

# Determinación de los coeficientes de capa límite mediante el Modelo de Desgaste Nodal (MDN) para el estudio de la corrosión del crisol de alto horno

M. F. BARBÉS FERNÁNDEZ<sup>1</sup>, M. Á. BARBÉS FERNÁNDEZ<sup>1</sup>, É. MARINAS GARCÍA<sup>1</sup>, B. FERNÁNDEZ PÉREZ<sup>1</sup>,  
R. MARTÍN DUARTE<sup>2</sup>, J. MOCHÓN MUÑOZ<sup>2</sup>, L. F. VERDEJA GONZÁLEZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo Sid-Met-Mat de la Universidad de Oviedo (Unidad Asociada al Grupo de Metalurgia Primaria del CENIM-CSIC),  
Escuela Técnica Superior de Minas de Oviedo, Calle Independencia 13, Oviedo 33004.

<sup>2</sup>Grupo de Metalurgia Primaria del CENIM-CSIC. Avda. Gregorio del Amo 8, Madrid 28040.

Durante la operación de un alto horno, tiene lugar la corrosión del crisol que, se ha de procurar llevar a cabo de una manera controlada. Si bien el progreso del desgaste en paredes y fondo del crisol se puede intuir a través de medidas de temperatura y flujos de calor, se necesita alcanzar un conocimiento más preciso de los mecanismos que influyen en su degradación. El Modelo de Desgaste Nodal (MDN), puede proporcionar a través de los valores de la capa límite térmica, la posibilidad de desarrollar el concepto del patrón de corrosión más indicado para la instalación.

*Palabras Clave: Metalurgia Primaria. Alto Horno. Crisol. Diseño. Corrosión.*

**Determination of the boundary layer coefficients by means of the Nodal Wear Model (NWM) in order to study the corrosion of the blast furnace crucibles**

Corrosion of crucibles happens during the blast furnace operation, and it is important to make it as controlled as possible. The wear of the walls and the bottom of the crucible can be qualitatively estimated using temperature data and heat flux, but it is necessary to reach a better knowledge of the multiple mechanisms involved in its degradation. The Nodal Wear Model (NWM) can give us, through thermal boundary layer values, the way to develop the best corrosion model for the crucible.

*Keywords: Primary Metallurgy. Blast Furnace. Hearth. Design. Corrosion*

## 1. INTRODUCCIÓN

Es una hipótesis de trabajo habitual establecer que, cuando un fluido (metal, escoria o gas) está en contacto con un sólido, existe una película de fluido en donde la temperatura, concentración o velocidad no se pueden considerar constantes. Por ejemplo, la temperatura puede considerarse uniforme en el interior de un fluido siendo una variable susceptible de medida experimental; no obstante, a lo largo del espesor de la capa límite térmica,  $\delta(T)$ , en contacto con el sólido, la temperatura puede experimentar una notable variación, Figura 1, (1), (2) y (3).

Uno de los errores que, a nuestro juicio se comete, al estudiar la corrosión de los materiales es la de proponer como temperatura del ensayo la experimentalmente medida por los termopares de control del horno o la del fluido que contacta con el material. En determinados ensayos de laboratorio, por ejemplo como los conocidos como *finger test*, el identificar la temperatura de la intercara (temperatura nodal,  $T_i$ , según el MDN) con la del ensayo (la registrada por el horno) puede ser válido. No obstante, en la mayoría de los contactos industriales o en aquellos ensayos de laboratorio dinámicos en los cuales se tenga la necesidad de refrigerar el extremo de la probeta a

ensayar, las diferencias entre las temperaturas nodales en la intercara y las atribuidas nominalmente al ensayo pueden ser notables.

El Modelo de Desgaste Nodal, constituye una propuesta teórica para el análisis de los procesos de corrosión química que experimentan los materiales cuando contactan con fluidos corrosivos a elevadas temperaturas. A partir de medidas de temperatura y flujos de calor en un sistema determinado, es posible obtener las correspondientes magnitudes nodales: temperaturas,  $T_i$ , y coeficientes de transporte globales de calor fluido-refractario,  $h_g^{f,r}$ . A partir de estas variables, se podrá igualmente determinar la magnitud del espesor de la capa límites de temperatura,  $\delta(T)$ , (4) (5) y (6). Un tratamiento metodológico generalizado para la utilización del MDN en el diseño de revestimiento de hornos, puede encontrarse en la referencia bibliográfica indicada (2).

