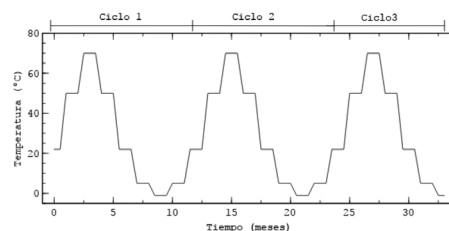


Influencia de los ciclos térmicos en el comportamiento mecánico del hormigón de estructuras termoactivadas

Influence of thermal cycles on the mechanical behaviour of concrete of thermo-activated structures



Kenzo-Jorge Hosokawa-Menéndez, Alfonso Cobo-Escamilla, María-Isabel Prieto-Barrio y Inmaculada Martínez-Pérez

Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Edificación. Avda. Juan de Herrera, 6 – 28040 Madrid. Tfno: +34 913367613

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8494> | Recibido: 15/06/2017 • Evaluado: 20/06/2017 • Aceptado: 16/10/2017

ABSTRACT

- This article examines the behavior of concrete when subjected to thermal cycles, thus, imitating the process of thermal loading and unloading in thermo-activated structures, throughout their in-use period. Cylindrical specimens have been performed to study the behavior to compression and tensile strength, and prismatic specimens were performed to flexural test strength. The analysis of results shows that in thermo-active structures subjected to thermal cycles, temperature variation influences on the evolution of concrete mechanical properties, not staying constant over time. Likewise, a greater amount of reinforcement to withstand compression is necessary, as well as the reformulation of calculation methods outlined in the concrete standard EHE, so that analysis of this type of structures can be performed on the safe side, regarding both stresses and strains.
- Keywords: concrete, temperature-related & thermal effects, thermo-active structures, compression test, splitting tensile test, flexural test.

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia el comportamiento del hormigón cuando se encuentra sometido a ciclos de temperatura, imitando así el proceso de carga y descarga térmica de las estructuras termo-activadas a lo largo de su periodo de servicio. Se han fabricado probetas cilíndricas para estudiar el comportamiento a compresión y tracción y probetas prismáticas para realizar los ensayos a flexión. Del análisis de resultados se puede concluir que en las estructuras termoactivas sometidas a ciclos térmicos, la variación de temperatura influye en la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón, no manteniéndose constantes a lo largo del tiempo. Así mismo, se hace necesario una mayor cantidad de armadura de compresión y la reformulación de los métodos de cálculo planteados en la instrucción de hormigón EHE, con el fin de realizar el cálculo de este tipo de estructuras del lado de la seguridad, tanto a nivel de tensiones como de deformaciones.

Palabras clave: hormigón, ciclos de temperatura, estructuras termoactivas, ensayo compresión, ensayo tracción indirecta, ensayo flexión.

1. INTRODUCCIÓN

Los edificios son uno 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 la edificación representa alrededor del 32% del consumo total de energía y el 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero [1], por ello hay una creciente conciencia de la importante función que determinados cambios llevados a cabo desde una perspectiva de eficiencia energética pueden desempeñar en la reducción de los efectos medioambientales [2].

La tendencia en eficiencia energética aboga por la combinación de estrategias de conservación de energía y de tecnologías de eficiencia energética para reducir la huella de carbono de los edificios. Los beneficios de los sistemas de calefacción y refrigeración de bajo consumo energético para el confort de los recintos han impulsado la búsqueda de nuevos conceptos de climatización para edificios.

Los elementos de construcción estructurales, como los forjados, losas y pilotes que además almacenan energía con un comportamiento dinámico-térmico, son explotados para proporcionar refrigeración mediante la absorción de la energía del ambiente interno, o calefacción, y a través de la liberación de la energía almacenada, lo que evita el aire acondicionado por medios convencionales y favorece la refrigeración con energía acumulada en el terreno, en aguas subterráneas y en el aire exterior [3].

