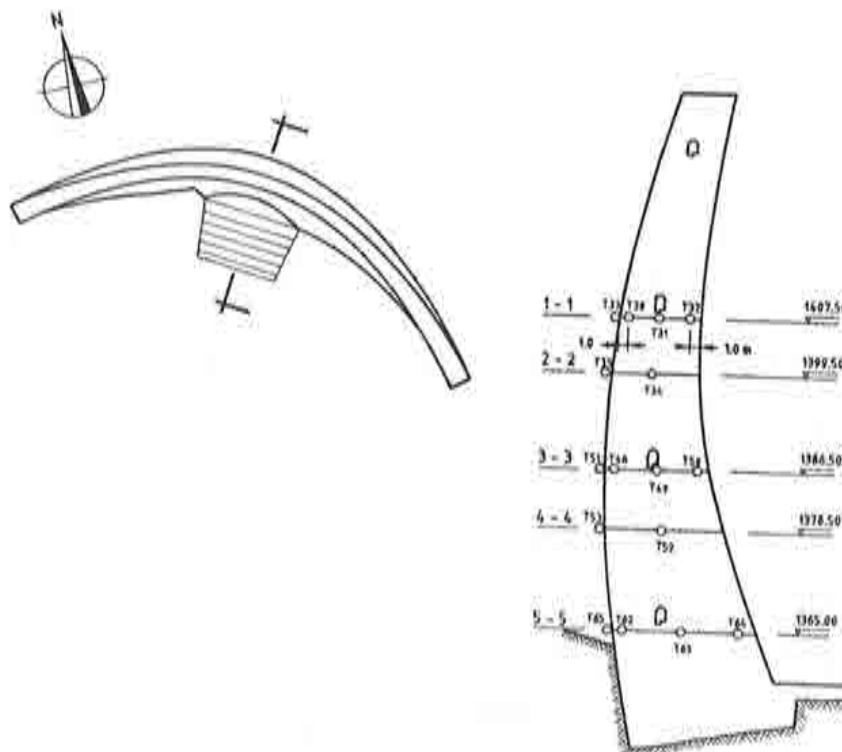


# Comportamiento Térmico de Presas de Hormigón en Servicio

L. Agulló Fité  
A. Aguado de Cea  
E. Mirambell Arrizabalaga



Diseño de la cubierta: Jordi Pallí

Primera Edición, Mayo 1995

@ Los autores

Edita:

Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería

Edificio C1, Campus Norte UPC

Gran Capitán, s/n

08034 Barcelona, España

ISBN: 84-87867-55-3

Deposito Legal: B-27778-95



## AGRADECIMIENTOS

*Los autores de este trabajo quieren mostrar su agradecimiento 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.*

*Asimismo, desean expresar su gratitud a D. Luis Berga, D. Jesús de Blas, D. José M<sup>a</sup> Gaztañaga, D. Arturo Gil, D. Enrique Giménez, D. Guillermo Gómez Lúa, D. Eugenio Herrero, D. Miguel Martín, D. Angel Pérez, D. Arturo Rebollo y D. Florentino Santos, quienes dedicaron parte de su valioso tiempo en conversaciones que sirvieron para enmarcar el presente estudio.*



## RESUMEN

La presa de hormigón en su etapa de explotación, se ve sometida de forma permanente a la acción térmica procedente del ambiente en el cual está ubicada. 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.

Este trabajo se enmarca en el ámbito de las presas de hormigón en fase de explotación y, dentro de este ámbito, se centra en el análisis de la respuesta térmica de la presa frente a la actuación de la acción térmica ambiental.

Para ello se ha desarrollado un modelo numérico, basado en un esquema explícito en diferencias finitas, que proporciona la temperatura en los nodos de la malla de discretización adoptada y en cualquier instante. 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.

Las temperaturas que el modelo predice se han contrastado satisfactoriamente con los registros térmicos experimentales de distintas presas españolas actualmente en explotación y que corresponden a distintos emplazamientos y tipos estructurales (Almendra, Baserca, Llauset y Mequinenza).

