

MATERIALES REFRACTARIOS NO CONFORMADOS REFORZADOS CON FIBRAS METÁLICAS⁽¹⁾

J.E. SIERRA DE COZAR

Suref, S.A. (Madrid)

Resumen

Se analizan los condicionamientos teóricos y técnicos que han impulsado la utilización de fibras metálicas como refuerzo de los materiales refractarios. Se describen algunas de las limitaciones derivadas de la posible oxidación en caliente de las fibras, así como los diferentes tipos existentes.

Unshaped refractory materials reinforced with metallic fibres

An analysis is made of the theoretical and technical conditionings that have impelled the utilizing of metallic fibres as reinforcement of refractory materials. Some of the limitations derived from the possible oxidation in hot of the fibres are described together with the different types existing.

Matériaux réfractaires non conformés renforcés avec des fibres métalliques

On analyse les conditionnements théoriques et techniques qui ont poussé la utilisation des fibres métalliques comme renfort des matériaux réfractaires. On décrit quelques limitations dérivées de la possible oxydation à chaud des fibres, ainsi que les différents types existants.

Feuerfeste, nicht geformte Materialien mit Metallfaserverstärkung

Theoretische und technische Bedingungen werden analysiert, die zur Anwendung von Metallfasern als Verstärkung für feuerfestes Material geführt haben. Eine Beschreibung wird gegeben über einige der Beschränkungen, die sich ergeben durch die mögliche Oxydation der Fasern im Hitzeverfahren, sowie eine Aufzählung vorkommender Typen.

1. INTRODUCCION

El uso de las fibras metálicas para mejorar algunas características como la resistencia a la flexotracción, al choque térmico y a los impactos de productos cerámicos ha sido investigado desde 1954. Se han estudiado por ejemplo, fibras de acero inoxidable en compuestos silico-aluminosos, fibras de Mo y W en compuestos de mullita y zircón, etc. y se ha comprobado que la degradación del componente metálico durante la cocción de los productos reforzados es la mayor limitación en el desarrollo de estos compuestos.

Por lo que a materiales no conformados concierne, a comienzos de los sesenta se llevaron a cabo los primeros estudios que abrieron el camino al actual y extendido interés por los hormigones reforzados con fibras de acero como material de construcción.

En 1971 tuvo lugar la primera instalación de cemento portland con fibras de acero al carbono en un pavimento para tráfico rodado y seis años después ya se habían empleado más de 10.000 Tm. de fibras de acero en diversas aplicaciones. Este éxito condujo de forma lógica a considerar la posibilidad de la utilización de las fibras de refuerzo en el campo de los refractarios no conformados, productos que, en comparación con los materiales cerámicos cocidos presentan aspectos diferenciales.

a) Con hormigones refractarios se pueden moldear piezas diversas a temperatura ambiente, sin que precisen sinterización previa a su empleo.

b) Con frecuencia, un revestimiento con hormigones o apisonables refractarios supone espesores relativamente grandes, de forma que sólo una parte del refractario está sometido a la temperatura de operación.

c) Gran número de aplicaciones comportan calentamiento periódico por lo que la temperatura media del revestimiento no alcanza la de equilibrio de modo permanente.

En estas circunstancias, las propias fibras o al menos una gran parte de las mismas, estarán expuestas a una temperatura admisible, por debajo de la temperatura de trabajo, y conservarán resistencia bastante para mantener reforzado al revestimiento en su totalidad. El crecimiento del empleo de refractarios no conformados reforzados con fibras metálicas se vió frenado inicialmente por el elevado coste de las fibras del alambre estirado usadas como refuerzo. La aparición en 1974 de las denominadas fibras de extracción directa (melt extraction) proporcionó un gran impulso a los compuestos refractario-fibra de tal modo que en 1979 se instalaron 35.000 Tm. de hormigón reforzado frente a las 650 Tm. de 1974 y las 5.000 Tm. de 1976.

2. TEORIA DEL REFUERZO

Se ha comprobado que, bajo ciertas condiciones, la adición de fibras de acero a un hormigón refractario permite a este soportar cargas a flexo-tracción superiores a las que producirían su rotura en el caso de ausencia de refuerzo.

(1) Original recibido el 1 de junio de 1985.

Por otra parte, el trabajo adicional necesario para arrancar las fibras de la matriz en el plano de rotura proporciona un cierto grado de ductilidad a la, de otro modo, frágil matriz.

