3 y 4]</sup>.



**Figura 6.** Gotas frías dentro del defecto. Algunas están aisladas y otras se han refundido pero, el ataque revela el borde. Observación por microscopio óptico, 64 X.

*Figure 6. Cold drops within the defect. Some are isolated, while others have been remelted, but the border is revealed by the etching. Light microscope, 64X.*

Pero, si se da la precipitación de una segunda fase aumenta la viscosidad de la nata y puede producirse su atrape, generando problemas de calidad y hasta perforaciones de línea<sup>[3 y 4]</sup>. La segunda fase puede ser alúmina, en las plantas que hacen inyección de aluminio en el molde, en circunstancias en que la adición es excesiva o está realizada fuera del chorro<sup>[3]</sup>. Pero, más comúnmente, la segunda fase es sílice y se forma, según la literatura, cuando la relación Mn/Si en el acero es baja, por ejemplo, menor que 3<sup>[4]</sup>. El atrape de esta nata en la piel solidificada, según la bibliografía consultada<sup>[5-10]</sup>, se ve favorecido por:



**Figura 7.** Decarburación cercana al silicato de manganeso que bordea el acero. Observación en el microscopio óptico, 256 X.

*Figure 7. Decarburization closed to the manganese silicate surrounding the steel. Light microscope, 256 X.*

- Bajos contenidos de carbono.
- Alto punto de fusión de los óxidos formados.
- Alta viscosidad de los óxidos formados.
- Baja mojabilidad de los óxidos formados por parte del acero líquido.
- Bajos valores de Mn, o bien de la relación Mn/Si en el acero líquido.
- Contenidos demasiado bajos o demasiado altos de aluminio.
- Bajas temperaturas de colada.
- Bajas velocidades de colada.

En el diagrama binario MnO-SiO<sub>2</sub> de la figura 8, se presentan las composiciones de las incrustaciones. Éstas se encuentran, mayoritariamente, en el campo de estabilidad de líquido más cristobalita, por lo que se trata de inclusiones que presentan una proporción mayor de sólido cuanto mayor es su contenido en SiO<sub>2</sub>.

Para determinar, en función del manganeso y silicio en el acero, si la nata formada por reoxidación estará en forma de silicato de manganeso líquido o si habrá precipitación de sílice a la temperatura de trabajo, se hizo un modelo físico-químico del sistema Fe-Mn-Si-O, basado en los datos termodinámicos presentados<sup>[4]</sup>. Sobre la base de este modelo se representaron las curvas de saturación con sílice, en función del % de manganeso y silicio, a diversas temperaturas (Fig. 9).

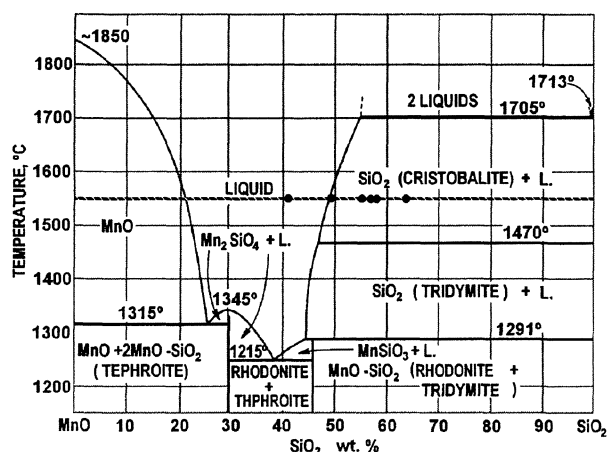


Figura 8. Ubicación de las incrustaciones en el diagrama MnO-SiO<sub>2</sub>.

Figure 8. Location of incrustations in the MnO-SiO<sub>2</sub> diagram.