Mediante el modelo numérico se ha realizado un exhaustivo estudio sobre la influencia relativa que presentan en la distribución de temperaturas de la presa las distintas variables que lo configuran. Como fruto de este estudio se ha puesto de



manifiesto la existencia de un grupo de parámetros principales que gobiernan, en mayor medida, su comportamiento térmico.

En este sentido, el comportamiento térmico medio anual de la sección depende, fundamentalmente, del espesor, de la evolución anual de las temperaturas ambiente y del agua y de la radiación solar global diaria media anual en el emplazamiento.

El comportamiento térmico del paramento de aguas abajo se rige, en gran medida, por la radiación solar, si bien se ve también influenciado por la temperatura ambiente, la velocidad del viento, la reflexión del entorno, la inclinación y orientación (acimut) del paramento y el coeficiente de absorción del hormigón.

Adoptando como parámetros principales las temperaturas medias anuales ambiente y del agua, los rangos anuales de estas temperaturas, la radiación solar global diaria media anual y el espesor de la sección, se han obtenido sendas formulaciones analíticas que proporcionan la temperatura media anual y el rango anual de la temperatura media en la sección.

Ambas formulaciones configuran un nuevo modelo teórico propuesto para representar el comportamiento térmico medio de la sección. Este permite predecir, tanto en proyecto como en explotación, la evolución anual de la temperatura media en cualquier sección de la presa. Las temperaturas medias que predice este modelo se han contrastado, con resultado satisfactorio, con las temperaturas medias obtenidas mediante registros experimentales en distintas secciones correspondientes a las presas de Baserca, Llauset y Mequinenza.

La utilización del modelo en explotación conduce a una propuesta alternativa en relación al planteamiento actual de la auscultación térmica de la presa.

Esta propuesta está encaminada, por una parte, a potenciar la instrumentación externa a la presa, registrando experimentalmente los parámetros que determinan su comportamiento térmico medio. Por otra parte, se plantea una redistribución de los termómetros internos en el sentido de disminuir el número de éstos que se disponen en zonas centrales de una sección y concentrarlos hacia el paramento a efectos de poder registrar su comportamiento térmico diferenciado respecto al comportamiento medio de la sección.



# ÍNDICE

## CAPITULO 1: INTRODUCCION

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>1.1. Antecedentes</b> ..... | 1 |
| <b>1.2. Objetivos</b> .....    | 3 |
| <b>1.3. Método</b> .....       | 4 |

## CAPITULO 2: MODELO Y CONTRASTACION

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>2.1. Introducción</b> .....                                                                                                                    | 7  |
| <b>2.2. Modelización utilizada para la obtención de la respuesta térmica de la presa de hormigón en fase de explotación</b> .....                 | 8  |
| 2.2.1. Hipótesis adoptadas .....                                                                                                                  | 8  |
| 2.2.2. Método numérico de resolución .....                                                                                                        | 11 |
| 2.2.3. Evaluación e implementación de diversos parámetros ambientales .....                                                                       | 13 |
| 2.2.3.1. Radiación solar incidente en los paramentos de la presa ..                                                                               | 14 |
| 2.2.3.2. Temperatura ambiente .....                                                                                                               | 21 |
| 2.2.3.3. Temperatura del agua en el embalse .....                                                                                                 | 23 |
| 2.2.3.4. Coeficientes de transmisión de calor .....                                                                                               | 23 |
| 2.2.4. Estructuración del programa de cálculo utilizado .....                                                                                     | 25 |
| <b>2.3. Contratación del modelo</b> .....                                                                                                         | 28 |
| 2.3.1. Criterios adoptados en la estimación de los parámetros que configuran el modelo y en la modelización de los registros experimentales ..... | 29 |

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 2.3.2. Método seguido en la contrastación . . . . . | 35 |
| 2.3.3. Resultados . . . . .                         | 36 |

