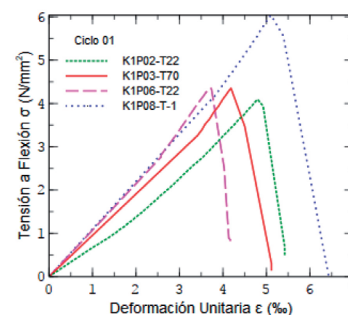


Comparación de la influencia de los ciclos térmicos sobre las estructuras termoactivadas con respecto a los modelos previstos establecidos en el Código Modelo 2010



Comparison of influence of thermal cycles on thermoactivated structures with respect to predicted models established in the Model Code 2010



Kenzo-Jorge Hosokawa-Menéndez, María-Isabel Prieto-Barrio, Gregorio García-López-de-la-Osa y Sonsoles González-Rodrigo

Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Edificación. Avda. Juan de Herrera, 6 - 28040 Madrid (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9018> | Recibido: 29/10/2018 • Inicio Evaluación: 14/11/2018 • Aceptado: 18/02/2019

ABSTRACT

- Global warming and increasing CO₂ emissions make it necessary to reduce energy consumption while maintaining thermal comfort. The current trend advocates the combination of energy conservation strategies and energy efficiency technologies and therefore thermoactive structures play an important role. The Model Code 2010 establishes a model of the effect of temperature on the compressive, flexural and tensile strength for normal concretes, but this model only takes into account the effect of temperature, thus neglecting the age of the concrete, as well as the effect produced by thermal cycles over time. This article examines the behavior of concrete subjected to thermal cycles, thus imitating the process of thermal loading and unloading in thermoactivated structures throughout its period of use. Cylindrical specimens have been made to study compression behavior and tensile strength, and prismatic specimens have been made to determine flexural strength. The results obtained have been compared with the models established in the 2010 model code, and large differences can be observed between them. It can be concluded that the models established in the model code do not describe the behavior of the concrete subjected to thermal cycles.
- **Keywords:** Plain concrete, temperature-related & thermal effects, testing, thermoactive structures.

RESUMEN

El calentamiento global y el aumento de las emisiones de CO₂ hacen que sea necesario reducir el consumo de energía mientras se mantiene el confort térmico. La tendencia actual aboga por la combinación de estrategias de conservación de energía y tecnologías de eficiencia energética y, por lo tanto, las estructuras termoactivas juegan un papel importante.

El Código modelo 2010 establece un modelo del efecto de la temperatura sobre la resistencia a la compresión, la flexión y la tracción de los hormigones normales, pero este modelo solo tiene en cuenta el efecto de la temperatura, descuidando así la edad del hormigón y el efecto producido por ciclos térmicos a lo largo del tiempo.

Este artículo examina el comportamiento del hormigón sometido a ciclos térmicos, imitando así el proceso de carga y descarga térmica en estructuras termoactivadas a lo largo de su período de

uso. Se han realizado muestras cilíndricas para estudiar el comportamiento de compresión y la resistencia a la tracción, y se han realizado muestras prismáticas para determinar la resistencia a la flexión. Los resultados obtenidos se compararon con los modelos establecidos en el código del modelo de 2010, y se pueden observar grandes diferencias entre ellos. Se puede concluir que los modelos establecidos en el código del modelo no describen el comportamiento del hormigón sometido a ciclos térmicos.

Palabras clave: Hormigón, efectos térmicos y relacionados con la temperatura, pruebas, estructuras termoactivas.

1. INTRODUCCIÓN

Los edificios son unos de los mayores consumidores de recursos naturales y representan una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero que afectan al cambio climático. A nivel mundial, el ciclo de vida de los edificios representa alrededor del 32% del consumo total de energía y el 18% de las emisiones de gases de efecto invernadero [1]. Se estima que la reducción del consumo de energía en los edificios es la forma menos costosa desde el punto de vista económico para lograr grandes reducciones de las emisiones de carbono [2].

La tendencia de la eficiencia energética aboga por la combinación de estrategias de conservación de energía y tecnologías de eficiencia energética para reducir la huella de carbono de los edificios. Los beneficios de los sistemas de calefacción y refrigeración energéticamente eficientes para el confort de las habitaciones han fomentado la búsqueda de nuevos conceptos de aire acondicionado para los edificios.

