

EFFECTO DEL ENFRIAMIENTO EN PROBETAS DE HORMIGÓN EXPUESTAS A TEMPERATURA

Montanaro, María I. *, Peralta, María H. *, Di Maio Angel A †

* Docentes investigadores Area Estructura. Depto. Ingeniería Civil. Fac. de Ingeniería UNCPBA.
Avda Del Valle 5737. (7400) Olavarría. Argentina, e-mail: mmontana@fio.unicen.edu.ar

† Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT). Calle
52 e/121 y 122 (1900) La Plata. Buenos Aires. Argentina

Palabras clave: hormigón, temperatura, perfil térmico

Resumen. *La acción térmica es una de las acciones que puede soportar el hormigón durante su vida útil, tal el caso de estructuras de edificios industriales, o de aquellas afectadas por incendios. Dicha acción produce variaciones en las características mecánicas del material cuya magnitud dependerá, entre otras causas, de la distribución de las temperaturas máximas alcanzadas en la masa del elemento en análisis y de la distribución resultante según la forma de enfriamiento utilizada.*

Desde el punto de vista del comportamiento estructural el cambio de temperatura es la causa principal de las deformaciones de tracción originadas en la masa de hormigón. La predicción de tales deformaciones hace necesaria la cuantificación de las variaciones térmicas resultantes entre los diferentes puntos del elemento en estudio lo que justifica el análisis que posibilite predecir el perfil térmico tanto en el calentamiento como el enfriamiento.

El presente trabajo da continuidad a estudios previos realizados en los cuales se analizó el efecto del calentamiento en el perfil térmico de probetas de hormigón considerando en esta etapa la influencia del enfriamiento en agua y en aire. A tal fin, se utiliza el Método de los Elementos Finitos y la calibración de los modelos de análisis se realiza con los resultados experimentales disponibles. Los gradientes térmicos obtenidos con la simulación se relacionan con la pérdida de resistencia obtenida experimentalmente.

1 INTRODUCCION

El hecho de que el hormigón sea un material compuesto hace que su comportamiento bajo diferentes acciones sea complejo pues se encuentra influenciado por el comportamiento individual de las componentes y del resultante de la interacción de los mismos. Numerosas investigaciones experimentales intentan explicarlo y más recientemente investigaciones numéricas la complementan.

En el caso particular de la exposición a elevadas temperaturas, el comportamiento se encuentra influenciado, fundamentalmente, por la composición de la matriz y el tipo mineralógico del agregado grueso. Por otro lado, los niveles de temperaturas que se alcanzan y el tiempo de exposición influyen directamente en el perfil térmico resultante en el elemento afectado.

Si la acción térmica es originada por incendios la forma en que se combate el mismo tiene relevancia en la pérdida de resistencia. Si la misma, como es habitual, se realiza con agua se produce un enfriamiento rápido del elemento que produce contracciones bruscas de los materiales componentes del hormigón. Si el enfriamiento se produce más lentamente, dichas contracciones son menores y consecuentemente serán menores los efectos correspondientes.

Una de las propiedades relevantes del hormigón es su resistencia a compresión ya que en forma directa o indirecta representa la mayoría de las otras propiedades del material. La misma se evalúa a través de ensayos normalizados en probetas cilíndricas de 15 cm x 30 cm. Existen en la bibliografía resultados de estudios experimentales tendientes a evaluar el comportamiento de hormigones de diferentes características tecnológicas cuando son sometidos a altas temperaturas. En general, se trata de cuantificar la pérdida de resistencia a compresión cuando son expuestos a distintas temperaturas máximas, tiempos de exposición y tipos de enfriamientos.

En tal sentido, experimentalmente⁽¹⁾ se ha evaluado la pérdida de resistencia a compresión en probetas introducidas en horno a distintas temperaturas y diferentes tiempos de exposición. Asimismo, se cuenta con datos de monitoreo temporal de las temperaturas en el centro y la periferia para el caso de una probeta expuesta a 300°C durante 1 hora.

