

Un modelo para el análisis del comportamiento térmico de presas de hormigón en etapa de explotación

LUIS AGULLÓ (*)
ANTONIO AGUADO (*)
ENRIQUE MIRAMBELL (*)

RESUMEN En este artículo se presenta un modelo numérico desarrollado para la obtención de las temperaturas en la presa frente a la actuación de la acción térmica ambiental. Este constituye un modelo sencillo, el cual contempla la presencia de distintas variables que caracterizan al hormigón, a la geometría y al emplazamiento de la presa, y a la acción térmica ambiental del medio en el que se encuentra inmersa.

Se exponen los criterios adoptados para la estimación de los parámetros que configuran el modelo y se presenta la aplicación del mismo a un caso concreto (Presa de Baserca).

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el modelo propuesto es capaz de reproducir de forma satisfactoria la evolución térmica de la presa en explotación y, en particular, de reflejar adecuadamente los efectos derivados de la inercia térmica del hormigón.

A MODEL FOR THE THERMAL BEHAVIOUR OF CONCRETE DAMS DUE TO ENVIRONMENTAL EFFECTS

ABSTRACT In this paper, an analytical model is presented for the simulation of the thermal behavior of dams that are subjected to the environmental thermal action during service. This is a simple model, which envisages variables that characterize the concrete, the geometry and location of the dam, and the environmental thermal action.

The temperatures predicted by the model were satisfactorily compared with the experimental thermal record of spanish dams currently in operation.

The results obtained demonstrate that the proposed model predicts the evolution of temperature adequately at different zones of the dam. Similarly, the model reflects the thermal inertia of the concrete dam.

Palabras clave: Presas de hormigón; Explotación; Comportamiento térmico; Modelos numéricos; Temperaturas; Presa de Baserca.

1. INTRODUCCIÓN

La presa de hormigón en su etapa de explotación se encuentra sometida de manera permanente a la acción térmica procedente del ambiente en el cual está inmersa. El propio carácter de esta acción térmica, asociada a las condiciones climatológicas y ambientales del emplazamiento y a las condiciones térmicas del agua embalsada, hace que su estudio requiera plantearse de la forma más específica posible.

En este artículo se presenta la descripción de un modelo de análisis desarrollado para la obtención de las temperaturas alcanzadas en la presa en explotación frente a la acción térmica ambiental, tanto en lo que concierne a las hipótesis en las que éste se fundamenta y al método de resolución

adoptado, como en lo que concierne a la evaluación de los distintos parámetros que lo configuran.

El modelo numérico que se propone, basado en un esquema explícito en diferencias finitas, proporciona la temperatura en los nodos de la malla de discretización adoptada y en cualquier instante y contempla la presencia de distintas variables que caracterizan al hormigón, a la geometría y al emplazamiento de la presa y a la acción térmica ambiental.

Seguidamente se exponen los criterios adoptados para la estimación de los parámetros que configuran el modelo y el procedimiento seguido en la contrastación de los resultados teóricos que predice el modelo con los registros térmicos experimentales correspondientes a diferentes presas españolas actualmente en explotación, las cuales responden a distintos emplazamientos y tipos estructurales.

Finalmente, se presenta, a modo de ejemplo, la aplicación del modelo en un caso concreto (Presa de Baserca), así como la contrastación de las temperaturas teóricas que éste predice con las temperaturas registradas en esta presa.

(*) Doctores Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Catalunya. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

2. MODELIZACIÓN UTILIZADA PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA TÉRMICA DE LA PRESA DE HORMIGÓN EN FASE DE EXPLOTACIÓN

2.1. HIPÓTESIS ADOPTADAS

La ecuación diferencial que rige el fenómeno de la conducción de calor en presas de hormigón, en fase de explotación se expresa por la relación:

$$\nabla^2 T = \frac{\rho \cdot c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

En su deducción se han adoptado, desde un punto de vista térmico, las siguientes hipótesis relativas al hormigón: medio continuo, isotrópico y homogéneo y permanencia de las propiedades térmicas.

Asimismo se ha supuesto que la generación de calor interno originado durante el proceso de endurecimiento ha finalizado y en consecuencia, el término relativo al calor generado por unidad de tiempo y unidad de volumen en el seno del hormigón es idénticamente nulo.

Para obtener, a nivel de sección transversal de la presa, la distribución de temperaturas en el hormigón, a las hipótesis ya mencionadas se suma la hipótesis de que el flujo de calor en la sección transversal es, predominantemente, unidireccional según el espesor; esta hipótesis, adoptada en otros trabajos relativos al estudio de la respuesta térmica del hormigón frente a solicitaciones térmicas ambientales (Stucky y Derron (1957), Townsend (1965), ACI (1987)), conduce a realizar el análisis del comportamiento térmico de la sección transversal mediante el análisis del comportamiento térmico de distintas secciones a cotas determinadas y de espesor variable en función, primordialmente, de la altura de presa (Fig. 1).

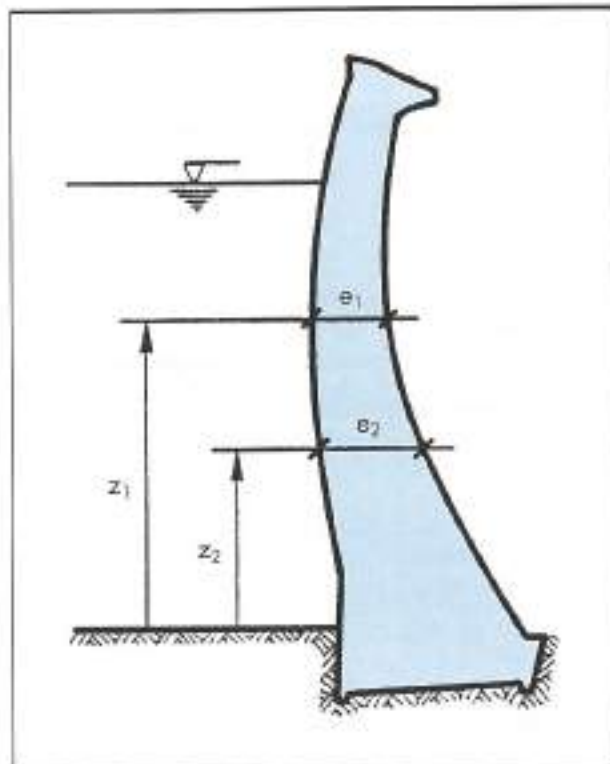


FIGURA 1. Modelo de análisis a nivel sección transversal.

La ecuación (1) requiere para su resolución de la imposición de las pertinentes condiciones inicial y de contorno.

Condición inicial

Esta condición viene definida por el conocimiento de la temperatura en todo el dominio de integración de la ecuación diferencial para un instante determinado, instante éste que se adopta como origen de tiempos.

$$T(X, z, t_0) = T_i(X, z) \quad (2)$$

Condiciones de contorno

Tales condiciones representan la formulación matemática de los distintos mecanismos de transmisión de calor entre la presa y el entorno en el cual se ubica. En el modelo de análisis adoptado, el intercambio de calor entre la presa y el medio en el cual se encuentra inmersa tiene lugar a través de sus paramentos de aguas abajo y de aguas arriba; en consecuencia, éstos son los que definen las superficies del contorno en las que se impondrán las pertinentes condiciones.

