

## Experiencias en el empleo de refractarios en la siderurgia No integral.

J. J. LARAUDOGOITIA\*, A. IBARRONDO\*\*, F. GONZALEZ\*\*, J. L. MUÑOZ\*, A. ARTEAGA\* Y J. CIRIZA\*

\*SIDENOR I+D S.A., Barrio Ugarte, s/nº 48970 Basauri, Vizcaya, España

\*\*SIDENOR INDUSTRIAL S.L., Barrio Ugarte, s/nº 48970 Basauri, Vizcaya, España

SIDENOR INDUSTRIAL S.L. es una empresa siderúrgica fabricante de productos largos de acero especial, dirigidos en un alto porcentaje al mercado de automoción.

En las instalaciones que SIDENOR posee en Basauri, el proceso de fabricación se desarrolla vía horno eléctrico de arco, metalurgia secundaria (horno cuchara y estación de vacío en tanque) y colada continua, seguido de un proceso de laminación directa sin acondicionado previo.

Para las instalaciones consideradas el empleo de material refractario se concentra fundamentalmente en la acería, con un 97% del refractario total. Considerando el consumo de acería, el 50% corresponde a colada continua, 35% a cucharas y 15% al horno eléctrico de arco y varios.

La idoneidad del refractario se define en SIDENOR desde tres puntos de vista:

- La calidad metalúrgica deseada en los productos fabricados
- El coste global, considerando tanto el precio, el coste de instalación, duración y consumo energético asociado
- Impacto medioambiental de las emisiones durante la fase de precalentamiento.

El análisis de comportamiento del material refractario se realiza en tres áreas:

- Régimen estacionario de trabajo (desgaste, desconchamiento, capacidad aislante, estanqueidad, etc....)
- Estudio teórico y mediciones desde el punto de vista térmico y medioambiental
- Análisis de fallos no previstos

*Palabras clave: Refractarios, Siderurgia, Acero Especial.*

### Refractory use experience in steelmaking

SIDENOR INDUSTRIAL S.L. is a steelmaking company producing special steel long products, devoted to a high extent for automotive applications.

Production facilities at Sidenor Basauri plant include electric arc furnace, secondary metallurgy station (two ladle furnaces sharing a vacuum tank degasser) and continuous casting process followed by direct rolling.

The refractory consumption at Basauri plant facilities is concentrated in the steelmaking shop with 97% out of total consumption. Regarding the steelmaking shop, refractory consumption has the following distribution: 50% continuous casting, 35% ladle and 15% electric arc furnace and rest of applications.

The refractory material suitability is defined in SIDENOR from three points of view:

- Quality level aimed for final products
- Total cost, taking into account purchase price, installation cost, running cost and energetic consumption associated to its use
- Emissions environmental impact due to drying and preheating of refractory products

The characterisation of the refractory material performance is done in three different levels:

- Steady state working conditions (wearing, spalling, thermal insulation, air tightness...)
- Theoretical study and measurements from thermal and environmental point of view
- Sudden and none predicted failures.

*Keywords: Refractory, Steelmaking, Special Steel.*

## 1. INTRODUCCIÓN

SIDENOR INDUSTRIAL S.L. es el principal productor español de aceros especiales, siendo el mercado de automoción el principal destinatario de dicho producto (Fig 1). Las ventas totales en el año 2004 fueron de 712.000 Tn correspondiendo el 57% al mercado nacional y el 43% a la exportación.

La fabricación contempla fundamentalmente calidades

pertenecientes a las familias de aceros aleados, microaleados, de herramientas, al carbono, de muelles, fácil maquinabilidad, deformación en frío y rodamientos. Por productos existen tres líneas fundamentales, productos laminados el 92%, barras forjadas el 5% y forja y fundición el 3%.

El presente análisis del empleo de refractarios se centra en



Fig. 1- Piezas/Conjuntos Automóvil. Cigüeñales y bielas. Motor.

la fábrica de BASAURI como ejemplo de la práctica operativa en el uso de estos materiales en SIDENOR INDUSTRIAL S.L. En las instalaciones que SIDENOR posee en Basauri, el proceso de fabricación se desarrolla vía horno eléctrico de arco, metalurgia secundaria (dos hornos cuchara compartiendo una estación de vacío en tanque) y colada continua de palanquilla en dos formatos 155x155 y 185x185 mm, seguido de un proceso de laminación directa sin acondicionado previo.