Trabajos previos de los autores⁽²⁾ del presente, han permitido analizar la influencia de las temperaturas máximas alcanzadas en probetas de hormigón calentadas en horno sobre la pérdida de resistencia a compresión, a partir de simulaciones numéricas tomando como referencia los estudios experimentales para la calibración de los modelos y la correlación de los resultados.

El objetivo del presente trabajo es darle continuidad a los trabajos numéricos previos realizados, a efectos de relacionar la pérdida de resistencia cuantificada experimentalmente con los gradientes térmicos obtenidos de las simulaciones para enfriamiento rápido (en agua) y lento (en aire)

2 MODELOS ANALIZADOS

El análisis se realizó con el software ALGOR⁽³⁾ sobre los mismos modelos geométricos utilizados en la publicación anterior, que representan un cuarto de la probeta cilíndrica de

hormigón de 15 cm x 30 cm. En la simulación se utilizó el elemento sólido elástico 2D de 4 nodos con dos grados de libertad traslacional por nodo. La vinculación considerada es la impuesta por las condiciones de simetría.

Se está frente a un problema transitorio o de estado no estacionario porque es necesario predecir la respuesta temporal del sistema que interviene en este proceso de transferencia de calor.

Se analizó numéricamente el enfriamiento en agua y aire tomando como temperaturas iniciales las del perfil térmico, obtenido previamente en el análisis numérico del calentamiento, en el instante de máxima temperatura. Se consideraron tiempos de exposición en horno de 0.5, 1 y 2 horas a 300 °C y 500°C correspondientes con los ensayos experimentales disponibles.

Los agregados utilizados en los hormigones de los ensayos experimentales son de origen granítico, en consecuencia se adopta un valor de conductividad térmica 2.7 J/seg. m°C⁽⁴⁾.

Los otros datos requeridos para la resolución del modelo numérico son:

Densidad de masa: 2351 kg./m³

Calor específico: 1047 J/kg°C

En la Figura 1 se muestran las correlaciones entre los datos experimentales y las simulaciones realizadas observándose que el coeficiente adecuado para este caso es $h= 13 \text{ J/m}^2\cdot\text{seg.}\cdot\text{°C}$ por ser el que mejor reproduce la respuesta, temperatura en función del tiempo, obtenida experimentalmente.

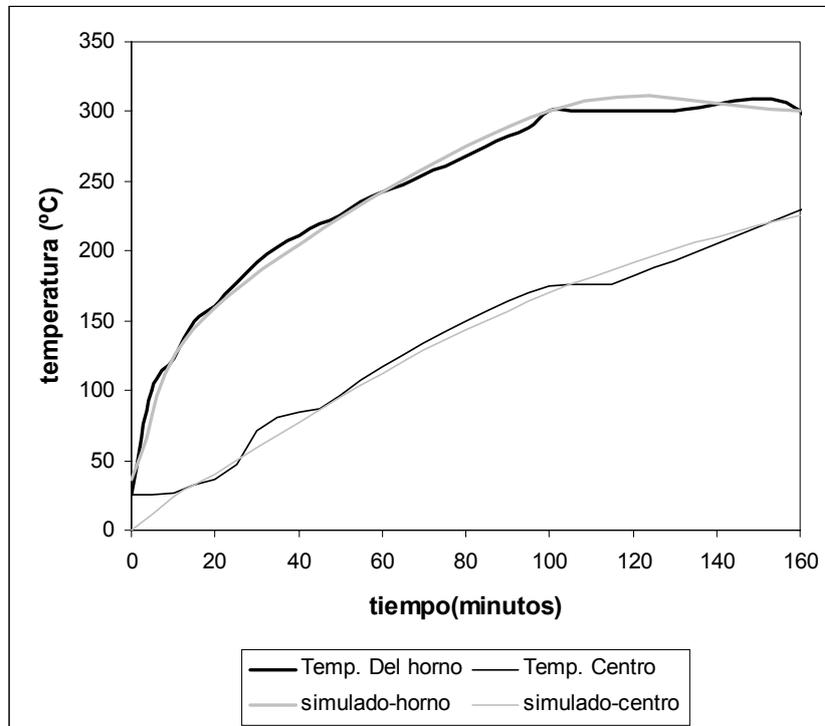


Figura 1: Correlación numérico experimental

Experimentalmente, el enfriamiento rápido se realiza rociando las probetas con chorros de agua durante media hora y el enfriamiento lento se logra apagando el horno hasta que las probetas alcanzan la temperatura ambiente, esto se denomina enfriamiento en aire.

