

EL FUNDIDOR



Única revista de información especializada en el sector

Nº 141 | ABRIL 2026

Riesgo de incidentes:
control, causas y
propiedades básicas

ALUMINIO LÍQUIDO Y LA PREVENCIÓN DE EXPLOSIONES

PÁG. 08

**EROSIÓN PATA DE ELEFANTE:
CAUSAS Y SOLUCIONES**

Los metales y sus técnicas

PÁG. 18

**NORBERTO D. RIVERO
DE FUNDICIÓN TITANIA**

Historia viva de la fundición

PÁG. 22

ARENAS DE MOLDEO EN VERDE

Los metales y sus técnicas



CIFRA
FUNDIDORES
ARGENTINA

Un fenómeno en hornos
de inducción sin núcleo

EROSIÓN

“PATA DE ELEFANTE”:

CAUSAS Y

SOLUCIONES

La llamada erosión de “pata de elefante” es una forma severa y localizada de desgaste refractario que afecta principalmente la zona inferior de hornos de inducción sin núcleo, especialmente durante la fusión de hierros base dúctiles. A partir de la experiencia de campo, este artículo analiza sus principales causas –desde la instalación y el sinterizado del revestimiento hasta la química de la carga y las condiciones operativas– y presenta recomendaciones prácticas para reducirla, controlarla e incluso eliminarla.

David C. Williams & Ying H. Ko

Traducción al español: José M. Bermúdez
Allied Mineral Products
www.alliedmineral.com



MEDEMET
MATERIALS ENGINEERING DEVELOPMENT

La erosión de “pata de elefante” ha sido un problema que ha plagado las operaciones en plantas de fusión de metales operadas con hornos de inducción sin núcleo (*coreless*). Esta erosión es más pronunciada en la fusión de hierros base dúctiles. Este artículo explica en términos generales algunas de las causas y soluciones para la erosión de “pata de elefante”.

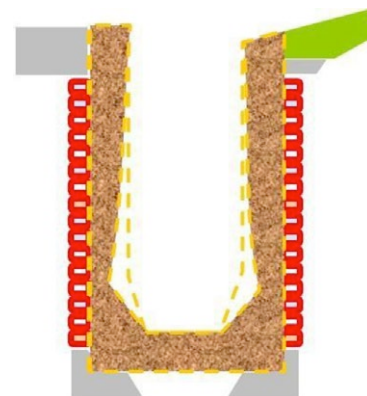
Qué es la erosión “pata de elefante”

La erosión de “pata de elefante” en refractarios de sílice representan la erosión localizada y rápida de la sección inferior de la pared o cono y del piso del revestimiento de un horno de inducción sin núcleo (*coreless*). Se ha observado comúnmente que cuando se funde hierro base dúctil en hornos *coreless*, pero también ocurre cuando se funden aleaciones de hierro gris y maleable. El desgaste inusual del revestimiento a menudo toma la apariencia de una pata de elefante. Desafortunadamente, la erosión ocurre dentro de la sección activa de la bobina lo que puede conducir a una erosión acelerada cuando el refractario saturado con metal se sobrecalienta inductivamente. Al considerar la ubicación de este proble-

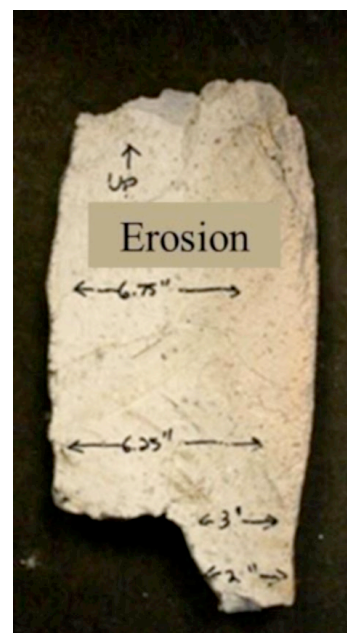
ma, la instalación del revestimiento en capas sueltas controladas se vuelve tedioso en el mejor de los casos y requiere un control cuidadoso. Con la cimbra en su sitio y de pie dentro del horno es difícil juzgar la cantidad de refractario suelto que se introduce en cada capa.

