

## COMPARACIÓN DE PROPIEDADES ENTRE UN HORMIGON REFRACTARIO DE ULTRA BAJO CEMENTO Y UNO LIGADO CON ALUMINA ACTIVA

Angela X. Moreno<sup>(1)</sup>, Sara Depierre<sup>(2)</sup> y Alberto N. Scian<sup>(3)</sup>

(1) Becario CONICET – Universidad del Cauca, COLOMBIA

(2) Pasante de la École Nationale Supérieure de Céramique – Limoges, FRANCIA

(3) CONICET La Plata – Fac de Cs Exactas. Universidad Nacional de la Plata, ARGENTINA

E-mail (autor de contacto): [axmoreno@unicauca.edu.co](mailto:axmoreno@unicauca.edu.co)

### RESUMEN

*Los hormigones refractarios son elaborados mezclando distintos tipos de agregados que soportan altas temperaturas con un ligante apropiado. Usualmente y para servicios extremos se suelen utilizar cementos aluminosos mezclados con granos de alúmina. En el caso de utilizar niveles de cemento inferiores al 3% se denominan hormigones de ultra bajo cemento. En este trabajo se compararon las propiedades termomecánicas de dos hormigones refractarios, uno de ultra bajo cemento utilizando cemento aluminoso como ligante y otro en el cual el ligante es una alúmina activa parcialmente hidratada, en ambos casos se mantuvieron las mismas proporciones de áridos –alúmina tabular y calcinada, lo mismo que un porcentaje determinado de microsilíce, variando únicamente el tipo de ligante. Se utilizaron curvas granulométricas de diseño propio para la confección de los hormigones. Se determinó el requerimiento de agua necesario para su moldeo por vibración. Se evaluó el comportamiento de probetas tratadas térmicamente a 110, 800, 1200 y 1400 °C, mediante ensayos de MOR, choque térmico a 1000 °C, módulo de Young, porosidad, densidad, variación lineal y distribución de tamaño de poros. Con esta información se pretende estudiar el comportamiento de los mismos y evaluar las bondades y desventajas de cada uno de los ligantes utilizados, siendo que los sistemas que utilizan alúmina activa parcialmente hidratada no están muy difundidos actualmente en su utilización.*

*Considerando los resultados obtenidos en el presente trabajo se puede concluir lo siguiente:*

- *Se moldearon dos tipos de hormigones refractarios con igual granulometría y diferente ligante (ultrabajo cemento, hormigón 1 y alúmina parcialmente hidratada, hormigón 2) y se trataron térmicamente a 110 – 800 – 1200 y 1400 °C.*
- *El hormigón 1 requirió menor cantidad de agua que el hormigón 2 para su preparación y mostró menor porosidad, mayor resistencia mecánica a las diferentes temperaturas y mayor módulo de elasticidad que el hormigón 2.*
- *Se evaluó en ambos casos la resistencia al choque térmico observándose mejor resultados para el hormigón 2, la cual concuerda con su mayor porosidad, menor resistencia mecánica inicial y menor módulo de Young respecto al hormigón 1.*

**Tópico 4:** Materiales Cerámicos

**Palabras clave:** *Hormigón, refractario, ligante, cementos, alúmina.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los hormigones refractarios son elaborados mezclando distintos tipos de agregados que soportan altas temperaturas con un ligante apropiado. Usualmente y para servicios extremos se suelen utilizar cementos aluminosos mezclados con granos de alúmina.

Hasta los años 70 se utilizaba para la fabricación de los hormigones refractarios una cantidad de cemento que podría variar entre 10 y 20% [1-2]. Los hormigones refractarios requieren de buenas propiedades termomecánicas a alta temperatura siendo que un alto porcentaje de cemento afecta sus propiedades. De hecho una gran cantidad de CaO baja la temperatura de fusión del sistema si se trata de mezclas silicoaluminosas. Por otra parte a temperaturas muy altas la formación de  $CA_6$  ( $CaO \cdot 6Al_2O_3$ ) en sistemas con muy alta alúmina es expansiva y esto afecta en gran medida las propiedades mecánicas de las piezas acabadas. En el caso de utilizar niveles de cemento inferiores al 3% se denominan hormigones de ultra bajo cemento, minimizando los problemas mencionados.

