

## AVANCES EN LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS PRESAS DE HORMIGÓN

D. Santillán<sup>1</sup>, E. Salete<sup>2</sup> y M.A. Toledo<sup>3</sup>

*RESUMEN: Las cargas de origen térmico constituyen una acción importante en determinadas tipologías de presas de hormigón. Su determinación es un problema complicado de abordar que exige el empleo de complejos modelos matemáticos. Recientes investigaciones desarrolladas por los autores de esta comunicación han proporcionado avances en esta materia.*

*Un primer paso para conocer las temperaturas del hormigón es cuantificar las acciones de origen térmico. Algunas de esas acciones son la radiación solar, la evaporación del agua de lluvia o la temperatura del aire. Se ha propuesto una nueva metodología para cuantificar estas acciones que incorpora fenómenos que hasta ahora no se habían considerado. La metodología se ha validado en un caso de estudio.*

*Las temperaturas del hormigón se calculan con la ecuación de transmisión de calor. Se disponen de modelos unidimensionales o tridimensionales y de diversos métodos numéricos, como el de los elementos finitos, o bien soluciones analíticas, como las ecuaciones de Stucky. Se ha estudiado el grado de aproximación de estos métodos comparando sus resultados al aplicarlos en un caso de estudio. También se ha estudiado el efecto sobre estas infraestructuras*

---

<sup>1</sup>Dr. Ing. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. david.santillan@upm.es

<sup>2</sup>Dr. Ing. Caminos, Canales y Puertos. Ldo. en Ciencias Matemáticas. Universidad Politécnica de Madrid. Esinde2

<sup>3</sup>Dr. Ing. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. matoledo@caminos.upm.es

*de un posible incremento de las temperaturas ambientales debido al cambio climático.*

## **1. INTRODUCCIÓN.**

Las cargas actuantes que afectan al comportamiento de una presa de hormigón durante su explotación son, fundamentalmente, el peso propio, el empuje hidrostático, las variaciones térmicas y las acciones sísmicas.

Conocer la temperatura del hormigón es una tarea complicada. Durante la fase de explotación, en la cual se puede considerar que su calor de fraguado se ha disipado ya, las variaciones de su temperatura provienen de los agentes atmosféricos.

Los esfuerzos inducidos por las deformaciones de origen térmico son especialmente elevados en el caso de las presas bóveda con doble curvatura y las presas arco-gravedad, en las que el monolitismo de la estructura ocasiona un alto grado de hiperestatismo.

Douglas (2002) creó y analizó una base de datos de incidentes en presas de hormigón y mampostería. Una de las conclusiones del análisis es que la variación de las temperaturas externas es la segunda causa de reparaciones en este tipo de presas.

Marco García (1995) elaboró un catálogo de presas fisuradas. El autor proporciona información acerca de la tipología de la presa y la causa de la fisuración. En total, se incluyen 220 presas y 48 causas. La variación externa de las temperaturas es, al menos, una causa de fisuración en el 17% de las presas de gravedad consideradas, un 41% en las de contrafuertes, un 24% en las arco y un 18% en las de arcos múltiples.

Los ejemplos anteriores muestran que la carga térmica es responsable de una parte sustancial de los esfuerzos a los que se encuentran sometidas estas tipologías de presas. También es una de las principales causas de averías y reparaciones.

Adicionalmente, las cargas de origen térmico podrían aumentar en el futuro debido al efecto del cambio climático. Se ha observado una tendencia creciente de las temperaturas medias anuales en el periodo 1970-2004. En España, el incremento oscila entre 1,0 y 2,0 °C (IPCC, 2007). Algunas previsiones auguran entre 1980 y 2099 un incremento de la temperatura media anual en el área Mediterránea de 2,2 a 5,1 °C (Christensen *et al.*, 2007).

### **1.1. EL CASO DE ESTUDIO.**

El caso de estudio empleado en esta investigación es la presa de La Baells. Esta estructura es una presa arco de doble curvatura, construida entre los años 1.974 y 1.975, cuya primera puesta en carga se iniciaron el mes de marzo de 1.976. Se encuentra ubicada en el río Llobregat en el término municipal de Cercs (Barcelona).

La presa está gestionada por la Agencia Catalana del Agua, la cual ha proporcionado a los investigadores los datos de la auscultación térmica recopilados en la misma. Las variables usadas han sido la temperatura del

hormigón en 21 termómetros embebidos en el cuerpo de presa y la temperatura del agua embalsada a cinco profundidades, ambas medidas semanalmente. También se ha dispuesto de los valores medios diarios de la temperatura ambiental, precipitación, radiación solar global, humedad relativa y velocidad del viento.