Este tipo de erosión también puede estar relacionada con la reacción química de varios materiales de carga con el refractario de sílice, el diseño del cono o pared baja de la cimbra, sobrecalentamiento excesivo del metal remanente en el horno y el cambio del gradiente térmico debido a componentes estructurales. El objetivo de este artículo es ofrecer una idea de este problema y tipo de erosión, y recomendar algunas soluciones para las fundiciones.

Como se ilustra en la Figura 1, la erosión de “pata de elefante” es una erosión refractaria severa en la pared inferior o cono y en el piso. Desafortunadamente, se observa que el resto del revestimiento refractario no parece afectado. Además, la mayoría de los fabricantes de refractarios recomiendan que cualquier revestimiento vibratorio seco en un horno de inducción sin núcleo se retire y reemplace cuando haya un desgaste general del 33 % (o un desgaste del 50 % en cualquier ubicación).



(a)



(b)

Figura 1
(a) Diagrama mostrando erosión de “pata de elefante” típica en horno *coreless*
(b) Muestra de revestimiento refractario con erosión de “pata de elefante”

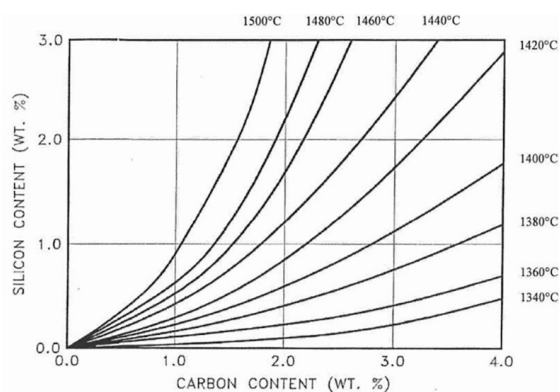


Figura 2
Curvas isotérmicas de equilibrio de la reducción de silicio (Si) por carbono (C)

Causas de la erosión de "pata de elefante"

Cuando se considera el problema por erosión de "pata de elefante", primero deben revisarse las causas. Basados en la experiencia de campo, hemos encontrado varios aspectos de las causas que han contribuido a este tipo de erosión:

- ≈ La instalación del revestimiento de trabajo.
- ≈ La sinterización del revestimiento de trabajo.
- ≈ La reacción química de las cargas iniciales.
- ≈ El diseño de la sección cónica de la cimbra.
- ≈ El sobrecalentamiento excesivo e incontrolado del metal remanente (incluyendo puenteo de la carga).
- ≈ Alteración del gradiente térmico en pared baja y piso.
- ≈ Filtración y saturación de metal localizada.
- ≈ Presencia de metales no ferrosos en la carga.

Recomendaciones prácticas para la solución del problema

Instalación del revestimiento de trabajo: al revisar los procedimientos de instalación de un revestimiento seco apisonable para hornos *coreless*, el criterio básico es la instalación por capas sueltas controladas de refractario. Esto se hace extremadamente difícil en las capas iniciales

en la zona cónica de la cimbra y una vez que se ha ubicado en su lugar. Al tratar de agregar material a esta zona, es importante asegurarse que las capas de material suelto sean aproximadamente de 100 mm (4").

Una vez agregada la capa de material suelto, se nivela para garantizar que tengamos 100 mm (4 pulgadas) alrededor de la cimbra. Luego se desairea con la herramienta correspondiente (*tridente*). Recientemente algunas fundiciones han descubierto que al disminuir la capa suelta a 50-75 mm (2-3 pulgadas) alrededor de la zona cónica de la cimbra es beneficioso.

Desafortunadamente, la ubicación del cono hace difícil el control de estos grosores, pero es necesaria para una instalación ideal.