### **CAPITULO 3: ESTUDIO PARAMETRICO**

|                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Introducción . . . . .                                                                                                      | 58  |
| 3.2. Método seguido en el estudio . . . . .                                                                                      | 59  |
| 3.3. Resultados y análisis de resultados relativos a los parámetros que caracterizan al hormigón . . . . .                       | 62  |
| 3.3.1. Conductividad térmica . . . . .                                                                                           | 62  |
| 3.3.2. Calor específico . . . . .                                                                                                | 66  |
| 3.3.3. Emisividad térmica . . . . .                                                                                              | 69  |
| 3.3.4. Coeficiente de absorción . . . . .                                                                                        | 71  |
| 3.4. Resultados y análisis de resultados relativos a los parámetros que caracterizan a la geometría y al emplazamiento . . . . . | 75  |
| 3.4.1. Espesor . . . . .                                                                                                         | 75  |
| 3.4.2. Inclinação del paramento de aguas abajo . . . . .                                                                         | 78  |
| 3.4.3. Acimut . . . . .                                                                                                          | 80  |
| 3.5. Resultados y análisis de resultados relativos a los parámetros que caracterizan a la acción térmica ambiental . . . . .     | 82  |
| 3.5.1. Coeficiente de reflexión del entorno . . . . .                                                                            | 82  |
| 3.5.2. Velocidad del viento . . . . .                                                                                            | 85  |
| 3.5.3. Radiación solar . . . . .                                                                                                 | 87  |
| 3.5.4. Temperatura del agua . . . . .                                                                                            | 91  |
| 3.5.5. Temperatura ambiente . . . . .                                                                                            | 97  |
| 3.6. Conclusiones derivadas del estudio paramétrico . . . . .                                                                    | 102 |

### **CAPITULO 4: CONSIDERACIONES DE DISEÑO**

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1. Introducción . . . . .                                                           | 105 |
| 4.2. Consideraciones relativas al comportamiento térmico de la sección . . . . .      | 106 |
| 4.2.1. Consideraciones relativas a la temperatura media anual en la sección . . . . . | 106 |

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.2. Consideraciones relativas al rango anual de la temperatura media de la sección . . . . . | 110 |
| 4.2.3. Consideraciones relativas al comportamiento térmico anual de la sección . . . . .        | 115 |
| 4.3. Consideraciones relativas al comportamiento térmico del paramento de aguas abajo . . . . . | 121 |
| 4.4. Consideraciones relativas a la auscultación térmica de la presa en explotación . . . . .   | 124 |

## **CAPITULO 5: CONCLUSIONES**

|                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Introducción . . . . .                                                                                                                                                           | 129 |
| 5.2. Conclusiones generales . . . . .                                                                                                                                                 | 130 |
| 5.3. Conclusiones específicas . . . . .                                                                                                                                               | 131 |
| 5.3.1. Conclusiones relativas al modelo numérico de obtención de la respuesta térmica de la presa en explotación . . . . .                                                            | 131 |
| 5.3.2. Conclusiones relativas a la influencia de los parámetros que caracterizan al hormigón, a la geometría y al emplazamiento de la presa y a la acción térmica ambiental . . . . . | 132 |
| 5.3.3. Conclusiones relativas al comportamiento térmico del paramento de aguas abajo . . . . .                                                                                        | 133 |
| 5.3.4. Conclusiones relativas al modelo teórico propuesto para representar el comportamiento térmico medio anual de la sección . . . . .                                              | 134 |
| 5.3.5. Conclusiones relativas a la auscultación térmica de la presa en explotación . . . . .                                                                                          | 134 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> . . . . . | 137 |
|-------------------------------|-----|



## **CAPITULO 1**

### **INTRODUCCION**

#### **1.1. ANTECEDENTES**

El estudio del comportamiento de las estructuras frente a la acción térmica ambiental constituye un amplio campo de investigación justificado por el hecho que, de una u otra manera, toda estructura se encuentra inmersa en unas determinadas condiciones climáticas y ambientales que condicionan su respuesta térmica. Esta acción térmica se diferencia, en líneas generales, de las acciones directas por actuar siempre y con un cierto carácter cíclico en el tiempo y por estar estrechamente vinculada a las condiciones climáticas y ambientales del emplazamiento de la estructura.