Los trabajos que han abordado el estudio del comportamiento de las estructuras termo-activas se pueden clasificar en tres grupos: el comportamiento geotécnico de los pilotes termo-activos [4,5]; el comportamiento termo-mecánico de los pilotes termo-activos monitorizando los resultados obtenidos de ensayos a escala real y posterior modelización de estos comportamientos [6-9]; y finalmente el comportamiento dinámico térmico de las losas termo-activas [10].

Las propiedades mecánicas del hormigón varían en función de la temperatura. Schneider [11,12], apreció una evolución negativa de la resistencia a compresión del hormigón en un intervalo entre 0 y 120°C. DeJong y Ulm [13] constatan que la principal razón de la disminución de la resistencia a compresión es debida a la evolución de la microestructura a causa de la deshidratación. Aslami y Bastami recopilan diferentes modelos que caracterizan la resistencia a compresión del hormigón a altas temperaturas [14].

Algunos autores han estudiado el comportamiento mecánico del hormigón sometido a ciclos térmicos, con diferentes intervalos

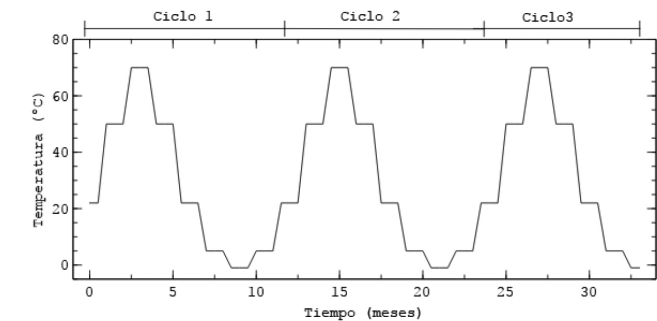


Fig. 1: Evolución de las temperaturas de las probetas en función del tiempo

de temperatura y tiempos de ciclo, desde una temperatura ambiente de 22°C hasta, en algunos casos, temperaturas máximas de 300°C [15,16]. Hošková estudió el esfuerzo de compresión de muestras saturadas sometidas a ciclos térmicos cuyo intervalo de temperatura estaba entre -20°C y + 25°C, durante un ciclo de 6 horas de duración, obteniendo que la tensión de compresión disminuía hasta obtener una pérdida del 8% del valor inicial cuando se realizaron 300 ciclos [17].

Por otro lado, el hormigón sometido a ciclos de hielo-deshielo produce considerables pérdidas 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 se congela [18-20].

Sin embargo, no se ha encontrado literatura que realice 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

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/m³)	456	438	453
Arena (kg/m³)	950	912	943
Grava (kg/m³)	1646	1581	1635
Agua (kg/m³)	209	201	208
Relación a/c	0,458	0,458	0,458

Tabla 1: Dosificación y contenido de material de las amasadas

compresión, tensión y flexión) sometido a ciclos térmicos, imitando el proceso de carga y descarga térmica de las estructuras termoactivadas a lo largo de su periodo de uso.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1. MATERIALES

- Para la realización del trabajo experimental se emplearon los materiales indicados a continuación, según las dosificaciones empleadas en la Tabla 1:
- El cemento empleado para la totalidad de los ensayos es CEM II/B-L 32,5 N, conforme a la norma instrucción EN 197-1:2011 y RC-08 [21,22].
 - La arena es un árido fino de fracción granulométrica 0-4mm, de naturaleza silíceas y lavada, según la norma EN 13139:2002/AC:2004 [23].
 - La grava es un árido grueso de fracción granulométrica 4-20mm, de naturaleza también silíceas y lavada, según la norma EN 12620:2002+A1:2008 [24].
 - El agua empleada procede del suministro del Canal de Isabel II.

2.2. FASES DEL TRABAJO

Para evaluar el comportamiento del hormigón sometido a ciclos de temperatura, se ha simulado en el laboratorio el ciclo térmico anual de una estructura termoactiva, sometiendo las probetas a un rango de temperaturas extremas que varían desde -1°C a +70°C conforme a la Fig. 1, comenzando en un periodo estacional equivalente al otoño (con una temperatura media de 22°C) y analizando su comportamiento mediante ensayos de compresión, de tracción indirecta y de flexión.