Sinterizado del revestimiento de trabajo:

el propósito del sinterizado de cualquier revestimiento seco apisonable en un horno *coreless* es desarrollar la "cara caliente" cerámica óptima. Para refractarios de sílice, esto representa la presencia de la fase de cristobalita, y que es también la superficie de refractario en contacto con el metal líquido. La intención es desarrollar una cara caliente cerámica que tenga la mínima cantidad de saturación metálica. Como siempre recomiendan los fabricantes de refractarios, la sinterización de los refractarios requiere un control preciso de temperatura usando termopares tipo "K" con cables *chromel-alumel* dentro de la cimbra metálica, cuidando la selección de la carga/bloques de arranque utilizados para el calentamiento/sinterizado inicial y un control cuidadoso de la potencia inducida. Si cualquiera de estos aspectos se ignora, el área en el horno que

primero sufrirá las consecuencias será el piso y la pared en la sección cónica.

Reacción química de carga inicial:

al fundir hierro base dúctil, se produce una reacción acelerada entre el refractario de sílice y el metal fundido. Termodinámicamente, existe una relación de equilibrio de carbono y silicio en el hierro fundido a una temperatura dada, como se muestra en la Figura 2.

En el hierro base dúctil, la proporción de carbono a silicio se desvía mucho de la relación de equilibrio requerida. El hierro base dúctil fundido buscará la compensación de silicio reduciendo la sílice (SiO_2) en el refractario a silicio (Si), para satisfacer la relación requerida termodinámicamente. Esto puede causar una erosión más profunda de la "pata de elefante", que puede abarcar toda la pared del revestimiento.

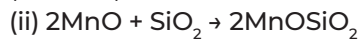
En muchas cargas ferrosas para hornos de inducción sin núcleo (*coreless*), una carga típica consiste en retornos de fundición, arrabio y acero al carbón. La secuencia de carga puede ser determinante para experimentar o prevenir el ataque químico temprano del refractario en la pared bajo o cono del revestimiento. Cuando se agrega acero al carbón al fondo del horno *coreless* vacío, es concebible que el metal fundido inicial tendrá niveles bajos de carbono y silicio. Esto hará que el metal fundido tenga mayores cantidades de óxido de hierro y óxido de manganeso. Ambos óxidos atacarán agresivamente el revestimiento de sílice (SiO_2) en el piso y la pared baja o cono. Las fórmulas (i) y (ii) muestran el ataque químico que sucede y genera saturación del revestimiento refractario de sílice, así como

el punto de fusión que permite erosionar más rápidamente el revestimiento saturado.



Punto de fusión: 1217o C

(2223o F)



Punto de fusión: 1345o C

(2453o F)

El arrabio es a menudo una parte integral de la carga de hierro gris. En el hierro gris de arrabio los niveles de carbono y silicio causarán mínima reacción con el revestimiento de hierro.

Al considerar arrabio con alto contenido de carbono y bajo contenido de silicio utilizado en cargas para hierro base dúctil, esta carga necesitará adquirir más silicio para satisfacer el estado de equilibrio carbono/silicio. Además, este tipo de arrabio es necesario para crear la química alta en carbono y baja en silicio para un baño/caldo de hierro base dúctil. Cuando se mezcla con retornos de fundición dúctil tratados, la agresividad de este arrabio disminuye.

Muchas fundiciones comienzan a cargar el horno vacío con arrabio o aceros con alto contenido de carbono y bajo en silicio. Cuando esto se hace, el metal líquido inicial en el fondo del horno tiene alto contenido de carbono y muy bajo contenido de silicio. Este metal fundido parcialmente ataca agresivamente el revestimiento de sílice, especialmente en el piso y el cono. Para evitar esto, una parte del retorno de fundición, metalúrgicamente balanceado con carbón y silicio, puede colocarse en el fondo antes de agregar el arrabio alto en carbón y el acero al carbón.

