

Agitación electromagnética en la colada continua de acero^(*)

G. Álvarez de Toledo^(*), O. Campo^(*) y E. Laínez^(*)

Resumen La instalación de agitadores electromagnéticos en las máquinas de colada continua del acero ha mejorado notablemente la calidad interna del producto colado. En este trabajo se describen los ensayos efectuados con bobinas agitadoras situadas en diferentes lugares en máquinas de colada continua de palanquilla. Se ha puesto de manifiesto que la bobina situada en el molde, al comienzo del proceso de solidificación, es la que produce una mayor modificación de la estructura de solidificación junto con una disminución de la segregación central de la palanquilla. Se ha diseñado una bobina para el molde que permite utilizar altas potencias de agitación sin que el movimiento del acero líquido, a la altura del menisco, produzca atrapamientos de los polvos de colada. Por otro lado, se ha encontrado un método por el que se puede calcular la frecuencia eléctrica óptima de trabajo de la bobina situada en el molde.

Palabras clave: **Colada continua. Acero. Agitación electromagnética. Calidad central. Segregación central.**

Electromagnetic stirring in the continuous casting of steel

Abstract The electromagnetic stirring of steel in the machines for the continuous casting process has improved the internal quality of the cast product. Experimental work with stirrers situated at different positions of continuous casting machines of billets has been carried out. The in-mould stirrer is the one that produces a major modification of the billet internal structure, and also the biggest decrease of the central segregation. An in-mould electromagnetic coil has been developed which allows the use of high stirring power without producing an undesirable movement of the liquid steel in the meniscus zone, therefore no mould powders entrapments are produced. It has been developed a method for determining the optimum electric frequency of the stirrer.

Keywords: **Continuous casting. Steel. Electromagnetic stirring. Central quality. Central segregation.**

1. INTRODUCCIÓN

Una de las utilidades más antiguas de campos magnéticos para mejorar la calidad de productos obtenidos por colada continua, de la cual se tratará en el presente trabajo, es la agitación del acero líquido durante el proceso de solidificación. En la actualidad se están desarrollando nuevas aplicaciones (1), siendo una de ellas la denominada "freno electromagnético" en la colada continua de plan-

chones (2). En este caso, se impone un campo magnético estático en la parte superior del molde con el fin de disminuir la velocidad del acero líquido a la salida de la buza y facilitar la decantación de inclusiones. También se ha propuesto un mecanismo semejante con el fin de modificar los flujos de acero en la artesa (3 y 4). La regulación del caudal del acero en una buza por medio de un campo electromagnético giratorio ha sido propuesta (5) como una de las soluciones para disminuir el consumo de refractarios y los problemas de colabilidad. También se investiga la posible aplicación de la colada continua "sin molde" (6 y 7), de aplicación en la industria del aluminio, en la colada continua de aceros. En este proceso, el campo magnético confina el

(*) Trabajo recibido el día 6 de junio de 1994.

(*) Sidenor I + D. Apartado 152. 48970-Basauri -Vizcaya- (España).

metal líquido a la altura del menisco, lográndose la solidificación del mismo sin que entre en contacto con el molde. De este modo se mejora la calidad superficial del producto colado. Debido a la menor conductividad eléctrica y térmica, y a la mayor densidad del acero líquido, no se ha conseguido una aplicación similar en este caso, aunque sí se puede conseguir modificar la altura del menisco, mejorando la lubricación de los polvos de colada (8).

En la figura 1 se puede observar el efecto de desconectar la agitación electromagnética durante la colada de un acero con 0,47 % C. En la misma, se muestran impresiones Baumann de secciones longitudinales de palanquilla sin y con agitación electromagnética. Cuando se desconecta la bobina, se distingue una estructura columnar de solidificación que llega hasta el mismo centro de la palanquilla. Este tipo de estructuras da lugar a la formación de “puentes de solidificación”, como el que se observa en la parte derecha de la figura 1a), que deterioran notablemente la calidad de la palanquilla, sobre todo cuando se trata de aceros con alto intervalo de solidificación. En principio, este tipo de estructura de solidificación se podría modificar colando el acero con un sobrecalentamiento del orden de los 10-15 °C (9). Sin embargo, sobrecalentamientos tan bajos producirían grandes dificultades operativas. En la figura 1b) se observa que la agitación electromagnética instalada en el molde frena el crecimiento direccional de los cristales columnares promoviendo la formación de una gran zona equiáxica central. Estos cristales equiáxicos permiten una mejor compactación del núcleo de la palanquilla al final de la solidificación, y la filtración de líquido hacia zonas inferiores de la palanquilla con el fin de contrarrestar la disminución de volumen que se produce en la solidificación.

La interacción del campo electromagnético con el acero líquido produce un movimiento de giro del mismo. La turbulencia generada por este movimiento acerca líquido caliente del centro de la palanquilla a la intercara de solidificación, aumentando la transmisión térmica y, por tanto, la eliminación del sobrecalentamiento. Por otro lado, el propio movimiento produce una erosión directa de la capa solidificada. Las puntas arrancadas de las dendritas pueden disolverse en el acero líquido disminuyendo el sobrecalentamiento, o permanecer en el seno del mismo actuando como gérmenes de solidificación de cristales equiáxicos. En las propias palanquillas fabricadas en máquinas curvas se aprecia la influencia de este segundo mecanismo: el punto final de solidificación se desplaza hacia la parte superior de la palanquilla, como se puede observar en la figura 1b), debido al asentamiento en la mitad inferior de la palanquilla de los cristales equiáxicos producidos por la agitación.