El coeficiente de convección utilizado para las simulaciones en el enfriamiento en aire es $h= 13 \text{ J/m}^2\cdot\text{seg}.\text{°C}$ (igual valor que en el calentamiento) y para el enfriamiento en agua $h= 122.3 \text{ J/m}^2\cdot\text{seg}.\text{°C}$ ⁽⁵⁾.

3 RESULTADOS OBTENIDOS

En los modelos sometidos a 300 °C y 500 °C durante 0,5; 1 y 2 horas, se tomaron los datos de las temperaturas alcanzadas, durante el enfriamiento, en el centro de la probeta (T_1) y en la periferia (T_2) en correspondencia con los puntos indicados en la Figura 2

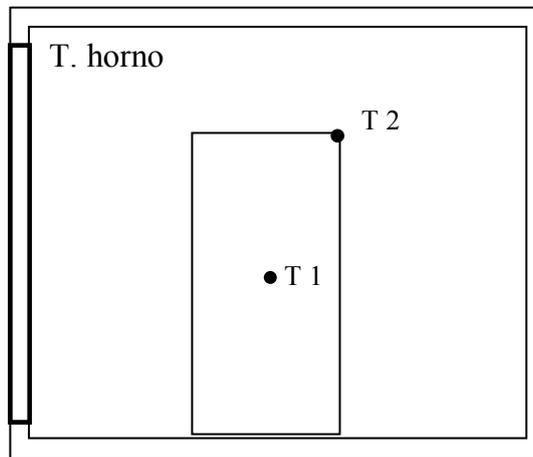


Figura 2: Localización de puntos

Los resultados indicados se obtienen para enfriamiento en aire y en agua a efectos de analizar la influencia del tipo de enfriamiento en el perfil térmico resultante y en consecuencia en la pérdida de resistencia.

En primera instancia se realizó el seguimiento de una probeta enfriada en aire hasta que se uniformaron las temperaturas en todo el elemento, es decir hasta que se igualaron las temperaturas en la periferia y el centro. Este primer análisis permitió acotar el tiempo de análisis en el enfriamiento a los primeros 30 minutos pues es el tiempo en el que se produce el máximo delta de temperatura que se correlacionará con la pérdida de resistencia. Esto se observa en Figura 3.