Para lograr alta resistencia mecánica debido a la reducción de la cantidad de cemento es necesario mejorar la compactación del material, actualmente las curvas de tamaño de distribución de Andreasen siguen siendo las más utilizadas para obtener compactación máxima debido a su simplicidad. En este trabajo se utilizaron las curvas granulométricas desarrolladas en el CETMIC [3] denominadas módulo de distribución variable, este modelo consiste en variar el coeficiente n del modelo de Andreasen en forma continua para los diferentes rangos de tamaños de partículas.

En el presente trabajo se lograron comparar las propiedades de dos tipos de hormigones refractarios uno de ultra bajo cemento y otro utilizando como ligante alúmina parcialmente hidratada, evaluando la cantidad de agua necesaria para formar las probetas por vibración y distintas propiedades fisicoquímicas y termomecánicas (Variación lineal, densidad, modulo elástico, modulo a la rotura y resistencia al choque térmico) a distintas temperaturas, 110, 800, 1200 y 1400 °C.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este trabajo se elaboraron dos tipos de hormigones uno de ultra bajo cemento, 3% de cemento aluminoso y el otro utilizando como ligante un 5% de alúmina parcialmente hidratada comercial.

Para la elaboración de ambos hormigones se utilizaron curvas granulométricas con modulo de distribución variable [3] con granos de alúmina tabular y 5 % de microsilice, variando únicamente su ligante y el dispersante. En la tabla 1 se puede observar la composición y granulometría de cada hormigón y la nomenclatura utilizada en este trabajo.

**Tabla 1.** Composición y granulometría de los hormigones.

MATERIAL (Granulometría)	HORMIGON 1 (%)	HORMIGON 2 (%)
Alúmina Tabular (-6 + 8)	25	25
Alúmina Tabular (-8 + 14)	15	15
Alúmina Tabular (-14 + 28)	15	15
Alúmina Tabular (-28 )	16	16
Alúmina Tabular (-325)	14	14
Alúmina Calcinada (-325)	7	5
Sílice volátil	5	5
Cemento aluminoso, 70 % $Al_2O_3$	3	---
Alúmina activa parcialmente hidratada	---	5

Para la elaboración de los hormigones se utilizó un mezclador de alta velocidad empleándose para el Hormigón 1, 0.2% de tripolifosfato de sodio como dispersante y para el Hormigón 2, 0.18 % de

una solución de poliacrilato de sodio al 40%. Los requerimientos de agua para su elaboración por vibración fueron de 4.73 % y 5.79 % para los hormigones 1 y 2 respectivamente. Esta cantidad debe ser medida con cierta precisión debido a que un exceso de agua reduce significativamente la resistencia mecánica de las piezas terminadas, los materiales fueron moldeados por vibración en moldes metálicos (2.5 x 2.5 x 15 cm). Las probetas se dejaron secar a temperatura ambiente durante 3 días, y a 110 °C durante un día, luego se trataron térmicamente a 800 - 1200 y 1400 °C durante 3 horas.

Las probetas así obtenidas fueron caracterizadas por Modulo de Young dinámico, porosidad, absorción de agua, variación lineal respecto al conformado, modulo de rotura a la flexión (MOR) y resistencia al choque térmico ( $MOR_{cho}$ ), el cual consistió en colocar las probetas en un horno a temperatura de 1000°C en forma instantánea, manteniéndolas durante 20 minutos a esa temperatura para luego enfriarlas bruscamente en agua, evaluándose la caída del modulo de rotura luego de dicho tratamiento [4].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de someter las probetas a tratamiento térmico se evaluaron sus propiedades físicas y termomecánicas por diferentes métodos. La técnica utilizada para determinar la porosidad y la densidad fue la norma IRAM 12510 (Arquímedes). Los resultados se encuentran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Propiedades físicas de los hormigones evaluados