En diferentes trabajos de investigación se ha tratado de establecer un modelo matemático que refleje la influencia del refuerzo metálico en una matriz de hormigón. Según una primera teoría, la carga última de rotura a flexión del compuesto reforzado se expresa por la ecuación siguiente:

$$\sigma_{ult} = K \cdot V_f \cdot F_a \cdot L/D$$

en la que, σ_{ult} = carga post-rotura del compuesto reforzado; K = una constante dependiente de la orientación de las fibras; V_f = porcentaje en volumen de fibras; F_a = índice o factor de adherencia fibra-matriz y L/D = relación longitud/diámetro de las fibras (índice aspecto).

Según dicha ecuación, la carga de rotura puede incrementarse mediante:

- Mayor adición de fibra
- Empleo de fibras con elevada razón longitud/diámetro
- Uso de fibras con mayor índice de adherencia
- Favorable alineamiento u orientación de las fibras.

Sin embargo existen factores de tipo práctico que no permiten incrementar de forma ilimitada la resistencia del compuesto:

Volumen de fibras.—Se ha comprobado que adiciones de fibras superiores al 2% en volumen no compensan por su mayor coste y dificultad a un 3-4% en peso de un hormigón refractario denso. Recientemente se han desarrollado nuevas técnicas, tal como la llamada «infiltración de lechada» con la que se logran adiciones del orden del 6-16% en volumen.

Tamaño de la fibra.—La relación $L/D = 100$ se considera el umbral máximo para que las fibras se puedan incorporar físicamente a la masa refractaria. A igualdad de índice aspecto, se mezcla mejor la fibra más corta.

Factor de adherencia.—En razón a la forma y superficie de las fibras se asigna índice 1 a las fibras de alambre liso, y 1,2 a las ya citadas de extracción directa y también a las de alambre deformadas o con extremos doblados.

Orientación de las fibras.—Parámetro raras veces susceptible de manejo, y que precisamente es opuesto al concepto inicial del refuerzo con fibras que supone una dispersión irregular.

Una segunda teoría, aunque anterior en el tiempo, se basa en el control de agrietamiento a que las fibras dan lugar. Puesto que la carga de rotura del hormigón disminuye con el mayor tamaño de las fisuras inherentes al material, puede deducirse que la resistencia a la tracción del compuesto hormigón-fibra se incrementará a mayor cantidad de fibras o lo que es igual cuando la distancia media entre fibras disminuya. Se ha puesto de manifiesto que dicha resistencia es función inversa del espaciado entre fibras, que viene dado por:

$$E = 13,8 \cdot D \sqrt{1/V_f}$$

3. MECANISMOS DE ROTURA

En la figura 1 se representan curvas esquemáticas de relación carga/deformación hasta rotura, típicas de los

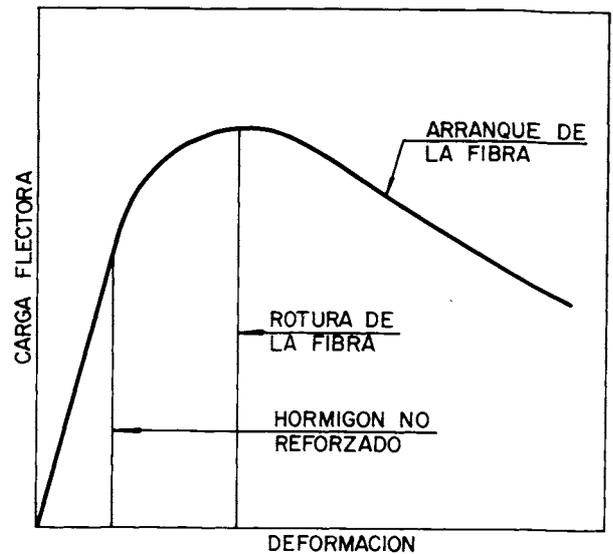


Fig. 1.

compuestos reforzados. La zona de la izquierda, de forma triangular, representa el modo de rotura brusca (línea vertical) de un hormigón convencional no reforzado y su total incapacidad para soportar cargas tras la rotura.