Dentro de esta amplia línea de investigación tienen una especial relevancia los trabajos desarrollados por E. Mirambell (1987) relativos a los efectos térmicos ambientales en puentes de hormigón, los cuales constituye un punto de referencia en el presente trabajo.

En el ámbito de la Ingeniería Civil, la presa es una de las estructuras más significativas cuya propia naturaleza hace que presente comportamientos diferenciados en lo relativo a su respuesta térmica frente a la acción térmica ambiental.

Ello obedece principalmente, por una parte, a la propia naturaleza de la presa de hormigón como estructura eminentemente masiva y, por otra parte, a que la acción térmica ambiental que actúa sobre ella se configura, además de por las condiciones climáticas y ambientales de su emplazamiento, por las condiciones térmicas del agua embalsada aguas arriba. Estas características repercuten, en gran medida, en el comportamiento térmico de la presa tanto en la etapa de construcción como en la etapa de explotación.

Así el carácter masivo de la presa y las condiciones térmicas ambientales de su emplazamiento condicionan el proceso constructivo en el sentido de tener que plantear la conveniencia de la refrigeración natural o artificial del hormigón o el enfriamiento y/o calentamiento de sus componentes, a efectos de limitar las temperaturas alcanzadas en la masa como consecuencia de los incrementos térmicos originados durante el proceso de endurecimiento.

En la etapa de explotación, el carácter masivo de estas estructuras confiere a la presa una inercia térmica que singulariza su comportamiento térmico. Asimismo, la acción térmica condiciona en gran medida el comportamiento de la presa en explotación. En este sentido, para determinadas tipologías y circunstancias, la incidencia de los efectos térmicos sobre el comportamiento de la estructura es de un orden de magnitud comparable a los debidos a otras sollicitaciones mecánicas o hidráulicas [Gómez Lúa (1982)].

Por otra parte, el carácter permanente en el tiempo que rige la actuación de la acción térmica y su ciclicidad hacen que las consecuencias derivadas de su actuación durante el período de vida útil de la presa puedan ser significativas en relación a la durabilidad del hormigón.

A las consideraciones expuestas en relación a la incidencia de la acción térmica ambiental sobre la presa en las etapas de construcción y de explotación, cabe añadir otras relativas al proyecto. En este sentido, y particularmente en lo que concierne al cálculo de la presa, éste está orientado, fundamentalmente, en la línea de dar respuesta a una seguridad estructural frente a las acciones directas (peso propio, empuje hidrostático, otras). En él no se tienen en cuenta de forma sistemática aquellas acciones indirectas derivadas de la actuación térmica ambiental, ni la combinación de éstas con las acciones directas.

Todo ello, pone en evidencia la relevancia de una amplia línea de investigación encaminada al estudio del comportamiento térmico de la presa frente a la acción térmica ambiental.

Dentro de este amplio marco, los estudios relativos al comportamiento térmico de la presa en primeras edades han prevalecido sobre los relativos al comportamiento térmico en explotación. Este hecho se corrobora por las numerosas publicaciones existentes que se refieren a los efectos térmicos en primeras edades y que son fruto tanto

de estudios teóricos como de experiencias recogidas durante la construcción de distintas presas.

Sin embargo, el comportamiento térmico de la presa en explotación ha sido poco estudiado en su conjunto. Las publicaciones al respecto son escasas y obedecen generalmente a aspectos puntuales relativos a los resultados de la auscultación térmica de la presa, los cuales no contemplan en un contexto general la respuesta térmica de la presa frente a la acción térmica ambiental.

En este sentido, una referencia significativa son los trabajos desarrollados por Stucky y Derron (1957) los cuales constituyen un primer paso de cara a obtener de una forma sencilla, utilizando ecuaciones analíticas, las temperaturas en la presa durante la etapa de explotación.

Todo ello conduce a la necesidad de profundizar en el conocimiento del comportamiento térmico de la presa en explotación mediante un amplio estudio que recoja las numerosas variables que definen la acción térmica ambiental y que determinan la respuesta térmica de la presa.