Para analizar el comportamiento a compresión y a tracción indirecta del hormigón, se han elaborado 33 probetas cilíndricas de hormigón H-25 de dimensiones 100mm de diámetro y 200mm de altura. Con este fin se han realizado dos amasadas, en la primera se han fabricado 24 probetas para ensayar a compresión y una probeta que contiene un termopar, tipo K, que servirá de referencia para evaluar la temperatura interior de la probeta, y en la segunda amasada 8 probetas para su rotura a tracción indirecta. Se analizará el comportamiento a flexión simple, mediante el ensayo de 8 probetas prismáticas de dimensiones 100x100x400mm³.

Las características geométricas de todas las probetas cumplen con los parámetros establecidos en la norma EN 12390-1:2012 [25] y su nomenclatura, los ensayos practicados y a los ciclos de temperaturas a los que se sometieron las probetas, se pueden observar en la Tabla 2.

Temperaturas de ensayo (°C)	Probetas cilíndricas (Ensayo a compresión)			Probetas cilíndricas (Ensayo a tracción indirecta)	Probetas prismáticas (Ensayo a flexión)
	Amasada 1			Amasada 2	Amasada 3
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 1
22	P01-T22	P09-T22	P17-T22	PB01-T22	K1P01-T22
22	P02-T22	P10-T22	P18-T22	PB02-T22	K1P02-T22
70	P03-T70	P11-T70	P19-T70	PB03-T70	K1P03-T70
70	P04-T70	P12-T70	P20-T70	PB04-T70	K1P04-T70
22	P05-T22	P13-T22	P21-T22	PB05-T22	K1P05-T22
22	P06-T22	P14-T22	P22-T22	PB06-T22	K1P06-T22
-1	P07-T-1	P15-T-1	P23-T-1	PB07-T-1	K1P07-T-1
-1	P08-T-1	P16-T-1	P24-T-1	PB08-T-1	K1P08-T-1

Tabla 2: Nomenclatura y características de las probetas

2.3. PROCESO EXPERIMENTAL

Para la realización de las tres amasadas, se empleó una amasadora planetaria de eje vertical. Los moldes correspondientes a las probetas cilíndricas y prismáticas se rellenaron, para posteriormente enrasarlos según EN 12390-2:2009 [26]. Se mantuvieron en condiciones de laboratorio durante 24 horas antes de desmoldar, momento en que se trasladaron a la cámara húmeda para su curado durante 28 días, a temperatura de 20°C ± 2°C y con una humedad relativa ≥ 95%.

Transcurridos 28 días de curado en la cámara húmeda, se procedió a la extracción de las probetas, dejándolas a una temperatura ambiente de 22°C durante una semana. A partir de ese momento se inició el ciclo térmico, pesando y ensayando las dos primeras probetas de cada tipo. A continuación se introdujeron el resto de probetas en la estufa de secado durante 42 días hasta obtener una temperatura interior del núcleo de 50°C, para posteriormente elevar la temperatura de la estufa hasta obtener 70°C a los 84 días.

Se pesaron y ensayaron el siguiente par de probetas de cada tipo y el resto se mantuvo en la estufa, bajando su potencia, hasta

que las probetas alcanzaron una temperatura de 50°C después de 126 días del inicio del ciclo. En ese momento se volvieron a sacar las probetas, dejándolas a temperatura ambiente hasta que alcanzaron una temperatura de 22°C después 168 días.

De nuevo se volvió a repetir el proceso de selección y pesado de las probetas para su posterior rotura, introduciéndose las probetas restantes en un congelador hasta obtener una temperatura de 5°C después de 210 días. A continuación se bajó la temperatura del congelador, hasta que la temperatura en el interior de las probetas alcanzó -1°C a los 252 días del inicio del ensayo.

Los diferentes ciclos a los que se sometieron a las probetas para los diferentes ensayos realizados, se encuentran especificados en la Tabla 2.

