

**INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE ENSAYO
EN LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DE
HORMIGONES AISLANTES REFRACTARIOS**

Dr. Luis A. Mennucci

SERIE II, Nº 344

INTRODUCCION

Los hormigones aislantes refractarios (HAR) constituidos por cemento alúmino-cálcico (CAC), cuyo componente mineralógico principal es un aluminato complejo de calcio y menores proporciones de sílico aluminato de calcio con agregados refractarios livianos, han adquirido en estos últimos años gran importancia por su creciente consumo, en reemplazo de refractarios aislantes de liga cerámica premoldeados en fábrica.

Esta creciente demanda se debe a las ventajas que presentan frente a aquéllos, por su tecnología más simple, economía de mano de obra en sus aplicaciones, construcción de estructuras complicadas en diferentes hornos industriales, buena aislación térmica con alta refractariedad, etc. (9).

La definición dada por la norma COPANT 375 (1972) (1) dice de estos productos que "están constituidos por una mezcla de materiales refractarios livianos, crudos y/o calcinados, de adecuada granulometría, con agregado de un cemento alúmino-cálcico que asegura el fraguado hidráulico cuando se mezcla con agua, originando materiales de baja conductividad térmica y alta porosidad". También se denominan "concreto aislante refractario". De acuerdo a esta definición, una de las características de importancia, entre otras, es la capacidad de aislación térmica a alta temperatura.

La norma ASTM C-401-70 (2) clasifica a estos materiales teniendo en cuenta la densidad aparente de volumen y la refractariedad, sin especificar la característica de conductividad térmica, mientras que la norma IRAM 12 519 (1968) (3) fija además este requisito, pero sin establecer valores de especificación del coeficiente de conductividad térmica, dejándolo librado a convenio entre productor y consumidor.

El método de ensayo adoptado en nuestro país es el de la norma IRAM 12 563 (4), similar, con ligeras variantes, al de ASTM C-417-58 (5). Ambos procedimientos son de larga duración, ya que alcanzada la temperatura de ensayo en la ca-

ra caliente de la probeta, cuyo tiempo de duración, según la misma, puede oscilar entre 3 y 5 horas, ésta debe mantenerse durante 24 horas para alcanzar un régimen de flujo unidireccional de calor constante a través del espesor de la probeta de ensayo, antes de poder efectuar las mediciones para el cálculo final. En consecuencia, el tiempo total puede llegar a 30 o más horas, por lo que resulta un ensayo, por el consumo de energía eléctrica y atención del operador, de alto costo.

La actual norma ASTM C-417-72, última revisión de la ASTM C-417-58 ha introducido algunas modificaciones del equipo y de las condiciones del ensayo que exigen un mayor tiempo de ejecución y atención del ensayo, y en consecuencia un mayor costo.

Con el objeto principal de acelerar la información de resultados a un costo menor, de que el valor obtenido sea reproducible, de lograr suficiente exactitud y que refleje, en cierta medida, el comportamiento del material en las condiciones reales de servicio, se ha creído conveniente modificar algunas de las condiciones que se especifican en el método. Para ello se han realizado una serie de experiencias, considerando como variables el espesor de la probeta de ensayo, el tiempo de calentamiento a la temperatura de régimen y el tratamiento térmico previo de la probeta de ensayo.

PARTE EXPERIMENTAL

Muestras de ensayo

Las muestras ensayadas en este trabajo son productos elaborados por la industria nacional, cedidas sin cargo alguno, o enviados al LEMIT por los usuarios para controlar sus características de acuerdo a la norma IRAM 12 519.

Se han utilizado en total diez muestras, que corresponden a las principales fábricas, dentro de las disponibles en el momento de realizar este trabajo.

TABLA I

Muestra	Tiempo de calentamiento a regimen: 6 horas \pm 1			Tiempo de calentamiento a regimen: 2 1/2 horas		
	P.E.A. (g/cm ³)	Coef. de cond. térm. (kcal/h.m.°C)	Temp. media de ensayo (°C)	Coef. de cond. térmica (kcal/h.m.°C)	Temp. media de ensayo (°C)	Diferencia (kcal/h.m.°C)
1-A	0,70	0,160	416	0,180	593	0,020
1-B	0,74	0,180	300	0,150	328	0,030
1-C	0,82	0,210	525	0,190	505	0,020
2-A	1,53	0,420	640	0,390	613	0,030
3-A	1,12	0,240	528	0,236	600	0,004
3-B	1,19	0,237	486	0,243	499	0,006
4-A	1,58	0,420	610	0,400	579	0,020
5-A	0,93	0,200	465	0,220	440	0,020
5-B	0,90	0,180	409	0,210	415	0,030
5-C	0,95	0,213	470	0,220	435	0,007
8-A	1,55	0,455	580	0,470	586	0,015
9-A	1,04	0,180	500	0,210	506	0,030
10-A	1,55	0,360	595	0,380	590	0,020

Preparación de las probetas de ensayo

Todas las probetas de ensayo se han preparado de acuerdo con las indicaciones de la norma IRAM 12 519 (1968).