## **2. LA INTERACCIÓN DE LA ESTRUCTURA CON EL MEDIO AMBIENTE.**

La estructura intercambia calor con el medio ambiente que la rodea. Este intercambio se da en su superficie, y es el responsable de la variación de la temperatura del hormigón. Se ha de distinguir entre las superficies sumergidas bajo el agua y las que están expuestas a la atmósfera.

La temperatura de las superficies sumergidas se puede igualar a la del agua en contacto con las mismas. El error de esta aproximación es prácticamente despreciable (Léger *et al.*, 1993a).

En cambio, la temperatura de las superficies no sumergidas no es igual, en general, a la del aire en contacto con las mismas. El efecto de los agentes atmosféricos lo impide. En estas superficies se ha de determinar el flujo de calor que se establece con el medio ambiente. A partir de este, se determina la temperatura del hormigón en la superficie y en el interior.

### **2.1. LAS SUPERFICIES SUMERGIDAS. LA TEMPERATURA DEL AGUA.**

La temperatura del agua se puede determinar a partir de modelos deterministas o modelos estadísticos.

Los modelos deterministas emplean leyes físicas para calcular el campo de temperaturas del embalse. Están basados en leyes de la termodinámica y de la mecánica de fluidos

Los modelos estadísticos extrapolan las temperaturas registradas en una serie de puntos e instantes a otros puntos y tiempos. Parten de unas funciones predefinidas dependientes de unos parámetros que se determinan a partir de las lecturas registradas en el embalse de interés. Son mucho más sencillos, rápidos y fáciles de emplear que los anteriores, aunque se pierde cierta precisión.

Uno de los modelos más empleados en numerosas publicaciones científicas es el propuesto por Bofang (1985). La Figura 1 muestra la evolución de la temperatura del agua del embalse de La Baells para diversas profundidades, calculadas con el modelo de Bofang.

Los parámetros del modelo fueron determinados a partir de los registros de temperaturas del agua embalsada. No obstante, en el caso de que no se disponga de los mismos, o en presas de nueva construcción, dichos parámetros se pueden estimar a partir de estudios limnológicos de embalses en zonas climáticamente homogéneas.

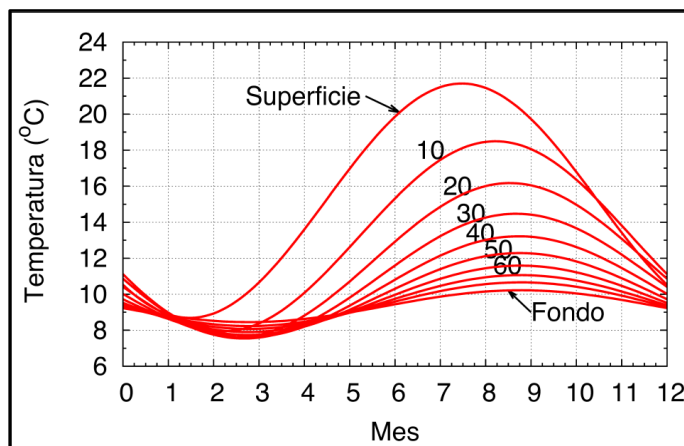


Figura 1: Evolución de la temperatura del agua embalsada en la presa de La Baells.

## 2.2. LAS SUPERFICIES NO SUMERGIDAS. EL INTERCAMBIO DE CALOR.

El intercambio de calor entre la superficie de la presa y el medio ambiente que la rodea se produce por cuatro mecanismos: la convección, la radiación solar, el intercambio de radiación de onda larga y la evaporación del agua de lluvia (Santillan *et al.* 2014a). En los siguientes puntos se comentan todos ellos.

### 2.2.1. La convección.

Consiste en el intercambio de calor entre una superficie y un fluido en contacto con la misma, a consecuencia de la diferencia de temperatura entre ambos. El fluido puede estar en reposo, siendo entonces la convección natural, o en movimiento –convección forzada–.

La convección se modela matemáticamente con la ley de enfriamiento de Newton, la cual expone que el flujo de calor debido a este mecanismo es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido. La constante de proporcionalidad se denomina coeficiente de convección o de película y es función, entre otros muchos factores, de la velocidad del fluido, relativa al sólido con el que realiza el intercambio térmico.