Uno de los principales inconvenientes de los modelos existentes para controlar la corrosión de los crisoles de alto horno consiste en situar correctamente la posición de la intercara refractario-arrabio. Al no trabajar con las propiedades nodales de la intercara, únicamente se toma como referencia

la temperatura global del fundido en el crisol,  $T^\infty$ , accesible de control experimental. Por otra parte, se asume que  $T^\infty$  es constante a lo largo de todas las interfases sólido-fluido en el interior del crisol. No obstante, bajo el punto de vista del control y seguridad de las instalaciones se acude a criterios empíricos relacionados con la posición de las isothermas del 500 °C o de 900 °C. Se comienzan a tomar medidas preventivas en la operación de la instalación, cuando la magnitud del retroceso por corrosión de las citadas isothermas alcanza el 50% del espesor inicial del refractario.

## 2. LA CAPA LÍMITE TÉRMICA Y EL MDN

A través de los desarrollos del MDN, es posible calcular la magnitud de la capa límite térmica a partir de los valores de la capa límite de velocidades,  $\delta(v)$ , y del número adimensional de Prandtl,  $Pr$ , (4) y (7):

$$\delta(T) = \delta(v) Pr^{-1/3} \quad [1]$$

en donde el valor de  $\delta(v)$ , es una función de la densidad,  $\rho$ , viscosidad,  $\mu$ , velocidad,  $v$ , y dimensión lineal característica del sistema,  $L$ , que se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$\delta(v) = 5 \left( \frac{\mu L}{v \rho} \right)^{1/2} \quad [2]$$

Por lo tanto, es posible calcular a lo largo de la intercara del fondo y paredes del crisol-arrabio, los correspondientes espesores nodales atribuidos para la capa límite térmica según la ecuación [1].

Finalmente, los valores obtenidos para  $\delta(T)$  atribuidos por la ecuación [1] son del orden de magnitud del centímetro, en consonancia con los reportados por la bibliografía (1).

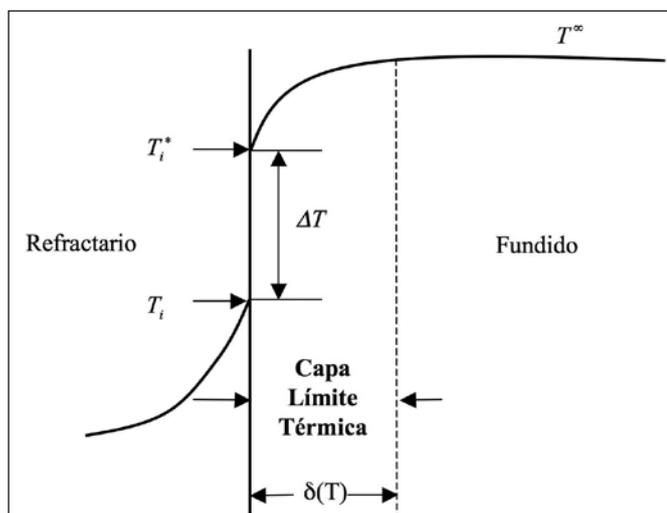


Figura 1. Perfil de temperatura a lo largo de la intercara sólido (refractario o cerámico) - fundido.

## 3. LA CAPA LÍMITE TÉRMICA EN CRISOLES DE ALTO HORNO

En orden a obtener valores para la capa límite térmica,  $\delta(T)$ , independientes de las características del crisol (geometría y materiales utilizados en su construcción) y de sus condiciones de operación, se ha propuesto la siguiente correlación:

$$\delta(T) = A X^n \quad [3]$$

en donde,  $A$  y  $n$  son dos constantes y  $X$  es una función de las siguientes variables:

$$X = \frac{Nu \mu^{0,50}}{Pr^{0,25} (g \beta \Delta T)^{0,25} \rho^{0,50}}$$

en donde:

$Nu$ , es el número de Nusselt.

$g$ , la aceleración de la gravedad.

$\beta$ , el coeficiente de expansión volumétrica del fluido.

$\Delta T$ , caída de la de temperatura en la capa límite térmica:

$$\Delta T = T^\infty - T_i$$

$\rho$  y  $\mu$ , son respectivamente, la densidad y la viscosidad del fluido.

Los antecedentes que se han utilizado para proponer una expresión que determine  $\delta(T)$ , la ecuación [3], tiene sus orígenes en la teoría de fenómenos de transporte que apoya la relación funcional existente entre los números adimensionales de Nusselt,  $Nu$ , Prandtl,  $Pr$  y Grashof,  $Gr$ , (1) y (2):

$$Nu = f(Pr; Gr)$$

en donde,  $Gr$  es igual:

$$Gr = \frac{l^3 g \beta \Delta T \rho^2}{\mu^2}$$

siendo  $l$ , la dimensión lineal característica del sistema estudiado.