De cada muestras se prepararon series de probetas de 220 mm x 50 mm x 50 mm para determinar densidad aparente de volumen, previo secado a 105-110°C y cocción a 850°C, por el método de la norma IRAM 12 530 (6) y resistencia a la rotura por flexión, previo secado a 105-110°C y cocción a 850°C, por el método de la norma IRAM 12 511.

Esta serie de probetas y determinaciones, tiene por objeto clasificar las muestras de acuerdo a la densidad aparente de volumen, especificado en la norma IRAM 12 519, y además, determinar valores de rotura a la flexión sobre productos de la industria nacional, con el fin de reunir antecedentes experimentales para sugerir, ante el Instituto IRAM de normalización, valores de especificación en la norma IRAM 12 519, ya que actualmente se dejan librados a convenio previo entre fabricantes y usuarios.

Se prepararon series de probetas, sobre cada muestra, de 450 mm x 350 mm x 30 mm y de 450 mm x 350 mm x 64 mm para determinar conductividad térmica, según método de ensayo de la norma IRAM 12 563 con 24 horas y 6 horas a temperatura de régimen.

De cada muestra se prepararon probetas de 220 mm x 114 mm x 60 mm, que fueron previamente sometidas a secado de 105-110°C y cocción durante 5 horas a temperatura, para cada caso, próxima a la de servicio recomendado. Sobre las probetas así preparadas se realizaron medidas de la conductividad térmica.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los valores que figuran en todas las tablas son promedio de dos ensayos. En la tabla I se exponen los resultados

TABLA II

Coeficientes de conductividad térmica en kcal/b.m.°C
 Espesor de la probeta de ensayo: $2,7 \pm 0,1$ cm

Muestra	P.F.A. (g/cm ²)	Tiempos de calentamiento a temperatura a. regimen				
		5 h	6 h	8 h	10 h	24 h
3-B	1,17	0,250 (189°C)	---	0,240 (195°C)	---	0,210 (194°C)
6-A	1,71	---	0,480 (213°C)	---	0,470 (211°C)	0,440 (214°C)
7-A	1,48	0,320 (197°C)	0,300 (202°C)	---	---	0,330 (201°C)
4-A	1,58	---	0,420 (610°C)	0,415 (605°C)	0,400 (615°C)	0,400 (579°C)
5-A	0,92	0,210 (463°C)	0,220 (460°C)	0,200 (459°C)	0,230 (466°C)	0,220 (462°C)
8-A	1,55	0,440 (570°C)	0,455 (580°C)	0,450 (575°C)	0,460 (480°C)	0,445 (485°C)
9-A	1,04	---	0,180 (500°C)	---	0,200 (504°C)	0,220 (510°C)

obtenidos del coeficiente de conductividad térmica, operando a 6 horas \pm 1 hora y 24 horas para alcanzar el flujo de calor constante, lo que significa una duración total del ensayo para el segundo caso, de aproximadamente 30 horas. El tiempo se cuenta desde la iniciación del calentamiento hasta la realización de las mediciones para el cálculo final.

Las temperaturas medias de ensayo son las que especifica, para cada clase de hormigón, la norma IRAM 12 519, y el espesor de probeta se ha fijado en $2,7 \pm 0,1$ cm.

De acuerdo a los valores obtenidos puede observarse que las diferencias no son muy significativas y pueden atribuirse, en gran parte, a la falta de homogeneidad de las probetas preparadas para el ensayo, a pesar de su misma densidad aparente de volumen.

En la tabla II se muestran los valores obtenidos del coeficiente de conductividad térmica sobre cuatro muestras, de densidad aparente de volumen diferentes, y operando con espesor de la probeta de ensayo constante, $2,7 \pm 0,1$ cm temperatura media de ensayo aproximadamente iguales, pero con tiempos de calentamiento a temperatura de régimen variables.

Como puede observarse los resultados son bastante concordes.

En la tabla III, se exponen los resultados obtenidos del coeficiente de conductividad térmica de siete muestras diferentes de hormigones refractarios aislantes, operando a iguales temperaturas medias de ensayo y tiempo de calentamiento a temperaturas de régimen (6 horas \pm 1 hora), pero para espesores de probeta de $2,7 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$ y $5,4 \pm 0,1 \text{ cm}$. Como puede observarse, las diferencias, para cada muestra, aumentan ligeramente con el espesor.