Diseño de parte cónica de la cimbra: el diseño de la sección cónica de la cim-

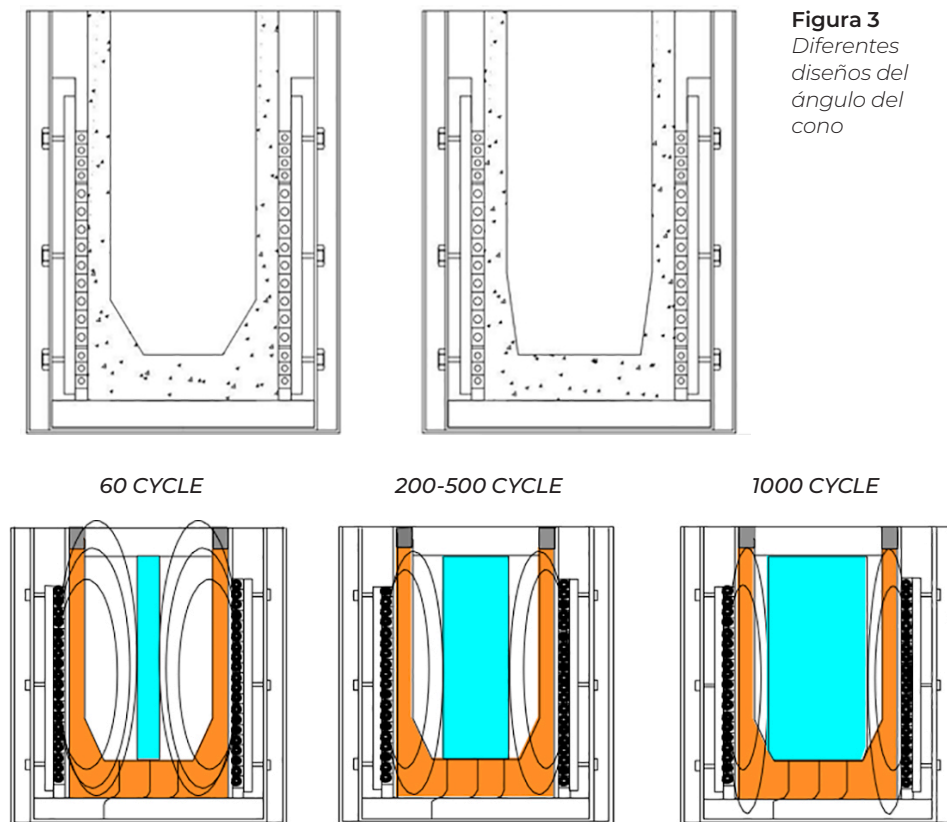


Figura 3
Diferentes diseños del ángulo del cono

bra puede contribuir significativamente a la densidad instalada del revestimiento refractario en la pared baja. Dependiendo de la geometría en la sección cónica, la instalación del refractario puede ser más difícil. La inclinación del ángulo del cono puede inhibir la técnica apropiada de desaireado directa/recta. La diferencia en diseños del ángulo del cono se ilustra en la Figura 3.

Si se usa el vibrado con Bosh, es difícil compactar el revestimiento en el área del cono de la pared baja. Cuando se considere vibración interna de la cimbra con el vibrador deseado o disponible, por ejemplo: vibrador neumático *Martin Brute*, vibrador de alta frecuencia *Vibrotor*, *Jolter/Rammer* de pistones neumáticos o EVS con vibrador eléctrico, es difícil esperar que el refractario durante la secuencia de vibrado fluya hacia abajo y alrededor de la zona del cono. A menudo el refractario es sometido a la fuerza de gravedad, y simple-

mente se compactará de forma vertical. Por esta razón, es común que se prefiera un ángulo de cono mínimo. Sin una densidad instalada óptima, el sinterizado puede generar una cara caliente menos densa y que es más propensa a la erosión.