Para la reproducción en el laboratorio del ciclo térmico anual de un estructura termoactiva, en el que se sometieron a las probetas a rangos de temperaturas extremas que varían desde -1°C y 70°C, se emplearon una estufa de secado modelo 2210 y un arcón frigorífico modelo LAB 51. En el proceso experimental, se sometieron las probetas a los ensayos de rotura a compresión UNE

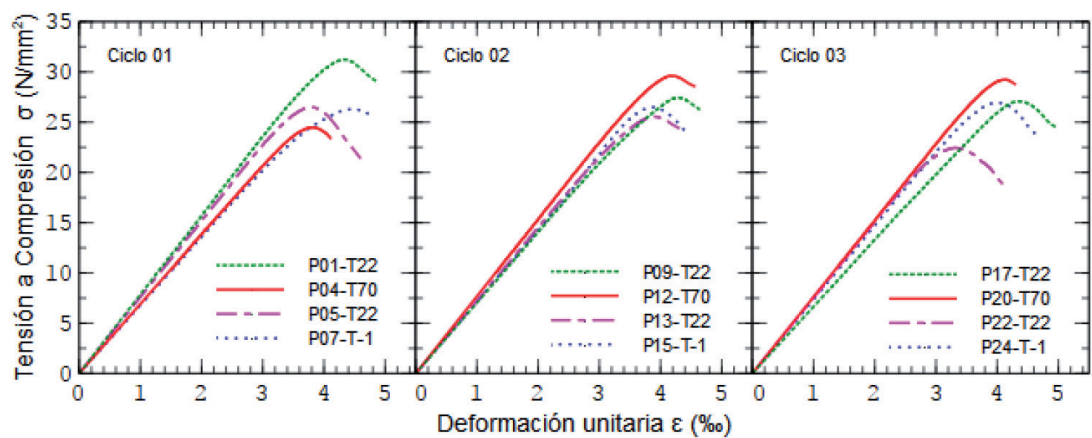


Fig. 2: Diagramas tensión-deformación del ensayo de rotura a compresión, en probetas sometidas a un primer ciclo de temperatura (a), segundo ciclo (b) y tercer ciclo (c)

Temperatura (°C)	Ensayo a compresión						Modelo Superpuesto FIB 2010	
	σ_{max} (N/mm²)	ϵ_{max} (‰)	ϵ_u (‰)	E_c (N/mm²)	U_{max} (N/mm²)	U_u (N/mm²)	$f_{cm}(t,T)$ (N/mm²)	$E_{ci}(t,T)$ (N/mm²)
							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 3: 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