Teniendo en cuenta la reducción de las necesidades energéticas, la atención se centra ahora en el aumento de las tecnologías de baja energía que utilizan la energía del medio ambiente. La energía ambiental se define como baja temperatura, sirve como fuente de calor en invierno y disipa el calor en verano y, al igual que la energía geotérmica, es proporcionada por el entorno en el que se encuentra. Los intercambiadores geotérmicos, los intercambiadores de calor tierra-aire y los pilotes termoactivos son tecnologías para obtener energía geotérmica cerca de la superficie (hasta una profundidad de 120 m). En Alemania, Suiza y Austria, un gran número de bombas de calor geotérmicas ya están en funcionamiento.

Los elementos estructurales, como los forjados y losas que también almacenan energía con comportamiento termodinámico, se aprovechan para proporcionar refrigeración mediante la absorción de energía del entorno interno, o calefacción mediante la liberación de la energía almacenada. Al mismo tiempo, evita la climatización por medios convencionales y favorece la refrigeración con la energía almacenada en el suelo, en las aguas subterráneas y en el aire exterior [3].

Como se mencionó anteriormente, los pilotes termoactivos son parte del sistema de intercambiadores de calor geotérmicos, que consiste en hacer circular un fluido caloportador dentro de una pila de cimentación para intercambiar energía con el suelo circundante. Esta tecnología está diseñada para producir tanto la calefacción como la refrigeración del edificio según la demanda energética estacional, utilizando el suelo como fuente de calor en invierno y como disipador de calor en verano. El pilote, por lo tanto, está sometido a cargas térmicas que van de 0 a 50 °C[4]. Por lo tanto, los pilotes termoactivos funcionan como elementos estructurales e intercambiadores de calor, recibiendo no sólo las cargas permanentes y transitorias de la estructura del edificio, sino también un ciclo de cargas térmicas bombeadas hacia ellos.

Las investigaciones relacionadas con los estudios de comportamiento de estructuras termoactivas se pueden clasificar en tres grupos: comportamiento geotécnico de pilotes termoactivos [5]; comportamiento termomecánico de pilotes termoactivos monitoreando los resultados obtenidos de las pruebas a escala real y posterior [6]; y finalmente, el comportamiento dinámico térmico de los forjados termoactivos [7].

En Suiza, se monitorizó el comportamiento termomecánico de uno de los pilotes termoactivos bajo un nuevo edificio de cuatro pisos de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) [5]. La carga axial de compresión máxima inducida térmicamente a lo largo del pilote de ensayo fue del orden de 2100 kN como resultado de un aumento de temperatura de 22 °C durante el primer ensayo y de 2700 kN a 15,9 °C durante el quinto ensayo. La razón principal detrás del mayor valor axial es que las tensiones de compresión durante este último pueden atribuirse a la presencia de la carga estructural en la parte superior, que bloqueó la expansión térmica del pilote de prueba. Se observó una resistencia negativa del eje movilizado (resistencia hacia abajo) en la parte superior de la pila y una resistencia positiva del eje (hacia arriba) en la parte inferior.

Las propiedades mecánicas del hormigón varían dependiendo de la temperatura. Schneider[8] apreció una evolución negativa de la tensión de compresión del hormigón en un rango entre 0 °C y 120 °C. DeJong y Ulm observaron que la razón principal de la disminución de la tensión de compresión es la evolución de la microestructura debido a la deshidratación [9]. Aslami y Bastami recogieron diferentes modelos que caracterizan la tensión de compresión del hormigón a altas temperaturas [10].

Algunos autores han estudiado el comportamiento mecánico del hormigón sometido a ciclos térmicos, con diferentes rangos de temperatura y tiempos de ciclo, desde una temperatura ambiente de 22 °C hasta, en algunos casos, temperaturas máximas de 300 °C [11]. Hošková estudió la tensión de compresión de probetas saturadas sometidas a ciclos térmicos cuyo intervalo de temperatura estaba entre -20 °C y + 25 °C, durante un ciclo de 6 horas de duración, obtuvieron la tensión de compresión reducida hasta obtener una pérdida del 8% del valor inicial al realizar 300 ciclos [12].

Por otro lado, el hormigón sometido a ciclos de congelación-deshielo, produce pérdidas considerables de resistencia y un cambio en el modo de ruptura de dúctil a frágil, aunque el daño por

fatiga puede ser menor cuando el hormigón está congelado [13].

El código modelo 2010 sintetiza las investigaciones realizadas hasta ahora en el campo del hormigón estructural, haciendo recomendaciones de diseño y sirve de base para el diseño. Sirvió de base para el Eurocódigo de Estructuras de Hormigón, que ahora se introduce en la mayoría de los países europeos [14].