Sobrecalentamiento excesivo de metal remanente en el horno:

en horno *coreless* de frecuencia de línea, la profundidad de penetración de la inducción crea un efecto de agitación vigorosa en toda la cavidad del horno, así como en el área del cono. Esta agitación es tan violenta que la erosión de "pata de elefante" es más profunda, incluyendo una porción significativa de la pared. Una comparación de los diferentes rangos de frecuencias para hornos de inducción sin núcleo se muestra en la Figura 4.

En un horno *coreless* de media o alta frecuencia, la agitación no es tan fuerte, aunque la capacidad de sobrecalentar inductivamente se inten-

Figura 4
Comparación de varias frecuencias y concentración de campos electromagnéticos

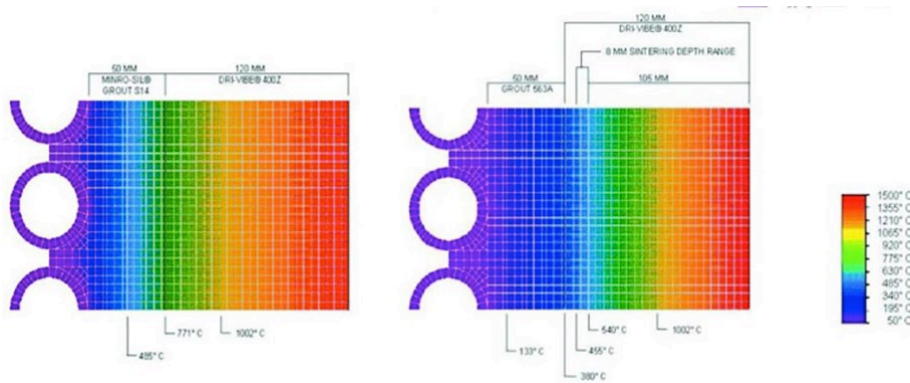


Figura 5

Comparación de análisis finito de perfiles térmicos en el grosor de una pared de un horno de inducción sin núcleo, ilustrando el efecto de enfriamiento por la bobina refrigerada por agua y la alteración en la configuración del respaldo al reducir la transferencia de calor

sifica por el incremento en potencia. Esta capacidad ha permitido a los fundidores a fundir más rápido, y les ha permitido usar el baño metálico completo (fusión por baches).

Sin embargo, si hay una interrupción de la secuencia de carga como una condición de puenteo, o si un remanente de baño metálico es dejado en el horno bajo una condición de alta potencia, la temperatura del baño metálico parcial puede incrementar dramáticamente, incluso hasta fundiendo el revestimiento. Esto usualmente sucede en el revestimiento de piso y el área del cono. Es necesario un control cuidadoso durante la operación de fusión, incluyendo medición de temperatura continua.

En general, cuando un horno se pone en una secuencia de espera y el horno permanece en alta potencia de fusión, el sobrecalentamiento del baño metálico sucederá. Con altas temperaturas y bajo tremenda agitación, la erosión será acelerada. El tipo y limpieza de la carga pueden ayudar a prevenir puenteos, así como la vigilancia cuidadosa durante la fusión.

Alteración del gradiente térmico de la pared baja y del piso

En cualquier horno de inducción sin núcleo (*coreless*), el efecto refrescante de la bo-



Figura 6

Ilustración de filtración metálica severa y subsiguiente saturación de metales localizada. Eventualmente esto conducirá a una severa condición de erosión

