

2.5.2. Solar.

Esta energía puede organizarse y de hecho así se está desarrollando en:

- a) Factor Solar Pasivo, en la utilización del diseño de edificios (ventanas, características estructurales).
- b) Sistemas de Energía Solar de baja temperatura (hasta 150° C), utilizan colectores de placas planas.
- c) Sistemas solares intermedios de alta temperatura (desde 150° C hasta 1.000° C), utilizan platos parabólicos o cóncavos.
- d) Celdas Solares fotovoltaicas para generar energía eléctrica directamente en lugares remotos.

2.5.3. Eólica.

Considera molinos de vientos y otros sistemas aerodinámicos.

Es un área, que aunque muy antigua, está siendo investigada, estudiada y desarrollada últimamente con mucha atención.

2.5.4. Mareas, olas marinas, diferencia de temperatura del mar.

Se está desarrollando principalmente en U.S.A. un importante programa de investigación en los diseños de sistemas que permitan aprovechar económicamente esta energía potencial. ●

EL SPALLING DE LOS REFRACTARIOS



Dr. Ing. Nelson Santander M.
Profesor Jornada Completa
Departamento de Metalurgia
Facultad de Ingeniería USACH.

1. INTRODUCCION

La mayor preocupación de los usuarios de refractarios es el rendimiento que éstos tienen en servicio. Por ello, cualquier tipo de destrucción, sea ésta precoz o normal (para las condiciones dadas de trabajo), constituye tema de inquietud para ellos.

Existe un tipo muy particular de deterioro que se identifica con la palabra inglesa SPALLING, pero ocurre sin embargo, que no siempre se tiene claridad conceptual sobre este fenómeno destructivo, no se conocen sus causas en forma suficientemente exacta, y se ignoran las metodologías de que se dispone para evaluarlo.

Es, sin duda, obvio que sólo conociendo bien este fenómeno será posible controlarlo, minimi-

zarlo, o incluso evitarlo. Es por ello que el propósito del presente artículo es dar una visión lo más didáctica posible acerca de este indeseable mecanismo de deterioro de albañilerías refractarias.

La palabra SPALLING se traduce al español como DESCONCHAMIENTO, DESCONCHADO, o DESGAJAMIENTO, ya que involucra la destrucción del refractario por fractura y consiguiente generación de fragmentos generalmente gruesos. Si la fractura origina fragmentos muy delgados se habla más bien de PEELING, palabra que se traduce al español como DESCASCARAMIENTO, DESCASCARILLADO o DESESCAMADO. Si la fractura genera lonjas de gran superficie se habla

de SLABBING, término que puede traducirse como DESLAJADO. Las palabras DESCOSTRAMIENTO y DESCORTEZAMIENTO se usan también en español, pero no con un sentido tan preciso como las anteriores.

Ante tanta nomenclatura sinónima conviene entonces adoptar una definición práctica para la palabra SPALLING.

Definición: se entiende por SPALLING a la fractura que sufre un material refractario debido a causas térmicas, mecánicas o químicas.

La primera causa produce el llamado SPALLING TERMICO, y se debe a un calentamiento o enfriamiento disparado del refractario, lo que genera gradientes térmicos capaces de originar esfuerzos de tal magnitud que logran fracturar al material.

La segunda causa produce el así llamado SPALLING MECANICO, que se debe a esfuerzos de compresión en estructuras refractarias generados por expansiones térmicas de la mampostería, esfuerzos que llegan a ser capaces de fracturar los refractarios. En general, este efecto se debe casi siempre a un diseño deficiente del horno.

La tercera causa produce el llamado SPALLING QUIMICO, y se debe a diferencias de coeficientes de expansión térmica entre la capa superficial y el cuerpo mismo del ladrillo, lo que a su vez se produce cuando hay penetración de escoria o de metales, o bien, cuando hay cambios estructurales durante la operación; transformaciones todas, que pueden alcanzar niveles capaces de destruir la zona afectada. En particular cuando el spalling químico se debe a un cambio estructural, se habla también de SPALLING ESTRUCTURAL.