### 2.2.2. La radiación solar.

La radiación solar incidente sobre las superficies de los paramentos ocasiona un flujo de calor entrante a la estructura. Su valor depende de la geometría de la propia estructura y de su intensidad.

La geometría de la estructura influye sobre el ángulo de incidencia de los rayos solares. Así, se deberá considerar la orientación e inclinación de cada punto de la superficie. En el caso de las presas de gravedad, todos los puntos de un mismo paramento tienen la misma orientación e inclinación. En cambio, en las presas bóveda la orientación varía, de forma continua, con la posición del punto en cuestión.

La intensidad de la radiación solar varía a lo largo del día debido a tres causas. La primera es la variación de la posición del Sol a lo largo del día. La segunda es la presencia de sombras sobre la superficie en cuestión. La última es debida a la propia variabilidad de la intensidad.

Los factores anteriores se han considerado al determinar el flujo de calor, realizando un cálculo horario del mismo. Se parte del valor de la radiación solar global diaria medida sobre una superficie horizontal.

La superficie de los paramentos se dividió en un número finito de superficies. En cada hora, por medio de modelos matemáticos, se determinó la radiación solar global incidente sobre una superficie horizontal y se descompuso su valor en las diversas componentes de la radiación. También se calcularon las sombras presentes en los paramentos. Seguidamente, mediante modelos matemáticos se calculó la magnitud de cada componente de la radiación sobre cada una de las superficies en las que se dividieron los paramentos. Finalmente se integraron los valores horarios para obtener un valor diario.

La Figura 2 muestra la radiación solar incidente sobre el paramento de aguas arriba de la presa de La Baells el día 5 de julio del 2007 entre las 6:00 y las 7:00 hora solar. La línea (2) corresponde a la sombra arrojada por las laderas del valle donde se ubica y la (3) a la sombra propia.

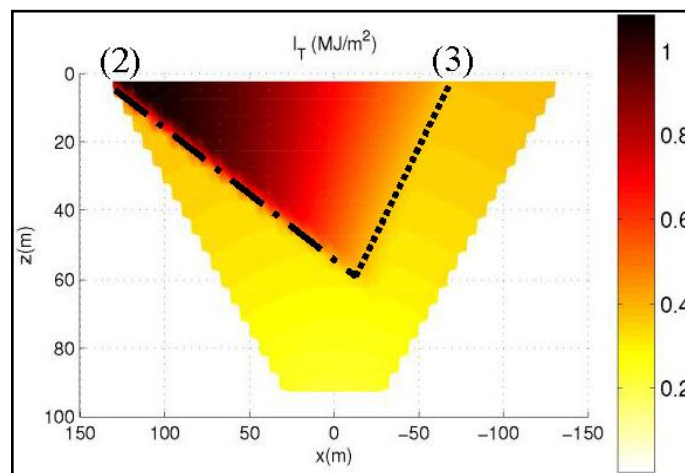


Figura 2: Radiación solar incidente sobre el paramento de aguas arriba de la presa de La Baells el 5 de julio del 2007 entre las 6:00 y las 7:00 hora solar.

### 2.2.3. El intercambio de radiación de onda larga.

El flujo de calor debido al intercambio de radiación de onda larga se modela con la ley de Stefan-Boltzman. El flujo es proporcional a la diferencia de las cuartas potencias de las temperaturas de la superficie y del cielo. La constante de proporcionalidad es la de Stefan-Boltzman.

La temperatura del cielo es aproximadamente igual a la ambiental durante el día. No obstante, durante la noche es inferior, produciéndose el denominado enfriamiento nocturno. La temperatura de la superficie puede llegar a ser inferior a la ambiental.

La temperatura del cielo se determinó con una expresión empírica propuesta por Chen *et al.* (1995). Es función de las temperaturas de rocío y del aire.

#### **2.2.4. La evaporación del agua de lluvia.**

La evaporación de agua de lluvia incidente sobre los paramentos ocasiona un flujo de calor saliente de la estructura. Este flujo, denominado de calor evaporativo, es proporcional al flujo de evaporación del agua, siendo la constante de proporcionalidad el calor latente de vaporización del agua.

El flujo de evaporación del agua depende de la humedad relativa del ambiente, de la presión de saturación del aire -función de la presión atmosférica y la temperatura ambiental- y del coeficiente de emisión de humedad -función de la velocidad del aire-.