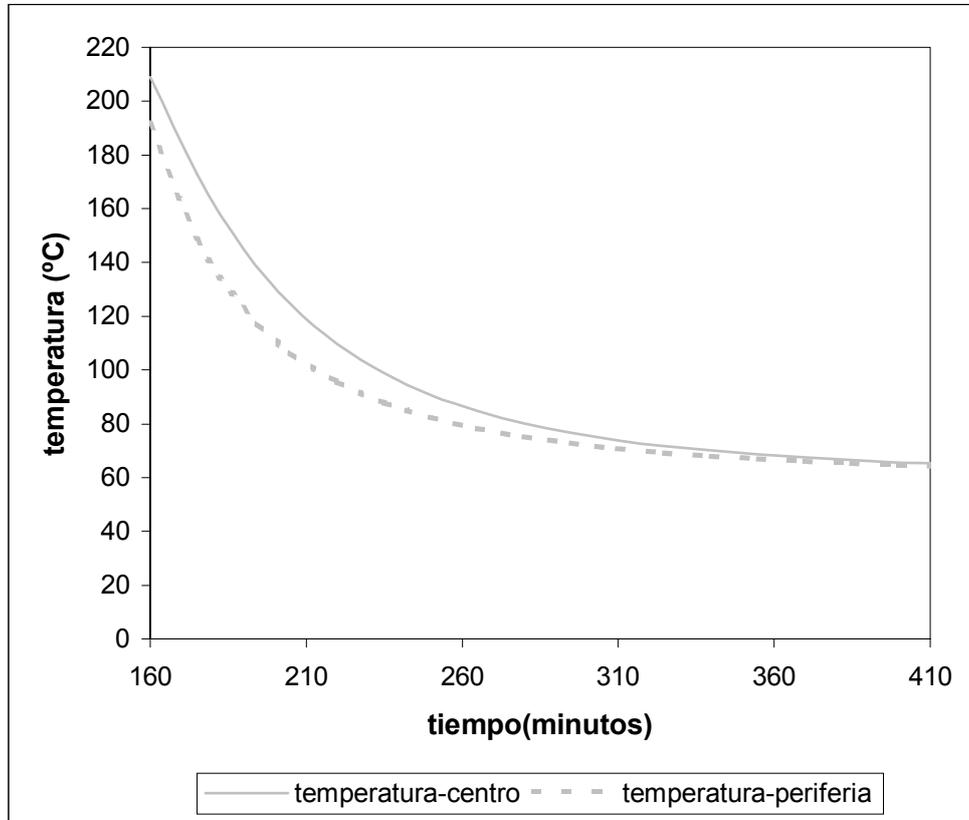


Figura 3: Curvas de enfriamiento correspondiente al centro y a la periferia

En Tablas 1 y 2 se indican las temperaturas obtenidas a los 15 y 30 minutos de comenzado el enfriamiento en los puntos T_1 (temperatura en el centro) y T_2 (temperatura en la periferia) indicados en la Figura 3 y el gradiente térmico correspondiente ($\Delta T = T_1 - T_2$) para las probetas enfriadas en aire y en agua respectivamente.

Tabla 1: Registros de temperatura y Delta T para probetas enfriadas en aire [°C].

		Tiempo=15 min			Tiempo=30 min		
		T.centro	T.periferia	Delta T	T.centro	T.periferia	Delta T
300°C	0.5 hs	191.57	114.69	76.88	159.03	98.52	65.51
	1 hs	209.82	120.55	89.27	177.87	102.92	69.95
	2 hs	232.65	128.28	104.37	191.23	108.73	82.5
500°C	0.5 hs	309.09	160.79	148.3	246.83	130.64	116.19
	1 hs	340.41	170.82	169.59	270.5	138.16	132.34
	2 hs	383.05	184.04	199.01	301.9	148.11	153.79

Tabla 2: Registros de temperatura y Delta T para probetas enfriadas en agua [°C].

		Tiempo=15 min			Tiempo=30 min		
		T.centro	T.periferia	Delta T	T.centro	T.periferia	Delta T
300°C	0.5 hs	169.87	42.16	127.71	109.36	28.88	80.48
	1 hs	187.06	44.09	142.97	119.47	29.67	89.8
	2 hs	210.3	46.63	163.67	132.88	30.71	102.17
500°C	0.5 hs	276.45	57.3	219.15	172.61	34.52	138.09
	1 hs	305.87	60.6	245.27	189.91	35.87	154.04
	2 hs	345.62	64.96	280.66	212.86	37.65	175.21

En Figura 4 se grafican los resultados correspondientes a enfriamiento rápido y lento en función del tiempo para el caso de tiempo de exposición 1 hora a temperatura máxima de 300°C. Esta representación permite visualizar la variación de los gradientes térmicos en función del tiempo para los dos tipos de enfriamiento analizados a efectos de evaluar la incidencia de los mismos en la pérdida de resistencia a compresión.