Para las instalaciones consideradas, el empleo de material refractario se concentra fundamentalmente en la acería, con un 97% del refractario total. Considerando el consumo fundamental en acería, el 50% corresponde a colada continua, 35% a cucharas y 15% al horno eléctrico de arco y varios. Esta distribución de consumo esta relacionada con la baja secuencialidad en colada continua, del orden de 4.5 coladas por artesa, de una fábrica de aceros especiales comparada con una acería fabricante de acero común.

Las actividades de desarrollo tecnológico son realizadas por la empresa SIDENOR I+D, subsidiaria del grupo SIDENOR INDUSTRIAL S.L., dedicada a la investigación y desarrollo de productos y procesos en las áreas de productos largos de aceros especiales, forja y fundición. Cabe destacar, en el ámbito del empleo de refractarios, los trabajos relacionados con la mejora de la calidad metalúrgica para la obtención de un producto con elevada exigencia de limpieza macro y micro inclusionaria, como es el acero de rodamientos (Fig 2), y el efecto que sobre la misma ejerce el material refractario empleado en los diferentes estadios del proceso de elaboración.



Fig. 2- Piezas/Conjuntos Automóvil. Rodamientos. Motor.

## 2. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIALES REFRACTARIOS

En la determinación de la idoneidad de un material refractario se contemplan tres factores:

- La calidad metalúrgica deseada en los productos fabricados. Se considera el carácter ácido / básico del material empleado para su compatibilidad con el proceso de elaboración, así como otras propiedades intrínsecas del material, aislamiento, estanqueidad, reactividad,...
- El coste global, considerando tanto el precio de adquisición, el coste de instalación y la duración del mismo (consumo de refractario y consumo energético asociado).
- Impacto medioambiental de las emisiones durante la fase de precalentamiento, centrándose los estudios en el secado y precalentamiento de las cucharas tras el cambio de su revestimiento de refractario.

La Fig. 3 muestra algunos de los materiales empleados en las diferentes áreas de aplicación existentes en el proceso de fabricación del acero especial.

MATERIALES		ACERIA	LAMINACION	TRATAMIENTOS TERMICOS
Conformados	Ladrillos	HEA, Cuchara, MS, CC, Fosos.		Horno TT
		MgO-C, MgO, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Especiales	HEA, Cuchara, CC, Fosos.	Bloques quemadores	Bolques quemadores
		Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -C, Zr, MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Monolíticos	Plástico Mezclas Gunitados	HEA	Solera, Bóveda, Paredes, Horno.	
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Masas	Cementos	HEA, Cuchara, MS, CC, Fosos.		Horno TT
		MgO, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Fig. 3- Selección de materiales refractarios.

## 3. ANÁLISIS EN TRABAJO DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS

### 3.1. Aspectos Económicos

Por lo que respecta al análisis económico del uso de material refractario, el estudio aquí presentado se centra en la cuchara. Este elemento representa el 35% del uso total de refractario en la fábrica de Basauri.

Se ha determinado que el factor fundamental que afecta al consumo de refractario es el ciclo térmico al que éste es sometido (1). Dicho ciclo se compone de precalentamiento, tiempo con acero y tiempo sin acero; repitiéndose el ciclo hasta el agotamiento del refractario y consiguiente demolición del revestimiento de la cuchara.

El análisis estadístico del efecto de los diferentes factores que pueden influir en la vida media de las cucharas ha determinado que los aspectos más significativos por orden de importancia son los siguientes:

- Número de reparaciones de la línea de escoria. El área mas dañada de la cuchara es la línea escoria, por tanto las reparaciones parciales de esta zona permiten prolongar la vida de aquella.

- Tiempo medio por colada de:
  - Cuchara con acero.
  - Cuchara vacía entre coladas.
  - Duración total del vacío en afino.

El aumento de cualquiera de estos tres tiempos repercute de forma negativa en la longevidad del revestimiento refractario.