Sin embargo, no se ha encontrado bibliografía para realizar un estudio del comportamiento de estructuras de hormigón termoactivado sometidas a ciclos térmicos de duración anual a temperaturas medias, por lo que el objetivo de este trabajo consiste en contribuir al conocimiento del comportamiento del hormigón (en compresión, tensión y flexión) sometido a ciclos térmicos, imitando así el proceso de carga y descarga térmica de las estructuras termoactivadas a lo largo de su período de utilización.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1. MATERIALES

Los materiales utilizados para realizar el trabajo experimental, con una relación c:a:g:w de 1:2:3:0,5 se enumeran a continuación en la tabla 1.

En todos los ensayos se utilizó cemento CEM II/B-L 32,5 N, según las normas UNE-EN 197-1:2011 y RC-16 [15, 16].

La arena utilizada fue árido fino de 0-4mm de fracción granulométrica, de naturaleza silíceo y lavado según la norma UNE - EN 13139/AC: 2004 [17].

La grava utilizada es árido grueso de 4-20 mm de fracción granulométrica, lavado y de naturaleza silíceo según la norma UNE-EN 12620:2003 + A1:2009 [18].

El agua utilizada fue suministrada por el Canal de Isabel II, cumpliendo con las características requeridas para su uso en hormigón estructural.

Tipo de hormigón	H-25		
Amasada	1	2	3
Número de probetas	25	8	8
Tipo de cemento	CEM II/B-L 32,5 N		
Cemento (kg/m ³)	456	438	453
Arena (kg/m ³)	950	912	943
Grava (kg/m ³)	1646	1581	1635
Agua (kg/m ³)	209	201	208
Relación a/c	0,458	0,458	0,458

Tabla 1: Dosificación y contenido de material de las amasadas

2.2. FASES DE TRABAJO

Para evaluar el comportamiento del hormigón bajo ciclos térmicos, se simuló en el laboratorio el ciclo térmico anual de una estructura termoactiva, sometiendo las probetas a un rango de temperaturas extremas que van de -1 °C a + 70 °C, comenzando en un periodo estacional correspondiente al otoño (con una temperatura media de 22 °C) y analizando el comportamiento de las probetas a través de ensayos de compresión, tracción de división y flexión.

Para analizar el comportamiento del hormigón frente a la resistencia a la tracción por compresión y división, se realizaron 33 muestras cilíndricas de hormigón H-25 con dimensiones de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Para ello se realizaron dos lotes: con el primer lote se fabricaron 24 muestras para ser so-

metidas a ensayo de compresión, y una muestra que contenía un termopar tipo K, que serviría de referencia para evaluar la temperatura en el interior de la muestra; con el segundo lote se realizaron 8 muestras para llevar a cabo el ensayo de resistencia a la tracción de división. Se han elaborado ocho muestras prismáticas de 100x100x400 mm³ para ensayos de flexión. Las características geométricas de todas las muestras cumplen con los parámetros establecidos en la norma UNE-EN 12390-1:2013 [19].

2.3. PROCESO EXPERIMENTAL

Para la realización de los tres lotes se utilizaron materiales con las proporciones detalladas en la tabla 1. Para el amasado se utilizó una mezcladora planetaria de eje vertical, donde los áridos y el cemento se mezclaban con la ayuda de las palas giratorias de la hormigonera, mezclando la mezcla seca. Después de 2 minutos, se agregó agua gradualmente, amasando la mezcla durante 3 minutos. Se rellenaron los moldes correspondientes a las probetas cilíndricas y prismáticas, y se realizó el solado según UNE-EN 12390-2:2009 [20].

Se mantuvieron en condiciones de laboratorio 24 horas antes del desmoldeo, cuando se trasladaron a la cámara húmeda para su curación, durante 28 días, a una temperatura de 20 °C ± 2 °C y una humedad relativa de ≥ del 95%.

Después de 28 días de curado en la cámara de humedad, se retiraron las muestras, dejándolas a una temperatura de laboratorio de 22 °C durante una semana. En ese momento se inició el ciclo térmico, pesando y probando las dos primeras muestras de cada tipo. Luego, los otros especímenes se introdujeron en la estufa de secado durante 42 días hasta que el núcleo del espécimen alcanzó una temperatura de 50 °C y, posteriormente, se elevó la temperatura de la estufa para obtener 70 °C en 84 días.