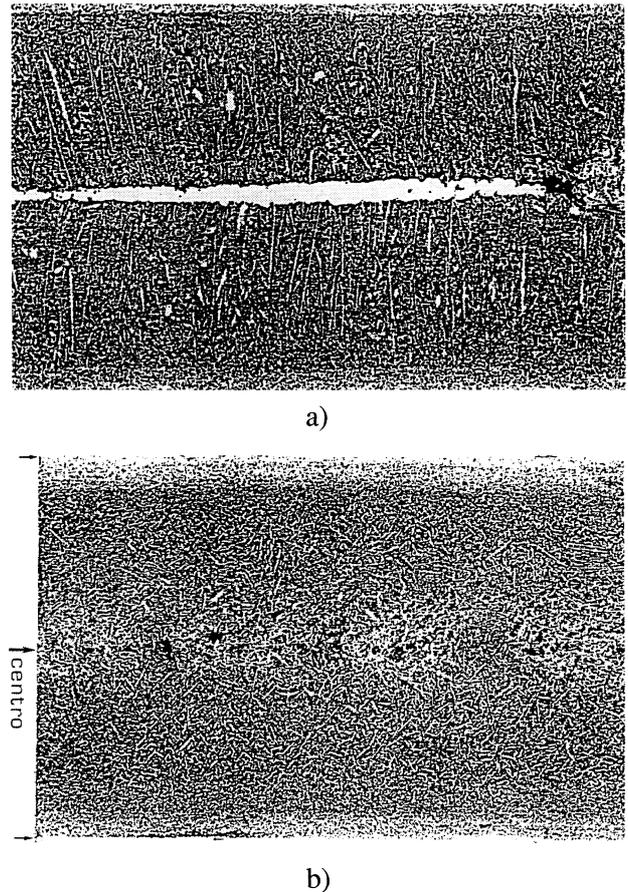


FIG. 1.— Impresiones Baumann de secciones longitudinales de palanquilla, obtenidas en una colada en el transcurso de la cual se desconectó la agitación en el molde por unos minutos.

a) sin agitación electromagnética en el molde.

b) con agitación electromagnética en el molde.

FIG. 1.— Baumann prints of longitudinal billet samples. The in-mould stirrer was switched off during some minutes in this heat.

a) without in-mould electromagnetic stirrer.

b) with in-mould electromagnetic stirrer.

En la colada continua de planchones se utiliza habitualmente la agitación longitudinal. En este caso el campo magnético se desplaza en la misma dirección de colada. Sin embargo, en la colada de palanquillas o *blooms*, el método más empleado es la agitación rotativa en la que el campo magnético gira en torno al eje de la palanquilla. En este estudio se describirán los resultados obtenidos con el empleo de este segundo tipo de agitación.

2. LUGAR DONDE INSTALAR LA AGITACIÓN

En la figura 2 se han representado de modo esquemático las tres zonas de la línea de colada en las que se suelen situar bobinas agitadoras: en el

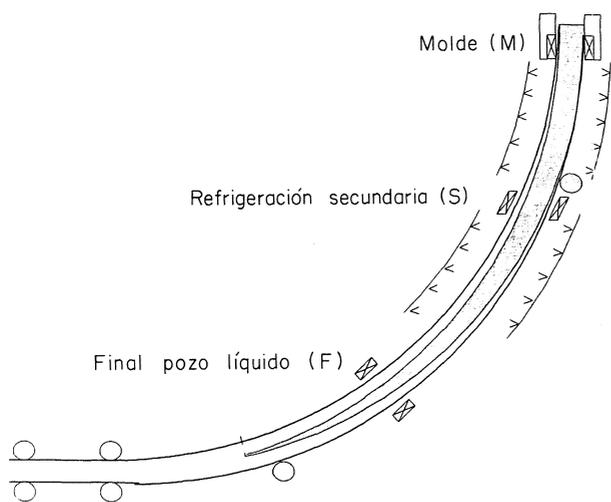


FIG. 2.— Posibles lugares donde colocar bobinas agitadoras en una máquina de colada continua de palanquillas.

FIG. 2.— Places of the continuous casting machine where electromagnetic stirrers are usually situated.

interior del molde (agitador M); en el enfriamiento secundario por agua (agitador S), y al final del pozo líquido (agitador F). Durante años hubo gran cantidad de publicaciones en las que se describían resultados con los agitadores colocados en uno u otro lugar (10 a 17). La colocación de un agitador en el molde presenta diversos inconvenientes, como el de diseño por el poco espacio disponible, o la necesidad de emplear baja frecuencia, ya que el molde de cobre produce una gran atenuación del campo magnético cuando se emplea la frecuencia de red. Por otro lado, la turbulencia del acero líquido a la altura del menisco puede interferir con los polvos de colada produciendo inclusiones cercanas a la superficie (18 y 19). Estas dificultades dieron lugar a que en ocasiones se instalasen los agitadores en las otras dos zonas. En diversas publicaciones, se mencionaba que se habían conseguido resultados óptimos utilizando una agitación en la refrigeración secundaria más otra al final del pozo líquido. La publicación de resultados como estos generaron gran confusión, pues parecían indicar la necesidad de realizar estas dos instalaciones, también en el caso de poseer ya una bobina en el molde. Con el paso de los años se ha ido clarificando esta situación y hoy en día existe la opinión generalizada de que la posición óptima del agitador es en el molde de máquina de colada continua. Cuando no se tiene el agitador M, la colocación de unos agitadores en las otras dos posiciones produce una mejora de la calidad central; sin embargo, esta mejora no es comparable con la que se puede conseguir con uno solo funcionando en el molde.