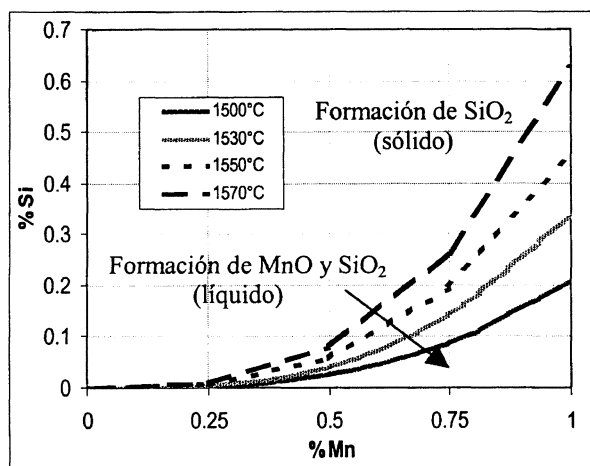


Figura 9. Curva de equilibrio para la precipitación de SiO<sub>2</sub> a diversas temperaturas, en función del Mn y Si en el acero.

Figure 9. Equilibrium curves for precipitation of SiO<sub>2</sub> as a function of Mn and Si in the steel.

Analizando estas curvas, se verifica que, la relación Mn/Si requerida para evitar la precipitación de sílice no es fija, sino que es función de la temperatura. La precipitación de sílice se ve favorecida por temperaturas bajas y contenidos de manganeso bajos, para un contenido, dado, de silicio en el acero.

En las acerías que producen aceros al silicio manganeso es conocido que, en determinadas condiciones, relacionadas con el estado de oxidación de la escoria y el acero y con los contenidos de MnO en la escoria y manganeso en el acero, se produce un descenso del contenido de manganeso en las palanquillas, a medida que avanza la colada.

Por lo tanto, en condiciones transitorias de descenso de manganeso, podrían producirse condiciones para el atrape de escoria. También podría darse la misma situación en condiciones transitorias de descenso de la temperatura, como las que ocurren también hacia el fin de una colada.

### 3.2. Mecanismo de formación de las gotas frías

El mecanismo propuesto para la formación de las gotas frías<sup>[11]</sup> y su asociación con el defecto estudiado, es el siguiente:

- Dentro del molde, pueden producirse salpicaduras de acero, en condiciones de chorro no uniforme, falta de alineación de la máquina, problemas con el mecanismo de oscilación, etc. Estas salpicaduras, en forma de pequeñas gotas, se adhieren a la pared del molde, particularmente, en las esquinas del mismo.
- Entre las gotas, así acumuladas, puede incorporarse aceite de lubricación, al deslizarse sobre las mismas.
- En un determinado momento, debido a operaciones de limpieza, por su propio peso o por ascenso del nivel de acero, las gotas acumuladas se desprenden del molde y se incorporan al acero que está solidificando en el menisco. Al llegar al menisco pueden arrastrar nata que esté sobrenadando.
- La alta temperatura provoca la reacción del aceite, con formación de H<sub>2</sub> y CO<sup>[12]</sup>. Estas reacciones causarían la falta de material observada en el producto (Fig. 2).

Este mecanismo podría explicar las características de los defectos encontrados en las muestras estudiadas, ya que los mismos contenían gotas frías, además de que había falta de material y porosidad localizada así como presencia de material no metálico.

En la figura 10 se puede ver un esquema de la formación y atrape del defecto.

## 4. RESULTADOS EN LA ACERIA

En la acería, sobre la base de los resultados obtenidos en los estudios, se realizaron diversas modificaciones en los procesos de metalurgia, en el horno cuchara y la máquina de colada continua:

- Se incrementó el precalentamiento de distribuidores para el arranque de la máquina de