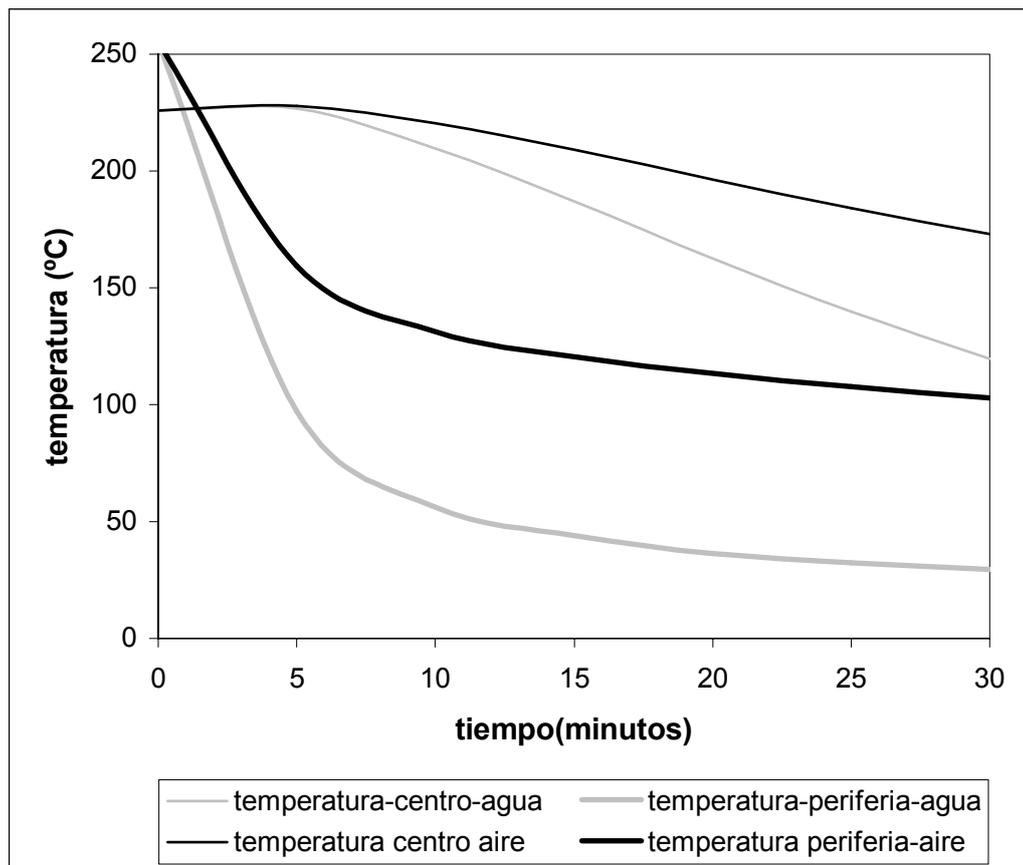


Figura 4: Curvas de enfriamiento del centro y periferia en probetas enfriadas en agua y aire.

En Figura 5 se indican las curvas obtenidas en las simulaciones correspondientes al calentamiento y enfriamiento para el caso de una probeta sometida a 300 °C durante 1 hora. Los puntos T₁ y T₂ corresponden al centro y la periferia de la probeta de hormigón respectivamente.