En el paramento de aguas abajo se adopta una condición de flujo prescrito; mediante esta condición se pretende representar la transferencia de calor en el paramento originada por los distintos mecanismos presentes de transmisión de calor (radiación solar, convección, re-radiación).

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(X, z, t) + q(X, z, t) = 0 \quad (3)$$

La energía calorífica (q) transferida en la superficie del paramento aguas abajo es suma de las energías debidas a la radiación solar, q_s , convección, q_c , y re-radiación q_r .

$$q(X, z, t) = q_s(X, z, t) + q_c(X, z, t) + q_r(X, z, t) \quad (4)$$

El calor ganado debido a la radiación solar (radiación de onda corta) puede expresarse mediante la relación

$$q_s(X, z, t) = \alpha \cdot I(X, z, t) \quad (5)$$

en la cual I es la radiación solar total incidente sobre la superficie del paramento en el instante t y α es el coeficiente de absorción solar del hormigón.

El calor perdido o ganado en la superficie por convección como resultado de la diferencia de temperatura entre la superficie expuesta del paramento y el aire viene definido por la ley de enfriamiento de Newton.

$$q_c(X, z, t) = h_c [T(X, z, t) - T_a(t)] \quad (6)$$

En dicha ecuación h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección, función principalmente de la velocidad del viento, T es la temperatura de la superficie en el instante t y T_a la temperatura ambiente en ese mismo instante.

El calor transferido entre la superficie expuesta del paramento de hormigón y el entorno que le rodea debido a la radiación térmica (radiación de onda larga) se modeliza a través de la ley de Stefan-Boltzmann, escrita ésta en forma cuasi-lineal:

$$q_r(X, z, t) = h_r(X, z, t) [T(X, z, t) - T_a(t)] \quad (7)$$

en la cual h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, que depende de la temperatura existente en la superficie y viene definido por la relación

$$h_r(X, z, t) = C_{SB} \cdot \epsilon \cdot [|T(X, z, t) + T_a(t)|^2 + (T_a(t) + T_a(t))^2] \cdot T(X, z, t) + T_a(t) + 2T_a(t) \quad (8)$$

En ella C_{SB} es la constante de Stefan-Boltzmann, ϵ es la emisividad de la superficie de hormigón y T° es una constante que permite pasar de grados Celsius a grados Kelvin.

Por tanto, la condición de contorno a imponer en el paramento aguas abajo puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$k \frac{\partial T}{\partial n}(X, z, t) + a \cdot I(X, z, t) + h_c [T(X, z, t) - T_a(t)] + h_r(X, z, t)(T(X, z, t) - T_a(t)) = 0 \quad (9)$$

En el paramento aguas arriba se impone una condición de contorno de temperatura prescrita; esta condición supone conocida para todo instante t la temperatura T en cualquier punto del paramento.

$$T(X, z, t) = T_a(X, z, t) \quad (10)$$

Como temperatura prescrita en un punto del paramento aguas arriba y en cualquier instante se adopta la temperatura que tiene el agua del embalse en ese punto y en el mismo instante.

2.2. MÉTODO NUMÉRICO DE RESOLUCIÓN

La resolución numérica de la ecuación diferencial establecida para obtener la respuesta térmica de la presa en explotación frente a la acción térmica ambiental se basa en un esquema en diferencias finitas correspondiente al método explícito de solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

El dominio de integración se discretiza mediante una malla unidimensional en cuyos nodos se aproximan las derivadas parciales que figuran en la ecuación mediante sus respectivas expresiones en diferencias finitas.

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_i = \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{(\Delta x)^2} \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_i = \frac{T_{i,M} - T_i}{\Delta t} \quad (12)$$

Sustituyendo (11) y (12) en la ecuación (1) se obtiene la siguiente relación:

$$T_{i,M} = T_i + \frac{k}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot (T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}) \quad (13)$$

la cual permite obtener el valor de la temperatura en el nodo i en el instante $(t + \Delta t)$ en función de las temperaturas del nodo en cuestión y de sus adyacentes en el instante t .

El esquema adoptado constituye una técnica sencilla de cálculo en la que los valores funcionales en el tiempo $(t + \Delta t)$ se deducen de los valores funcionales en el tiempo t mediante operaciones aritméticas simples; no obstante, el incremento de tiempo a adoptar para realizar la integración en el dominio tiempo de ser tal que se verifiquen las condiciones que aseguren la convergencia y estabilidad del método numérico.

La condición necesaria y suficiente para que la solución sea estable resulta ser la misma que la condición necesaria y suficiente para que la solución sea convergente. Esta condición viene expresada por la desigualdad:

$$\frac{k}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (14)$$

Sin embargo, dicha condición no asegura la estabilidad en los nodos exteriores en los que debe imponerse las condi-

ciones de contorno relativas a la radiación solar, radiación térmica y convección.

Para estos nodos, resulta la condición:

$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{k}{\rho \cdot c} \left(\frac{2}{(\Delta x)^2} + \frac{h}{k \Delta x} \right)} \quad (15)$$

la cual es más restrictiva que la obtenida (14) para los nodos interiores.

La restricción impuesta al valor del incremento de tiempo a adoptar siguiendo el esquema explícito puede evitarse mediante la utilización de métodos implícitos incondicionalmente convergentes y estables, en los cuales se requiere de la solución de un sistema de tantas ecuaciones como nodos aparezcan en la discretización del dominio considerado. En el caso particular de las presas de hormigón la discretización debe contemplar un número elevado de nodos para reflejar adecuadamente la transmisión del calor en su interior, lo que lleva consigo un aumento grande de las operaciones de cálculo como consecuencia de la inversión de una matriz de orden relativamente elevado para cada escalón de tiempo; ello hace que, en algunos casos, se opte por el empleo de métodos explícitos [Zienkiewicz (1980)].

Por otra parte, la utilización de incrementos de tiempo pequeños permite seguir con detalle la evolución de las temperaturas alcanzadas en el hormigón de la presa y de la acción térmica ambiental que actúa sobre ella; asimismo, cabe plantearse si una mejora de la precisión, en ocasiones pequeña, justifica el aumento del cálculo especialmente en el caso que nos ocupa en donde existe gran aleatoriedad en algunos de los parámetros climatológicos y ambientales que se utilizan como dato para el análisis.

2.3. EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE DIVERSOS PARÁMETROS AMBIENTALES

2.3.1. Radiación solar incidente en los paramentos de la presa

El modelo de análisis propuesto contempla la radiación solar incidente en el paramento de la presa (superficie inclinada y orientada) y su variación horaria dentro del correspondiente intervalo de horas de sol.

Por otra parte, los datos relativos a radiación solar de los que puede disponerse comúnmente son, en ausencia de otras medidas específicas en un emplazamiento determinado, los publicados por el Servicio Meteorológico Nacional. Estos se refieren a la radiación global diaria en promedio mensual recibida por una superficie horizontal en diferentes puntos de la geografía española; en base a estas mediciones se han confeccionado los mapas de radiación solar contenidos en el Atlas de la Radiación Solar en España (Instituto Nacional de Meteorología, 1984) y que constituyen una primera fuente de información para estimar la radiación solar en los distintos emplazamientos de nuestro país.

En consecuencia, se precisa seguir un proceso de cálculo que permita obtener de la radiación global sobre superficie horizontal en el emplazamiento de la presa como dato, la radiación global incidente sobre los paramentos de la misma. Este proceso se expone seguidamente en forma resumida; la formulación detallada del mismo puede consultarse en Agulló *et al.* (1995).