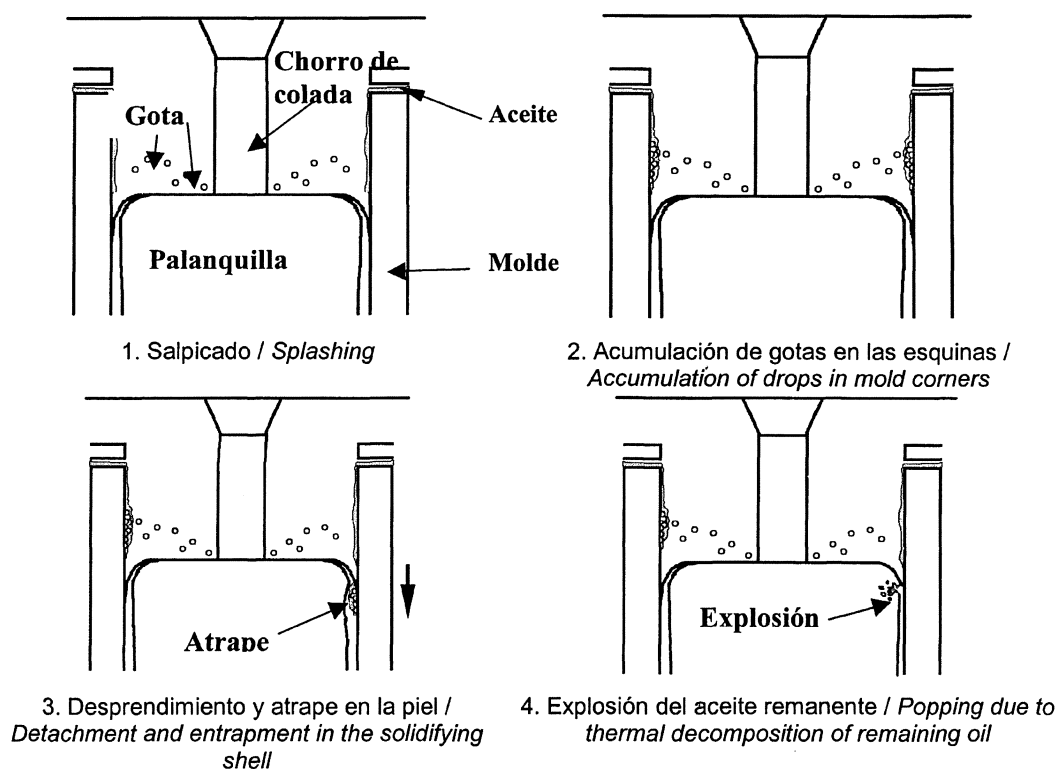


Figura 10. Mecanismo de formación y atrape de las gotas frías<sup>[12]</sup>.

Figure 10. Mechanism of the formation and entrapment of cold drops<sup>[12]</sup>.

colada continua. Así, se redujo la inestabilidad y goteo del chorro de acero en el molde.

- Se aseguró una buena alineación de las boquillas con respecto al molde.
- Se controló la relación % Ca/% Al y % Ca/% S, para evitar la obstrucción de boquillas, evitando a su vez el fenómeno de *clogging* y, así, minimizar la aparición de las llamadas gotas frías, ya que si las condiciones del chorro son irregulares se incrementa el riesgo de salpicaduras. Con este cambio, también, se trata de modificar la forma y naturaleza de las inclusiones, haciéndolas líquidas a la temperatura de colada.
- Se precalentó el aceite de lubricación de moldes para asegurar la ausencia de humedad en el mismo.
- Se mejoró la estabilidad térmica del acero en el distribuidor.

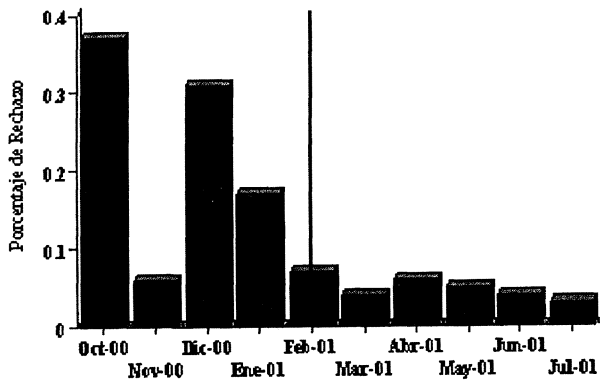
Se puede apreciar en la figura 11 que, a partir del mes de febrero de 2001, el porcentaje de rechazos por escoria atrapada disminuyó, manteniéndose en valores cercanos al 0,05 %.