Se pesó y probó el siguiente par de muestras de cada tipo y el resto permaneció en la estufa, bajando su temperatura, hasta que las muestras alcanzaron una temperatura de 50 °C después de 126 días, contados a partir del inicio del ciclo. Posteriormente, las muestras se retiraron de nuevo de la estufa, dejándolas a temperatura ambiente hasta que alcanzaron una temperatura de 22 °C, después de 168 días.

Una vez más se repitió el proceso de selección y pesaje de las muestras para su posterior rotura, introduciendo las muestras restantes en un congelador hasta alcanzar una temperatura de 5 °C después de 210 días. Después de esto, la temperatura del congelador se redujo, hasta que la temperatura dentro de las muestras alcanzó -1 °C, 252 días después de comenzar la prueba.

En la tabla 2 se especifican los diferentes ciclos a los que se someten las muestras para los diferentes ensayos.

2.4. TIPOS DE ENSAYO

Para reproducir el ciclo térmico de una estructura termoactiva en el laboratorio y someter las muestras a temperaturas extremas que varían de -1 °C a 70 °C, se utilizaron una estufa de secado de 150 litros, modelo 2210, de 2 kW de potencia y un frigorífico modelo LAB 51 con capacidad de 416 litros de la marca JP Selecta.

De acuerdo con el proceso experimental desarrollado, en relación con los ciclos térmicos explicados en el apartado 2.3, se han ensayado probetas hasta la rotura, la compresión, la resistencia a la tracción por rotura y la resistencia a la flexión, todo ello realizado en la prensa universal IBERTEST MIB-60/AM.

El ensayo de compresión hasta la rotura se ha realizado siguiendo las instrucciones de la norma UNE-EN12390-3:2009[21]. Su superficie superior fue recubierta con mortero de azufre, siguiendo las instrucciones de la norma UNE 83506:2004[22]. Las probetas se colocaron en la prensa y se aplicó una precarga del 10% de la carga máxima del ensayo, siguiendo las instrucciones de la norma UNE-EN12390-3:2009[21].

El ensayo de rotura por tracción indirecta de las probetas se realizó según las directrices de la norma UNE-EN12390-6:2010[23], y utilizando la prensa universal IBERTEST MIB-60/AM.

El ensayo de flexión se realizó según las instrucciones de la norma UNE-EN 12390-5:2009[24], realizando el ensayo aplicando una carga específica en la sección central, con una luz entre apoyos de 340 mm.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. ENSAYO A COMPRESIÓN

Los resultados de los ensayos de rotura a compresión en probetas cilíndricas sometidas a tres ciclos térmicos se resumen en la figura 1, mostrando los diagramas de tensión-deformación para cada tipo. Como se puede ver en el primer ciclo, la mayor tensión se produce en el estado inicial a temperatura ambiente, disminuyendo significativamente a medida que la temperatura sube hasta los 70 °C. En el proceso de enfriamiento, hasta que las muestras alcanzan de nuevo la temperatura ambiente, la tensión se recuperó un poco, manteniendo esta recuperación cuando las muestras se transportan a una temperatura de -1 °C. En el segundo ciclo, la tensión permanece como cuando las muestras estaban a -1 °C y aumentaba a medida que la temperatura aumentaba hasta 70 °C, disminuyendo cuando