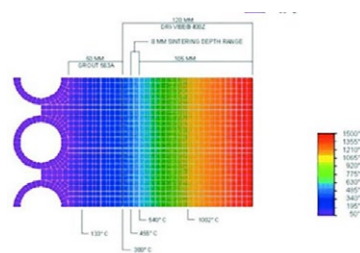


Figura 7

Perfil térmico por análisis finito del grosor de pared de un horno de inducción sin núcleo, que ilustra la ubicación de la temperatura de solidificación de zinc y plomo dentro de la sección transversal

bina de cobre refrigerada por agua crea un fuerte gradiente térmico a través de la pared. En la sección transversal de la pared en la Figura 5, se puede observar el efecto aislante del *grout* de sílice versus el *grout* de alúmina. También indicado esta la profundidad del sinterizado. Mientras que el gradiente térmico es menos fuerte, la profundidad de sinterizado es mayor. Esto también es cierto si representara metal o saturación de escoria. Una penetración más profunda

de metal o escoria puede esperarse cuando el efecto refrescante de la bobina refrigerada es reducido, por ejemplo, al usar un *grout* de sílice en vez de un *grout* de alúmina. Otro efecto de reducción de refrigeración lo puede dar el usar papel cerámico con mica o tela de fibra de vidrio como plano de deslizamiento.

Cuando se consideren refractarios apisonables secos de sílice en las paredes y en el cono, el grosor del revestimiento hace la diferencia de una penetración metálica o escoria mayor. Para combatir este problema es importante estudiar cuidadosamente las condiciones térmicas del cono, incluyendo la evaluación de cualquier tipo de refractario de soporte estructural detrás del revestimiento en la zona del cono. Un concreto refractario con contenido de alta alúmina debe resultar en mayor conductividad térmica, permitiendo el incremento de la refrigeración desde la bobina hacia el revestimiento de trabajo. Cuando se considere cualquier cambio en los refractarios estructurales, se recomienda ampliamente que se consulte al fabricante del horno, así como al fabricante del refractario antes de hacer cualquier cambio.

Filtración de metal y saturación localizada de metal

La filtración metálica en un horno *coreless* a menudo es el resultado de una grieta en el refractario, formada por condiciones de choque térmico o impacto mecánico durante el cargado del horno. La filtración metálica en la sección transversal del revestimiento se calentará inductivamente y causará una penetración metálica en el refractario en un patrón localizado alrededor de la filtración. Esta pe-

netración metálica será más profunda en la sección cónica debido al gradiente térmico más reducido en el área. El gradiente térmico en el cono es afectado por el incremento del espesor del revestimiento, así como por cualquier componente estructural detrás del revestimiento, como se indica en la Figura 6.

En hornos de inducción sin núcleo de media frecuencia/alta potencia, esta alta saturación puede llevar a una fusión del refractario apisonable seco, causando una condición de erosión severa. Esta filtración metálica inicial puede ser aliviada adhiriéndose a procedimientos de enfriamiento y precalentamiento/arranque en frío conservadores.

Presencia de metales no ferrosos en la carga

La presencia de metales no ferrosos en la carga de hierro se está haciendo más común debido al incremento en el uso de chatarras alternativas como aceros galvanizados. Cualquier recubrimiento galvanizado tendrá una fina capa de zinc. Otros recubrimientos pueden contener una fina capa de estaño o puede estar recubierto con pintura a base de plomo. El punto de fusión de estos metales no ferrosos es drásticamente menor al punto de fusión de cualquier aleación de hierro.

Al considerar la profundidad de penetración de estos metales en las paredes o el cono del revestimiento apisonable seco (para fusión de cualquier aleación de hierro), podría filtrarse a través del grosor de la pared completa. Como ejemplo, consideremos el zinc con un punto de fusión 416° C (780° F) y tiene un bajo punto de vaporización de 927° C (1700° F). En el perfil térmico de la pared lateral (Figura 7),

se puede observar como el zinc dentro del hierro a fundir puede penetrar a través de la porosidad del revestimiento apisonable seco como un vapor hasta la isoterma de 927° C (1700° F).

En este punto de la sección transversal, el zinc pasa de gas a líquido, y continuará penetrando a través de la porosidad del refractario hasta la isoterma de 416° C (780° F). Una capa delgada de zinc metálico se solidificará de manera vertical y paralela a la superficie de la pared (*grout*) de la bobina.