## 1.2. OBJETIVOS

Dentro del ámbito que concierne al comportamiento térmico de la presa de hormigón en fase de explotación, el presente trabajo se centra, fundamentalmente, en el estudio de las temperaturas que se alcanzan en la presa como consecuencia de la acción térmica ambiental que actúa sobre ella.

Este estudio se ha dirigido a la consecución de unos objetivos principales, los cuales se exponen seguidamente.

- Desarrollar un modelo numérico, que contemplando la presencia de los distintos parámetros que caracterizan al hormigón, a la geometría y al emplazamiento de la presa y a la acción térmica ambiental, proporcione las temperaturas alcanzadas en la presa en su etapa de explotación. Dicho modelo se contrastará con las temperaturas experimentales registradas en distintas presas en explotación.
- Analizar la influencia relativa que presentan en la respuesta térmica de la presa las distintas variables contempladas en el modelo, en orden a determinar, de entre ellas, cuales son las variables principales que gobiernan el comportamiento térmico de la presa en explotación.
- Realizar un estudio encaminado a obtener un modelo teórico en diseño que represente la evolución anual de la temperatura media en cualquier sección de la presa en función de las variables principales anteriormente determinadas.

- Formular, en base a los estudios realizados, una propuesta referente a la instrumentación térmica de la presa en explotación de cara a obtener como fruto de la misma una óptima información relativa a las temperaturas en la presa durante esta etapa.

### 1.3. MÉTODO

Para conseguir los objetivos propuestos se han desarrollado distintos trabajos los cuales dan contenido a los diferentes capítulos de este documento. A continuación se describe brevemente el método seguido en cada uno de ellos.

En el **capítulo 2**, se presenta, en su primera parte, el modelo numérico desarrollado para la obtención de la respuesta térmica de la presa. Primeramente se establecen las hipótesis adoptadas relativas a la ecuación diferencial que gobierna la conducción de calor en presas de hormigón en fase de explotación y a las condiciones de contorno que representan los distintos mecanismos de transmisión de calor entre la presa y el entorno en el cual se ubica. En segundo lugar se describe el método numérico adoptado para la resolución de la ecuación diferencial, basado en un esquema explícito en diferencias finitas, y se hace énfasis en las condiciones que aseguran la convergencia y estabilidad numéricas de la solución.

El modelo desarrollado contempla la presencia de distintas variables que caracterizan al hormigón (conductividad térmica, calor específico, peso específico, coeficiente de absorción y emisividad) a la geometría y al emplazamiento de la presa (espesor de la sección, inclinación y orientación del paramento de aguas abajo y latitud) y a la acción térmica ambiental (temperatura ambiente, temperatura del agua, radiación solar, reflexión del entorno y velocidad del viento).

Seguidamente, se incide en distintos aspectos relativos a la evaluación e implementación numérica de los diversos parámetros ambientales que representan la acción térmica sobre la presa. Finalmente se exponen las características generales referentes al programa numérico confeccionado para obtener la solución de la ecuación diferencial.

En la segunda parte de este capítulo, se realiza la contrastación de las temperaturas teóricas que predice el modelo con las temperaturas obtenidas experimentalmente como fruto de la auscultación térmica de distintas presas españolas actualmente en explotación, las cuales responden a diferentes tipologías y emplazamientos (Almendra, Baserca, Llauset y Mequinenza).

Para ello, se establecen los criterios adoptados en la estimación de los parámetros que configuran el modelo y en la modelización de los registros experimentales. Por último se presentan los resultados obtenidos en la contrastación realizada.

Una vez constratado y verificada su bondad, el modelo numérico desarrollado se ha utilizado para realizar un exhaustivo estudio paramétrico sobre la influencia relativa que presentan las distintas variables en la respuesta térmica de la presa. Este estudio, el cual se recoge en el **capítulo 3**, contempla las variables agrupadas en tres grupos principales que, respectivamente, caracterizan al hormigón, al emplazamiento y a la geometría de la presa, y a la acción térmica ambiental.

El estudio paramétrico se estructura estableciendo, en primer lugar, el procedimiento seguido de forma sistemática en su desarrollo, que se caracteriza por la definición de unas condiciones de referencia y de los intervalos de variación adoptados para cada parámetro. A continuación se presentan los resultados obtenidos y el análisis de los mismos para cada una de las variables estudiadas.