La resistencia que ofrece un refractario a un debilitamiento o a la fractura derivada de los esfuerzos térmicos producidos al enfriar o calentar bruscamente el material se conoce con el nombre de RESISTENCIA AL CHOQUE TERMICO. En la práctica es precisamente la susceptibilidad de los materiales cerámicos a los choques térmicos uno de los factores que más limitan su uso, por ello el diseño de refractarios debe considerar casi siempre los factores adecuados que permitan darles una buena resistencia al SPALLING.

En el párrafo que sigue se revisarán algunas situaciones prácticas que ilustran los casos más frecuentes de destrucción de albañilerías debido al spalling.

2. EJEMPLOS MAS COMUNES DE SPALLING

Es interesante conocer algunos casos prácticos en los que con gran frecuencia se detectan los efectos del spalling.

- Quizás el ejemplo más típico lo constituyan aquellos órganos estructurales de los hornos que son de "quita y pon". En este caso se encuentran las bóvedas móviles de los hornos eléctricos de arco, las que es preciso remover para poder efectuar el carguío del horno. Al remover la tapa, ésta queda en contacto directo con el aire, y al finalizar el carguío vuelve a calentarse con rapidez. En una situación similar se encuentran las puertas móviles de hornos tipo reverbero con carguío lateral, tal es el caso de las puertas de carguío de los hornos Siemens Martin.
- Todos aquellos hornos y equipos de operación continua batch, o de operación discontinua que están sujetos a grandes variaciones cíclicas de temperaturas. En el primer caso destacan los hornos con insuflado de aire (o aire enriquecido) como son los hornos Peirce-Smith de cobre y los convertidores LD al oxígeno para aceros, y en el segundo caso están los cubilotes, las cucharas de colada, las piqueras y canales de sangría.
- Todos aquellos hornos continuos que para su reparación son sometidos a enfriamientos bruscos o forzados como ocurre cuando se les enfría con chorros de agua fría; y también aquellos hornos continuos reparados sobre la marcha con refractarios fríos o húmedos, tal es el caso de la reposición de ladrillos de bóvedas colgantes y de muchos parches "en caliente".

3. TEORIA

Resulta curioso observar que pese a lo importante que resulta conocer bien el fenómeno de spalling, la literatura teórica al respecto es escasa.

Estudios experimentales llevados a cabo con modelos de geometrías simples (esferas, discos, prismas), aplicando la técnica fotoelástica, ponen de manifiesto algo muy importante: el spalling térmico se debe a 2 tipos de sollicitaciones; esfuerzos de cizalle y esfuerzos de tensión. Pero, estos esfuerzos se manifiestan de manera distinta según se trate de piezas calentadas o bien piezas enfriadas.

La figura 1^a ilustra los tipos de grietas que se producen al enfriar (1a), o al calentar (1b) bruscamente un ladrillo refractario. Se ve entonces que al enfriar bruscamente el spalling térmico se debe a esfuerzos de tensión (las fracturas por tensión entran por el centro de las caras del

ladrillo, a 90°), y al calentar bruscamente, el spalling térmico se debe casi exclusivamente a esfuerzos de corte (las fracturas entran por las caras a 45°, y tienden a que el ladrillo vaya adquiriendo forma esférica con el tiempo). En todo caso, hay que hacer notar que la fractura no sigue necesariamente la dirección de los esfuerzos en todos los lados, sino que viaja a lo largo del ladrillo de modo de liberar la máxima energía, lo que depende mucho de la microestructura del refractario.

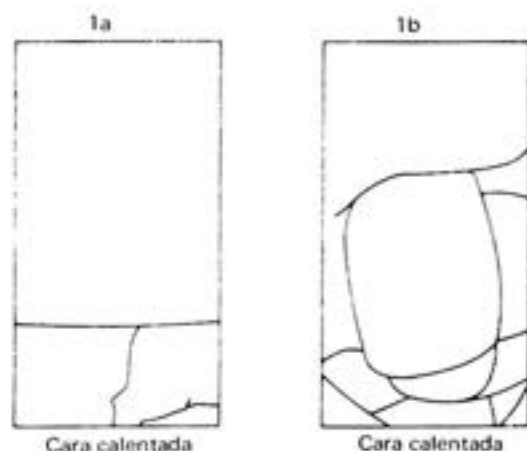


FIG. 1: Tipos de grietas al enfriar o calentar bruscamente ladrillos refractarios.