Partiendo de la radiación global diaria en media mensual sobre una superficie horizontal, H_g , se obtienen las componentes correspondientes a la radiación diaria difusa, H_d , y a la radiación diaria directa, H_b .

Una vez estimadas las componentes directa y difusa de la radiación global diaria en promedio mensual en el emplazamiento (plano horizontal), se obtienen las radiaciones horarias difusa, H_{hd} , y directa, H_{hd} , en las distintas horas del intervalo horario correspondiente a la salida y puesta del sol en el lugar donde la presa está ubicada.

Obtenidas las componentes horarias directa y difusa de la radiación solar en el emplazamiento de la presa, se está en condiciones de estimar la radiación horaria incidente en los paramentos de la misma, I_h , como suma de sus componentes horarias directa, I_{hd} , difusa, I_{hd} , y reflejada, I_{hr} .

$$I_h = I_{hd} + I_{hd} + I_{hr} \quad (16)$$

Evaluada la radiación total incidente sobre el paramento en las diferentes horas del día en el intervalo de horas de sol correspondiente, la radiación total diaria, I , se obtiene como suma de las anteriores, extendida desde la hora de la salida a la de la puesta del Sol.

El proceso de cálculo indicado requiere como datos de entrada, además de la ya citada radiación global diaria en media mensual sobre superficie horizontal en el emplazamiento (H_d), el conocimiento de distintos parámetros que intervienen en la estimación de las diferentes componentes de la radiación solar incidente sobre el paramento. Estos son: la declinación solar (δ), la latitud del emplazamiento (ϕ), la inclinación y el acimut del paramento (S, γ) y el coeficiente de reflexión del entorno en que está ubicada la presa (ρ).

Para la determinación de la declinación solar pueden consultarse tablas o almanaques que dan su valor diario, o bien, utilizar fórmulas aproximadas que expresan la declinación en función del día del año, como son la de Lokmanhekim o la de Cooper [Duffie y Beckman (1974)].

No obstante, es usual considerar un día medio para calcular el valor medio de la declinación en cada mes; normalmente se considera el día medio como aquel en que la radiación extraterrestre asume el valor más próximo a la radiación extraterrestre diaria en media mensual para el mes considerado. En la tabla 1, tomada de Coronas *et al.* (1982), se presenta para cada mes el día medio y el valor que en él adopta la declinación solar.

Mes	Día medio	δ (grados)
Enero	17	-20,7
Febrero	15	-12,6
Marzo	16	-1,7
Abril	15	9,8
Mayo	15	18,9
Junio	10	23,0
Julio	17	21,2
Agosto	17	13,4
Septiembre	16	2,6
Octubre	16	-8,9
Noviembre	15	-18,5
Diciembre	11	-23,0

TABLA 1. Días medios y su declinación solar.

En relación a la latitud del emplazamiento y a la inclinación y el acimut del paramento, son parámetros que pueden obtenerse, respectivamente, en función de la localización geográfica de la presa y de la geometría de la sección transversal de la misma que se analice.

Respecto al coeficiente de reflexión del entorno, éste puede estimarse en función del medio que refleja radiación sobre la superficie inclinada del paramento según los valores dados por Coronas *et al.* (1982), los cuales se presentan en la tabla 2.

Tipo de suelo	ρ
Nieve reciente	80-90%
Nieve no reciente	60-70%
Terrenos de cultivo	
• Sin vegetación	10-15%
• Hierba seca	28-32%
• Prada y arbolados	15-30%
Terreno arenoso	15-25%
Cemento, hormigón	55%
Arena clara	25-40%
Agua	
• Verano	5%
• Invierno	18%

TABLA 2. Coeficiente de reflexión del entorno.

Por tanto, mediante el proceso de cálculo establecido, partiendo de la radiación global incidente en el emplazamiento de la presa (H_d) puede estimarse, en cualquier día del año y a cualquier hora del mismo (δ), la radiación global incidente en el paramento (I) en función de datos relativos al emplazamiento de la presa (ϕ), a su geometría (S, γ) y al entorno en que está ubicada (ρ).

2.3.2. Temperatura ambiente

Para modelizar matemáticamente la variación de la temperatura ambiente a lo largo del día se ha optado por una función bisenoidal; ésta permite, además de proporcionar un buen ajuste para variaciones periódicas, la representación de variaciones no periódicas. Esta función se determina por las temperaturas máxima y mínima diaria y por las horas del día en que se alcanzan estas temperaturas.

Cuando se trata de analizar el comportamiento térmico de la presa en explotación, los parámetros térmicos necesarios para definir la evolución de la temperatura ambiente pueden estimarse a partir de las temperaturas ambiente que se registran habitualmente en el emplazamiento de la presa.

2.3.3. Temperatura del agua en el embalse

La temperatura del agua embalsada varía con la profundidad siendo estas variaciones térmicas más significativas en las proximidades de la superficie donde la influencia tanto de la temperatura ambiente y de otros agentes climáticos como del régimen de explotación tienen una mayor repercusión.

ción; a medida que nos alejamos de la superficie y aumenta la profundidad, el comportamiento térmico del agua tiende a ser más uniforme.

Los rangos alcanzados por la temperatura del agua, entendidos éstos como diferencia de temperaturas extremas, tienen distinta significación en cuanto a su efecto térmico sobre el paramento mojado de la presa dependiendo también del período de tiempo que se adopte para el análisis. Así, el efecto de las variaciones térmicas diarias en el agua del embalse, tal como señala Townsend (1965), tienen poca significación mientras que éste se muestra significativo cuando el análisis se realiza en períodos estacionales o anuales.

El modelo planteado contempla la acción térmica del agua embalsada sobre la presa mediante la condición de contorno impuesta en su paramento mojado de aguas arriba; esta condición se establece adoptando como temperatura del hormigón en un punto de dicho paramento la temperatura del agua en ese punto, expresada ésta por un valor medio mensual.

Esta modelización permite representar las variaciones de la temperatura con la profundidad al contemplar como dato la temperatura del agua a la cota en la cual se realiza el análisis. Asimismo, y en relación al análisis temporal, permite reflejar las variaciones térmicas estacionales y anuales mediante los valores medios mensuales adoptados.

2.3.4. Coeficientes de transmisión de calor

El coeficiente de transmisión de calor por radiación, h_r , se evalúa en cada instante en función de las temperaturas ambiente y de la superficie, de la emisividad del hormigón y de la constante de Stefan-Boltzmann según la expresión (8) anteriormente escrita.

El coeficiente de transmisión de calor por convección, h_c , se contempla como dato a introducir previamente al análisis y con la opción de que pueda ser variable según los distintos meses del año.

El mencionado coeficiente, si bien depende de numerosos factores, es función primordial de la velocidad del viento y en función de ésta puede evaluarse mediante fórmulas empíricas propuestas por distintos autores.

En lo que se refiere a este trabajo, se ha adoptado la fórmula empírica dada por Kehlbeck (1975), utilizada ésta en otros trabajos relativos a efectos térmicos ambientales en estructuras de hormigón [Elbadry y Ghali (1983), Dilger *et al.* (1983), Mirambell (1987)].

$$h_c = 3,83v + 4,67 \quad (17)$$

En esta relación, v es la velocidad del viento expresada en m/seg y h_c se obtiene en $w/m^2 \text{ } ^\circ C$.