En la Figura 2, se representan los valores de capa límite,  $\delta(T)$  y  $X$  para los nodos estudiados (aproximadamente 85) de cinco crisoles (lo que implica una correlación con 430 puntos), de diferentes características geométricas y operativas al inicio de su campaña. En la Tabla 1, se presenta un esquema de las principales características de estos crisoles que se pueden resumir en:

- Todos tienen la misma geometría exterior; se estudió un caso en el que las paredes interiores estaban inclinadas 8° sobre la vertical.
- Se asumió que el fondo del crisol estaba ocupado total o parcialmente por un lecho estático de partículas (hombre muerto o zona de coque inactivo).

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS DE LOS CRISOLES ESTUDIADOS.

	Paredes interiores	Zona de coque inactivo (lecho poroso de partículas estáticas)	Recubrimiento refractario	Esquinas refrigeradas
HAB1-1	Rectas	Apoyada en todo el fondo	Sialon	No
HAB1-2	Rectas	Apoyada en el centro del fondo	Sialon	Sí
HAB4-1	Rectas	Apoyada en todo el fondo	Sialon	Sí
HAB5-1	Rectas	Apoyada en todo el fondo	Grafito	Sí
HAC1-1	Inclinadas	Apoyada en todo el fondo	Sialon	Sí

- Si bien los crisoles tenían diferentes materiales refractarios en su mampostería se consideró la variación de la calidad en la zona en contacto con los fundidos (Sialon o Grafito).
- En el mismo sentido se considero la posibilidad de que las esquinas de la mampostería se realizaran de un material gráfitico con el fin de incrementar el flujo de calor.

Los valores que se han obtenido para las constantes,  $A$  y  $n$ , de la ecuación [3] para este conjunto de crisoles, son:  $A = 0,0706$  y para  $n = 1, 30$  (Figura 2) (8). El criterio utilizado para calcular los parámetros  $A$  y  $n$  de la ecuación [3] ha sido el de utilizar aquella correlación que minimice la diferencia:

$$\delta(T)_{\text{correlación}} - \delta(T)_{\text{nodal}}$$

del conjunto de las 430 propiedades nodales utilizadas, Figura 2. Como se puede apreciar en la Figura los crisoles HAC1-1 y HAB1-2 son las que más se alejan de la correlación (un 20% medio de error frente a un 10% de los otros tres crisoles. Globalmente el error de la correlación para los 430 puntos es del 15%).

La aportación del conocimiento de los valores de la capa límite térmica,  $\delta(T)$ , de un crisol al inicio o a lo largo de su campaña, puede resultar de interés si se representa los resultados en forma de un diagrama de distribución de frecuencias o de probabilidad al objeto de calcular su valor medio,  $\overline{\delta(T)}$ , su varianza,  $\overline{\Delta\delta(T)^2}$ , o desviación típica,  $(\overline{\Delta\delta(T)^2})^{0.5}$ . A partir de estos resultados, se podrían generar distintos patrones de comportamiento del crisol a lo largo de su campaña.