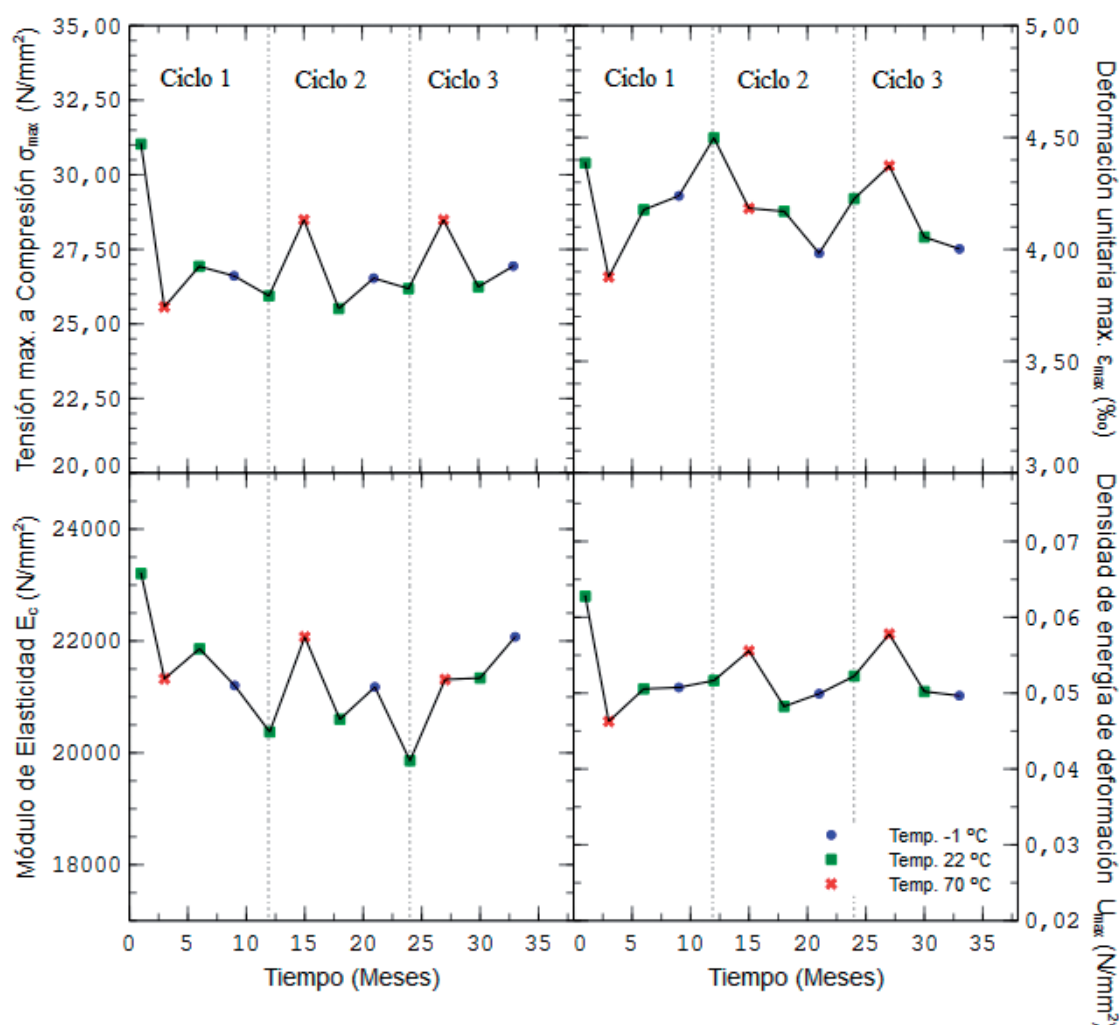


Fig.3: Evolución de los valores máximos medios característicos del ensayo a compresión en probetas cilíndricas, tensiones máximas medias (a), deformaciones máximas medias (b), módulo de elasticidad (c), densidad de energía de deformación máxima media (d)

83506:2004 [27] y EN 12390-3:2009 [28], tracción indirecta EN 12390-6:2009 [29] y flexión, EN 12390-5:2009 [30], todos ellos realizados en la prensa universal IBERTEST MIB-60/AM.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Fig. 2 muestra los resultados correspondientes a los ensayos de rotura a compresión en probetas cilíndricas, sometidas a tres ciclos de temperatura, mediante los gráficos tensión-deformación más representativos de cada tipo. Según se puede observar en el primer ciclo, las mayores tensiones se producen en el estado inicial a temperatura ambiente, disminuyendo de manera importante al aumentar la temperatura hasta 70°C. En el proceso de enfriamiento hasta que las probetas alcanzan de nuevo la temperatura ambiente, las tensiones se recuperan un poco, manteniéndose esta recuperación cuando las probetas son llevadas hasta una temperatura de -1°C. En el segundo ciclo, las tensiones se mantienen respecto a las que tenían cuando estaban a -1°C y aumentan al aumentar la temperatura hasta los 70°C, para disminuir al volver a la temperatura ambiente e incluso recuperarse, al someterlas a -1°C de nuevo. Al volverlas a la temperatura ambiente en el tercer ciclo, las tensiones se mantienen, aumentando de nuevo al aumentar la temperatura hasta los 70°C, disminuyendo bruscamente al enfriarse hasta los 22°C y aumentando de nuevo al someterlas a -1°C.

A partir de los ensayos de rotura a compresión, se han calculado los valores medios para realizar un análisis más profundo de los resultados. Los valores reflejados en la Tabla 3 son: tensión máxima a compresión (σ_{max}), deformación máxima (ϵ_{max}), deformación última (ϵ_u), módulo de elasticidad longitudinal (E_c), densidad de energía de deformación máxima (U_{max}) y densidad de energía de deformación última (U_u).