- Valor medio de toneladas de acero líquido por colada. Para una cuchara con una capacidad estándar variar el tonelaje de forma significativa entre una colada y la siguiente afecta negativamente sobre la duración de la misma.

Se realiza sistemáticamente el control de la evolución del consumo de refractario en mm/colada, comparándolo con el tiempo medio con acero de la cuchara por colada. El análisis de la evolución en el tiempo de estos dos factores revela situaciones especiales que pueden ser causa de particularidades en el comportamiento del material refractario en trabajo.

### 3.2. Modelo Térmico

Sidenor I+D ha desarrollado un modelo térmico para la cuchara con el que se realizan cálculos y predicciones acerca del estado térmico del refractario de las mismas y su evolución temporal (2).

Las características fundamentales de este modelo dinámico de simulación, basado en otros existentes (3) son las siguientes:

- Permite trabajar con cualquier configuración de pared de cuchara, calidades de los ladrillos (dolomía, magnesia-C, alúmina,...) y cualquier espesor.
- Tiene incorporados modelos de los distintos procesos a los que está sometida la cuchara (calentamiento en mecheros, con acero, vacía,...)

La Fig.4 presenta un ejemplo de cálculo donde el usuario ha elegido una configuración física y una composición del refractario considerado, así como una campaña de trabajo para la cuchara. El resultado gráfico de la modelización nos muestra a diferentes profundidades la evolución temporal de la temperatura.

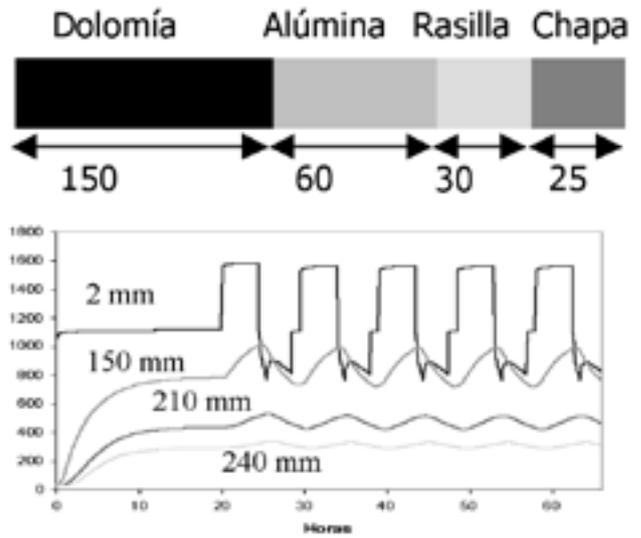
Este modelo permite, con una versatilidad total, la simulación del comportamiento de los diferentes materiales, tanto para geometría como calidades, así como bajo diferentes condiciones de trabajo y secuencia temporal de aplicación en el proceso productivo.

La aplicación puede realizarse tanto para cucharas como para cualquier otro recipiente construido de refractario y acero que contenga cualquier metal fundido férreo o no-férreo del que se conozcan sus propiedades físico-químicas.

### 3.3. Análisis Medioambiental

Con relación al empleo de refractarios, se ha iniciado el trabajo en el área medioambiental fundamentalmente en relación con el secado y precalentamiento de cucharas nuevas. En la Fig.5 puede observarse la zona de acería correspondiente a las estaciones de secado y precalentamiento de cucharas.

Dentro del programa de investigación europeo RFCS (European Programme of the Research Fund for Coal and Steel) y en el marco del proyecto RFS-CR-03008 "Investigations



ETAPA	DURACIÓN
Pre calentamiento	20 h
Con acero	4 h
Vacía	2 h
Calentando	1 h
Con acero	4 h

Fig. 4- Modelo dinámico de simulación del estado térmico de la cuchara.

and Measures to Reduce Emissions and Energy Consumption during Preheating of Steel Ladles”, realizado en colaboración con Betriebsforschungsinstitut, Thyssen Krupp Nirosta GMBH, Acciai Speciali Terni y Centro Sviluppo Materiali S.p.A., se van a llevar a cabo las siguientes mediciones en la estación de secado y precalentamiento:

- Temperatura de los gases de salida
- Contenido de CO y CO<sub>2</sub>
- Nivel de sustancias diversas (Mg gas, productos de la carbonización de los gases,...)
- Termogravimetrías isoterma



Fig. 5- Estación de secado y precalentamiento de cucharas.