Estos resultados se refieren, principalmente, a las temperaturas medias alcanzadas en la presa a lo largo de un período anual, y a los rangos anuales de estas temperaturas.

El estudio paramétrico permite priorizar la influencia relativa de cada una de las variables y, en base a ello, determinar cuales son las variables principales que rigen el comportamiento térmico de la presa en explotación.

Tomando como punto de partida los resultados de este estudio, en el **capítulo 4** se propone, primeramente, de cara al proyecto y/o explotación, un modelo de comportamiento térmico en diseño que representa la evolución anual de la temperatura media en la sección. Dicho modelo teórico propuesto se contrasta con resultados experimentales relativos a diferentes presas actualmente en explotación.

Con posterioridad, se analiza en detalle el comportamiento térmico del paramento de aguas abajo de la presa. Asimismo, se hace una breve referencia a las tensiones autoequilibradas que en él aparecen como fruto de la no linealidad de la distribución de temperatura en la sección. Este tratamiento no contemplado como objetivo principal, tiene por objeto definir un orden de magnitud de las tensiones de origen térmico en explotación y hacer énfasis en la importancia de las mismas.

Finalmente, retomando distintas facetas que se han puesto de relieve en el desarrollo de este trabajo se realizan unas consideraciones relativas a la auscultación térmica de la presa en explotación y se presenta una propuesta alternativa a la práctica usual en la actualidad encaminada a obtener de ella una óptima información térmica.

En el **capítulo 5**, último de este documento, se presentan las conclusiones derivadas de los distintos trabajos realizados. Estas se exponen en forma de unas conclusiones generales que responden a los objetivos principales propuestos y de unas conclusiones específicas que obedecen a diferentes aspectos concretos de los trabajos desarrollados.

Por último, en el apartado de **bibliografía** se recogen las referencias más significativas utilizadas en el transcurso del trabajo realizado.



## **CAPITULO 2**

### **MODELO Y CONTRASTACION**

#### **2.1. INTRODUCCION**

En este capítulo, se realiza una descripción pormenorizada del modelo de análisis desarrollado para la obtención de la respuesta térmica de la presa en explotación frente a la acción térmica ambiental tanto en lo que hace referencia a las hipótesis en que éste se fundamenta y al método de resolución adoptado, como en lo que concierne a la evaluación de los distintos parámetros que se contemplan en el mismo.

Con posterioridad, los resultados teóricos que predice el modelo se contrastan con los resultados experimentales obtenidos fruto de la auscultación térmica en distintas presas españolas actualmente en explotación, las cuales responden a diferentes tipologías y emplazamientos.

## 2.2. MODELIZACION UTILIZADA PARA LA OBTENCION DE LA RESPUESTA TERMICA DE LA PRESA DE HORMIGON EN FASE DE EXPLOTACION

### 2.2.1. 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:

$$\nabla^2 T = \frac{\rho \cdot c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

En su deducción se han adoptado, desde un punto de vista térmico, las siguientes hipótesis relativas al hormigón:

- Medio continuo
- Medio isótropo
- Medio homogéneo
- 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 sollicitaciones 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. 2.1).

La ecuación (2.1) 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.

$$T(X, z, t_0) = T_i(X, z) \quad (2.2)$$

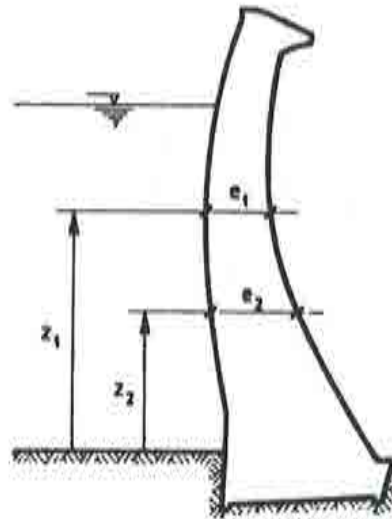


Fig. 2.1. Modelo de análisis a nivel sección transversal.