El análisis teórico que se verá a continuación separará por completo los efectos originados por los esfuerzos de corte o cizalle, de los efectos originados por los esfuerzos de tensión.

a) Spalling Térmico causado por esfuerzos de corte: Considérese para los efectos de análisis un trozo de ladrillo refractario que se supondrá que es un sólido elástico y homogéneo, en el cual se extrae calor bruscamente desde una de sus caras (supuesta plana e infinita), tal como se ve en la figura 2.

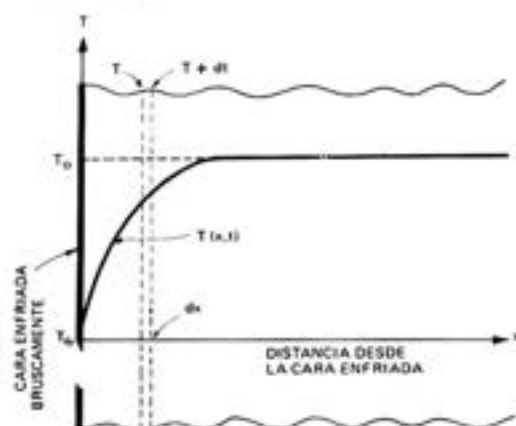


FIG. 2: Perfil térmico de un refractario enfriado bruscamente.

El perfil térmico resultante $T(x, t)$ puede evaluarse a partir de la ley de Fourier de flujo calórico no estacionario:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

con:

$$a^2 = \left(\frac{K}{C_p \rho} \right) = \text{difusividad}$$

Resolviendo la ecuación diferencial anterior se obtiene:

$$T(x, t) = A + B \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right)$$

y derivando esta expresión con respecto a x , manteniendo t constante, se obtiene el gradiente de temperatura en cada punto:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = \left(\frac{2 T_0}{\sqrt{\pi}} \right) \cdot e^{-\left(\frac{x^2}{4 a^2 t} \right)} \cdot \left(\frac{1}{2a\sqrt{t}} \right)$$

Por consiguiente, en el interior del refractario aparecerán planos isotérmicos (líneas punteadas en la figura 2), y así entre los planos isotérmicos T y $T + dT$ existirá un gradiente $(\partial T / \partial x)$ que puede evaluarse usando la expresión recién encontrada. Ocurre entonces que como en el plano de mayor temperatura el refractario estará más dilatado, se genera entonces un esfuerzo de corte que quedará evaluado por la deflexión de un plano con respecto a otro, dividido por la distancia entre ellos. Si se considera entonces un eje y ortogonal a x , un trazo que en T tiene una longitud y , en el plano isotérmico $T + dT$ tendrá una longitud $(y + y \alpha dT)$, luego:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{esfuerzo} \\ \text{de corte} \end{array} \right\} = \frac{(y + y \alpha dT) - y}{dx} = y \alpha \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

ecuación que expresa que el esfuerzo cortante generado al enfriar (o calentar) un cuerpo es proporcional a su tamaño, a su coeficiente de

expansión térmica, y al gradiente de temperatura (este último ya evaluado anteriormente). Habrá un cierto valor máximo que puede resistir el refractario antes de ceder al CIZALLE (y se designará como FLEXIBILIDAD F). Puede entonces definirse la tendencia que presenta el refractario al spalling por cizalle S_c , como el cociente entre el esfuerzo considerado dividido por el esfuerzo máximo, o sea:

$$S_c = \left(\frac{\text{esf. corte}}{\text{esf. corte máx.}} \right) = \frac{\gamma \alpha \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)}{F} \approx \frac{\gamma \alpha}{F} \left(\frac{k_1}{a} \right)$$

(ya que $(\partial T / \partial x)$ se hace $\alpha(1/a)$ cuando t se hace muy grande).

b) Spalling Térmico causado por esfuerzos de tensión: al calentar o enfriar bruscamente un ladrillo se generan esfuerzos de compresión o de tracción, los que pueden llegar a fracturar el material. Como la resistencia al cizalle de los materiales frágiles (cerámicas por ejemplo) es mucho mayor que la resistencia a la tensión, el refractario fallará por tensión, cuando se enfría bruscamente.