En Sidenor se realizaron experiencias colocando agitadores en S y en F, además del que ya se tenía

instalado en el molde. Los resultados de las mismas se pueden resumir del siguiente modo: el agitador M consigue una mejora evidente de la calidad central al promover una gran proporción de zona equiáxica central. Cuando se coloca el agitador S, existiendo uno ya en el molde, sus efectos sobre la calidad central son apenas perceptibles. Además, este agitador S produce una “banda blanca” que delinea la situación de la intercara sólido/líquido en el momento de actuar la agitación, como se puede observar en la figura 3. Esta “banda blanca” se aprecia no sólo en la palanquilla de bruto de colada, sino también en el producto laminado. Experimentalmente, se ha comprobado que la concentración en elementos segregables en esta zona es inferior a la concentración en la matriz. Esta disminución se debe a que el movimiento del acero líquido producido por la agitación perturba el equilibrio térmico y de concentraciones existente en la intercara de solidificación. Por un lado, aumenta la temperatura de la intercara y, por otro lado, se puede producir un efecto de “lavado” del líquido segregado de la intercara, por lo que el nuevo líquido que solidifique lo hará con una concentración en elementos de aleación inferior. En algunos trabajos se muestra que la magnitud de la segregación negativa es proporcional al cociente (U/V) (20 y 21), siendo U la velocidad de movimiento del acero líquido y V la

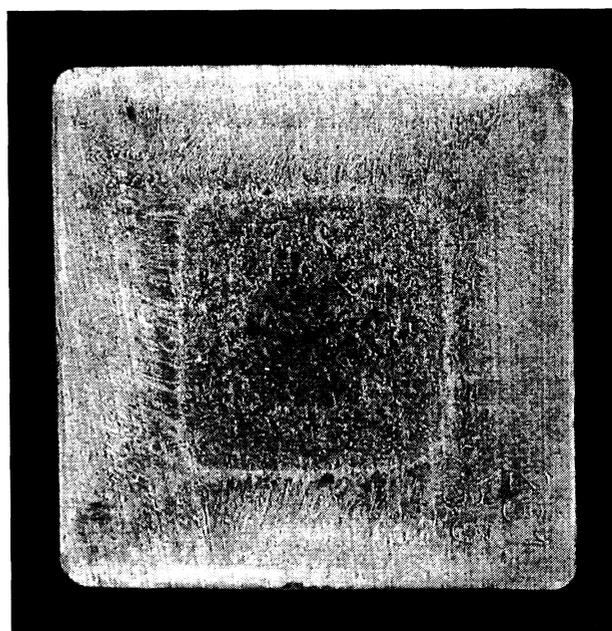


FIG. 3.— “Banda blanca” producida por una bobina situada en la refrigeración secundaria. Sección transversal de la palanquilla tras ataque ácido. (Palanquilla de 145 mm. Calidad 20CrMnE).

FIG. 3.— “White band” produced by an electromagnetic stirrer situated in the secondary cooling zone. Transversal billet sample after hot etching. (145 mm square billet, 20CrMnE steel quality).

velocidad de solidificación. Este resultado explica el hecho de que cuando el valor de V es elevado, como ocurre cuando la palanquilla se encuentra en el interior del molde, sea difícil apreciar la presencia de “bandas blancas”, aunque se empleen potencias de agitación elevadas. Según aumenta el espesor solidificado disminuye la velocidad de solidificación y es más fácil observar este fenómeno. Kor (22) deduce que ambos parámetros $-U$ y V están interrelacionados y que, entonces, la magnitud de la segregación negativa es proporcional a la disminución en la velocidad de solidificación producida por la agitación.

Diversos estudios han mostrado que esta “banda blanca” no influye sobre el comportamiento en servicio del producto (23). En Sidenor se abandonó la agitación S por las reticencias que la presencia de la “banda blanca” despertaba entonces en los utilizadores y, por otro lado, tampoco se observó una mejora evidente de la calidad central al ya existir el agitador M.