En la zona adyacente, la presencia de las fibras determina un notable aumento de la carga necesaria para la rotura por tracción de aquellas, pero una vez que se produce tampoco se sigue soportando carga alguna (segunda línea vertical). La absorción de energía del compuesto, representada por área bajo la curva, es mayor que en el primer caso pero no la máxima que se alcanza cuando las fibras no rompen bajo el efecto de la carga sino que son arrancadas de la matriz de hormigón. En esta situación el compuesto reforzado es capaz de resistir cargas después de la fractura de la base cerámica y la absorción de energía, medida por la superficie bajo la curva, es sensiblemente superior.

Esta capacidad de absorción de energía que, de alguna forma, se ha tratado de cuantificar y presentar como índice del comportamiento previsible de un hormigón reforzado, está en función de los factores que según la ecuación anterior determinan el valor de la carga de rotura, según se indica en la figura 2.

4. EFECTOS DEL REFUERZO

Los resultados prácticos de mayor interés derivados de la incorporación de fibras metálicas de refuerzo a masas refractarias se refieren a su influencia positiva sobre el agrietamiento y el efecto de anclaje o armadura interna del revestimiento. De estas dos ventajas se derivan mejoras de otras características como resistencia a la erosión, al choque térmico, a vibraciones, a ciclos térmicos, a impactos, etc. Figuras 3 y 4.

La integridad física de un revestimiento de hormigón refractario depende en gran parte de la contracción al secado y calentamiento y de las tensiones térmicas inducidas. La contracción de la cara caliente precede a la de la zona fría, la tensión sobrepasa la resistencia del material y se forman grietas normales a la superficie, las mayores

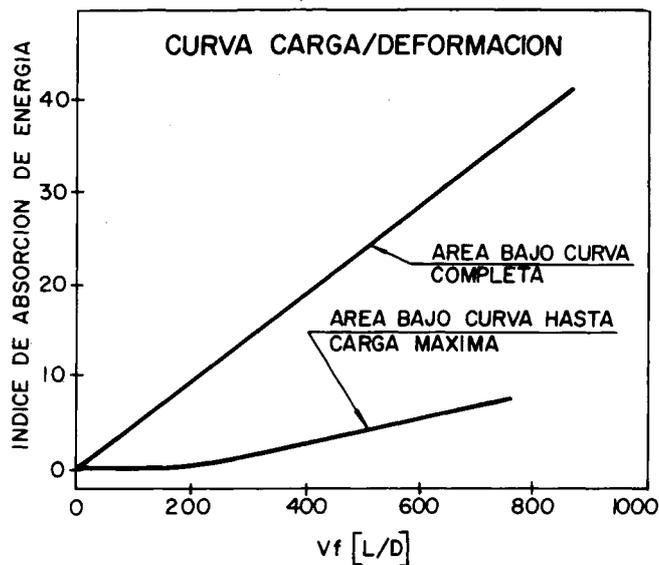


Fig. 2.

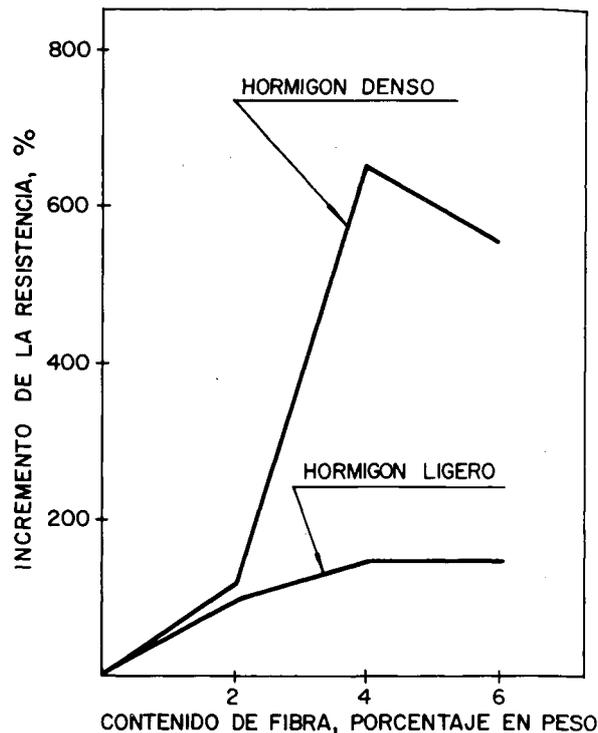


Fig. 4.

de las cuales se propagarán preferentemente debido a la concentración de las tensiones.