El código modelo 2010 establece, dentro de un rango de temperatura similar al ensayado, un modelo de resistencia a compresión del hormigón en función de la temperatura de ensayo. Si superponemos este modelo al desarrollo de la tensión del hormigón en función del tiempo, estableciendo un coeficiente "s" de 0,38 al utilizar un tipo de cemento de 32,5 N, podemos obtener un modelo que tiene en cuenta tanto los parámetros de edad del hormigón como la temperatura de ensayo, y puede ser útil para comparar los resultados obtenidos con los esperados [31].

La Tabla 3 muestra los valores más representativos de los ensayos a compresión realizados en probetas cilíndricas y su correspondencia con el modelo estudiado.

4. DISCUSIÓN

Los resultados de los ensayos a compresión mostrados en la Tabla 3 permiten comprobar que los sucesivos ciclos de temperatura aplicados en el hormigón reducen su resistencia máxima

(σ_{max}). La densidad de energía de deformación (U_{max}) también disminuye con los ciclos, teniendo valores similares en los tres ciclos para temperaturas de -1°C y disminuyendo en el primer ciclo para aumentar en los posteriores, cuando la temperatura alcanza 70°C . El módulo de elasticidad longitudinal (E_c) disminuye con los ciclos, pero manteniéndose en valores razonables para el comportamiento del hormigón.

La Fig. 3 permite comparar los valores medios más importantes del ensayo de rotura a compresión en probetas cilíndricas sometidas a ciclos de temperatura. Como se puede observar en la Fig. 3a, existe una disminución brusca inicial de la tensión máxima al aumentar la temperatura a 70°C , produciéndose a lo largo de los ciclos una oscilación entre los valores, que indican una cierta periodicidad de las tensiones en función de la temperatura a la cual se han realizado los ensayos, estabilizándose al final del ensayo en tensiones próximas a los 27 N/mm^2 . Si se analiza la evolución temporal de la tensión máxima de las probetas ensayadas a 70°C , se aprecia un ascenso de un 10.23% de las resistencias a compresión en el segundo y el tercer ciclo respecto al primero, mientras que las tensiones máximas medias de las probetas ensayadas a -1°C se mantienen estables a lo largo de los ciclos, de modo que los ciclos térmicos no influyen en el comportamiento de las tensiones del hormigón cuando son ensayados a una temperatura de -1°C . En la Fig. 3b se observa que mientras la evolución de la deformación unitaria máxima en los elementos ensayados a 22°C muestran una tendencia negativa, los ensayos a 70°C muestran una evolución positiva con un incremento de las deformaciones de un 4.65% . En la Fig. 3c se observa el descenso del módulo de elasticidad de las probetas ensayadas a 22°C , observándose una drástica disminución al aumentar la temperatura a 70°C , para luego mantenerse en valores relativamente estables a lo largo de los ciclos. En la Fig. 3d se puede observar una disminución drástica del valor de la densidad de energía máxima al aumentar la temperatura hasta los 70°C , para luego mostrar una tendencia ascendente a esta temperatura. Para temperaturas ambiente y a -1°C , los ciclos no influyen en la densidad de energía de deformación, ya que los valores presentan una tendencia nula.

Los resultados obtenidos siguen la misma tendencia que otras investigaciones llevadas a cabo sobre el comportamiento del hormigón sometido a ciclos térmicos, en el que el aumento de ciclos disminuye la tensión del hormigón [15,16].

La Tabla 4 muestra las pérdidas de resistencia en el hormigón, en tanto por ciento (%) respecto a la resistencia a la temperatura ambiente del primer ciclo, cuando se encuentra sometido a ciclos de temperatura y ensayos de compresión, tracción indirecta y flexión. Como se puede observar, en elementos sometidos a compresión, la resistencia disminuye del orden del 15% a temperatura ambiente, en elementos sometidos a 70°C , disminuye un 8% y en elementos sometidos a -1% , disminuye un 13% . Esto implica que los ciclos de temperatura disminuyen la resistencia del hormigón

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Ensayo de compresión		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
22	0,6	-36,1	-37,3
70	-19,7	-18,7	-20,5
22	-31,1	-38,3	-37,7
-1	-37,7	-40,4	-40,4

Tabla 5: Variación de la resistencia en tanto por ciento (%) en los ensayos de compresión, con respecto a la superposición de modelos

a compresión de modo menos importante cuando se aumenta la temperatura hasta los 70°C , que si se disminuye hasta -1°C , disminuyendo de modo más importante a temperatura ambiente.