En diversas publicaciones se señala que la combinación óptima de bobinas es la colocación de una en M más otra en F. La primera promueve una gran zona equiáxica central y la segunda consigue una buena compactación de los granos al final del pozo líquido, a la vez que facilita la alimentación de líquido a zonas inferiores de la palanquilla. En dichas publicaciones se menciona que, para conseguir estos resultados, existe una posición óptima en la cual colocar el agitador F, con el fin de que la mezcla sólido/líquido del centro de la palanquilla tenga una proporción determinada de líquido. Hay un gran número de parámetros que pueden desplazar esta posición idónea de la bobina, como son la velocidad de colada, sobrecalentamiento del acero, intensidad de la refrigeración secundaria, etc. Se realizaron ensayos tratando de encontrar una colocación de este agitador que permitiese observar unos efectos beneficiosos sobre la calidad central. En la fábrica de Basauri, la bobina estuvo situada a 8, 10 y 12 m, empleando en cada una de estas posiciones potencias de agitación diferentes. Se tuvo constancia de que la bobina actuaba sobre el núcleo de la palanquilla, pues, en algunos casos, se detectaba la existencia de “banda blanca”. Sin embargo, estudios estadísticos en los que se comparaba la segregación central de la línea con bobina F con las otras líneas sin bobinas en esa posición, no mostraron diferencias significativas. Es decir, así como cuando se pasa de no tener el agitador M a tenerlo se observa una evidente mejora en la calidad central de la palanquilla, el agitador F puede ofrecer una cierta mejora pero la misma no resulta fácilmente apreciable; por estos motivos, en Sidenor, así como en otras compañías, se dejó de utilizar el mismo y se concentraron todos los estudios en mejorar la bobina instalada en el molde.

La tendencia actual para conseguir una ulterior optimización de la calidad central de la palanquilla con agitación electromagnética es la de actuar contra las causas de esa segregación: la disminución de volumen en la solidificación y los efectos térmicos que ponen en tensión el centro de la palanquilla al final del pozo líquido. Se utilizan dos medios para ello: reducción en línea de la palanquilla y colocación de una zona “extra” de enfriamiento al final del pozo líquido. En el primero de estos casos, se produce mecánicamente una disminución de la sección de la palanquilla para compensar la disminución del volumen central. En el segundo caso, se trata de provocar un fenómeno similar por un mecanismo térmico: el enfriamiento rápido de la superficie de la palanquilla produce una contracción de la misma que, de alguna manera, contrarresta la que por motivos semejantes se está produciendo en el centro de la palanquilla (24). Compañías y centros de investigación que fueron punteros en su día en el desarrollo de la agitación y que propugnaron la idea de colocar una bobina F además de la situada en el molde, como el IRSID francés, en las publicaciones actuales (25) mencionan estos dos métodos -reducción en caliente y refrigeración al final del pozo líquido-, como complemento óptimo a la agitación en el molde de cara a conseguir mejorar la calidad central en la colada de aceros de alto intervalo de solidificación. También en Sidenor se ha podido constatar la eficacia de una refrigeración más intensa que la convencional al final del pozo líquido (26).

3. DESCRIPCIÓN DEL AGITADOR SITUADO EN EL MOLDE

Uno de los inconvenientes del agitador en el molde es que puede inducir una turbulencia excesiva del acero líquido a la altura del menisco produciendo “atrapas” de los polvos de colada con el consiguiente deterioro de la calidad superficial (18 y 19). Para evitar este fenómeno, en algunos casos se recurre a la colocación de pantallas magnéticas en la zona del menisco (18). En Sidenor se evitó este problema situando la bobina en la parte final del molde, como se puede observar en la figura 4. En esta figura también se han incluido las mediciones experimentales de la inducción magnética a lo largo del eje de la lingotera para diferentes formatos de colada. En la gráfica se observa que la acción del campo magnético se extiende más allá de los límites físicos de la bobina, aumentando esta influencia según aumenta el formato de colada. Este resultado se corresponde con la experiencia, pues, para los grandes formatos de colada, superiores a cuadrado de 207 mm, se observó movimiento del acero en el menisco cuando funcionaba la agitación. Como se

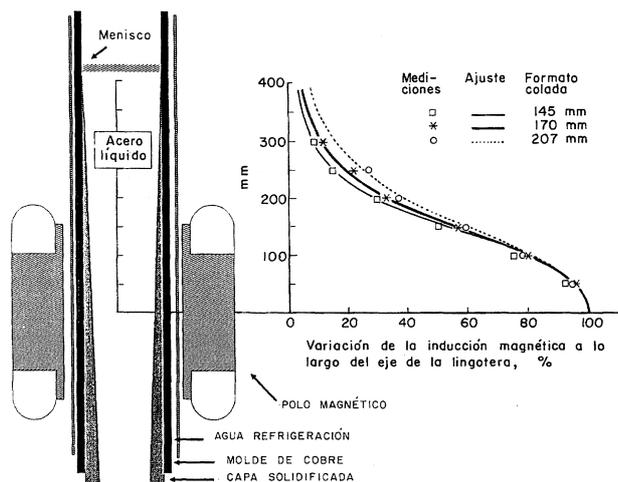


FIG. 4.— Situación de la bobina en el interior de la lingotera y distribución axial del campo electromagnético para distintos formatos de colada.