Las diferencias observadas pueden atribuirse además de la indicada en la primera serie de experiencias, a que con mayor espesor de la probeta y con un tiempo de calentamiento a temperatura de régimen de seis horas, persiste en el espesor ensayado un mayor porcentaje de liga hidráulica (capas próximas a la cara fría de la probeta), estructura ésta que posee mayor conductividad térmica, como consecuencia del agua ligada químicamente al cemento alúmino-cálcico (7, 8, 9).

TABLA III

Tiempo de calentamiento a temperatura de regimen: 6 ± 1 hora
 Coeficiente de conductividad térmica a temperatura media en kcal/h.m.°C

Muestras	P.E.A. (g/cm ³)	Temp. media de ensayo (°C)	Espesores de probeta de ensayo (cm)		Diferencias (kcal/h.m.°C)
			2,7 ± 0,1	5,4 ± 0,1	
1-A	0,70	490	0,160	0,200	0,040
1-B	0,74	514	0,180	0,250	0,050
5-A	0,93	465	0,200	0,260	0,060
5-B	0,90	409	0,180	0,270	0,090
4-A	1,58	610	0,420	0,470	0,050
3-B	1,19	486	0,240	0,280	0,040
2-A	1,53	640	0,420	0,470	0,050
8-A	1,54	580	0,456	0,491	0,035
6-A	1,71	215	0,480	0,530	0,050

En la tabla IV, se exponen los resultados obtenidos operando sobre probetas de ensayo sometidas previamente a un tratamiento térmico a temperatura próxima a la de servicio recomendado, con el objeto de eliminar en todo el espesor ensayado, la liga hidráulica y desarrollar en alto porcentaje la liga cerámica.

Los valores aumentan significativamente, como consecuencia de que en la estructura del espesor ensayado se desarrolla en alto grado la liga cerámica con modificación de la distribución y tamaño de los poros, aumento de la fase vítrea, etc. Estos resultados están de acuerdo con los antecedentes bibliográficos (9).

Esta forma de operar no significaría un mayor costo de ensayo, siempre y cuando se realicen en estos materiales todos los ensayos exigidos en la norma IRAM 12 519, ya que las probetas destinadas para el ensayo de variación lineal permanente por cocción a temperaturas de servicio recomendadas, podrán utilizarse para determinar el coeficiente de conductividad térmica, pero siguiendo las condiciones expresadas en la norma IRAM 12 561 (6) que se refiere a ladrillos refractarios aislantes de liga cerámica con un tiempo de duración de aproximadamente 7 horas, en vez de 24 horas que se exige en la norma IRAM 12 563 para los hormigones refractarios aislantes.

CONSIDERACIONES GENERALES

De los valores obtenidos en la serie de experiencias realizadas, puede establecerse que los coeficientes de conductividad térmica no difieren mayormente (diferencias aceptables), cuando se opera con un espesor de probeta determinado en un tiempo de calentamiento a temperatura de régimen de 6 horas \pm 1 hora y 24 horas.

De las diferentes formas de operar, que se mencionan en este trabajo, el valor del coeficiente de conductividad térmica se aparta de las condiciones de servicio, por cuanto pueden resultar diferentes. Así la temperatura de cara calien-

TABLA IV

Coefficientes de conductividad térmica en kcal/h.m.°C
Espesor de la probeta de ensayo 2,7 ± 0,1 cm

Muestras	Secado previo a 105-110°C	Cocción previa a temperatura de uso	Diferencias (kcal/h.m.°C)
1-A	0,170 (564°C)	0,240 (595°C)	0,07
1-B	0,180 (300°C)	0,270 (320°C)	0,09
2-A	0,420 (640°C)	0,580 (666°C)	0,16
7-A	0,340 (590°C)	0,440 (585°C)	0,10
3-A	0,240 (528°C)	0,350 (530°C)	0,11
5-A	0,200 (465°C)	0,340 (470°C)	0,14

te es generalmente muy superior a la de ensayo; igualmente ocurre con el espesor y el tiempo de calentamiento, lo cual conduce a que en el espesor de la estructura de aislación se desarrollen capas paralelas de características físico-químicas diferentes. Sin embargo, la forma de operar con probetas fraguadas y secadas previamente a 105-110°C se considera más correcta que la de operar con probetas previamente sometidas a cocción a temperaturas vecinas a las de servicio.