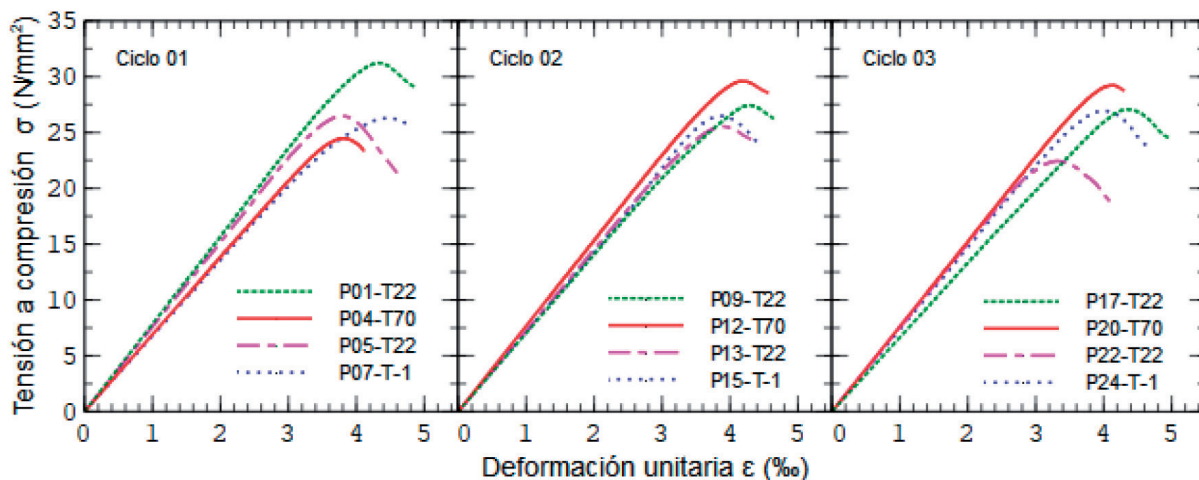


Fig 1: Diagrama tensión-deformación del ensayo de compresión, en probetas sometidas a un primer ciclo térmico, segundo ciclo y tercer ciclo

la temperatura volvía a bajar a la temperatura ambiente e incluso se recuperaban, cuando se volvían a someter a -1 °C. Al volver a la temperatura ambiente en el tercer ciclo, la tensión se mantuvo, aumentando de nuevo a medida que la temperatura aumentaba hasta los 70 °C, disminuyendo bruscamente cuando se enfriaba hasta los 22 °C, y aumentando de nuevo a medida que se sometía a -1 °C.

Desde los ensayos hasta la rotura, pasando por la compresión, la resistencia a la rotura por tracción y la resistencia a la flexión, se han calculado los valores medios que se indican a continuación con el fin de realizar un análisis más profundo de los resultados. Los valores mostrados en las tablas 3 y 6 según los ensayos realizados son: tensión máxima (σ_{max}), deformación máxima (ϵ_{max}), deformación última (ϵ_u), módulo de elasticidad (E_c), densidad de energía de deformación máximo (U_{max}) y densidad de energía de deformación última (U_u).

El Código Modelo 2010 en la sección 5.1.10.4 establece un modelo del efecto de la temperatura sobre la resistencia a la compresión, para hormigón normal (Ec. 5.1-87a FIB 2010), válido en un rango de temperatura entre 0 y 80 °C, muy similar al rango de temperatura de prueba [14].

Superponiendo los dos modelos, y asumiendo un valor de coeficiente S de 0,38 establecido en la tabla 5.1.9 del código de modelo para un tipo de cemento utilizado de 32,5 N, se puede obtener un modelo que tenga en cuenta tanto los parámetros de antigüedad del hormigón como la temperatura de ensayo y que pueda ser útil para comparar los resultados obtenidos con los esperados.

La tabla 2 muestra los valores medios de los ensayos de compresión realizados con probetas cilíndricas.

3.2. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA Y FLEXIÓN

La Figura 2 muestra los resultados del ensayo de flexión cuando las muestras se someten a un ciclo térmico. Como se muestra, las resistencias son mucho mayores cuando las probetas están a -1 °C que cuando están a temperatura ambiente o a 70 °C, por lo tanto, la disminución de la temperatura influye claramente en el comportamiento de flexión de los elementos, aumentando su resistencia, cuando el hormigón se somete a un único ciclo térmico.

El código modelo establece algunas ecuaciones que tienen en

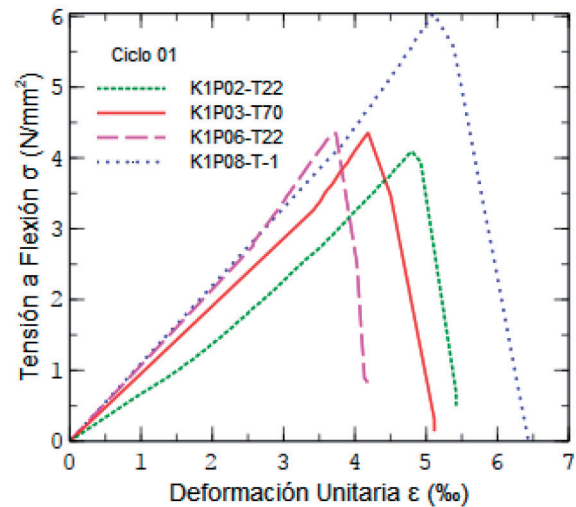


Fig. 2: Diagrama tensión-deformación del ensayo de flexión, en probetas sometidas a un ciclo térmico

cuenta el efecto de la temperatura sobre la resistencia a la tracción y a la flexión, descuidando la edad del hormigón, así como el efecto producido por los ciclos térmicos a lo largo del tiempo. Desafortunadamente, no hay ecuaciones para reproducir el efecto de la edad en el código del modelo.