FIG. 4.— Sketch of the in-mould electromagnetic stirrer. Variation of the magnetic flux density along the mould axis for different billet sizes: experimental values and mathematical fit.

muestra en el Anexo, la inducción magnética a lo largo del eje de la lingotera viene dada por la siguiente expresión matemática:

$$B(z) = B_0 \cdot 0,5 \cdot t \sqrt{1+t^2} \left[\frac{1}{(1-h^2)+t^2-(1-h)\sqrt{(1-h)^2+t^2}} - \frac{1}{(1+h^2)+t^2+(1+h)\sqrt{(1+h)^2+t^2}} \right] \quad [1]$$

donde:

$B(z)$ = la inducción magnética a una distancia z del centro de la bobina;

B_0 = el valor de la inducción en el centro de la bobina;

$h = 2(z/b)$ siendo b la longitud de la bobina;

$t = D/b$ con D la anchura de la bobina que depende del formato de colada.

En la figura 4 se observa que con esta fórmula se consiguen unos ajustes razonables de los datos experimentales para diferentes formatos de colada.

Con ayuda de esta expresión se dedujo un método para ajustar la potencia de funcionamiento de las bobinas, de modo que trabajando con la máxima agitación no se produjese una turbulencia excesiva del acero líquido a la altura del menisco, sobre todo cuando se trabaja con grandes formatos de palanquilla (27 y 28).

4. FRECUENCIA ÓPTIMA DE AGITACIÓN

El molde de cobre produce una gran atenuación del campo magnético generado por la bobina, debi-

do a su alta conductividad eléctrica. La inducción magnética, después de atravesar un espesor x del molde, viene dada por la siguiente expresión (1):

$$B(x) = B_e \exp(-x\sqrt{\pi\mu\sigma f}) \cdot \exp[i(x\sqrt{\pi\mu\sigma f} + 2\pi ft)] \quad [2]$$

donde

B_e = la inducción magnética en el exterior del molde de cobre. Su valor es función de la intensidad eléctrica de alimentación a las bobinas, el número de espiras de las bobinas, y la geometría del circuito magnético. Por tanto, B_e , para un agitador dado, es directamente proporcional a I , siendo I la intensidad eléctrica de alimentación a las bobinas.

f = la frecuencia del campo magnético;

μ = la permeabilidad magnética del cobre;

σ = la conductividad eléctrica del cobre;

t = tiempo.

En esta expresión se observa que la amplitud de la inducción magnética en el interior de la lingotera disminuye con el aumento del espesor del molde y de la frecuencia de excitación de las bobinas. Por otro lado, el término de la derecha en la ecuación indica que el molde también produce un desfase del campo. Este desfase motiva la concentración de las líneas de fuerza en las paredes y esquinas interiores de la lingotera, disminuyendo la penetración del campo en el acero líquido. Tomando como base la ecuación [2], la amplitud de la inducción magnética en el interior de la lingotera, en función de la intensidad eléctrica de alimentación a las bobinas, se puede aproximar por la siguiente ecuación:

$$B_c = K \cdot \exp(-p \cdot \sqrt{f}) \cdot I \quad [3]$$

siendo K y p constantes.

La velocidad de giro del acero líquido sometido a un campo magnético rotativo viene dada por la siguiente expresión (29 y 30) :

$$W = K_1 \cdot B_c \cdot \sqrt{f} \quad [4]$$

donde:

W = la velocidad angular;

B_c = la inducción magnética en el centro de la lingotera;

f = la frecuencia del campo electromagnético; y

K_1 = una constante.

En esta expresión se observa que para aumentar la velocidad de giro conviene incrementar la frecuencia, pero, a su vez, la inducción magnética disminuye con dicha frecuencia. Existirá, por tanto, una frecuencia óptima para la cual se conseguirán

las velocidades más elevadas. Para encontrar la frecuencia óptima de funcionamiento, se diseñó un dispositivo que medía la velocidad de giro del mercurio líquido contenido en un recipiente, cuando el recipiente se situaba en el interior de la lingotera con la bobina en funcionamiento. La figura 5 muestra que para una misma intensidad eléctrica de alimentación a la bobina, la inducción magnética en el eje de la lingotera disminuye según aumenta la frecuencia. Sin embargo, la velocidad de giro del mercurio líquido alcanza su valor máximo para una frecuencia en torno a los 4 Hz. El empleo de frecuencias superiores o inferiores produce grandes disminuciones en esta velocidad de giro y, por tanto, en el rendimiento del agitador.

Combinando las ecuaciones [3] y [4] se obtiene la siguiente expresión:

$$W = K_2 \cdot \exp(-p \cdot \sqrt{f}) \cdot \sqrt{f} \cdot I \quad [5]$$

cuyo máximo corresponde a una frecuencia de:

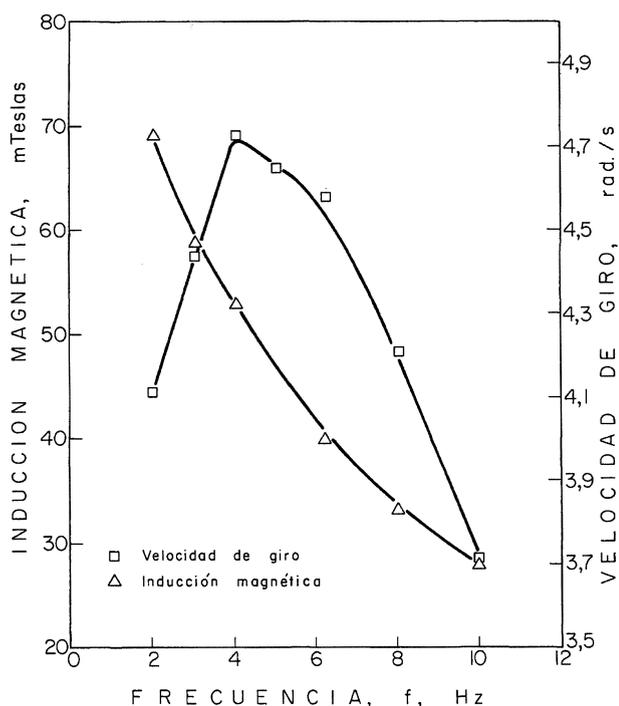


FIG. 5.— Influencia de la frecuencia de excitación de las bobinas sobre la inducción magnética y la velocidad de giro del mercurio líquido. Mediciones efectuadas en el interior de la lingotera para una misma intensidad eléctrica.

FIG. 5.— Influence of the electric current frequency of the in-mould stirrer on the magnetic flux density and angular velocity of liquid mercury. Measurements carried out inside the mould for a same electric intensity.

$$f_{\text{óptima}} = (1/p)^2 \quad [6]$$

en donde el valor de la constante p es función de las propiedades físicas del molde de cobre, de su espesor y dimensiones.

La figura 6 muestra la variación de los datos experimentales $\text{Ln}(B_c/I)$ y $\text{Ln}(W/(I \cdot \sqrt{f}))$ en función de \sqrt{f} . Se pueden trazar dos rectas paralelas que ajustan razonablemente los valores experimentales. De las ecuaciones [3] y [5] se deduce que la pendiente de estas dos rectas es el valor de la constante p . En este caso, $p = 0,527$, y la frecuencia óptima será 3,6 Hz. Resulta, por tanto, un buen acuerdo entre la frecuencia óptima calculada y la obtenida realizando el ensayo con mercurio. En consecuencia, la frecuencia óptima de funcionamiento de un agitador se puede calcular a partir de mediciones de la velocidad de giro del mercurio líquido, o de la variación de la inducción magnética en el centro de la bobina con la frecuencia. En la práctica resultará más asequible la realización de este segundo tipo de mediciones.

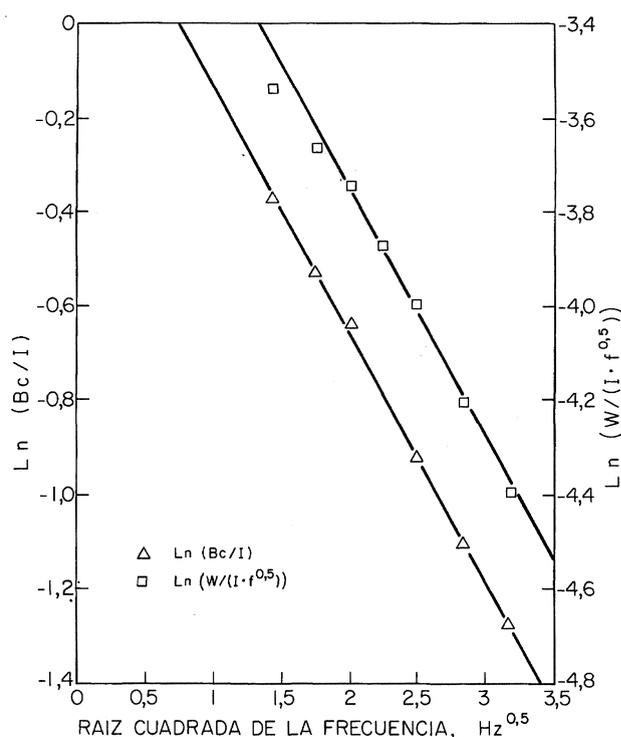


FIG. 6.— Determinación de la frecuencia óptima de funcionamiento de la bobina en el molde a partir de las mediciones de inducción magnética y velocidad de giro del mercurio líquido.

FIG. 6.— Optimum working electric frequency of the in-mould electromagnetic stirrer, based upon experimental magnetic flux density and mercury angular velocity measurements.

5. CONCLUSIONES

La agitación electromagnética del acero líquido durante el proceso de colada continua aumenta la proporción de cristales equiaxiales en el centro de la palanquilla y evita la formación de los grandes rechupes y segregaciones que se forman cuando la estructura de solidificación es columnar.

El lugar de la línea de colada donde la instalación de un solo agitador produce mejores resultados es en el molde. Cuando ya existe una bobina en el molde, funcionando con una capacidad de agitación adecuada, no se ha observado que un agitador situado en el enfriamiento secundario, o al final del pozo líquido, produzcan mejoras apreciables de la calidad central de la palanquilla. Sin embargo, estas mejoras sí se pueden lograr controlando adecuadamente la refrigeración secundaria, y más en concreto, con la instalación de un enfriamiento "extra" al final del pozo líquido.

La colocación de la bobina al final del molde permite el empleo de elevadas potencias de agitación sin que se produzcan atrapamientos de los polvos de colada. Por otro lado, existe una frecuencia óptima de agitación de modo que el empleo de frecuencias más bajas o más elevadas produce una disminución del rendimiento del agitador. Mediante un dispositivo de medida con mercurio líquido se ha determinado experimentalmente que el valor de esta frecuencia, para una determinada instalación, es de aproximadamente 4 Hz. Se ha demostrado que esta frecuencia óptima de funcionamiento de la bobina se puede deducir a partir de medidas más simples de la inducción magnética en el interior de la lingotera para diferentes frecuencias.