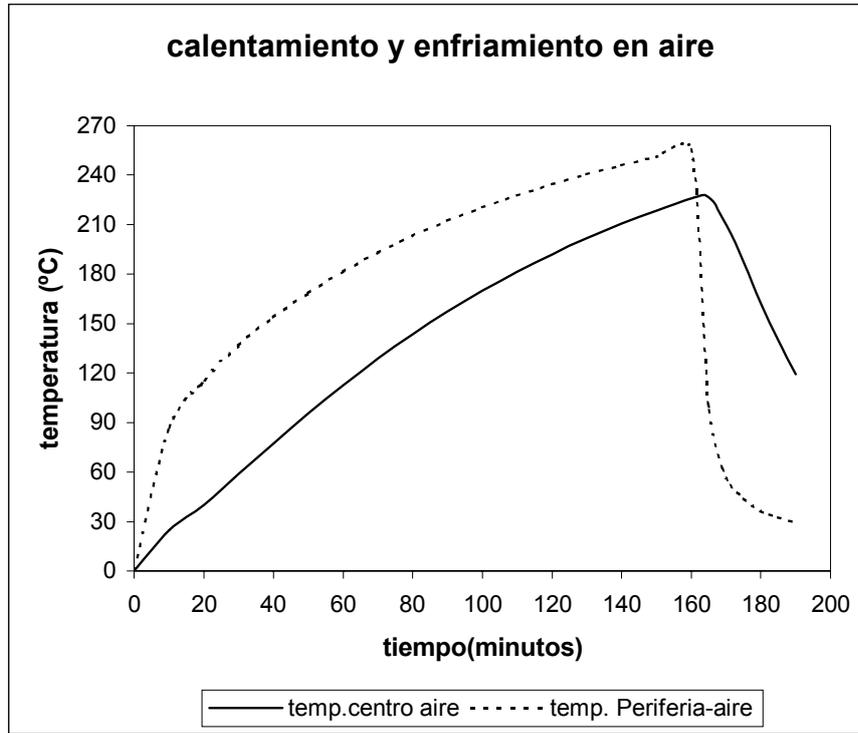


Figura 5: Curvas de calentamiento y enfriamiento obtenidas numéricamente

En Tabla 3 se muestra la relación entre el delta T obtenido a los 15 minutos en las simulaciones y los datos de pérdida de resistencia obtenidos experimentalmente⁽¹⁾. Los datos experimentales corresponden a hormigones con relación a/c=0.4, con los que se moldearon probetas patrón curadas en cámara húmeda durante 28 días y expuestas a temperatura ambiente en laboratorio otros 28 días. Por otro lado, otras probetas moldeadas con el mismo hormigón se sometieron a temperatura en horno, como se indicó previamente, y se enfriaron en aire o en agua. Finalmente, se evaluó la pérdida de resistencia a compresión debido a la acción térmica ensayando las probetas patrón y las expuestas a calentamiento y enfriamiento. Dicha pérdida se calculó de la siguiente manera:

$$P[\%] = \frac{R_p - R_T}{R_p} \cdot 100 \quad (1)$$

R_p : resistencia a compresión promedio de las muestras patrón

R_T : resistencia a compresión promedio de las muestras sometidas a temperatura.

La mencionada relación delta T- pérdida de resistencia, se representa en Figura 6.

Tabla 3: Relación entre delta T [°C] y pérdida de resistencia [%].

		aire		agua	
		Delta T	Pérdida de resistencia	Delta T	Pérdida de resistencia
300°C	0.5 hs	76.88	11.6	127.71	18.8
	1 hs	89.27	16	142.97	18
	2 hs	104.37	17	163.67	21
500°C	0.5 hs	148.3	16	219.15	21.8
	1 hs	169.59	19.5	245.27	28.3
	2 hs	199.01	19.6	280.66	34.1