Esta penetración temprana y severa del metal es difícil de prevenir, ya que estos metales con bajos puntos de fusión están ya filtrados profundamente dentro de la pared refractaria. En la sección cónica, donde el efecto de enfriamiento se reduce por el espesor de la pared refractaria, la profundidad de la filtración es peor. Cualquier penetración de metal no ferroso puede conducir a la penetración de metal de hierro. La mejor manera de minimizar esta filtración es reducir la cantidad de material de carga revestido con metales no ferrosos que se utiliza en el proceso.

5 claves: del diagnóstico a la solución

1- Cumplimiento estricto de los procedimientos adecuados de instalación y sinterización

A lo largo de los años se ha demostrado que las técnicas de instalación pueden ayudar a reducir la erosión de “pata de elefante” aumentando la densidad instalada, que permite que el refractario desarrolle una cara caliente aceptable con saturación metálica mínima.

2- Calidad de los materiales de carga y la secuencia de carga adecuada

Para minimizar la erosión de “pata de elefante” al fundir hierro base dúctil, la secuencia de carga debe modificarse. En vez de cargar acero al carbón, arrabio con alto contenido de carbón y/o grafito en la carga inicial con el horno coreless vacío, los retornos de hierro fundido y metalúrgicamente balanceado deben cargarse primero y promoviendo tener metal líquido sin deficiencia de silicio que ataquen químicamente al revestimiento. Acero al carbón o arrabio con alto contenido de carbón debe cargarse cuando se tenga alrededor del 50 % de la capacidad del horno. Cualquier carga restante debe consistir en retornos de hierro y adición de grafito.

Esta práctica reduce significativamente la erosión de “pata de elefante”. La potencia inicial se reduce al fundir primero retornos de hierro de proceso y metalúrgicamente balanceados, en lugar de la carga de aceros. La adición de grafito inicial no es requerida cuando los retornos de hierro de proceso y metalúrgicamente balanceado se usan como carga inicial. Además, la fusión de aceros al carbón genera más FeO y MnO, que son químicamente más agresivos al refractario de sílice.

3- Adición de zirconita al refractario de sílice

Recientemente, se ha probado que la erosión de “pata de elefante” puede ser reducida cuando se agrega zirconita al refractario de sílice. La zirconita funciona como agente antiadherente, reduce significativamente el ataque químico y la reacción del hierro líquido con el refractario de sílice.

4- Diseño cónico de la cimbra de horno de inducción sin núcleo (*coreless*)