REFERENCIAS

- (1) ASAI, S. *ISIJ Int.*, 29 (12), 1989: 981-992.
- (2) ZEZE, M., HARADA, H., TAKEUCHI, E. e ISHII, T. *Iron Steelmaker*, 20 (11) 1993: 53-77.
- (3) ILEGUSI, O.J. y SZEKELY, J. *Steel Res.* 59 (9), 1988: 399-405.
- (4) SZEKELY, J. e ILEGUSI, O.J. "Magnetic Streamlining and Flow Control in Tundishes", Pat. EE.UU. Nº 87/51, (1987).
- (5) GARNIER, M. *ISIJ Int.*, 30, (1) 1990: 1-7.
- (6) LEWIS, B.G. y YARWOOD, J.C. Proc. Intern. Symp. on Casting and Near Net Shape Products, AIME, Hawaii, 1988: 515.
- (7) LI, B.Q., EVANS, J.W. y COOK, D.P. *Metall. Trans.* 22B, 1991: 121-134.
- (8) NAKATA, H. y ETAY, J. *ISIJ Int.*, 32 (4), 1992: 521-528.
- (9) LESSOULT, G., NEU, P. y BIRAT, J.P. *Metallurgical Application of Magneto-hydrodynamics*, The Metals Society, Cambridge, 1982: 164-179.
- (10) SHIN, Y.K., LEE, I.R., KIM, D.S., KIM, S.K. y OH, K.S. *Ironmaking Steelmaking*, 15 (3), 1988: 143-149.
- (11) OH, K.S., LEE, I.R., SHIN, Y.K., KOO, Y.S., LEE, I.J. y LEE, D.Y. Proc. 6th Intern. Iron and Steel Congr., Nagoya, ISIJ, 1990: 256-263.
- (12) BEITELMAN, L. y MULCAHY, J. *Trans. ISS*, ago. 1988: 43-51.
- (13) ABBOTT, T.B., HOYLE, I.B., WOODYATT, A.S., DAVEY, B.E. y MULDOON, L.J. *Steelmaking Conf. Proc.*, Toronto, 1992: 875-882.
- (14) MULCAHY, J.A. y BEITELMAN, L. *Iron Steel Eng.*, 59 (7), 1982: 49-57.
- (15) MARR, H.S. *Metallurgical Application of Magneto-hydrodynamics*, The Metals Society, Cambridge, 1982: 143-153.
- (16) AYATA, K., MORI, T., FUJIMOTO, T., OHNISHI, T. y WAKOSUGI, I. *Trans ISIJ*, 24, 1984: 931-939.
- (17) BIRAT, J.P. y CHONE, J. *Ironmaking Steelmaking*, 10 (6), 1983: 269-281.
- (18) YAMAMOTO, H., KONDO, H., MATSUMURA, C., MORI, K., KANEDA, Y., HASEGAWA, T. y TERADA, O. Proc. of the 6th Intern. Iron and Steel Congr., Nagoya, ISIJ, 1990: 478-486.
- (19) NAKATA, H., TSUBOKURA, J. y TAKAHASHI, H. Proc. 6th Intern. Iron and Steel Congr., Nagoya, ISIJ, 1990: 470-477.
- (20) KOBAYASHI, S., TOMONO, H. y TADA, K. *Rev Metall.* 80 (11), 1983: 887-903.
- (21) SASAKI, K. *Tetsu-to-Hagané*, 65 (1), 1979: 60-69.
- (22) KOR, G.J.W. *Ironmaking Steelmaking*, 9 (6), 1982: 244-251.
- (23) ZAVARAS, T. y BRODY, H.D. *Electric Furnace Conf. Proc.*, 1989: 275-290.
- (24) RAIHLE, C.M. y FREDRIKSSON, H. *Metall. Mater. Trans.* 25B, 1994: 123-133.
- (25) ANTOINE, P., BOBRIE, M., SELARIES, J., JOLIVET, J.M., BIRAT, J.P. y BOBADILLA, M. *Rev. Metall.*, 89 (1), 1992: 65-72.
- (26) ÁLVAREZ DE TOLEDO, G., LAÍNEZ, J. y CIRIÓN, J.C. *Mater. Sci. Eng.*, A173, 1993: 299-304.
- (27) LAÍNEZ, E., ÁLVAREZ DE TOLEDO, G. "Procedimiento de elaboración de productos de acero por colada continua centrífuga y lubricación con polvos fundentes de lingotera". Pat. Nº 8801856, 16 de junio de 1989.
- (28) LAÍNEZ, E., ÁLVAREZ DE TOLEDO, G. y BENGOCHEA, J.M. "Sistema de freno electromagnético en la elaboración de productos de acero por colada continua centrífuga y lubricación con polvos fundentes de lingotera". Pat. Nº 2010005, 16 de octubre de 1989.
- (29) KOBAYASHI, S. e ISHIMURA, S. *Trans. ISIJ*, 28, 1988: 754-760.
- (30) SPITZER, K.H. y SCHWERDTFEGGER, K. *Trans. ISS, Iron Steelmaker*, Sep. 1990: 57-71.
- (31) ZILJLSTRA, H. "Experimental methods in Magnetism", North-Holland Publ. Co. Amsterdam, 1967.