### 3.4. Análisis de Fallos

Una de las actividades fundamentales del trabajo de Sidenor I+D con relación al comportamiento, tanto desde el punto de vista metalúrgico como económico, de los refractarios es el análisis de fallos de los mismos en servicio.

#### 3.4.1. Análisis post-mortem de una cuchara

Un ejemplo típico del análisis de fallos es el estudio post-mortem (4,5). El estudio post-mortem, por ejemplo, de una cuchara que haya sufrido un percance grave como una perforación. La Fig.6 muestra las consecuencias de la perforación en trabajo que la cuchara nº2 sufrió por la línea de escoria el día 23/02/2005. Las consecuencias de un fallo de este tipo son muy importantes, ya que además de los problemas operativos ocasionados por la propia perforación, la cuchara quedó bastante deformada al entrar acero entre la chapa y el refractario.

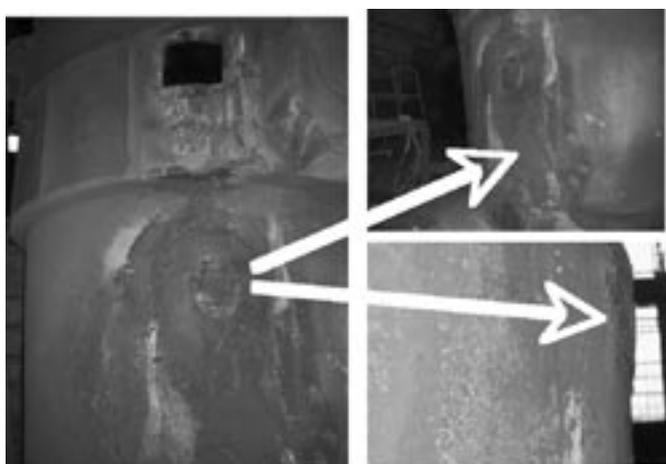


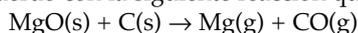
Fig. 6- Perforación de una cuchara por la línea de escoria.

El análisis de situación recoge las características de la cuchara, la historia de su uso, ciclos con y sin acero, etc. Tras el estudio de todos los datos disponibles se llegó a la conclusión de que una de las causas más probables de la perforación fue la larga estancia en mecheros (40 horas) en dos coladas previas a la que se produjo la perforación.

La teoría establecida (6) como posible origen de la perforación es la siguiente:

- Tras 38 coladas el revestimiento de MgO-C tenía ya un espesor bastante menor al de fabricación (90mm en vez de los 150mm iniciales)

- En el calentamiento en mecheros se produce una reacción de reducción de la MgO, favorecida por la alta temperatura de acuerdo con la siguiente reacción química:



de tal forma que va disminuyendo el contenido en grafito del refractario con el consiguiente aumento de la porosidad de la matriz y la reducción de la resistencia al agrietamiento por choque térmico (7,8,9). Estos dos fenómenos dan lugar a un incremento de la permeabilidad a la escoria y a un mayor desgaste del ladrillo refractario.

- Una vez perforado el ladrillo de trabajo en la colada número 39, el revestimiento de seguridad es destruido fácilmente, perforando la chapa en la colada número 40

Así pues, se apunta como causa posible de la perforación un excesivo tiempo de calentamiento en mecheros; el cual, dado ya el acusado desgaste que presentaban los ladrillos de la línea de escoria, acabó provocando la mencionada perforación.

Tras el análisis realizado se comprueba la importancia de realizar un calentamiento controlado, tratando de evitar incidencias operativas que puedan inducir en un futuro situaciones similares a la estudiada. Como parte de las conclusiones se proponen dos diferentes acciones preventivas:

- Inspección termográfica de las cucharas previamente a ser confirmadas para colada. Mediante una rápida inspección visual con una cámara termográfica, se podrían detectar zonas calientes en la chapa, lo que es indicativo de posibles problemas. La Fig.7 muestra un ejemplo de análisis termográfico de una cuchara.