### **3. LOS MODELOS DE CÁLCULO TÉRMICO.**

La distribución de temperaturas en el interior de la presa se determina con la ecuación de transmisión de calor o de Fourier. Su expresión en un medio en el cual no existen ni fuentes ni sumideros de calor es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \chi \Delta T = 0,$$

en la cual T es la temperatura, t el tiempo,  $\chi$  la difusividad y  $\Delta$  es el operador Laplaciano.

Las soluciones de la ecuación anterior pueden ser de naturaleza analítica o numérica. A continuación se esbozan cada una de ellas.

#### **3.1. SOLUCIONES ANALÍTICAS.**

La ecuación de Fourier tiene soluciones analíticas en determinados dominios y condiciones de contorno. Una de esas soluciones fue la propuesta por Stucky y Derron (1957), que resuelve la ecuación en un dominio unidimensional en el cual la temperatura de sus extremos sigue una ley sinusoidal en fase.

Léger y Leclerc (2007) extendieron la solución anterior a leyes de temperatura de cualquier forma mediante el desarrollo de las mismas en series de Fourier. La ley de temperaturas es descompuesta en un número finito de sumas de senos y cosenos, se determina la temperatura del hormigón con las fórmulas de Stucky y Derron para cada uno de los sumandos y finalmente se calcula la temperatura del hormigón como suma de todas las soluciones anteriores.

La solución anterior requiere conocer la temperatura de los paramentos. No obstante, esta es en general desconocida. Stucky y Derron propusieron considerar el mecanismo de la convección entre el aire y la superficie del hormigón mediante un sobreespesor del mismo. Adicionalmente, la temperatura del aire es incrementada para tener en cuenta el efecto de la radiación solar.

Las fórmulas de Stucky y Derron fueron aplicadas al caso de estudio. Se determinaron las temperaturas del hormigón en puntos coincidentes con los termómetros y se compararon las soluciones con los registros de lecturas

Las fórmulas proporcionaron temperaturas varios grados superiores a los registros. Este resultado se debió a que la formulación no considera el efecto de las sombras, ni el enfriamiento nocturno ni el flujo de calor evaporativo, entre otras simplificaciones.

## 3.2. SOLUCIONES NUMÉRICAS.

La ecuación de Fourier se puede resolver con métodos numéricos. Las condiciones de contorno de estos modelos son de temperatura impuesta en las superficies sumergidas y de flujo de calor impuesto en las expuestas a la atmósfera. Los métodos más empleados en la actualidad en la ingeniería de presas son el de diferencias finitas y el de los métodos finitos.

### 3.2.1. Los elementos finitos.

La ecuación de Fourier ha sido resuelta en dominios tridimensionales mediante el método de los elementos finitos. El dominio suele estar compuesto por la presa y una porción finita de su cimentación.

El campo de temperaturas de la presa de La Baells se determinó con este modelo. Los flujos de calor empleados en las condiciones de contorno se determinaron con la metodología expuesta en la sección anterior.

Las temperaturas calculadas con el modelo se compararon con las registradas en la presa. La calidad de las estimaciones se cuantificó con el error cuadrático medio, siendo inferior al grado centígrado.

### 3.2.2. Los esquemas de diferencias finitas.

Agullo *et al.* (1996) propusieron un modelo unidimensional de diferencias finitas para determinar el campo de temperaturas. Este modelo fue posteriormente mejorado por Santillan *et al.* (2014b) añadiendo flujos de calor de otros mecanismos de transmisión de energía que no fueron considerados por los primeros autores.

El modelo mejorado fue evaluado en el caso de estudio. Las estimaciones de las temperaturas de los termómetros tuvieron un error cuadrático medio entorno a un grado centígrado.

Con la ayuda del modelo térmico tridimensional de la presa, se estudió la dirección de propagación del calor. Se comprobó que éste fluía en una dirección sensiblemente paralela a la normal a la superficie media de la presa. Esa dirección es la de integración del modelo de diferencias finitas y es, en parte, responsable de la calidad de sus predicciones.

Se calculó también el campo de temperaturas en un número finito de puntos situados en la ménsula central y en un arco con los dos modelos numéricos. Las predicciones fueron similares, con diferencias absolutas medias inferiores a un grado centígrado. El error aumentó considerablemente en las proximidades de los estribos, donde el flujo de calor se desvía de la

dirección comentada en el párrafo anterior. La desviación está ocasionada por la presencia del cimientado, que no se reproduce en el modelo unidimensional.