#### 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).

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(X, z, t) + q(X, z, t) = 0 \quad (2.3)$$

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  $q_r$ .

$$q(X, z, t) = q_s(X, z, t) + q_c(X, z, t) + q_r(X, z, t) \quad (2.4)$$

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

$$q_s(X, z, t) = a \cdot I(X, z, t) \quad (2.5)$$

en la cual  $I$  es la radiación solar total incidente sobre la superficie del paramento en el instante  $t$  y  $\alpha$  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.

$$q_c(X, z, t) = h_c [T(X, z, t) - T_a(t)] \quad (2.6)$$

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 re-radiación térmica (radiación de onda larga) se modeliza a través de la ley de Stefan-Boltzmann, escrita ésta en forma cuasi-lineal:

$$q_r(X, z, t) = h_r(X, z, t) [T(X, z, t) - T_a(t)] \quad (2.7)$$

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

$$h_r(X, z, t) = C_{SB} \cdot e \cdot [ (T(X, z, t) + T^*)^2 + (T_a(t) + T^*)^2 ] \cdot T(X, z, t) + T_a(t) + 2T^* \quad (2.8)$$

En ella  $C_{SB}$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $e$  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:

$$k \frac{\partial T}{\partial n}(X, z, t) + \alpha \cdot I(X, z, t) + h_c [T(X, z, t) - T_a(t)] + h_r(X, z, t) [T(X, z, t) - T_a(t)] = 0 \quad (2.9)$$

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.

$$T(X, z, t) = T_u(X, z, t) \quad (2.10)$$

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.

Por consiguiente, ante las hipótesis adoptadas y establecidas las condiciones inicial y de contorno, es posible abordar la resolución de la ecuación que rige el fenómeno de la conducción de calor en presas de hormigón en fase de explotación.

### 2.2.2. 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.

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_i = \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{(\Delta x)^2} \quad (2.11)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_i = \frac{T_{i,\Delta t} - T_i}{\Delta t} \quad (2.12)$$

Sustituyendo (2.11) y (2.12) en la ecuación (2.1) se obtiene la siguiente relación

$$T_{i,\Delta t} = T_i + \frac{k}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot [T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}] \quad (2.13)$$

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

$$\frac{k}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (2.14)$$

Sin embargo, dicha condición no asegura la estabilidad en los nodos exteriores en los que debe imponerse las condiciones de contorno relativas a la radiación solar,

radiación térmica y convección.

Planteando el balance energético en el nodo exterior ( $i$ ),

$$a \cdot I + k \cdot \frac{(T_{i+1} - T_i)}{\Delta x} - h \cdot (T_i - T_a) = \rho \cdot c \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \left( \frac{T_{i,\Delta t} - T_i}{\Delta t} \right) \quad (2.15)$$

Operando se obtiene

$$T_{i,\Delta t} = \frac{2\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot \delta \cdot T_{i+1} + \left[ 1 - 2\delta \cdot \Delta t \left( \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{h}{k\Delta x} \right) \right] T_i + \frac{2\Delta t}{\Delta x} \cdot \frac{\delta}{k} [a \cdot I + h \cdot T_a] \quad (2.16)$$

en donde

$$\delta = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (2.17)$$

Suponiendo que  $I$  y  $T_a$  son valores exactos y que se comete un cierto error en la temperatura de los nodos para el instante  $t$ , el error introducido para un instante posterior  $t + \Delta t$  puede obtenerse mediante la siguiente expresión

$$\Delta T_{i,\Delta t} = \frac{2\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot \delta \cdot \Delta T_{i+1} + \left[ 1 - 2\delta \cdot \Delta t \left( \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{h}{k\Delta x} \right) \right] \cdot \Delta T_i \quad (2.18)$$

Adoptando  $\eta$  como

$$\eta = \max(|\Delta T_{i+1}|, |\Delta T_i|) \quad (2.19)$$

debe verificarse que

$$\Delta T_{i,\Delta t} \leq \left[ \frac{2\Delta t \cdot \delta}{(\Delta x)^2} + \left| 1 - 2\delta \cdot \Delta t \left( \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{h}{k\Delta x} \right) \right| \right] \eta \quad (2.20)$$