En consecuencia, la estimación en el modelo que se propone del coeficiente de transmisión de calor por convección se realiza a través de la velocidad del viento en el emplazamiento de la presa, lo cual permite analizar la influencia que, desde un punto de vista térmico, tiene esta variable climatológica en la respuesta térmica de la presa en fase de explotación; su implementación en el modelo puede realizarse mediante un valor medio mensual o bien adoptando un valor medio anual.

Los datos relativos a la velocidad del viento en la presa pueden estimarse a partir de los registros medidos en estaciones meteorológicas próximas al emplazamiento. En ausencia de éstos, una primera estimación puede realizarse adoptando los valores medios dados por el Instituto Nacional de Meteorología (1983).

3. CONTRASTACIÓN DE RESULTADOS. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Los resultados teóricos que predice el modelo se han contrastado con los resultados experimentales obtenidos fruto de la auscultación térmica en distintas presas españolas actualmente en explotación que responden a distintos emplazamientos y tipos estructurales (Baserca, Llauset, Almendra y Mequinenza).

Los datos relativos a la auscultación térmica con los cuales se ha trabajado en la contrastación son, en lo que se refiere a la acción térmica ambiental, los registros periódicos de la temperatura ambiente y de la temperatura del agua embalsada, mientras que en relación a la respuesta térmica de la presa en explotación se ha dispuesto de las temperaturas alcanzadas en el hormigón, registradas éstas también periódicamente; asimismo, se ha dispuesto para cada presa considerada de los planos que permiten la localización y definición geométrica de las secciones estudiadas. En la tabla 3 se muestran, para cada presa, los períodos interanuales en los cuales se han registrado experimentalmente las temperaturas utilizadas para la contrastación.

Presa	Temperatura ambiente	Temperatura del agua	Temperatura del hormigón
Baserca	1985-86-87	1985-86-87	1985-86-87
Llauset	1985-86-87	1985-86-87	1985-86-87
Almendra	1977-78-79-80-81	1984-85-86-87	1975,76-77-78
Mequinenza	1983-84-85-86	1983 al 1988	1984 al 1988

TABLA 3. Períodos interanuales relativos a los datos experimentales utilizados en la contrastación.

La aplicación del modelo a un caso concreto requiere, por una parte, la estimación previa de los parámetros que en él intervienen y de los cuales no se tiene un conocimiento directo a través de medidas experimentales *in situ*; por otra parte, se precisa también una modelización de los datos experimentales registrados periódicamente para su implementación numérica en el modelo presentado.

A continuación se exponen los criterios adoptados para la estimación de los parámetros físicos que configuran el modelo y en la modelización de los datos experimentales. Seguidamente, se define el método utilizado sistemáticamente en la contrastación y, finalmente, se presenta, a modo de ejemplo, la aplicación del modelo para la presa de Baserca.

Los aspectos particulares relativos a la aplicación del modelo en las presas de Llauset, Almendra y Mequinenza están recogidos en Agulló (1991).

3.1. CRITERIOS ADOPTADOS EN LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS QUE CONFIGURAN EL MODELO Y EN LA MODELIZACIÓN DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES

Los parámetros necesarios para la obtención de la distribución de temperaturas en la presa siguiendo el modelo propuesto pueden agruparse en cuatro familias o grupos principales; éstos son, los relativos a las características térmicas del hormigón, al emplazamiento y la geometría de la presa, y a la caracterización térmica del ambiente en el cual ésta se ubica. En la tabla 4 se muestran en forma detallada los po-

rámetros referidos, señalándose con un asterisco aquéllos que se han estimado tomando como fuente la documentación específica suministrada para cada presa analizada.

Parámetros relativos al hormigón

El hormigón queda caracterizado térmicamente, en lo que hace referencia a la conducción del calor en el seno de la presa, mediante la conductividad térmica, el calor específico y el peso específico, parámetros éstos que gobiernan, desde el punto de vista del material, la ecuación diferencial establecida para la obtención de la respuesta térmica de la presa de hormigón en fase de explotación.

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL HORMIGÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Conductividad • Color específico • Peso específico • Coeficiente de absorción • Emisividad
CARACTERIZACIÓN DE GEOMETRÍA Y EMPLAZAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Latitud [°] • Declinación solar • Acimut [°] • Espesor [m] • Inclinación paramento aguas abajo [°]
CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL AMBIENTE	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura ambiente [°] • Temperatura del agua [°] • Coeficiente de convección • Radiación solar • Coeficiente de reflexión del estroma
[*] Valores estimados en función de datos relativos a la presa.	

TABLA 4. Parámetros necesarios para la obtención de la respuesta térmica de la presa según el modelo propuesto.

En relación a los intercambios de calor con el ambiente exterior, la emisividad rige los originados por la existencia de transferencia de calor por radiación térmica (onda larga), mientras que el coeficiente de absorción representa un índice de la cantidad de calor que puede absorber la presa debido a la radiación solar incidente en sus paramentos.

Las hipótesis adoptadas de medio continuo, homogéneo, isotrópico y de permanencia de las propiedades térmicas conducen a estimar los parámetros que caracterizan térmicamente al hormigón mediante valores constantes en el tiempo y en el espacio. En la tabla 5 se muestran los valores adoptados para estos parámetros en la contrastación.

Caracterización térmica del hormigón	
Conductividad térmica	2,5 w/m ² C
Color específico	1.000 J/kg ² C
Peso específico	2.500 kg/m ³
Emisividad	0,88
Coeficiente de absorción	0,50

TABLA 5. Valores adoptados para caracterizar térmicamente al hormigón.

El valor estimado para la conductividad térmica corresponde a un valor medio, para un hormigón saturado, obtenido en base a conductividades térmicas evaluadas en hor-

migones dosificados con áridos de distinta procedencia, utilizados en la construcción de diversas presas en Estados Unidos y en Brasil [ACI (1987), Itaipu RC-37 (1981)]; asimismo, el calor específico se ha estimado siguiendo criterios análogos a los utilizados para la conductividad térmica [ACI (1987), Itaipu RC-45 (1979)].

En relación al peso específico, éste se ha estimado también mediante un valor medio representativo de pesos específicos determinados en hormigones empleados en diferentes presas construidas en España y en los E.E.U.U. [Aguado *et al.* (1989), ACI (1987)].

En cuanto a la emisividad térmica y al coeficiente de absorción no se han encontrado en la bibliografía consultada valores de estos parámetros que respondan a una evaluación experimental de los mismos en el ámbito específico de las presas de hormigón; por ello, su estimación se ha realizado teniendo en cuenta los valores que han adoptado distintos autores en estudios relativos a la acción térmica ambiental en otras tipologías estructurales de hormigón. Así, el valor adoptado para la emisividad es coincidente con el utilizado por Emerson (1973) y CEB (1975) mientras que para el coeficiente de absorción se ha tomado el recomendado por Emerson (1973), valor éste comprendido en el rango de valores establecido por Stucky y Derron (1957) para este parámetro.

Parámetros relativos al emplazamiento

En este grupo se engloban la latitud de la presa, el acimut de la superficie sobre la que incide radiación solar y la declinación solar. Si bien estos parámetros responden a distintos orígenes, su consideración conjunta obedece, fundamentalmente, a que todos ellos intervienen, en mayor o menor medida, en el proceso anteriormente establecido para estimar la radiación solar incidente en los paramentos de la presa (superficies inclinadas y orientadas) a partir de la radiación solar incidente en su emplazamiento (plano horizontal).