TEMPERATURA (°C)	HORMIGON 1			HORMIGON 2		
	VARIACIÓN LINEAL (%)	POROSIDAD (%)	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	VARIACIÓN LINEAL (%)	POROSIDAD (%)	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
800	-0.04	13.16	3.02	-0.03	15.43	2.95
1200	-0.41	15.02	3.06	-0.31	17.69	2.99
1400	-0.61	12.76	3.12	-0.36	16.70	3.03

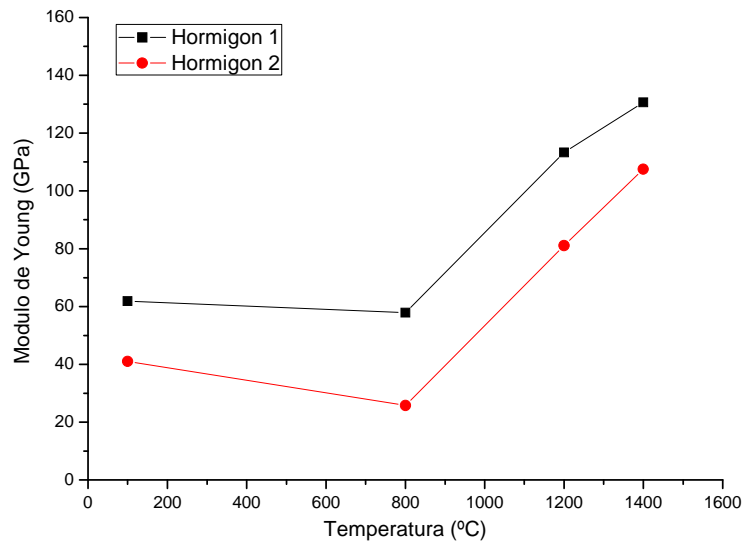
Se puede observar en la tabla 2 que la variación lineal del hormigón 2 es menor que la del hormigón 1, esto debido a que las fases vítreas apenas se estaban formando por la inexistencia de CaO en su composición a dicha temperatura, encontrándose por lo tanto muy lejos del eutéctico y/o de la temperatura de liga cerámica, en cambio el hormigón 1 alcanzó a formar algo de fase vítrea ligante mostrando incipiente sinterización y por lo tanto mayor contracción. Respecto a la porosidad el hormigón 2 es mucho más poroso con relación al hormigón 1 debido a la naturaleza misma del ligante utilizado, el cual genera una muy alta porosidad cuando es calcinado a estas temperaturas y tiempos.

El modulo de elasticidad (modulo de Young) fue evaluado en forma dinámica (ensayo no destructivo) con un equipo Grindosonic, observándose su evolución en función de la temperatura para ambos tipos de hormigones, ver figura 1. En la misma se observa que ambos comportamientos son similares en formato de curva pero encontrándose el hormigón 2 desplazado hacia valores menores de módulo.

Esto es consistente con la naturaleza misma de los ligantes, siendo que el ligante del hormigón 2 es más poroso que el 1 y que forma menos liga cerámica respecto al hormigón 1 a cualquiera de las temperaturas ensayadas. Esta afirmación es consistente también con los valores de porosidad observados, y además el hecho de que corran paralelas es debido a que más del 95% del material es el mismo en ambos casos (igual granulometría y áridos).