## 5. CONCLUSIONES

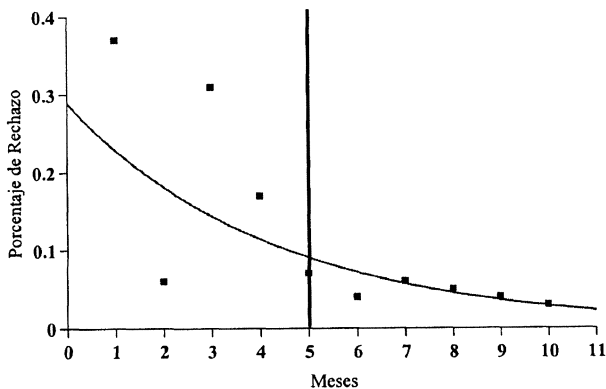
De acuerdo al estudio metalográfico, los defectos superficiales observados en la palanquilla son una asociación de atrape de escoria, gotas frías, falta de material y porosidad.

La relación Mn/Si para evitar el atrape no es una constante, sino que es función de la temperatura y otros factores. Aún, para diseños de acero con relación Mn/Si igual o mayor que 3, puede haber condiciones para la formación y atrape de nata en situaciones transitorias de baja temperatura, bajo manganeso o alta reoxidación (por ejemplo, hacia el fin de una colada).

El salpicado de acero por chorro defectuoso, alineación incorrecta de la máquina, etc., puede dar lugar a la acumulación de gotas frías en las esquinas del molde. Estas acumulaciones pueden impregnarse con aceite de lubricación. Luego, por operaciones de limpieza, peso propio o ascenso del nivel de acero en el molde, pueden incorporarse a la piel solidificada, incorporando nata sobrenadante. El aceite remanente puede reaccionar.



A



B

**Figura 11.** A: Porcentaje de palanquillas rechazadas por "atrape de escoria", desde octubre de 2000 hasta julio de 2001; B: Línea de tendencia de la figura A.

Figure 11. A: Percentage of billets rejected due to "slag entrapment", since October 2000 to July 2001; B: trend line from figure A.

Las medidas tomadas en la práctica de horno cuchara y colada continua, en base a estos resultados y definiendo nuevas composiciones de escorias, permitieron disminuir, notoriamente, la influencia del defecto.

## REFERENCIAS

- [1] A. HASSAN, *Sidetur's Newest Continuous Casting Machine. Concast Standard News* 30 (1991) 2-3.
- [2] A. HASSAN, O. MAZZEI y A. LARES, *XXVIII ABM Seminar on Melting, Refining and Solidification of Steels*, Campinas, Brazil, 1997, pp. 137-150.
- [3] J. MADÍAS, M. VALENTINI, M. GARRO, R. VÉNICA y R. SANTACHIARA, *Informe interno IAS-SOMISA*, Marzo 1990-Enero 1991.
- [4] H. MORI, N. TANAKA y M. HIRAI, *Tetsu-to-Hagane* 11 (1971) 1.500-1.513.
- [5] R. KIESSLING, *Non-metallic Inclusions in Steel*, The Metals Society, 2<sup>nd</sup> Edition, 1978, pp. 17-45.
- [6] A. PALMAERS, J. DEFAYS y L. PHILIPPE, *C.R.M.* 55 (1979) 15-23.
- [7] M. COBURN y J. GRIFFITHS, *Wire J.* 13 6 (1980) 70-72.
- [8] Y. MATSUANGA, K. FURUGA y Y. SEYAMA, *Tetsu-to-Hagane* 57 4 (1971).
- [9] J.C. GONZÁLEZ, J. ESPERÓN, H. MORAL, E. GUARAGNA y A. REY, *Siderurgia* (1978) 106-124.
- [10] Y. ISHIBASHI, Y. KAWAUCHI y N. MASUMITSU, *Steelmaking Conference Proc.*, Iron and Steel Society, EE.UU., 1988, pp. 151-158.
- [11] K. SCHWERDTFEGER, comunicación privada, Instituto Argentino de Siderurgia, San Nicolás, Argentina, 2001.
- [12] H. VAN VUUREN, *Steelmaking Conference Proc.*, Iron and Steel Society, EE.UU. 1978, pp. 306-334.