La presencia de las fibras metálicas da lugar a una redistribución de las tensiones con formación de una red de fisuras muy finas normales a la superficie de unión fibra-matriz. Las pocas en número y estrechas grietas que pueden verse en la superficie del revestimiento después del calentamiento inicial se atribuyen a tensiones residuales. Esta estructura de microfisuras favorece sensiblemente la resistencia del revestimiento a la fractura, ya que tensiones posteriores se desarrollarán en la dirección de las microgrietas existentes y aunque la matriz pueda romper, muchas fibras metálicas seguirán «puenteando» los bordes de la fractura.

El desarrollo de tal estructura puede también consi-

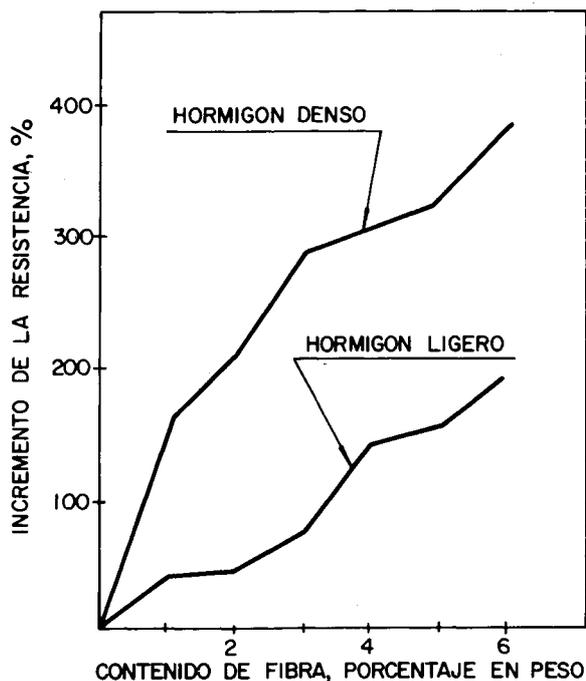


Fig. 3.

derarse en términos de subdivisión del revestimiento monolítico en muchas piezas entrelazadas como un rompecabezas, unidas por las fibras. En el análisis de la tensión térmica a que está sometido un refractario, que es proporcional a la superficie perpendicular al flujo de calor, al coeficiente de dilatación y al gradiente térmico, la estructura de microgrietas puede suponer una enorme reducción del factor superficie y por tanto de la tensión. Esta analogía está apoyada en la práctica cuando se ha observado hormigones reforzados en los que las fibras metálicas se han quemado y/o corroído, a pesar de lo cual el revestimiento permanecía intacto y con una resistencia notable al choque térmico.

5. CORROSION EN CALIENTE

Una de las limitaciones en el empleo de fibras metálicas como refuerzo de materiales refractarios no conformados viene dictada por su pérdida de resistencia al ser sometidas a elevadas temperaturas, fenómeno íntimamente ligado a la presencia de diferentes elementos en la atmósfera en la que el refractario opera. Así, por ejemplo, el acero al carbono que resiste oxidación hasta 540°C, en atmósfera de SH₂ sólo puede usarse a 260°C, en tanto que en una atmósfera de nitrógeno podría soportar hasta 980°C.

De las investigaciones realizadas resulta:

- a) El factor más importante para reducir la corrosión de una aleación de acero es el cromo, en proporciones superiores al 25%.
- b) Un segundo factor es la cantidad de silicio presente en la aleación, dentro de los límites establecidos. A más Si mayor resistencia a la corrosión.
- c) La presencia del níquel en la composición del acero favorece la resistencia mecánica de éste a temperaturas altas.

Otro factor que también contribuye al desarrollo de la corrosión del componente metálico, es el calentamiento cíclico. Expansión y contracción repetidas favorecen el contacto agente corrosivo-metal. En la tabla I se indican las temperaturas límite recomendadas en servicio continuo o intermitente para diversas aleaciones, aunque es preciso notar que se refieren a calentamiento en el aire que, en la práctica no se produce al estar las fibras inmersas en el interior del refractario.