ANEXO

CÁLCULO DE LA DISTRIBUCIÓN AXIAL DE CAMPO MAGNÉTICO EN LA LINGOTERA

En la figura 4 se observan las mediciones experimentales del campo magnético a lo largo del eje de la lingotera para tres formatos de colada diferentes. En estas mediciones se determinó el valor de la componente del campo perpendicular a los polos. Esta componente es la principal responsable del movimiento de giro del acero líquido durante la agitación electromagnética.

Para buscar una expresión teórica de la variación axial del campo magnético, se han considerado los polos magnetizados uniformemente, con cargas magnéticas concentradas en las caras de los polos y densidades uniformes +I y -I en uno y otro polo de una misma fase. Debido a la simetría del agitador -4 polos, enfrentados 2 a 2, y alimentados por corriente bifásica-, se puede reducir el problema al cálculo del campo producido por los dos polos de una fase cuando el valor de la corriente es máximo. Este valor máximo corresponde a uno nulo en la otra fase, al ser el desfase 90°. En la figura 7 se observan los parámetros geométricos que intervienen en el cálculo del potencial magnético producido por un diferencial de carga magnético, dq, en un punto P del eje de la lingotera (31):

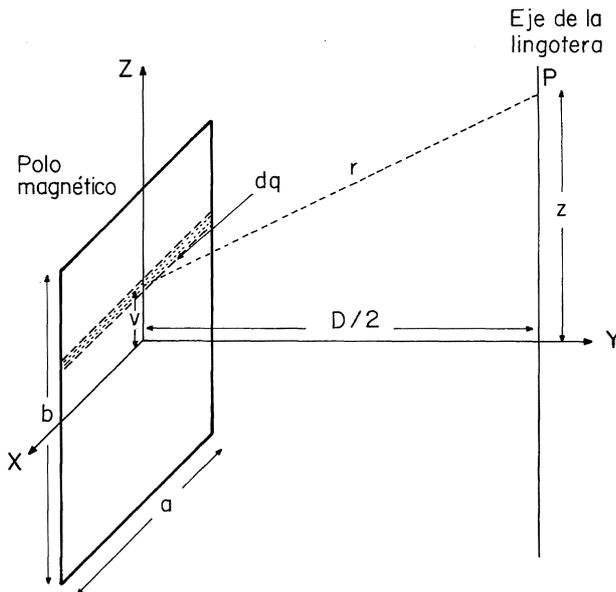


FIG. 7.— Cálculo del potencial magnético, creado por un polo del agitador electromagnético, en un punto P del eje de la bobina.

FIG. 7.— Calculation of the magnetic potential, created by one of the stirrer poles, in a point P of the stirrer axis.

$$dV(z) = \frac{1}{4\pi\mu_o} \frac{dq}{r} = \frac{I}{4\pi\mu_o} \frac{ds}{r} = \frac{I \cdot a}{4\pi\mu_o} \frac{dv}{r} \quad [A1]$$

resolviendo geoméricamente e integrando para toda la superficie del polo se obtiene la siguiente expresión:

$$V(z) = \frac{Ia}{4\pi\mu_o} \log \left[\frac{(1+h) + \sqrt{t^2 + (1+h)^2}}{(1-h) + \sqrt{t^2 + (1-h)^2}} \right] \quad [A2]$$

donde $h = 2(z/b)$ y $t = D/b$.

La intensidad de campo magnético en el punto P, $H(z)$, viene dada por el gradiente de $V(z)$. La componente normal al polo se puede calcular derivando $V(z)$ respecto a y:

$$H_y(z) = \frac{I}{4\pi\mu_o} \frac{a}{b} \log e \cdot t \left[\frac{1}{(1-h^2)+t^2-(1-h)\sqrt{(1-h)^2+t^2}} - \frac{1}{(1+h^2)+t^2+(1+h)\sqrt{(1+h)^2+t^2}} \right] \quad [A3]$$

La distribución del campo a lo largo del eje se calcula dividiendo la expresión anterior por la del campo en el centro de la bobina, para $z = 0$, quedando:

$$H_y(z) = 0,5 \cdot t \sqrt{1+t^2} \left[\frac{1}{(1-h^2)+t^2-(1-h)\sqrt{(1-h)^2+t^2}} - \frac{1}{(1+h^2)+t^2+(1+h)\sqrt{(1+h)^2+t^2}} \right] \quad [A4]$$

En el caso real del agitador instalado en la máquina de colada continua, entre los polos y el eje de la bobina se encuentra el molde de cobre que produce una atenuación del campo. Sin embargo, aun en este caso, parece que se puede aplicar la expresión anterior, ya que la misma es únicamente función de las dimensiones de la bobina. En la figura 4 se observa que con esta ecuación se consigue un buen ajuste de las medidas experimentales para tres formatos de colada diferentes. La expresión matemática de la distribución de la intensidad de campo también será válida para la inducción magnética, al estar ambos parámetros relacionados a través de una constante.