- Monitorización del estado del refractario cuando se vacía la cuchara. Esta técnica permite la detección de puntos con desgastes excesivos así como una caracterización del desgaste medio general del refractario de trabajo.

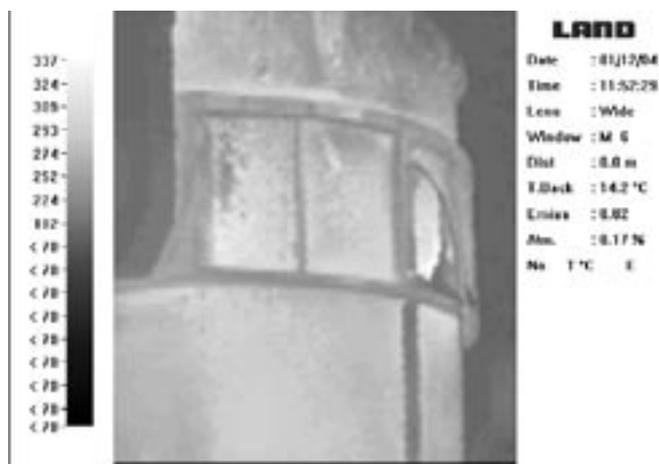


Fig. 7- Imágenes termográficas del estado térmico de la chapa e interior refractario de una cuchara.

#### 3.4.2. Efecto del tubo cuchara-artesa en la renitrogenación del acero

Se define como renitrogenación al aumento del contenido de N en el acero entre el control después del vacío y el control en artesa. Los factores que afectan de forma más determinante a la captación de N por el acero son:

- Composición química del acero (10,11)
- Contenido de N inicial (12)
- Concentración de elementos tensoactivos, O y S.
- Regasificación por contacto acero-atmósfera.

Se ha determinado que el aislamiento entre aire-acero, en concreto el tubo cuchara-artesa (ver Fig.8) es un aspecto fundamental en el nivel de renitrogenación del acero.

Debido a la importancia del fenómeno considerado y el impacto que sobre él tiene el comportamiento del tubo cuchara-artesa, se ha analizado su comportamiento dependiendo del proveedor (A y B).

El análisis estadístico realizado sobre el nivel de renitrogenación en función del fabricante del tubo de cuchara revela que el promedio de reN del tubo A es de 8.7 ppm frente



Fig. 8- Tubo cuchara-artesa

a los 12.2 ppm del tubo B. Se observa en la distribución de valores de reN, Fig. 9, que las reN en el entorno 15-25 ppm se presentan con mayor frecuencia con el empleo del tubo B. Este análisis ha permitido en cooperación con el fabricante B, tratar de mejorar las prestaciones de forma que puedan reducirse los niveles de reN a los valores del fabricante A (13).

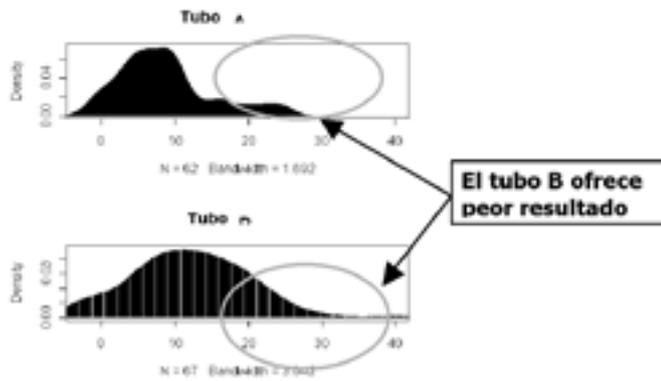


Fig. 9- Análisis del nivel de reN de acero en función del fabricante del tubo cuchara-artesa

#### 4. CONCLUSIONES

Tras el análisis del empleo de refractarios en SIDENOR INDUSTRIAL S.L., se concluye que el estudio y control del comportamiento de los refractarios, desde el punto de vista tanto teórico como el seguimiento en trabajo de los mismos, se revela vital desde tres perspectivas:

- Calidad metalúrgica del acero a fabricar.
- Impacto en el coste de transformación.
- Efecto medioambiental.