La latitud y la declinación solar determinan las horas de salida y de puesta del Sol en el lugar donde la presa se ubica y, en consecuencia, definen el intervalo en horas solares en el cual incide la radiación solar en el emplazamiento. Asimismo ambas también contribuyen, juntamente con el acimut y la geometría del paramento de la sección, en la definición del ángulo de incidencia de los rayos solares en el paramento y por tanto en la evaluación de la radiación solar que incide en el mismo.

En cada presa se ha determinado la latitud según su situación geográfica, localizándola previamente en el plano general de presas y embalses españoles contenido en el Inventario de Presas Españolas (1986).

La estimación del acimut de la superficie que recibe radiación solar se ha realizado teniendo en cuenta la posición relativa de la sección transversal considerada (normal al eje o directriz de la presa) en la planta general de la presa, determinándose según esta posición la orientación de la proyección de la normal a la superficie respecto a la dirección Sur. Los valores adoptados para esta magnitud son, para cada sección transversal, constantes en el tiempo y en el espacio.

Para la declinación solar se adopta un valor medio en cada mes, valor éste que corresponde a la declinación solar en un día medio representativo del mes. Los valores adoptados para este parámetro así como los días medios representativos de cada mes han sido expuestos anteriormente en la tabla 1, en la cual se pone de manifiesto que los días medios representativos del mes a efectos de la radiación solar se sitúan, para cada mes, o bien en el día 15 o en un entorno muy próximo a éste.

Parámetros geométricos

El modelo de análisis propuesto contempla la caracterización geométrica de la presa, en cada sección transversal considerada, mediante el espesor y la inclinación que presenta en ella el paramento de aguas abajo, definidos ambos para cada cota en la cual se realiza el análisis.

El espesor constituye un parámetro de interés primordial en relación, fundamentalmente, a la conducción del calor en el seno de la presa, siendo la inclinación del paramento aguas abajo uno de los parámetros que interviene en la cuantificación de la radiación solar incidente sobre el mismo.

Los valores adoptados para el espesor y la inclinación del paramento aguas abajo se han obtenido, en cada presa, a partir de los planos correspondientes a las secciones transversales en las que se ha planteado la contrastación.

Parámetros ambientales

La modelización adoptada para la temperatura ambiente requiere el conocimiento de unas temperaturas ambiente máxima y mínima diarias, así como las horas del día en que se alcanzan ambas temperaturas.

Estas temperaturas se han estimado, en cada presa, a partir de los registros de la temperatura ambiente diaria, máxima y mínima, obtenidos experimentalmente como resultado de la auscultación térmica en el emplazamiento. Los valores numéricos adoptados corresponden a los valores medios mensuales (máxima y mínima diarias en media mensual) calculados en base a los datos disponibles en los respectivos períodos interanuales. Para la estimación de las horas del día en que se alcanzan las temperaturas diarias extremas no se ha dispuesto de información al respecto, adoptándose, como valores medios peninsulares, las 3,0 h para la temperatura mínima y las 15,0 h para la temperatura máxima.

La temperatura del agua define la condición de contorno impuesta en el paramento mojado aguas arriba de la presa. Su estimación se ha realizado mediante un valor medio mensual obtenido teniendo en cuenta las temperaturas del agua medidas experimentalmente en cada presa en los respectivos períodos interanuales, y en las cotas correspondientes a las secciones analizadas.

En el modelo propuesto, el coeficiente de transferencia de calor por convección precisa para su definición la estimación previa de la velocidad del viento en el emplazamiento de la presa. Al no disponer de registros de esta velocidad en estaciones meteorológicas próximas a los emplazamientos de las presas estudiadas, se ha adoptado para la misma un valor medio anual en cada emplazamiento según los datos recogidos al respecto por el Instituto Nacional de Meteorología (1983).

En relación a la radiación solar incidente, la ausencia de medidas experimentales de esta magnitud en los emplazamientos de las presas analizadas ha conducido a realizar su estimación mediante los valores medios mensuales de la radiación global diaria incidente sobre plano horizontal comprendidos éstos en el Atlas de la Radiación Solar en España publicado por el Instituto Nacional de Meteorología (1984); a partir de estos valores se obtiene la variación diaria de la radiación solar incidente en el paramento de la presa en el día medio considerado para cada mes.

Para el coeficiente de reflexión del entorno se ha adoptado el valor de 0,55 recomendado por Coronas *et al.* (1982) cuando el medio que refleja la radiación incidente es cemento u hormigón.

Los criterios adoptados en relación a los datos experimentales que intervienen como parámetros ambientales (valores medios mensuales en cada período interanual) permiten configurar un año tipo o año modelo durante el cual actúa sobre la presa la acción térmica ambiental modelizada.

3.2. MÉTODO SEGUIDO EN LA CONTRASTACIÓN

Los datos experimentales relativos a las temperaturas del hormigón en las presas estudiadas son las temperaturas registradas en los termómetros en ellas ubicados; estas temperaturas responden a lecturas tomadas durante varios años con una frecuencia que, por término medio, puede cifrarse entre cuatro y cinco lecturas por mes.

El número de termómetros que habitualmente se dispone a una determinada cota no es grande, variando este número en función, primordialmente, del espesor de la presa a la cota considerada; por otra parte, los termómetros dispuestos a una misma cota se suelen distribuir generalmente de forma selectiva en las zonas próximas a los paramentos y en la zona central del espesor. Ello conduce a considerar que las temperaturas medias y gradientes térmicos que puedan obtenerse en estas condiciones sean poco representativos de la respuesta térmica de la presa a efectos de la contrastación con los resultados teóricos que predice el modelo.

En consecuencia se ha optado por una contrastación de tipo puntual en el sentido de considerar las temperaturas registradas en los termómetros como datos básicos de comparación con los resultados obtenidos mediante el modelo.

La modelización de los registros experimentales relativos a las temperaturas alcanzadas en el hormigón se plantea en función de las series anuales de datos experimentales con los que se ha contado en el presente estudio. Para cada año, se determinan las temperaturas medias mensuales en cada termómetro; adoptando estos doce valores mensuales como representativos del comportamiento térmico en cada mes queda definida la evolución anual media de la temperatura del hormigón en cada uno de los períodos anuales que configuran el período interanual considerado en cada una de las presas analizadas.

En paralelo, para cada presa y a las cotas correspondientes que definen las distintas secciones en donde se ubican los termómetros, se obtienen mediante el modelo las temperaturas en los diferentes nodos que materializan los respectivos espesores; estas temperaturas determinan una distribución teórica de la temperatura del hormigón en cada sección considerada.

La contrastación de los registros experimentales modelizados con los resultados teóricos que predice el modelo se realiza en un contexto temporal de variación anual de temperatura, la cual queda definida mediante los valores mensuales obtenidos.

3.3. EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MODELO A LA PRESA DE BASERCA

La presa de Baserca está situada en la cuenca del río Noguera Ribagorzana, en el término municipal de Bono (Huesca). Responde a la tipología de presa bóveda con aliviadero en lámina libre y su función principal es la producción de energía eléctrica. Sus características generales se resumen en la tabla 6.

La sección transversal en la que se ha planteado la contrastación corresponde a la sección entre las juntas 10 y 11.