Se puede observar en la Tabla 5 que a temperatura ambiente hay una variación entre los valores obtenidos y las estimaciones con el código modelo 2010 de alrededor del 37% . Sin embargo, la variación a temperaturas de ensayo más altas, disminuye a valores de alrededor del 19% , y a temperaturas más bajas aumenta a valores de alrededor del 40% .

5. CONCLUSIONES

- En el hormigón sometido a ciclos térmicos, la variación de temperatura influye en la evolución de sus propiedades mecánicas, no manteniéndose constantes a lo largo del tiempo.
- 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 referencias, podemos concluir que la influencia de los ciclos térmicos no es tan significativa como la de las temperaturas. Sobre la base de estas conclusiones deberíamos tener en cuenta, sin embargo, que la pequeña diferencia significativa de los resultados obtenidos entre los 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.
- Se sugiere que la aplicación de un coeficiente por la fatiga térmica del hormigón puede ser adecuada, y debería ser necesario llevar a cabo otras campañas experimentales de mayor duración para confirmarlo.
- Los valores de las deformaciones unitarias, tanto ultimas como de rotura, cuando las probetas son ensayadas a 22°C y a -1°C , disminuyen con el tiempo, mientras que cuando son ensayadas a 70°C , las deformaciones aumentan.

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Ensayo de compresión			Ensayo de tracción indirecta	Ensayo de flexión
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 1
22	0,00	-16,40	-15,63	0,00	0,00
70	-17,60	-8,18	-8,21	-15,74	+18,05
22	-13,21	-17,79	-15,44	-38,37	+11,95
-1	-14,24	-14,50	-13,18	-47,56	+46,15

Tabla 4: Variación de la resistencia en tanto por ciento (%) en los ensayos de compresión, tracción indirecta y flexión, en probetas sometidas a ciclos de temperatura

- La disminución del valor del módulo de deformación longitudinal con las distintas temperaturas de los ciclos térmicos, influye en el cálculo de la flecha instantánea, aumentando la flecha para los mismos valores de carga, luz entre apoyos, e inercia equivalente.
- La resistencia a tracción del hormigón se ve afectada de manera muy importante por los cambios de temperatura, disminuyendo del orden del 50%, al final del primer ciclo de temperaturas.
- De todo lo anterior se puede concluir, que en las estructuras termoactivas sometidas a ciclos térmicos, debe tenerse en cuenta la necesidad de la reformulación de los métodos de cálculo planteados en la instrucción de hormigón EHE [32], con el fin de realizar el cálculo de este tipo de estructuras del lado de la seguridad, tanto a nivel de tensiones como de deformaciones.

Como futura línea de investigación, se repetirá la misma campaña experimental, pero con muestras selladas, para comparar la influencia de la humedad en el comportamiento de las estructuras termoactivas.