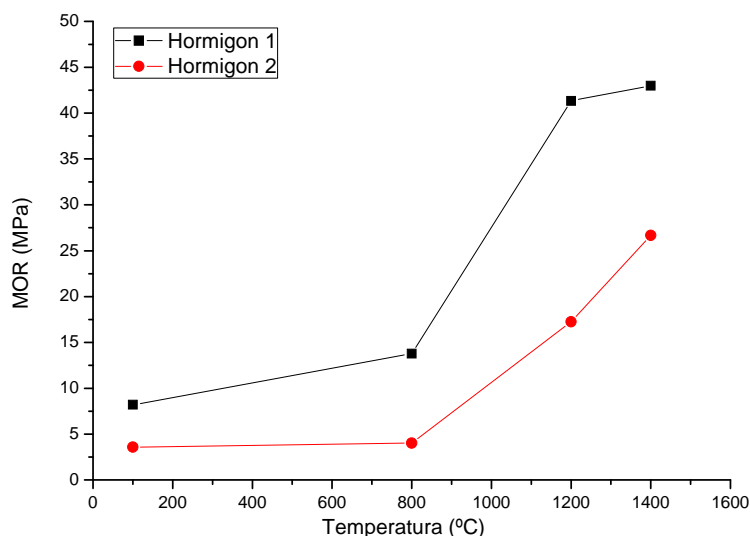
El formato de las curvas para los dos tipos de hormigones presento una caída leve del modulo hasta 800 °C y subida pronunciada entre 800 y 1400 °C esto se debe a que en el primer intervalo ambos

hormigones eliminan su agua de fraguado, perdiendo así parte de la rigidez del material. En el segundo intervalo (800-1400°C) se comienza a formar la liga cerámica por reacción de los ligantes deshidratados con los finos más reactivos de la mezcla, lo cual se incrementa a medida que aumenta la temperatura dándole mayor rigidez a las piezas. Aquí la mayor refractariedad del hormigón 2 hace que también su reactividad haya sido menor que la del hormigón 1 y se mantenga con menores valores de modulo de elasticidad.



**Figura 1.** Modulo de Young de los hormigones 1 y 2

Se midió el modulo de rotura a la flexión en tres puntos sobre las probetas tratadas térmicamente, figura 2. Se observó que el hormigón 1 presentó un pequeño crecimiento entre 110 y 800 °C debiéndose esto a la alta reactividad existente entre los compuestos provenientes de la deshidratación del cemento y la microsilice, sumado esto a la alta compactación del sistema. En cambio el hormigón 2 no modifico sus valores entre 110 y 800 °C dado que la alúmina deshidratada presente solo reacciona con la microsilice a mayores temperaturas. Por otro lado entre 800 y 1200 °C el hormigón 1 presenta un gran crecimiento que corresponde a la formación de su liga cerámica debido a la contribución del calcio presente, el hormigón 2 en cambio presentó un menor crecimiento ya que apenas comienza a formarse la liga cerámica debido a la mayor refractariedad ya mencionada. A temperaturas entre 1200 y 1400 °C el hormigón 1 mostró una menor pendiente de crecimiento debido a que su liga cerámica ya estaba bastante avanzada, en cambio el hormigón 2 presenta un ligero aumento de pendiente significando esto que el proceso de liga mencionado sigue en progreso.



**Figura 2.** Modulo de rotura a la flexión (MOR) en función de la temperatura para ambos hormigones.

Con el fin de conocer mejor el comportamiento termomecánico de los hormigones se realizó el ensayo de choque térmico, Tabla 3.

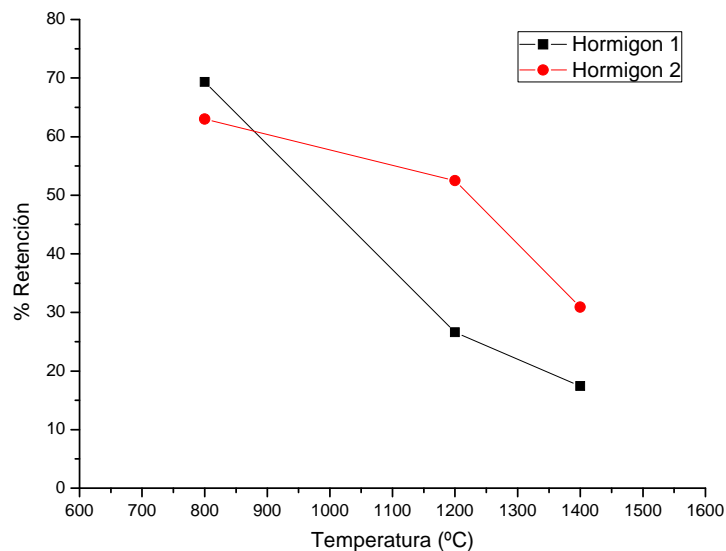
**Tabla 3.** MOR y MOR<sub>cho</sub> y % retención para los hormigones 1 y 2.