Es de conocimiento que en estos materiales sílico-aluminosos, la conductividad térmica aumenta con la temperatura hasta aproximadamente 1 200°C, por cuanto dentro de este rango de temperaturas la mayor transferencia de calor se produce por conducción y convección, mientras que por encima de los 1 200°C comienza a predominar la transferencia de calor por radiación, donde la ecuación aplicada en la norma IRAM 12 560, para el cálculo del coeficiente de conductividad térmica no es válida. Esto conduce a que en todo procedimiento de ensayo, para medir esta temperatura, es necesario fijar la temperatura media (promedio de las temperaturas de cara caliente y cara fría).

La temperatura media de una pared de aislación dependerá, para una temperatura de cara caliente determinada, del coeficiente de conductividad térmica, del espesor de la pared de aislación, si la cara fría está o no refrigerada y del tiempo de exposición para alcanzar el estado de régimen, es decir, cuando las temperaturas de cara caliente y de cara fría no varían. Debe hacerse notar, que para una temperatura de cara caliente constante, para tiempos de exposición prolongados, la temperatura de la cara fría aumenta, rápido al comienzo y muy lentamente después de alcanzar un régimen estacionario, debido a que la estructura del material se modifica.

La norma IRAM 12 519 ha fijado valores de temperaturas medias de ensayo, para cada clase de hormigón, dentro de rangos de temperaturas donde la liga hidráulica del material se destruye (300-600°C). Estos rangos son crecientes a medida que la refractariedad del material aumenta.

Por último debemos señalar que se ha preferido realizar este trabajo operando sobre materiales de producción nacional,

en vez de usar un material preparado en el laboratorio, de composición química y características físicas bien definidas, con el fin de incluir todas las posibles variables tecnológicas de elaboración. De este modo se llegan a establecer las bases para futuras especificaciones relativas a las características de conductividad térmica y de módulo de rotura a la flexión previo secado a 105-110°C y cocción a 850°C, valores éstos aún no fijados en la actual norma de clasificación.

Esta conducta ha sido siempre, uno de los objetivos del LEMIT en los trabajos de investigación aplicada a productos de la industria nacional, tendientes a un mejor conocimiento de los mismos, para lograr un adecuado uso en condiciones de servicio muy generales y de este modo, a través de una correcta normalización, contribuir a mejorar la calidad.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo a las experiencias realizadas se deduce que, operando con espesor de probeta de ensayo de $2,7 \text{ cm} \pm 0,1$ centímetros, en tiempos de calentamiento a temperatura de régimen de 6 horas ± 1 hora, se puede reemplazar la condición establecida en la norma IRAM 12 563 con resultado de la misma exactitud y como consecuencia el procedimiento resulta más rápido y económico.

2. La forma de operar con mayor espesor de probeta a temperatura media comprendida dentro del rango de temperaturas indicado en la norma IRAM 12 519, significaría trabajar a mayores temperaturas en cara caliente con mayores tiempos de calentamiento, lo cual conduce a un encarecimiento innecesario del costo del ensayo.

3. Los valores que se obtienen del coeficiente de conductividad térmica, operando con probetas sometidas previamente a temperatura de cocción vecinas a la de uso recomendado, no reflejarían con suficiente aproximación a las condiciones reales de servicio, ya que la probeta de ensayo expe-

rimenta en ambas caras, la acción de temperaturas de servicio, apartándose así de las condiciones de uso, donde existe un gradiente de temperatura y composición estructural, entre cara caliente y fría.

BIBLIOGRAFIA

1. Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT-375-1972).
2. Annual Book of ASTM Standards, 1972.- Standards classification of castable refractories. C-401-70. pág. 334.
3. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.- Norma IRAM 12 519, Hormigones Refractarios. 1968.
4. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.- Norma IRAM 12 563, Hormigones refractarios y refractarios plásticos; método de determinación de la conductividad térmica. 1968.
5. Annual Book of ASTM Standards, 1972.- Method of Test for thermal conductivity of castable refractories, C-417-71, pág. 353.
6. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.- Norma IRAM 12 530, Clasificación de ladrillos refractarios aislantes.
7. Blasco Betancourt, J. M.- Influencia del historial térmico previo sobre la conductividad térmica de los concretos o moldeables refractarios. III Seminario ALAFAR, tomo II, oct.-nov. 1973, Valencia (Venezuela).
8. Priskulaik, S., Tosuka, Y., Cincotto, M. A. y Sbrighi Neto, C.- Inst. de Pesquisas Tecnológicas, Sao Paulo, Publicação 942 (1972).
9. Mennucci, L. A.- Consideraciones sobre la normalización de hormigones aislantes refractarios. IV Congreso de ALAFAR. Tomo II, Trab. 12. Mar del Plata (Argentina), octubre-noviembre, 1974.