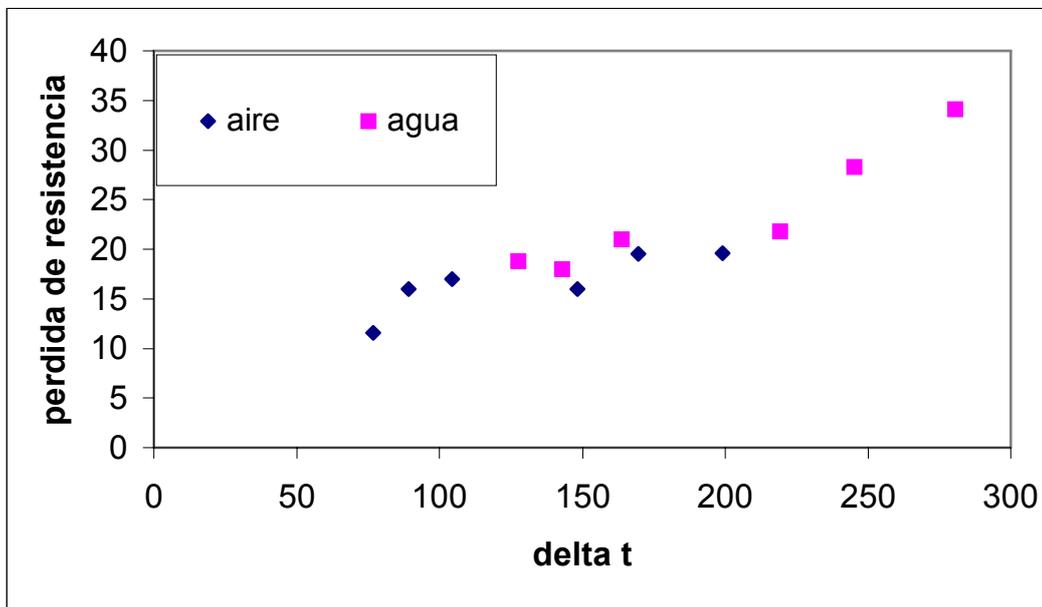


Figura 6: Relación entre la pérdida de resistencia y el deltaT

En Figura 7 se observa la relación que existe entre la pérdida de resistencia y la temperatura máxima alcanzada en el calentamiento⁽²⁾ para un hormigón con relación agua-cemento 0.40 enfriado en agua y en aire.

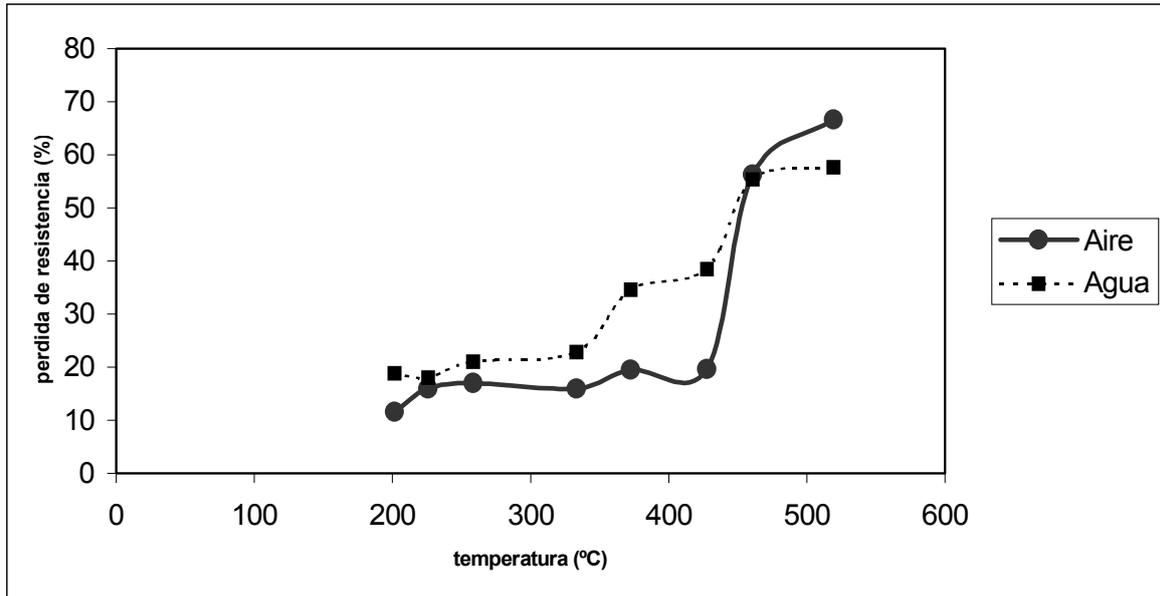


Figura 7: Pérdida de resistencia en función de la temperatura máxima alcanzada

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En todos los casos analizados se realizó el seguimiento de las variaciones térmicas en los primeros 30 minutos de iniciado el enfriamiento en agua y en aire. En Figura 4 se indica dicho seguimiento para probetas expuestas a 300 °C durante una hora, observándose claramente que el delta T para enfriado en aire es menor que el delta T para enfriado en agua para todo el tiempo analizado. Este comportamiento se repite para los distintos tiempos de exposición y temperaturas máximas alcanzadas.