Así mismo, basándose en la relación con los suministradores, se percibe en el mercado de los materiales refractarios cierta inestabilidad desde el punto de vista de aprovisionamiento. Las causas fundamentales que contribuyen a este hecho son la elevada oferta de productos similares, fundamentalmente de terceros países, el incremento del coste de las materias primas en origen, el incremento de los fletes y las restricciones en ciertos países a la exportación de materias primas.

#### AGRADECIMIENTOS

La investigación llevada a cabo en el Patrimonio de Talamanca de Jarama se ha realizado gracias a un convenio con la Dirección General de Patrimonio Histórico de la Comunidad de Madrid. Del mismo, agradecemos al Ayuntamiento de Talamanca de Jarama las facilidades aportadas para la realización de este trabajo. También agradecemos el apoyo recibido por la Comunidad de Madrid a través del proyecto MATERNAS\_CM,0505/MAT/0094.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. J. Ciriza, G. Alvarez de Toledo, Estudio estadístico de los parámetros que influyen en la duración de la vida de las cucharas de la Acería de Reinosa, AC-118/1. Informe Sidenor I+D. Sept. (2001).
2. G. Álvarez de Toledo, Modelo matemático del estado térmico del refractario de cuchara durante los procesos de acería. CC-55/2. Informe Sidenor I+D. Mayo (1996).
3. O. Volkova, D. Janke, Modelling of temperature distribution in refractory ladle lining for steelmaking, ISIJ international, 43, 8, 1185-1190 (2003).
4. A. H. De Aza, P. Pena, S. De Aza, M. Raigón, J. Gómez-Millán, C. Domínguez, Estudio post-mortem de un hormigón refractario colocado en la línea de escorias de una cuchara de acería, Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 42, 6, 375-378 (2003).
5. B. Vázquez, A. Caballero y P.Pena, Estudio del campo primario del  $Al_2O_3$  en el sistema  $Al_2O_3$ -CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>, Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 43, 1, 16-18 (2004).
6. W. T. Lankford. "The making, shaping and treating of steel", 11<sup>th</sup> edition by United States Steel Corporation (Corporate Author), Association of Iron and Steel Engineers (Corporate Author), William T. Lankford (Editor). The Association of Iron and Steel Engineers (AISE) (204-205), Pittsburgh, Pennsylvania (1990).
7. G. D. Pickering and J. D. Batchelor, Carbon-MgO reactions in BOF refractories, Ceramics Bulletin, 50, 7, 611-614 (1971).
8. V. Bravie, A study on mechanisms of reaction between refractory materials and aluminium deoxidised molten steel, Steel Research, 2, 54-60 (1997).
9. A. Watanabe, H. Takahasi, and F. Nakatani, Mechanism of dense magnesia layer formation near the surface of Magnesia-Carbon brick, J. Am. Ceram. Soc. 69, 213-214 (1986).
10. H. Ono, K. Morita, and N. Sano, Effects of Ti, Zr, V, and Cr, on the Rate of Nitrogen Dissolution into Molten Iron. Metallurgical and Materials Transactions B 26B, 991-996, October (1995).
11. K. Morita, T. Hirosumi, and N. Sano, Effects of Aluminum, Silicon, and Boron on the Dissolution Rate of Nitrogen into Molten Iron. Metallurgical and Materials Transactions B 31B, 899-904, October (2000).
12. A. Arteaga, J. J. Laraudogoitia, Modelo de desgasificación bajo vacío. AC-125/1 Informe Sidenor I+D. Nov. (2001).
13. A. Arteaga, J. J. Laraudogoitia. Control del contenido de N en el acero: Adición de N<sub>2</sub> para alear el acero y captación espontánea. AC-138-001 Informe Sidenor I+D. Oct. (2003).

Recibido: 01.06.06

Aceptado: 28.07.06

Trabajo presentado en la Jornada sobre Refractarios en Siderurgia. Madrid, 15 de Junio de 2005.