Los valores medios calculados a partir de los ensayos de resistencia a la tracción y de flexión realizados con probetas cilíndricas y prismáticas, respectivamente, se muestran en la Tabla 3.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. ENSAYO A COMPRESIÓN

La Tabla 4 muestra que a temperatura ambiente existe una variación entre los valores obtenidos y las estimaciones con FIB 2010 de alrededor del 37 %. Sin embargo, la variación a temperaturas

Temperatura (°C)	Ensayo a compresión						Modelo Superpuesto FIB 2010	
	σ_{max} (N/mm ²)	ϵ_{max} (‰)	ϵ_u (‰)	E_c (N/mm ²)	U_{max} (N/mm ²)	U_u (N/mm ²)	$f_{cm}(t,T)$ (N/mm ²)	$E_{ci}(t,T)$ (N/mm ²)
							ec. [5.1-50] FIB 2010	ec. [5.1-56] FIB 2010
22	31,0	4,386	4,851	23205,0	6,28E-02	7,16E-02	30,8	23065,8
70	25,6	3,876	4,241	21324,0	4,63E-02	5,08E-02	31,9	21689,9
22	26,9	4,177	4,984	21861,0	5,06E-02	6,67E-02	39,0	25959,5
-1	26,6	4,239	5,053	21204,0	5,07E-02	7,78E-02	42,7	28089,0
22	25,9	4,498	5,042	20374,5	5,17E-02	6,21E-02	40,6	26460,5
70	28,5	4,183	4,721	22071,0	5,56E-02	6,59E-02	35,0	22745,1
22	25,5	4,170	4,816	20599,5	4,82E-02	6,73E-02	41,3	26702,6
-1	26,5	3,982	4,512	21177,0	4,99E-02	5,98E-02	44,4	28644,3
22	26,2	4,226	4,766	19860,0	5,22E-02	6,27E-02	41,8	26852,3
70	28,5	4,373	4,560	21310,5	5,78E-02	6,05E-02	35,9	23010,3
22	26,2	4,055	4,665	21337,5	5,02E-02	6,14E-02	42,1	26956,5
-1	26,9	4,002	4,653	22074,0	4,97E-02	6,38E-02	45,1	28872,2

Tabla 2: Valores medios más representativos de las probetas sometidas a cada temperatura en cada ciclo, de los ensayos a compresión y valores del modelo superpuesto teniendo en cuenta los efectos de la temperatura y de la edad del hormigón

	Temperatura (°C)	Ensayo a tracción indirecta					Ensayo a flexión			
		σ_{max} (N/mm ²)	ϵ_{max} (‰)	ϵ_u (‰)	U_{max} (N/mm ²)	U_u (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	ϵ_{max} (‰)	U_{max} (N/mm ²)	U_u (N/mm ²)
Ciclo 1	22	1,4	7,970	9,170	5,56E-03	6,83E-03	3,7	4,442	9,30E-03	2,50E-02
	70	1,2	7,860	8,274	4,61E-03	7,45E-03	4,4	4,185	1,359E-02	2,99E-02
	22	0,9	6,307	7,092	2,97E-03	3,92E-03	4,1	3,782	8,29E-03	1,87E-02
	-1	0,7	5,631	6,587	2,04E-03	3,46E-03	5,4	4,455	1,613E-02	4,06E-02

Tabla 3: Valores medios más representativos de las probetas sometidas en cada ciclo, en los ensayos de tracción indirecta y de flexión

Temperatura (°C)	Ensayo de compresión						Ensayo a tracción indirecta	Ensayo a flexión
	Variación de resistencia			Módulo de elasticidad				
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 1
22	0,6	-36,1	-37,3	0,6	-23,0	-26,0	1,6	1,0
70	-19,7	-18,7	-20,5	-1,7	-3,0	-7,4	42,9	58,6
22	-31,1	-38,3	-37,7	-15,8	-22,9	-20,8	-34,7	11,9
-1	-37,7	-40,4	-40,4	-24,5	-26,1	-23,5	-57,2	32,1

Tabla 4: Variación de los valores de los ensayos de compresión, tracción indirecta y flexión respecto a los modelos superpuestos

	Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F-Valor	P-Valor
% Variación y Temperatura	Entre Grupos	592,548	2	296,274	2,29	0,1567
	Dentro de los grupos	1162,74	9	129,193		
	Total	1755,28	11			
% Variación y Ciclo	Entre Grupos	365,76	2	182,88	1,18	0,3494
	Dentro de los grupos	1389,52	9	154,391		
	Total	1755,28	11			

Tabla 5: Tablas ANOVA de Variación porcentual respecto a temperatura y ciclo

	Temperatura (°C)	Ensayo a tracción indirecta		Ensayo a flexión	
		σ_{max} (N/mm ²)	$f_{ctm(T)}$ (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	$f_{ctm(T)}$ (N/mm ²)
			Ec. [5.1-88] FIB 2010		Ec. [5.1-90] FIB 2010
Ciclo 1	22	1,4	1,4	3,7	3,7
	70	1,2	0,8	4,4	2,8
	22	0,9	1,4	4,1	3,7
	-1	0,7	1,6	5,4	4,1

Tabla 6: Valores medios más representativos de las probetas sometidas a cada temperatura en un ciclo, del ensayo de tracción indirecta y de flexión con respecto de los valores establecidos en el Código Modelo 2010

de ensayo más altas disminuye a valores de alrededor del 19 %, y a temperaturas más bajas aumenta a valores de alrededor del 40 %.

Si se realiza un análisis de la varianza de un factor y se agrupan los valores por su temperatura de ensayo, se obtiene un P-valor de 0,1567 mayor que 0,05, por lo que no hay diferencia estadísticamente significativa entre la variación porcentual media entre un nivel de temperatura y otro, con un nivel de fiabilidad del 95,0%.

Por otro lado, al realizar un nuevo análisis de la varianza agrupando los valores por el ciclo de prueba, se obtiene un P-valor de 0,3449 mayor que 0,05, por lo que no hay diferencia estadísticamente significativa entre la variación media en porcentaje entre un ciclo y otro, con un nivel de fiabilidad del 95,0 %.

Si se comparan los resultados obtenidos con un modelo que superpone tanto el efecto de la temperatura como la edad del hormigón, se observa una gran diferencia de resistencia, alcanzando valores cercanos al 40 %.

Si bien es cierto que la superposición de los modelos no describe el comportamiento obtenido, ya que las variaciones son sustanciales, también es cierto que a la misma temperatura de prueba los porcentajes diferenciales obtenidos son similares. Tomando estas similitudes como referencia, se puede concluir que la influencia de los ciclos térmicos no es tan significativa como la de las temperaturas.

La Tabla 5 muestra la variación porcentual de los valores del módulo de elasticidad obtenidos en el ensayo y los valores previstos según los modelos superpuestos.

A temperatura ambiente se produce una reducción media del 25 % del módulo de elasticidad, mientras que para una temperatura de 70 °C la reducción es mucho menor, con un valor de alrededor del 5 %, y en cambio, para temperaturas de ensayo más bajas la variación aumenta hasta valores del 25 %.

4.2. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA Y FLEXIÓN

Al igual que con la resistencia a la compresión, el código del modelo establece una ecuación que considera el efecto de la temperatura sobre la resistencia a la tracción y a la flexión.

Los valores obtenidos en el modelo de resistencia a la tracción en función de la temperatura se muestran en la tabla 6.

La Tabla 4 muestra la variación de resistencia en porcentajes (%) del ensayo de división y flexión con respecto al modelo de resistencia a la temperatura.

Los resultados de la comparación del ensayo de tracción de división muestran una gran disparidad entre los valores obtenidos y el modelo. La tendencia es claramente decreciente (a pesar del valor obtenido a 70 °C).

No obstante, los resultados de la comparación de la resistencia a la flexión obtenida en todos los casos son superiores a los valores estimados. Tampoco hay una tendencia clara.

5. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones pueden obtenerse de los resultados de las pruebas:

En el hormigón sometido a ciclos térmicos, la variación de temperatura influye en la evolución de sus propiedades mecánicas, no permaneciendo constantes en el tiempo.

a.- Si bien es cierto que la superposición de los modelos no describe el comportamiento obtenido, ya que las variaciones son sustanciales, también es cierto que a la misma temperatura de ensayo los porcentajes diferenciales obtenidos son similares. Tomando como referencia estas similitudes, se puede deducir que la influencia de los ciclos térmicos no es tan significativa como la de las temperaturas. A partir de estas conclusiones hay que tener en cuenta, sin embargo, que la escasa diferencia significativa en los resultados obtenidos entre ciclos puede deberse a dos factores: en primer lugar, que la influencia de los ciclos no es realmente de gran importancia y, en segundo lugar, que la temporalidad del experimento ha limitado los resultados obtenidos.

b.- Se sugiere que la aplicación de un coeficiente por la fatiga térmica del hormigón puede ser adecuada, y debería ser necesario realizar otras campañas experimentales de mayor duración para confirmarlo.

REFERENCIAS

[1] Edenhofer O et al. "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change", Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. pp.351-412. (doi: <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415416.005>)

[2] Stern et al. "Stern review: The economics of climate change", HM treasury. 2006.

[3] Adam D, Markiewicz R. "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers", *Géotechnique*. 2009. Vol. 59, n°3, pp. 229-236, 2009. (doi: <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.229>)

[4] Laloui L, Donna.A. "Understanding the behavior of energy geo-structures", *Proceedings of the ICE-Civil Engineering*. 2011. Vol. 164(4), pp. 184-191. (doi: <https://doi.org/10.1680/cien.2011.164.4.184>)

[5] Laloui L, Cekerevac C. "Non-isothermal plasticity model for cyclic behavior of soils", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2008. Vol. 32(5). (doi: <https://doi.org/10.1002/nag.629>)

[6] Laloui L, Nuth M, Vulliet L. "Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2006. Vol. 30(8), pp. 763-781. (https://doi.org/10.1002/nag.499)

[7] Saelens D, Parys W, Baetens R. "Energy and comfort performance of thermally activated building systems including occupant behavior", *Building and Environment*. 2001. Vol. 46(4), pp. 835-84. (doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.012>)

[8] Schneider U. "Behavior of concrete under thermal steady state and non-steady state conditions", *Fire and Materials*. 1976. Vol. 1(3), pp. 103-115. (doi: <https://doi.org/10.1002/fam.810010305>)

[9] DeJong MJ, Ulm F. "The nanogranular behavior of C-S-H at elevated temperatures (up to 700°C)", *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37(1), pp. 1-12. (doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.006>)

[10] Aslani F, Bastami, *ACI Materials Journal*, "Constitutive relationships for normal-and high-strength concrete at elevated temperatures". 2011. Vol. 108(4), pp. 355-364.

[11] Campbell-Allen D, Desai P.M. "The influence of aggregate on the behavior of concrete at elevated temperatures", *Nuclear Engineering and Design*. 1967. Vol. 6(1), pp. 65-77. (doi: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(67\)90047-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(67)90047-7))

[12] Hošková Š et al. "Effect of thermal cycling on the strength and texture of concrete for nuclear safety structures" *Acta Polytechnica*. 2001. Vol. 41(1), pp. 17-19.

[13] Berto L, Saetta A, Talledo D.A. "Constitutive model of concrete damaged by freeze-thaw action for evaluation of structural performance of RC elements", *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 98, pp. 559-569. (doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.035>)

[14] International Federation for Structural Concrete (FIB), "Model Code 2010". 2010. Vol 1.

[15] EN 197-1:2011, CEN/TC 51 "Cement and building limes", "Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements", 2011.

[16] Ministerio de Fomento Madrid, "RC-16 Instrucción para la recepción de cementos", 2016.

[17] EN 13139:2002/AC:2004, CEN/TC/154 "Aggregates", "Aggregates for mortar", 2004.

[18] EN 12620:2002+A1:2008, CEN/TC/154 "Aggregates", "Aggregates for concrete 2008", 2008.

[19] EN 12390-1:2012, CEN/TC 104 "Concrete and related products" "Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds", 2012.

[20] EN 12390-2:2009, CEN/TC 104 "Concrete and related products", "Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests", 2009.

[21] EN 12390-3:2009, CEN/TC 104 "Concrete and related products", "Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens", 2009.

[22] AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), AEN/CTN 83 - Hormigón, "UNE-83506:2004: Concrete with fibres. Capping with sulfur mortar", 2004.

[23] EN 12390-6:2009, CEN/TC 104 "Concrete and related products", "Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens", 2009.

[24] EN 12390-5:2009, CEN/TC 104 "Concrete and related products", "Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens", 2009.

Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de agencias de financiamiento en los sectores público, comercial o sin fines de lucro.