#### **4. LAS POSIBLES CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO.**

El cambio climático ha adquirido una importante relevancia, tanto social como política. A finales de la década de los ochenta, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización Meteorológica Mundial crearon el Grupo Intergubernamental sobre Expertos del Cambio Climático (IPCC), cuya misión es evaluar los aspectos científicos, los efectos y los aspectos socioeconómicos del cambio climático y de las opciones de mitigación y adaptación.

Se han estimado predicciones futuras de las diversas variables climáticas hasta el año 2100. Las predicciones se han determinado con diversos modelos climáticos y con varios escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. El proyecto europeo ENSEMBLES (Hewitt, 2004) pone a disposición de los científicos predicciones diarias de la evolución de diversas variables climáticas en Europa.

Las presas bóveda son estructuras sensibles a los cambios de temperatura. Por ello, y a partir de varias predicciones diarias proporcionadas por el proyecto ENSEMBLES y refinadas con los registros de las mismas en el sitio de interés, se estimaron las evoluciones de las variables climáticas necesarias para los estudios térmicos de presas de hormigón.

A partir de las estimaciones del clima futuro, se determinó la evolución del campo de temperaturas de la presa de La Baells. Posteriormente, mediante un modelo mecánico elástico de la estructura, se calculó la evolución de sus tensiones y deformaciones con diversos niveles de embalses.

La Figura 3 representa diversas predicciones de la evolución de los movimientos radiales medios anuales de origen térmico de la coronación de la ménsula central para tres niveles de embalse. Se observa que los movimientos radiales podrían aumentar entre 6 y 14 mm. También se prevé que el posible incremento de deformaciones ocasionado por el aumento de las temperaturas no altere sustancialmente el estado tensional de la presa debido a la fluencia del hormigón.

Además, es ya conocido que las presas bóveda experimentan una deriva temporal de sus movimientos radiales hacia aguas abajo debido a la combinación "fluencia + empuje hidrostático". No obstante, se ha estimado que esta deriva podría cambiar de sentido por el efecto del incremento de las temperaturas ambientales.

Este es un aspecto a tener en cuenta por los explotadores de las presas. Se prevé un cambio del sentido de la deriva de los movimientos radiales a consecuencia del efecto del cambio climático.

#### **5. CONCLUSIONES.**

Se propone una nueva metodología para cuantificar la interacción térmica entre la estructura y el medio ambiente que la rodea que incluye nuevos



fenómenos de intercambio de calor. La metodología se ha evaluado en un caso de estudio, con resultados satisfactorios.

Se han evaluado diversos modelos matemáticos para determinar el campo de temperaturas de las presas de hormigón en un caso de estudio. Se ha analizado las causas de la calidad de las predicciones de cada uno de ellos.

Finalmente, se ha analizado el comportamiento futuro tenso-deformacional del caso de estudio en diversos escenarios de cambio climático. Se ha estimado que los movimientos radiales medios anuales de la coronación de la ménsula central se incrementarán. El campo de tensiones no se alterará considerablemente debido a la fluencia del hormigón.