Aprovechando la misma figura 2, se ve que al enfriar bruscamente, la corteza exterior enfriada trata de contraerse, y como esta contracción queda frenada por el núcleo que está a mayor temperatura, se genera una compresión contra el núcleo, que puede evaluarse por la conocida ley de Hooke:

$$\sigma = E \epsilon$$

pero:

$$\epsilon = \frac{\Delta y}{y} = \alpha \Delta T$$

$$\therefore \sigma = E \alpha \Delta T \approx E \alpha \left(\frac{k_1}{a} \right) \Delta x$$

y si se supone que σ_f es la tensión de fractura del material (resistencia a la ruptura):

$$\sigma_f = E \epsilon_f$$

puede entonces definirse (análogamente al caso anterior) una tendencia al spalling por tensión S_t al dividir la tensión considerada por la tensión de fractura:

$$S_t = \frac{\sigma}{\sigma_f} = \frac{E \alpha \left(\frac{k_1}{a} \right) \Delta x}{E \epsilon_f} = \frac{\Delta x \alpha}{\epsilon_f} \left(\frac{k_1}{a} \right)$$

ecuación que tiene total analogía con la de S_c .

Para verificar experimentalmente las ecuaciones de tendencia al spalling en refractarios comerciales se midieron los ciclos de enfriamiento brusco que eran capaces de soportar diversos ladrillos comerciales y se correlacionaron con el factor (α/aF) y el resultado puede apreciarse en la figura 3. Se aprecia allí una muy buena aproximación a un comportamiento hiperbólico. Aunque no aparecen allí estudiados los refractarios básicos, puede decirse que en general presentan una pobre resistencia al spalling. El carburo de silicio que tampoco aparece evaluado en la gráfica, tiene en cambio una excelente resistencia al spalling.

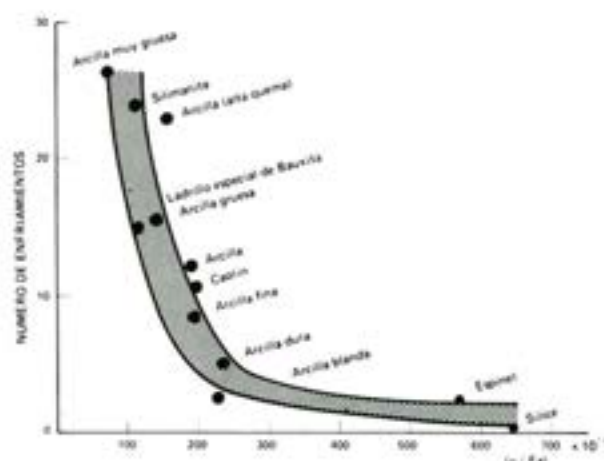


FIG. 3: Resistencia al Spalling vs. Tendencia al Spalling.¹

Resulta muy interesante hacer algunas evaluaciones reales para piezas refractarios o cerámicas sometidas a esfuerzos térmicos.

De acuerdo a la literatura² el coeficiente de dilatación media (entre 0 y 1000°C) para la mayoría de los refractarios es del orden de $10 \times 10^{-6} [K^{-1}]$, luego, al calentar bruscamente entre 0° y 1000° C, y unidireccionalmente, una cerámica cuyo módulo elástico sea del orden de 138 [GPa] (equivalente a 20×10^6 PSI)*, se genera un esfuerzo térmico igual a:

$$\sigma = 138 \times 10 \times 10^{-6} \times 10^3 = 1,38 [GPa]$$

valor que es superior a la resistencia a la ruptura de la mayoría de los refractarios.