Mayor detalle del comportamiento mecánico del hormigón cuando se encuentra sometido a flexión y a tracción indirecta, se puede consultar como material adicional mediante enlace web.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner SW, Seyboth K and Minx JC. "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change". Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, Cambridge, 2014. p. 351-412.
- [2] Stern N, Peters S, Bakhshi V, Bowen A, Cameon C and Catovsky S. "Stern review: The economics of climate change". HM treasury, London, 2006.
- [3] Markiewicz R, Adam D. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Geotechnique*. 2009. Vol.59-3. p. 229-236. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.229>
- [4] François B, Laloui L. "Unsaturated soils under non-isothermal conditions: Framework of a new constitutive model". *GeoCongress08*, New Orleans, 2008.
- [5] Laloui L, Cekerevac C. Non-isothermal plasticity model for cyclic behaviour of soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2008. Vol.32-5. p.437-460. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/nag.629>
- [6] Amatyia BL, Soga K, Bourne-Webb PJ. Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Geotechnique*. 2012. Vol.62-6. p.503-519. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.10.P.116>
- [7] McCartney JS, Murphy K. Strain distributions in full-scale energy foundations. *DFI Journal*. 2012. Vol.6-2. p.28-36. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/dfi.2012.008>
- [8] Laloui L, Nuth M, Vulliet L. Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006. Vol.30-8. P.763-781. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/nag.499>
- [9] Knellwolf C, Peron H, Laloui L. Geotechnical analysis of heat exchange piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2011. Vol.137-10. p.890-902. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000513](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000513)
- [10] Saelens D, Parys W, Baetens R. Energy and comfort performance of thermally activated building systems including occupant behavior. *Building and Environment*. 2011. Vol.46-4. p.835-848. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.012>
- [11] Schneider U, Diederichs U and Ehm C. Effect of temperature on steel and concrete for PCRV's. *Nuclear Engineering and Design*. 1982. Vo.67-2. p.245-258. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493\(82\)90144-3](http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493(82)90144-3)
- [12] Schneider U. Behaviour of concrete under thermal steady state and non-steady state conditions. *Fire and Materials* 1976. Vol.1-3. p.103-115. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/fam.810010305>
- [13] 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. p.1-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.006>
- [14] Aslani F, Bastami M. Constitutive relationships for normal-and high-strength concrete at elevated temperatures. *ACI Materials Journal*. 2011. Vol.108-4. p.355-364.
- [15] Campbell-Allen D, Desai PM. The influence of aggregate on the behaviour of concrete at elevated temperatures. *Nuclear Engineering and Design*. 1967. Vol.6-1. p.65-77. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493\(67\)90047-7](http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493(67)90047-7)
- [16] Bertero VV, Polivka M. Influence of thermal exposures on mechanical characteristics of concrete. American Concrete Institute, Special Publication. 1972. Vol.34. p.505-531.
- [17] Hošková Š, Kapišková O, Trtik K, Vodák F. Effect of thermal cycling on the strength and texture of concrete for nuclear safety structures. *Acta Polytechnica*. 2001. Vol.41-1. p.17-19. ISSN 1805-2363 (Online)
- [18] Berto L, Saetta A, Talledo D. Constitutive model of concrete damaged by freeze-thaw action for evaluation of structural performance of RC elements. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol.98. p.559-569. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.035>
- [19] Gong F, Ueda T, Wang Y, Zhang D, Wange Z. Mesoscale simulation of fatigue behavior of concrete materials damaged by freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol.144. p.702-716. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.207>
- [20] Cheng Y, Zhang Y, Jiao Y, Yang J. Quantitative analysis of concrete property under effects of crack, freeze-thaw and carbonation. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol.129. p.106-115. (doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.113)
- [21] EN 197-1:2011 "Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements". CEN/TC 51 "Cement and building limes", 2011.
- [22] RC-08. Instrucción para la recepción de cementos. Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, Madrid, Spain, 2009.
- [23] EN 13139:2002/AC:2004. "Aggregates for mortar". CEN/TC/154 "Aggregates", 2004.
- [24] EN 12620:2002+A1:2008 "Aggregates for concrete". CEN/TC/154 "Aggregates", 2008.
- [25] EN 12390-1:2012 "Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds", CEN/TC 104 "Concrete and related products", 2012.
- [26] EN 12390-2:2009 "Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests". CEN/TC 104 "Concrete and related products", 2009.
- [27] AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). UNE-83506:2004: Concrete with fibres. Capping with sulfur mortar. AEN/CTN 83 - Hormigón, Spain.
- [28] EN 12390-3:2009 "Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens". CEN/TC 104 "Concrete and related products", 2009.
- [29] EN 12390-6:2009 "Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens". CEN/TC 104 "Concrete and related products", 2009.
- [30] EN 12390-5:2009 "Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens". CEN/TC 104 "Concrete and related products", 2009.
- [31] Model Code 2010. International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, Vol 1, 2010.
- [32] Ministerio de Fomento. Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). Con comentarios de la Comisión Permanente del Hormigón. Madrid: 2010.