El seguimiento del comportamiento en el calentamiento y en el enfriamiento indicado en la Figura 5, para el caso de 300° durante una hora de exposición, permite observar que los mayores delta de temperatura se producen en el enfriamiento.

A efectos de analizar la influencia del tiempo de exposición y nivel de temperatura alcanzado en la probeta se registraron los datos indicados en Tablas 1 y 2. Estos resultados muestran el aumento de la temperatura en el centro (seno de la probeta) y del delta T correspondiente con el aumento de temperatura del horno y tiempo de exposición. Asimismo, de la comparación de los resultados de Tabla 1 y 2 puede observarse un notable aumento de delta T en los casos de enfriamiento en agua con respecto al enfriamiento en aire para todos los casos analizados.

El análisis de los resultados de la Tabla 3 permite indicar que las pérdidas de resistencia son levemente mayores para los casos de enfriamiento en agua respecto de las enfriadas en aire hasta el caso correspondiente a temperatura de exposición 500°C durante 1 hora a partir del cual las diferencias se hacen más notables. Lo indicado permite observar que la pérdida de resistencia no es directamente proporcional al aumento gradual de los delta T hasta dicho caso de 500°C durante 1 hora como se observa en Figura 6.

Por otro lado, los resultados obtenidos en el análisis del calentamiento en trabajos previos permiten correlacionar la pérdida de resistencia con las temperaturas máximas alcanzadas para enfriamiento rápido (agua) y lento (aire) tal lo indicado en Figura 7. El análisis de dichas curvas permite indicar que hasta aproximadamente 350 °C de temperatura máxima alcanzada no existe diferencia notable en las pérdidas de resistencia obtenidas para ambos tipos de enfriamiento. En el caso de enfriamiento en agua existe un aumento importante en la pérdida de resistencia a partir de los 350 °C de temperatura máxima alcanzada aproximadamente y a partir de los 420 °C aproximadamente para el caso de enfriamiento en aire.

5 CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos para los casos estudiados puede indicarse que:

1. La temperatura y tiempo de exposición de las probetas tienen influencia en la pérdida final de resistencia.
2. A partir de una temperatura de exposición de 500°C y tiempo de exposición de 1 hora se producen importantes pérdidas de resistencia en el caso de enfriamiento en agua.
3. Las pérdidas de resistencia provocadas por la acción térmica no son directamente proporcionales a los gradientes térmicos (ΔT) originados por la misma, siendo la temperatura máxima alcanzada de mayor importancia.
4. La pérdida de resistencia es independiente del tipo de enfriamiento analizado hasta aproximadamente 350°C de temperatura máxima alcanzada.
5. A partir de los 350 °C el enfriamiento en agua produce mayores pérdidas que el enfriamiento en aire. Esto puede asociarse con los mayores ΔT provocados por el enfriamiento rápido que producirán mayores alteraciones en el material.
6. En futuros trabajos se pretende extrapolar los resultados obtenidos para analizar el comportamiento de elementos estructurales tipo vigas, columnas y losas sometidos a acciones térmicas.

6 REFERENCIAS

- [1] Di Maio, A.; Traversa L., "Evaluación de hormigones expuestos a temperatura mediante el ensayo break-off", IV Congreso Iberoamericano de Patología das Construcoes, pag. 153-159, 1997.
- [2] Montanaro, M.I., Peralta M. H., Di Maio A. A., "Distribucion De Temperaturas En Probetas De Hormigon Sometidas A Acciones Termicas", Memorias del XIII Congreso sobre métodos numéricos y sus aplicaciones, ENIEF 2003, pág. 1702-1711.
- [3] ALGOR SOFTWARE PACKAGE y sus correspondientes manuales, .
- [4] Metha, P.K; Monteiro, P.J.M., *CONCRETE Structure, Properties, and Materials*, Segunda edición, 1993, Editorial Prentice-Hall
- [5] Bird, R.B.; Stewart, W.E.; Lightfoot, E.N.; *Fenómenos de transporte; un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento*, 1976, Editorial Reverté.