El ángulo del cono en la cim-

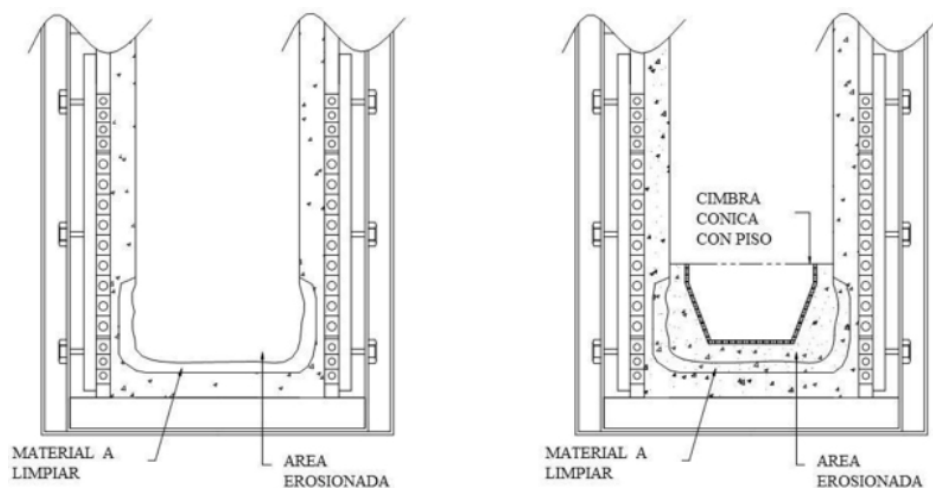


Figura 8
Área cónica
desgastada,
"pata de
elefante", a ser
reparada

bra puede imponer algunas dificultades en la instalación del refractario en el área del cono, y especialmente en hornos de gran capacidad. Se ha demostrado que es difícil lograr un bien desaireado completo y una vibración adecuada en la zona del cono. Se ha intentado con la modificación del ángulo del cono mejorar la instalación, pero poco se ha logrado. Para tener un mejor acceso al área cónica para la instalación, se debe ampliar el diámetro del piso. Esto reduce el ángulo cónico y hace que la sección cónica sea más accesible desde la parte superior del horno durante la instalación del revestimiento en esa zona.

5- Recuperación de paredes (*shave repair*)

Para extender la campaña del revestimiento en hornos, algunas fundiciones han recurrido a un procedimiento de recuperación de pared, *shave repair*, como práctica de mantenimiento. Como se ilustra en la Figura 8, el área de desgaste en la sección cónica se desmenuza para limpiar cualquier metal penetrado y escoria adherida al área,

logrando exponer la superficie de refractario semi-sinterizado limpia de respaldo. Debe limpiarse y prepararse con cuidado para prevenir que haya una avalancha del material en polvo detrás del refractario semi-sinterizado. Primero, se desairea y apisona el piso, en caso de que requiera reparación. Se debe apisonar el piso en exceso de 25 mm (1") de su medida normal para nivelarlo y lograr una superficie firme y apisonada sin segregación del refractario. Se coloca una cimbra con menos diámetro y más corta que la original, con altura por encima de la zona del cono, y se asegura con carga dentro de la cimbra. Se completa la instalación de las paredes rellenando, desaireando y apisonando con un vibrador Bosh. El sinterizado es similar al de un revestimiento nuevo, asegurando el sinterizado apropiado en el área. La cantidad de recuperaciones de pared, *shave repair*, puede ser limitada debido al costo total de la reparación en comparación con el beneficio de extender la campaña para cada revestimiento.

Conclusión general: puede reducirse y hasta eliminarse

La erosión de "pata de elefante" puede mejorarse. En primer lugar, se requiere una correcta instalación y sinterizado del revestimiento refractario del horno. En segundo lugar, la práctica de cargado debe ser mejorada para minimizar la cantidad de carga con bajo contenido de silicio en el fondo del horno. En tercer lugar, la adición de zircon o de sílice electrofundida al refractario base de sílice reduce la penetración del hierro líquido al mejorar las características de no mojabilidad del metal sobre el refractario de sílice. Para extender la vida útil de la campaña del horno, una recuperación de espesor/*shave repair*, puede utilizarse como práctica de mantenimiento.

El objetivo de este artículo es concientizar al personal de fundición de que la erosión de "pata de elefante" en el área cónica de un revestimiento de un horno de inducción sin núcleo puede reducirse, e incluso eliminarse, mediante la aplicación de controles durante la fusión de la carga y la secuencia de cargado, el control cuidadoso de la potencia cuando hay metal remanente en el horno por periodos de mantenimiento por atrasos en el proceso, así como mejorar el proceso de instalación y sinterizado confirmando procedimientos varias veces durante el año y que los encargados de la instalación no hayan cambiado los procedimientos recomendados por el fabricante.

REFERENCIAS

- > *Effect of Iron Slags on Refractories in Coreless Induction Furnaces*, Williams, D., AFS Transactions, Vol. 102, (1994), pág. 94.
- > *A Troubleshooting Guide to Silica Dry Ram Refractories*, Doza, D., Modern Casting, (Jun. 1995).
- > *The influence of Iron Oxide and Manganese Oxide on Refractories Used in Ferrous Induction Melting*, Williams, D., Ko, Y., and Green, T., The American Foundrymen's Society's 100th Casting Congress, Philadelphia, Pennsylvania, Apr. 21, 199