Este primer ejemplo ilustrativo, para simplicidad de cálculo se hizo suponiendo que el esfuerzo actúa en forma unidireccional. En la práctica, sin embargo, los esfuerzos actúan en las 3 dimensiones, de modo que según sea la geometría del cuerpo considerado, los esfuerzos toman distintos valores según su forma geométrica y según si se trata de esfuerzos en el centro o bien en la superficie, tal como muestra la Tabla 1³.

* Recordar que 1 PSI = $6,8948 \times 10^3$ Pa ; 1 Pa = 1N/m²

TABLA 1

Esfuerzos térmicos en la superficie y en el centro de cuerpos elásticos de formas diversas

Forma	Superficie	Centro
Plancha gruesa infinita	$\begin{cases} \sigma_x = 0 \\ \sigma_y = \sigma_z = -\frac{E\alpha}{1-\mu} (T_a - T_s) \end{cases}$	$\begin{cases} \sigma_x = 0 \\ \sigma_y = \sigma_z = \frac{E\alpha}{1-\mu} (T_a - T_c) \end{cases}$
Placa delgada	$\begin{cases} \sigma_y = \sigma_z = 0 \\ \sigma_x = \alpha E (T_a - T_s) \end{cases}$	$\begin{cases} \sigma_y = \sigma_z = 0 \\ \sigma_x = \alpha E (T_a - T_c) \end{cases}$
Esfera maciza	$\begin{cases} \sigma_r = 0 \\ \sigma_t = \frac{E\alpha}{1-\mu} (T_a - T_s) \end{cases}$	$\sigma_t = \sigma_r = \frac{2E\alpha}{3(1-\mu)} (T_a - T_c)$
Esfera hueca	$\begin{cases} \sigma_r = 0 \\ \sigma_t = \frac{\alpha E}{1-\mu} (T_a - T_s) \end{cases}$	$\begin{cases} \sigma_r = 0 \\ \sigma_t = \frac{\alpha E}{1-\mu} (T_a - T_c) \end{cases}$

T_a = Temperatura media del cuerpo
 T_s = Temperatura de la superficie
 T_c = Temperatura del centro

A continuación y aprovechando dicha Tabla, se evaluará el esfuerzo que se genera en una barra de vidrio gruesa e infinita, cuando se enfría bruscamente desde 100° C hasta 0° C (en un baño con hielo por ejemplo). Para los efectos de aplicación del modelo de esfuerzo, puede suponerse que si la velocidad de transferencia de calor desde la superficie es alta, ella alcanza la nueva temperatura inmediatamente, pero el interior sigue con una temperatura uniforme de 100° C. Los esfuerzos de compresión que desarrolla la corteza fría contra el núcleo caliente, según la Tabla 1, son iguales en las 2 direcciones de las caras de la barra:

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{E\alpha}{(1-\mu)} (T_{\text{centro}} - T_{\text{sup}})$$

donde:

$$\mu = \left(\frac{E}{2G} - 1 \right) = \text{razón de Poisson} \quad (G = \text{módulo de rigidez})$$

Para un vidrio típico: $E = 70$ [GPa], $\alpha = 10 \times 10^{-6}$ [K⁻¹], y $\mu = 0,20^{**}$, luego:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{70 \times 10 \times 10^{-6}}{(1 - 0,20)} \times (100 - 0) = 0,875 \text{ [GPa]} = \\ &= 875 \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

** Para materiales cerámicos $\mu = 0,2 - 0,3$

valor que es superior a la resistencia del vidrio (≈ 70 MPa), por lo que se puede esperar que se quiebre bajo esas condiciones de trabajo. Ahora si en lugar de vidrio común se emplea vidrio Pyrex, cuyo coeficiente $\alpha = 3 \times 10^{-6}$, se tiene:

$$\sigma = \frac{70 \times 3 \times 10^{-6}}{(1 - 0,2)} \times (100 - 0) \approx 26 \text{ [MPa]}$$

en cuyo caso no hay peligro de fractura.