Altura (m)	86
Longitud en coronación (m)	322
Volumen de presa (10^3 m^3)	225
Volumen de embalse (hm^3)	12
Superficie de embalse (ha)	96
Capacidad de aliviadero (m^3/s)	290

TABLA 6. Características generales de la presa de Baseroa [Inventario de Presas Españolas (1986)].

En la figura 2 se presenta un croquis de la situación en planta de esta sección así como de su perfil, en donde se muestra detalladamente la disposición de los termómetros que se han empleado en la contrastación; también se defi-

nen en esta figura las distintas cotas a las que se ha planteado el análisis y se exponen los valores particulares adoptados para la presa en relación a los parámetros geométricos y de emplazamiento.

Los valores numéricos que representan la acción térmica ambiental sobre la presa se recogen en la tabla 7, en la cual se explicita para cada uno de ellos la fuente utilizada para su estimación.

El análisis se ha planteado en cinco secciones a distintas cotas contemplando en conjunto la evolución de la temperatura en un total de once termómetros. La disposición de éstos en la presa, tal como se ha recogido en la figura 2, obedece a tres ubicaciones claramente diferenciadas que corresponden a las proximidades de los paramentos de aguas abajo y de aguas arriba y a la zona central en cada espesor.

Los termómetros próximos al paramento de aguas abajo son los designados por T32, T50 y T64, todos ellos distantes un metro del mencionado paramento y a las cotas respectivas que se han indicado en la figura 2.

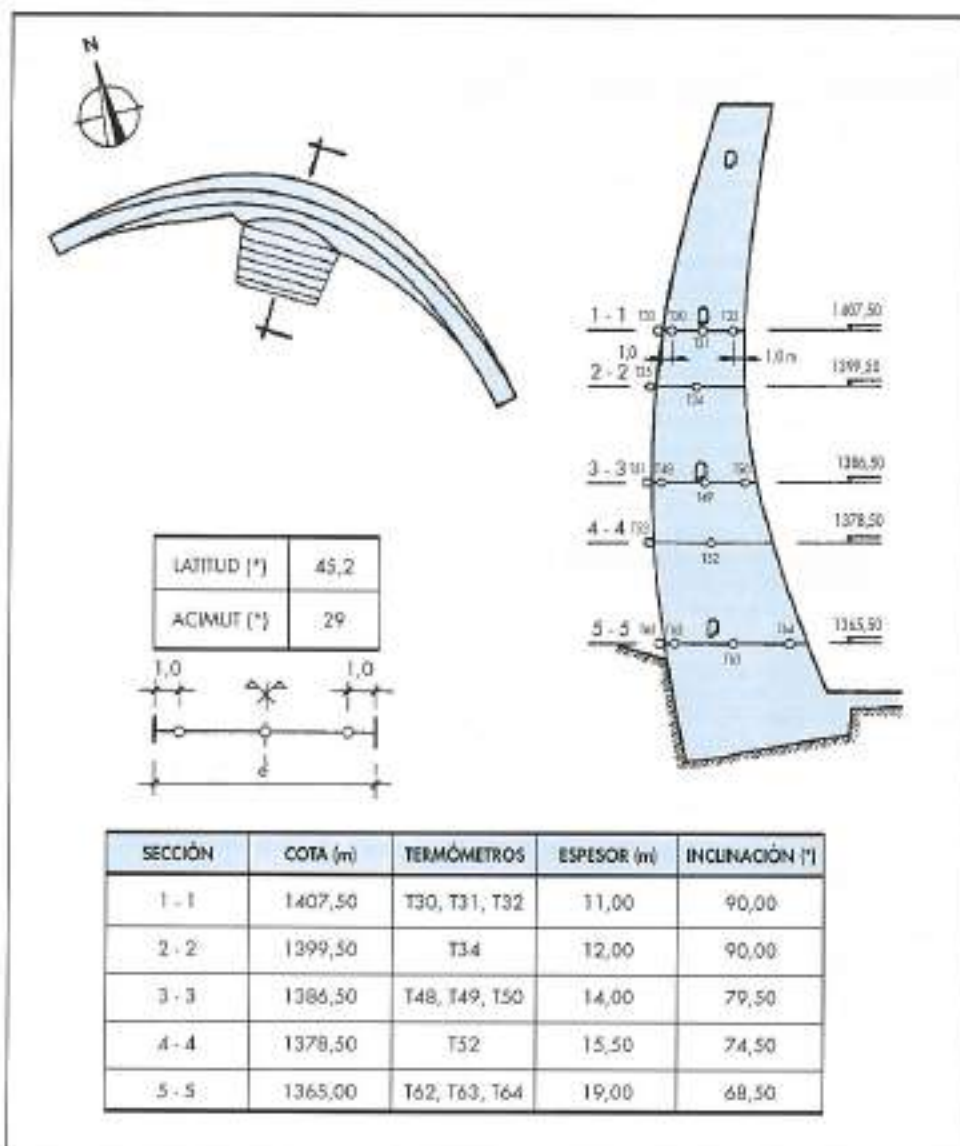


FIGURA 2. Características de la sección adoptada en la contrastación.

Mes	(1) [°]	(2) [°]	(3) [°]	(4) Cota (m) [°]				
				1407,5	1399,5	1386,5	1378,5	1365,0
E	1300	0,80	-5,57	1,92	1,90	2,04	2,22	2,51
F	2300	4,91	-3,40	1,87	1,68	2,13	2,36	2,78
M	3800	6,58	-1,71	2,12	3,01	2,71	2,81	3,04
A	4400	7,37	-1,17	6,60	5,20	4,15	4,07	4,15
MY	5400	11,70	3,11	6,94	6,61	6,00	5,38	5,17
J	6300	17,96	8,33	8,25	7,85	7,30	5,74	5,46
JL	6800	21,58	11,81	10,59	10,19	9,45	6,73	6,33
AG	5600	22,94	11,68	12,69	12,26	11,65	7,07	6,61
S	4500	20,66	10,93	13,77	13,46	11,70	6,99	6,70
O	3200	12,86	5,42	11,53	11,26	10,92	7,68	7,13
N	1800	6,97	0,47	7,44	7,39	7,25	6,69	6,51
D	1300	5,91	-1,01	4,31	4,40	4,27	4,21	4,16

• (1) Radiación solar incidente en el emplazamiento (kJ/m^2)
 • (2) Temperatura ambiente máxima diaria en medio mensual ($^{\circ}\text{C}$)
 • (3) Temperatura ambiente mínima diaria en medio mensual ($^{\circ}\text{C}$)
 • (4) Temperatura media del agua ($^{\circ}\text{C}$)
 • Coeficiente de convección ($h=4,16 \text{ m/s}$)= $20,63 \text{ w/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [***]
 [°] Atlas de la Radiación Solar en España, I.N.M. (1984)
 [°] Registros experimentales en la presa.
 [***] Atlas Climático de España, I.N.M. (1983)

TABLA 7. Valores de los parámetros ambientales adoptados en la construcción.