TEMPERATURA (°C)	HORMIGON 1			HORMIGON 2		
	MOR (MPa)	MOR <sub>cho</sub> (MPa)	% RETENCIÓN	MOR (MPa)	MOR <sub>cho</sub> (MPa)	% RETENCIÓN
110	8.2	/	/	3.6	/	/
800	13.7	9.5	69.33	4.0	2.5	63.0
1200	41.3	11.0	26.6	17.2	9.1	52.5
1400	43.0	7.5	17.4	26.7	8.3	31.0

En la tabla 3 se puede observar que luego de someter los hormigones ya tratados térmicamente a un choque térmico violento (MOR<sub>cho</sub>), todos quedaron con valores de MOR residual cercano a 10 MPa, salvo en el caso del hormigón 2 tratado a 800 °C, el cual ya poseía un valor de MOR bajo (~4MPa). Desde este punto de vista podría decirse que el hormigón 1 posee menor resistencia al choque térmico ya que sus valores iniciales antes del mismo eran superiores a los del hormigón 2. En la figura 3 se grafica el porcentaje de retención del MOR (MOR<sub>cho</sub> x 100/MOR) a cada temperatura y para cada tipo de hormigón. El grafico muestra que el hormigón 2 retiene mucho mejor el módulo inicial luego del choque térmico, indicando un menor deterioro del material cuando es sometido a dicha exigencia, se observa también en la misma figura que la curva que muestra la caída entre 800 y 1200 °C del hormigón 2 posee una menor pendiente respecto al hormigón 1 indicando que es esa la franja de temperaturas donde mejor trabajaría el material si es sometido a servicios donde sufre choque térmico.

Esta mejor propiedad de resistencia de choque térmico del material 2 respecto al 1 coincide con los valores obtenidos para la porosidad, tabla 2, y también con lo observado en los valores del modulo de Young, ya que mostraron un material menos rígido y por ende con mayor aptitud para absorber esfuerzos termomecánicos.

Entre 1200 y 1400 °C la caída de la retención es más abrupta para el hormigón 2, pero aun así los valores del MOR residual final son aproximadamente similares.



**Figura 3.** Porcentaje de Retención de los hormigones

#### 4. CONCLUSIONES

Considerando los resultados obtenidos en el presente trabajo se puede concluir lo siguiente:

- Se moldearon dos tipos de hormigones refractarios con igual granulometría y diferente ligante (ultrabajo cemento, hormigón 1 y alúmina parcialmente hidratada, hormigón 2) y se trataron térmicamente a 110 – 800 – 1200 y 1400 °C.
- El hormigón 1 requirió menor cantidad de agua que el hormigón 2 para su preparación y mostró menor porosidad, mayor resistencia mecánica a las diferentes temperaturas y mayor módulo de elasticidad que el hormigón 2.
- Se evaluó en ambos casos la resistencia al choque térmico observándose mejor resultados para el hormigón 2, la cual concuerda con su mayor porosidad, menor resistencia mecánica inicial y menor modulo de Young respecto al hormigón 1.

#### REFERENCIAS

1. G. Aliprandi, Refractarios y cerámica, Ed. Séptima París, 1979. (Libro).
2. F. H. NORTON, Refractarios Ed. Blume, 1971. (Libro).
3. A.N. Scian y E.F. Aglietti, “Development of a New Particle Size Distribution: Variable CCM”. Refractories Applications. American Ceramic Society Refractory Ceramics Division.3 (3) pp 6-7 (1998). (Paper).
4. N. Rendtorff, Materiales cerámicos del sistema Mullita Zirconia Zircón; propiedades mecánicas, de fractura y comportamiento frente al choque térmico. Tesis doctoral. Departamento de química, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de la Plata, 2009.