RESISTENCIA AL CHOQUE TERMICO

Conocidos y evaluados hasta aquí algunos esfuerzos térmicos que pueden generar o no fracturas, interesa ahora evaluar la resistencia al choque térmico. Para tal efecto, conviene definir 2 parámetros de gran importancia:

$\Delta T_f \equiv$ variación térmica necesaria para la fractura

$\sigma_f \equiv$ resistencia a la fractura

Si se considera por ejemplo la barra del cálculo anterior:

$$\sigma_f = \frac{E\alpha}{(1-\mu)} \Delta T_f$$

y reescribiendo:

$$\Delta T_f = \frac{\sigma_f (1 - \mu)}{E \alpha}$$

Si en lugar de la barra anterior se emplea otra de geometría diferente, como se puede ver en la Tabla 1, la ecuación anterior se vería afectada por un "factor de forma FF", y se tendría:

$$\Delta T_f = \left[\frac{\sigma_f (1 - \mu)}{E \alpha} \right] \cdot FF$$

pero resulta que todo el factor que multiplica al FF es una constante del material, entonces conviene definirlo como:

$R \equiv$ factor de resistencia del material al choque térmico.

Luego:

$$\Delta T_f = R \cdot FF$$

Se puede concluir entonces que la resistencia al choque térmico R se ve favorecida con una alta resistencia a la compresión, con un bajo módulo de elasticidad, y un bajo coeficiente de expansión térmica. Las expresiones anteriores sólo son válidas cuando el enfriamiento es lo suficientemente rápido como para que la temperatura superficial alcance su valor final antes que cambie la temperatura media del cuerpo.

Toda la teoría anterior se ha basado en suponer que el inicio de la fractura del refractario (nucleación de las grietas) ocurre cuando las condiciones de flujo calórico son tales que la tensión térmica producida alcanza el valor de la tensión de fractura del material. Ocurre, sin embargo, que los refractarios en general contienen, desde su fabricación, diversas grietas que son capaces de actuar como concentradoras de esfuerzos, de modo que las fracturas producidas pueden sólo tener efectos locales. Lo que sí preocupa es la propagación catastrófica de las grietas, y para esto la teoría de fracturas predice que la resistencia a la propagación de las grietas toma la forma:

$$R' = \frac{E}{\sigma_f^2 (1 - \mu)}$$

relación que expresa un efecto totalmente inverso de los factores E , σ_f y μ . Por ello, la selección de las características del material refractario para evitar la iniciación de las grietas es opuesta al caso en que la selección pretenda evitar la propagación de dichas grietas.

Por consiguiente, ya que en refractarios se tolera la existencia de pequeñas grietas, se puede mejorar la resistencia a la propagación catastrófica de ellas, introduciendo heterogeneidades microestructurales que sean capaces de absorber las tensiones que deben liberarse cuando el material se somete a esfuerzos térmicos. Dicho sea de paso, ésta es una de las razones por la que los ladrillos aislantes (muy porosos) tienen alta resistencia al spalling térmico.

Queda en claro que la microestructura tiene mucha importancia en la resistencia de los refractarios al spalling, al igual que la distribución granulométrica. La figura 4^a ilustra por ejemplo, la incidencia de la granulometría en la resistencia al choque térmico de probetas de cromo-magnesita en proporción 75/25. Los granos se han agrupado en 3 rangos: gruesos (7-25 mallas), medianos (25-72 mallas) y finos (bajo 72 mallas). Como tope se ha tomado aquí 30 ciclos térmicos. En general se aprecia que los granos gruesos mejoran la resistencia al spalling.

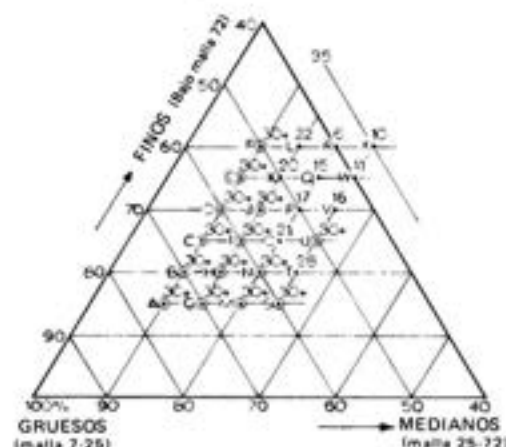


FIG. 4: Influencia de la granulometría sobre la resistencia al choque térmico en probetas de cromo-magnesita 75/25.