La figura 3 muestra la evolución anual de la temperatura en el termómetro T64 según los resultados obtenidos mediante el modelo y los resultados obtenidos experimentalmente en los distintos años que configuran el periodo interanual considerado, siendo el comportamiento térmico que

presenta éste termómetro similar al que presentan los termómetros T32 y T50. En ésta, se pone de manifiesto que la evolución térmica anual que predice el modelo representa cualitativamente de forma satisfactoria la evolución térmica anual establecida en base a los registros experimentales de

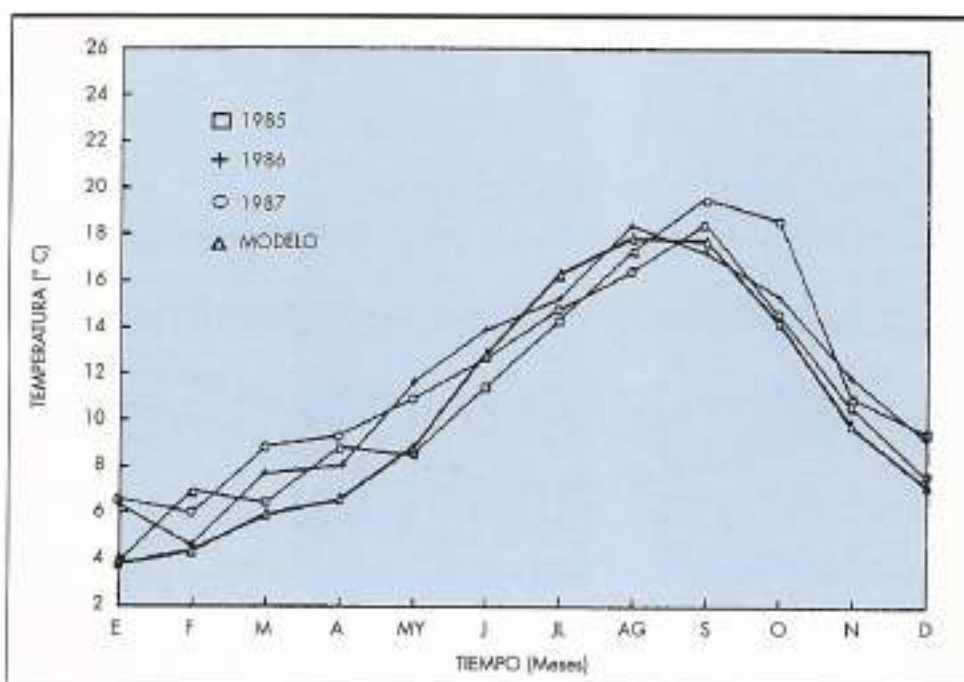


FIGURA 3. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T64.

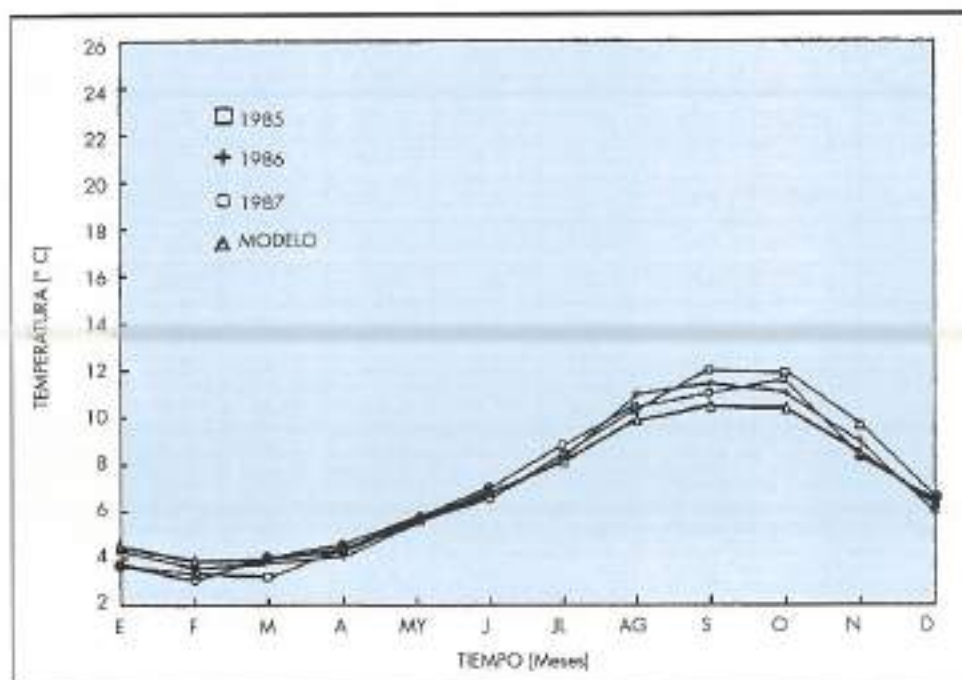


FIGURA 4. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T48.

la temperatura en la presa; ello permite reproducir adecuadamente la inercia térmica del hormigón, aspecto éste de interés primordial cuando se trata de analizar mediante un modelo matemático la respuesta térmica de la presa en explotación.

Los termómetros próximos al paramento de aguas arriba (T30, T48, T62) están situados a un metro de este paramento a las cotas indicadas en la figura 2. Los resultados obtenidos en la contrastación planteada para estos termómetros son semejantes entre sí, mostrándose en la figura 4

la evolución anual de la temperatura en el termómetro T48, en la que se aprecia la bondad de los resultados obtenidos mediante el modelo en relación a los valores obtenidos experimentalmente. Asimismo, los resultados teóricos en estos termómetros reproducen de forma idónea la inercia térmica del hormigón.

Respecto a los termómetros ubicados en zonas centrales del espesor (T31, T34, T49, T52, T63), en la figura 5 se muestra la evolución anual de la temperatura en el termómetro T34, alojado éste en el punto medio de una

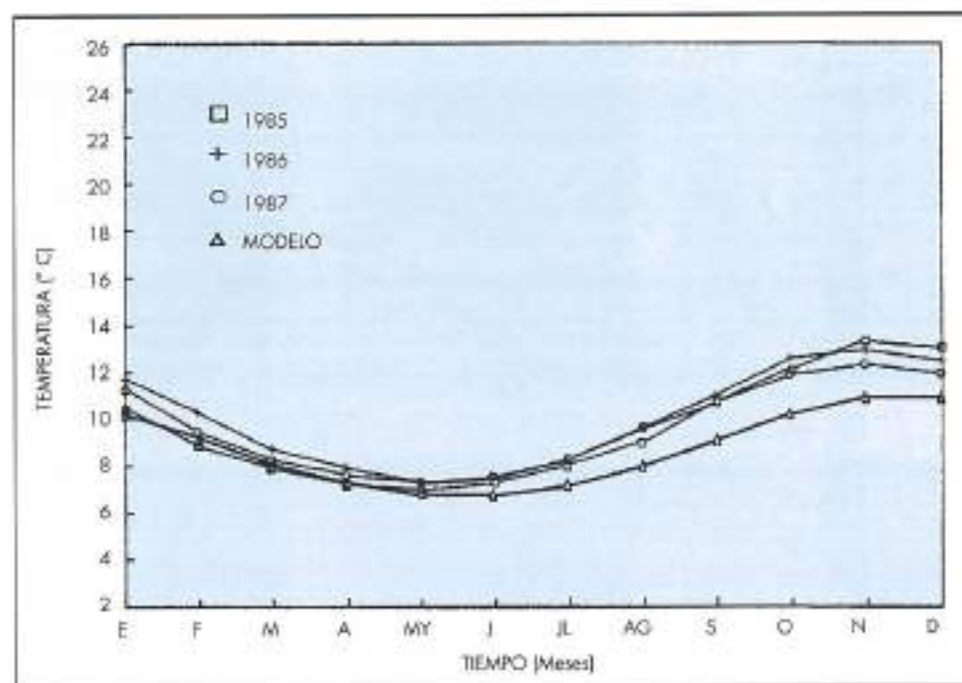


FIGURA 5. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T34.