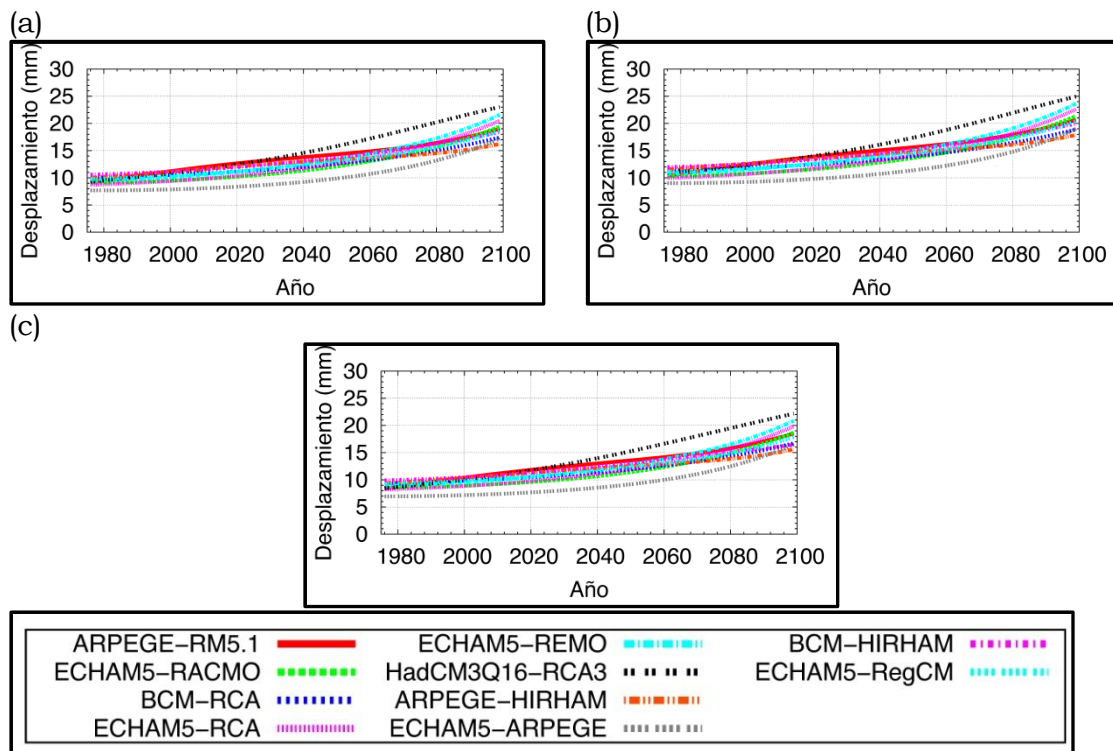


Figura 3. Predicciones de las evoluciones de los movimientos radiales medios anuales de origen térmico de la coronación de la ménsula central para (a) embalse vacío, (b) nivel de embalse a media altura, (c) embalse lleno. Cada línea se corresponde con una predicción futura del clima.

## AGRADECIMIENTOS.

Agradecemos la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación "Desarrollo del Software iCOMPLEX para el control y evaluación de la seguridad de infraestructuras críticas" con código IPT-2012-0813-390000. También se agradece los datos de la presa de La Baells proporcionados por la empresa Ofiteco y la Agencia Catalana del Agua.

## REFERENCIAS.

Agullo, L., Mirambell, E. y Aguado, A. (1996). A model for the analysis of concrete dams due to environmental thermal effects. *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow*, 6(4), 25-36.

Bofang, Z. (1985). Prediction of water temperature in reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2:001.

Chen, B., Clark, D., Maloney, J., Mei, W., y Kasher, J. (1995). Measurement of night sky emissivity in determining radiant cooling from cool storage roofs and roof ponds. En *Proceedings of the National Passive Solar Conference*, volumen 20, pp. 310-313. American Solar Energy Society Inc.

Christensen, J., Hewitson, B., Busuioc, *et al.* (2007b). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, capítulo Regional Climate Projections. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY.

Douglas, K. (2002). *The shear strength of rock masses*. Tesis doctoral, The University of New South Wales, Sydney, New South Wales, Australia.

Hewitt, C.D. (2004). Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. *Eos Trans AGU*, 85(52), 566-566

IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, Cambridgeshire, UK.

Léger, P., Venturelli, J. y Bhattacharjee, S. (1993a). Seasonal temperature and stress distributions in concrete gravity dams. Part I: modelling. *Can. J. Civ. Eng.*, 20(6), 999-1017.

Léger, P. y Leclerc, M. (2007). Hydrostatic, temperature, time-displacement model for concrete dams. *J. Eng. Mech.-ASCE*, 133(3), 267-277.

Marco-García, C. (1995). *Modelos de fisuración de presas de hormigón*. Colección Señor, 15. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.

Santillán, D., Saleté, E., Vicente, D.J. y Toledo, M.A. (2014a). Treatment of solar radiation by spatial and temporal discretization for modeling the thermal response of arch dams. *J. Eng. Mech.-ASCE*, 140(11), 05014001.

Santillán, D., Saleté, E., Toledo, M.A. y Granados, A. (2014b). An improved 1D-model for computing the thermal behaviour of concrete dams during operation. Comparison with other approaches. *Comput. Concrete* (en prensa).

Santillán, D., Saleté, E. y Toledo, M.A. (2014c). A methodology for the assessment of the effect of climate change on the thermal-strain-stress behaviour of structures. *Eng. Struct.* (en proceso de revisión).

Stucky, A. y Derron, M.H. (1957), *Problèmes Thermiques Posés par la Construction des Barrages-réservoirs*, P. Feissly, ed., Science & Technique, Lausanne, Suiza.