4. ENSAYOS

Conocidas ya las causas del fenómeno de spalling de refractarios, interesa conocer ahora las metodologías existentes para evaluar en laboratorio el comportamiento de estos materiales frente al spalling térmico.

Para este efecto, se han revisado las normas más usuales y se han resumido en la Tabla 2 con objetivos de comparación. Como complemento se ha añadido a esta tabla, en la última columna, las características más importantes de una metodología desarrollada en los Laboratorios del Departamento de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Santiago.

TABLA 2. Cuadro Comparativo de las Normas sobre Ensayos de Spallino

	DIN 51068-1 ⁵	ASTM C38-68 ⁶	BS ⁷	USACH-Met.80 ⁸
Método	Probeta aislada, enfriada en agua	panel enfriado con agua fría pulverizada	probeta aislada, enfriamiento al aire	probeta aislada, enfriamiento en agua
Rango de temperatura	950-10 a 20° C	Variable	1000 ó 1200° C. -T. ambiente	1000° C - 0° C
Probetas	Cilíndricas: 50 mm ± 0,5 mmφ 50 mm ± 0,5 mmH	ladrillos de: 4" x 2 1/2" ó 3" x 4 1/2" (230x65 ó 76x165mm)	prismas 3"Hx2"x2" (76x51x51mm)	prismas 1" x 1" x 1" (25 mm por lado)
Evaluación	según número de ciclos soportados (máximo 30)	por pérdida de peso después de N° ciclos específico	según número de ciclos hasta que se rompe al flexarla (máximo 30)	según número de ciclos hasta que se rompe al flexarla (máximo 20)
Costo	ensayo corto y barato; no requiere horno especial	ensayo largo y caro; requiere horno especial y antoxos	ensayo corto y barato; no requiere equipo especial	ensayo corto y barato; no requiere equipo especial

REFERENCIAS

1. F.H. NORTON: "Refractories", p. 251, Mc Graw-Hill, N.Y., (1968).
2. L.H. Van VLACK: "Physical ceramics for Engineers", p. 143-144, Addison-Wesley, (1964).
3. W.D. KINGERY et al.: "Introduction to Ceramics", p. 819, John Wiley, N.Y., (1976).
4. J.H. CHESTERS: "Refractories: Production and Properties", p. 234, The Iron and Steel Institute, London, (1973).
5. ANONIMO: Norma DIN 51068-1.
6. ANONIMO: Norma ASTM C 38-68.
7. ANONIMO: Norma BS.
8. J. BALLESTEROS: Tesis Ing. Ejec. Met., Depto. Metalurgia U.T.E. (1980).

Properties", p. 234, The Iron and Steel Institute, London. (1973).

5. ANONIMO: Norma DIN 51068-1

6. ANONIMO: Norma ASTM C 38-6

7. ANONIMO: Norma BS.

8. J. BALLESTEROS: Tesis Ing. I

Metalurgia U.T.E., (1980).

 **KÜPFER
HNOS. S.A.**

LIBERTAD 58 - CASILLA 294 V - CORREO 21 - FONO 98821

**Un Siglo
de Experiencia
al Servicio
del Progreso**

PROVEEDORES DE LA INDUSTRIA

ACEROS • FERRETERIA INDUSTRIAL
SOLDADURAS • SEGURIDAD INDUSTRIAL

VALPARAISO
Serrador, Domingo 1477
Fono. 52891

ANTOFAGASTA
Aconcagua 573
Fono. 725537

CONCEPCION
Lirioyan 601
Fono. 22287

COPIAPO
Villa Lda. Bata O'Higgins 118
Fono. 33617

GR. Servicios Publicitarios