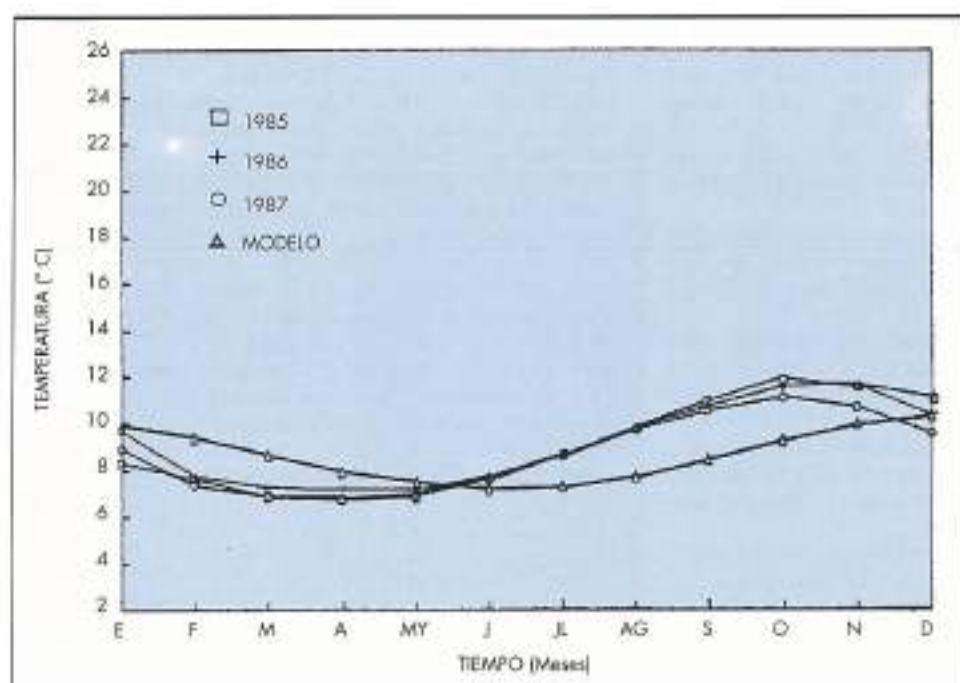


FIGURA 6. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T49.

sección de doce metros de espesor; ésta pone de manifiesto que el comportamiento térmico obtenido mediante el modelo reproduce bien las evoluciones anuales obtenidas como fruto de la auscultación térmica en el punto considerado.

No obstante, conviene reseñar que tres de estos termómetros (T31, T49, T63) se encuentran muy próximos a sendas galerías, lo que supone una sustancial modificación en las hipótesis adoptadas para modelizar la conducción del calor en el seno de la presa. En la figura 6 se exponen los resultados obtenidos para el termómetro T49, próximo a la galería existente a la cota 1.357, resultados éstos que muestran, en estas condiciones, un comportamiento térmico teórico que se aleja del comportamiento registrado experimentalmente.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la contrastación realizada muestran, en conjunto, que el modelo propuesto para obtener la respuesta térmica de la presa en explotación frente a la sollicitación térmica ambiental es capaz de reproducir de forma satisfactoria la evolución de la temperatura en los diferentes nodos analizados, ya sea para los que representan los termómetros colocados en zonas próximas a los paramentos de aguas arriba y de aguas abajo, o bien en las zonas centrales de los respectivos espesores. En este sentido, el modelo refleja bien la inercia térmica del hormigón, que puede visualizarse mediante los desfases existentes en el tiempo entre los valores extremos de las condiciones térmicas ambientales y los valores extremos alcanzados por la temperatura del hormigón de la presa.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren mostrar su agradecimiento a la Dirección General de Investigación Científica y Técnica (DGICYT-

PB 90-0611) y a las empresas eléctricas Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana, Iberduero, Hidroeléctrica Española e Hidroeléctrica de Cataluña y a la Confederación Hidrográfica del Duero por su inestimable colaboración suministrando registros térmicos experimentales relativos a diferentes presas en explotación.

6. REFERENCIAS

- ACI (1987). "Mass Concrete". ACI Committee 207. ACI 207.1R-87.
- AGUADO, A.; AGULLÓ, L.; VÁZQUEZ, E. (1989). "Propuesta de actuación en relación a los hormigones a emplear en la presa de la Llosa del Cavall". Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. Agosto.
- AGULLÓ, L. (1991). "Estudio térmico en presas de hormigón frente a la acción térmica ambiental". Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Barcelona. Junio.
- AGULLÓ, L.; AGUADO, A.; MIRAMBELL, E. (1995). "Comportamiento térmico de presas de hormigón en servicio". Monografía CIMNE nº 29. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona. Mayo.
- ÁTLAS DE LA RADIACIÓN SOLAR EN ESPAÑA (1984). Instituto Nacional de Meteorología. Font, I. Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid.
- C.E.B. (1985). "Thermal Effects in Concrete Structures". Bulletin d'Information no 67. C.E.B. Lausanne. Janvier.
- CORONAS, A.; LLORENS, M.; VILLARRUBIA, M. (1982). "Energía solar a Catalunya: Radiació solar i insolació". Publicacions i Edicions Universitat de Barcelona. Conselleria d'Indústria i Energia. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- DILGER, W.; GHALI, A.; CHAN, M.; CHEUNG, M.; MARS, M. (1983). "Temperature Stresses in Composite Box Girder Bridges". Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, nº 6. June.

- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. (1974). "Solar Energy Thermal Processes". Wiley Interscience, New York.
- ELBADRY, M. M.; GHALI, A. (1983). "Nonlinear Temperature Distribution and its Effects on Bridges". IABSE Proceedings, p. 66/83, August.
- ELBADRY, M. M.; GHALI, A. (1983). "Temperature Variations in Concrete Bridges". Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, n° 10, October.
- EMERSON, M. (1973). "The Calculation of the Distribution of Temperature in Bridges". TRRL Report LR 561. Department of Transport, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, U.K.
- ITAIPU-RELATORIO RC-45/79 (1979). Determinação do Calor Específico de Misturas de Concreto.
- ITAIPU-RELATORIO RC-37/81 (1981). "Estudo das Propriedades Térmicas do Concreto".
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA (1982). "Guía resumida del clima en España". Servicio de Climatología. Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA (1983). "Atlas climático de España". Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid.
- KEHLBECK, F. (1975). "Einfluss der Sonnenstrahlung bei Brückenbauwerken". (Effect of Solar Radiation on Bridge Structures). Werner-Verlag, Düsseldorf.
- MIRAMBELL, E. (1987). "Criterios de diseño en puentes de hormigón frente a la acción térmica ambiental". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. Enero.
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO (1986). "Inventario de presas españolas". Dirección General de Obras Hidráulicas.
- STUCKY, A.; DERRON, M. (1957). "Problèmes thermiques posés par la construction des barrages-réservoirs". École Polytechnique de l'Université de Lausanne. Publication no 38. Sciences et Technique. Lausanne.
- TOWNSEND, C. L. (1965). "Control of Cracking in Mass Concrete Structures". Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior, Washington.
- ZIENKIEWICZ, O. C. (1980). "El método de los elementos finitos". Editorial Reverté, S.A. España.