TABLA I: TEMPERATURAS DE OXIDACION

ALEACION AISI	Componentes		Servicio Intermitente °C	Servicio Continuo °C
	Cr	Ni		
302	17-19	8-10	870	925
304	18-20	8-12	870	925
309	22-24	12-15	980	1095
310	24-26	19-22	1035	1150
316	16-18	10-14	870	925
321	17-19	9-12	870	925
330	14-17	33-37	1035	1150
347	17-19	9-13	870	925
409	11-13		815	705
430	14-18		870	815
446	23-27		1175	1095

Por lo que se refiere al efecto de la atmósfera, en la tabla II se resumen los resultados de estudios realizados y en la que se señalan los índices relativos de corrosión de diferentes aleaciones expuestas a distintos ambientes o combinación de éstos y la temperatura.

TABLA II: INDICE DE CORROSION RELATIVA DE ALEACIONES DE ACERO

°C	Oxidación °C	Carburización		Azufre		Azufre y Carburización		Nitruración	Reducción	Cloro	Nitrógeno		SH ₂
		980	1095	815	1095	815	980	540			540	760	540
Ac. Carbono	540										260°C		
Inox. 304	1040	P	—	4	25	3,9	16	10	2	315°C	1	1,2	2
Inox. 309	1095	6	2	1	2	1,4	3,4	4	1	—	1	1,3	1
Inox. 310	1150	1	1,8	1	2	1,4	1,8	—	1	315°C	1	1	1
Inox. 330	1205	4	1	—	24	—	—	1	P	1	—	—	P
Inox. 409	705	P	P	3	P	4	20	13	7	—	1,1	3	4
Inox. 430	870	P	3	2	P	3,4	16,8	15	2,5	—	1,1	3,2	2
Inox. 446	1205	3,5	1,8	1	1	1	1	19	1	—	1	15	1

P = comportamiento pobre. La aleación con índice 1 es la mejor en ese medio.

6. TIPOS DE FIBRAS DE REFUERZOS

Básicamente se han empleado 3 tipos de fibras de acero aleado para el reforzamiento de refractarios monolíticos, diferentes tanto en su sistema de producción, como en su forma geométrica y otras particularidades que influyen en su facilidad de instalación, coste, disponibilidad, etc.

Estos tipos de fibra son:

a) Alambre estirado

De sección circular, se obtiene de alambre de acero inoxidable estirado hasta diámetros de 0,3-0,4 mm. y cortado a la longitud deseada de 25-30-40 mm.

Con objeto de aumentar su factor de adherencia puede presentarse con deformaciones intermedias o con extremos doblados. Sus mayores inconvenientes residen en la dificultad de incorporación al refractario por su tendencia a formar bolas o erizos, su elevado porcentaje de rebote en instalación por gunitado y el frecuente bloqueo del equipo, ofreciendo por contra un eficaz refuerzo. Las calidades de acero disponibles están limitadas a las fabricaciones de alambre comercial (304-310 o similares) y su precio es elevado.

b) Láminas cortadas

De sección rectangular, procedentes de corte de láminas finas de acero, con un tamaño de 0,25 x 0,5 mm. (0,4 mm. Ø equivalente) y longitud de 25 mm. son fáciles de instalar a mano o por gunitado y resultan económicas pero no están disponibles más que en acero al carbono y en inoxidable AISI-409 lo que limita enormemente sus posibilidades.

c) «Melt extracted»

Con sección en forma de media luna, se obtienen directamente del horno de fusión, con un tamaño de 0,4-0,5 mm. Ø equivalente y longitudes normales de 25 y 35 mm. siendo las de más fácil instalación por cualquier método. En razón a su sistema de fabricación se pueden producir en teoría en cualquier calidad de aleación siendo normales las calidades 304-310-330-430 y 446.

BIBLIOGRAFIA

1. LANKARD y otros: Strengthening refractory concrete. *Industrial Process Heating* 13. (3) 1973 34-37.
2. LANKARD, D.R.: The engineering properties of SFRC. State of the art. *Batelle Dev. Corp.* 5-82.
3. HACKMAN, L.E.: Steel fibers reinforced refractories. Technical paper. American Ceramic Society. Annual Meeting. Mayo 1977.
4. PETERSON y VAUGHAN: Metal Fiber-Reinforced Refractory. Paper 51. *Corrosion/80*. Marzo, 1980.
5. HACKMAN, L.E.: Hot corrosion of steel fibers in refractories. Technical paper. American Ceramic Society. Annual Meeting. Mayo 1978.