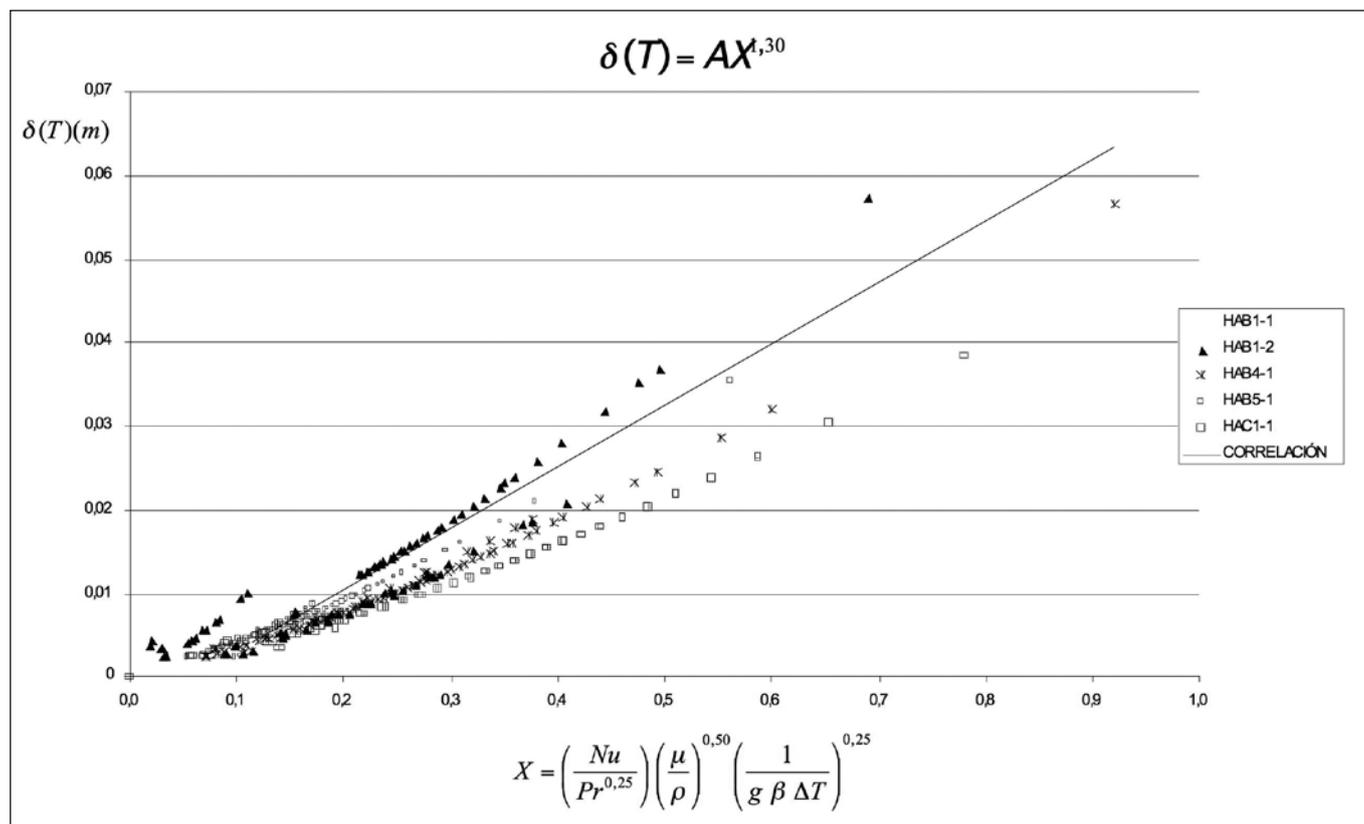


Figura 2. Correlación para la obtención de los espesores de la capa límite térmica,  $\delta(T)$  (en metros), en crisoles de alto horno.

#### 4. CONCLUSIONES

Se presenta por vez primera para un crisol de alto horno, la posibilidad de calcular los espesores de capa límite térmica,  $\delta(T)$ , y la forma de utilizar estos resultados en el desarrollo de patrones de corrosión que pueden resultar un instrumento cuantitativo para evaluar el estado del crisol a lo largo de su campaña.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo quieren agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia-España (MEC): MAT2003-00502, al Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación (MAEC): MAEC-AECID-B/1629/04; B/2884/05; B/5814/06, B/7648/07 y al CSIC-Madrid por facilitar la cooperación científica y tecnológica entre el CENIM y la Universidad de Oviedo y a la FICYT (Plan PCTI- Asturias 2006-2009) por la ayuda para la financiación de este trabajo.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. D. R. Poirier, G. H. Geiger, *Transport Phenomena in Materials Processing*, Ed. TMS, Pennsylvania, EE.UU., 528-529 (1994).
2. L. F. Verdeja, J. P. Sancho, A. Ballester, *Materiales Refractarios y Cerámicos*, Ed. Síntesis, Madrid, 19-22; 156-176 (2008).
3. J. P. Sancho, L. F. Verdeja, A. Ballester, *Metalurgia Extractiva: Procesos de obtención*. Ed. Síntesis, Madrid, 69 (2000).
4. L. F. Verdeja, P. Rusek, A. Alfonso, R. González, La temperatura en la intercara arrabio – refractario como variable determinante de los mecanismos de corrosión del crisol de horno alto, *Rev. Metal. Madrid*, Vol. 34, (5), 175-178 (1998).
5. L. F. Verdeja, A. Alfonso, R. González, Material wear in blast furnace crucibles, *Am. Ceram. Soc. Bull.* Vol 77, (5), 91-96 (1998)
6. L. F. Verdeja, R. González, A. Alfonso, M<sup>o</sup>. F. Barbés, Nodal Wear Model: corrosion in carbon blast furnace hearths, *Rev. Metal. Madrid*, Vol. 39, (3), 183-192 (2003).
7. M<sup>o</sup>. F. Barbés Fernández, El Modelo de Desgaste Nodal (MDN) en la simulación y diseño de crisoles de alto horno, Memoria para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas. Universidad de Oviedo. E. T. S. de Ingenieros de Minas de Oviedo. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Oviedo, 25 de Marzo del 2004, 289.
8. M<sup>o</sup>. F. Barbés, E. Marinas, E. Brandaleze, R. Parra, L. F. Verdeja, G. A. Castillo, R. Colás, Design of blast furnace crucibles by means of the Nodal Wear Model, *ISIJ Int*, Vol. 48 (2), 134-140 (2008).

Recibido: 17-11-08

Aceptado: 08-06-09