La condición de estabilidad exige

$$\Delta T_{i,\Delta t} \leq \eta \quad (2.21)$$

o lo que es lo mismo

$$\frac{2\Delta t \cdot \delta}{(\Delta x)^2} + \left| 1 - 2\delta \cdot \Delta t \left( \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{h}{k\Delta x} \right) \right| \leq 1 \quad (2.22)$$

Operando se obtienen dos condiciones

$$\frac{2\delta \Delta t}{(\Delta x)^2} + 1 - \frac{2\delta \Delta t}{(\Delta x)^2} - \frac{2\delta h \Delta t}{k \Delta x} \leq 1 \quad (2.23)$$

$$\frac{2\delta \Delta t}{(\Delta x)^2} - 1 + 2\delta \Delta t \left( \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{h}{k \Delta x} \right) \leq 1 \quad (2.24)$$

De la primera se desprende que  $\Delta t$  debe ser positivo. De la segunda se obtiene el valor de  $\Delta t$  que hace estable el método numérico de resolución;

$$\Delta t \leq \frac{1}{\delta \left( \frac{2}{(\Delta x)^2} + \frac{h}{k \Delta x} \right)} \quad (2.25)$$

la cual es más restrictiva que la obtenida (2.14) para los nodos interiores.

La restricción impuesta al valor del incremento de tiempo a adoptar siguiendo el esquema explícito puede obviarse 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.

### 2.2.3. Evaluación e implementación de diversos parámetros ambientales

En este apartado se incide en distintos aspectos relativos a la evaluación e implementación numérica de diversos parámetros ambientales los cuales, por su importancia tanto desde el punto de vista de la respuesta térmica de la presa en explotación como del conocimiento de la propia acción térmica ambiental, son merecedores de un análisis en mayor detalle. Estos son: la radiación solar incidente en los paramentos de la presa, la temperatura ambiente, la temperatura del agua en el embalse y los coeficientes de transmisión de calor.

### 2.2.3.1. Radiación solar incidente en los paramentos de la presa

Los datos relativos a radiación solar de los que puede disponerse comunmente 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.

Por otra parte, la obtención de la radiación solar incidente sobre los paramentos de la presa (superficies inclinadas y orientadas) a partir de la radiación global sobre superficie horizontal, requiere del conocimiento previo de las componentes directa y difusa de la radiación en dicha superficie horizontal.

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, la radiación global incidente sobre los paramentos de la misma. En dicho proceso intervienen numerosos parámetros, los cuales se presentan, según su intervención, en el desarrollo que a continuación se expone.

Partiendo de la radiación global diaria en media mensual sobre una superficie horizontal,  $H_o$ , el método propuesto por Liu y Jordan [1963, 1967], recogido en Villarrubia et al. (1980, 1981), permite estimar la radiación diaria difusa sobre dicha superficie,  $H_d$ , obteniéndose la componente directa de la radiación,  $H_b$ , por diferencia de las anteriores.

La relación entre  $H_o$  y  $H_d$  se expresa por

$$H_d = H_o \cdot (1,39 - 4,027 K_T + 5,531 K_T^2 - 3,108 K_T^3) \quad (2.26)$$

en la cual  $K_T$  es el índice de nubosidad medio mensual, definido por el cociente entre la radiación global diaria en promedio mensual ( $H_o$ ) y la radiación solar extraterrestre en media mensual ( $H_e$ ).

$$K_T = \frac{H_o}{H_e} \quad (2.27)$$

La radiación solar extraterrestre puede evaluarse mediante la expresión

$$H_e = \frac{24}{\pi} I^2 \cdot I_{sc} (\cos \delta \cos \phi \sinh_s + h_s \sen \delta \cos \phi) \quad (2.28)$$

en donde los términos que en ella figuran tienen los siguientes significados:

$r^2$  : factor corrector de la constante solar para cada día del año

$$r^2 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 Z}{365}\right) \quad 1 \leq Z \leq 365 \quad (2.29)$$

$I_{SC}$  : constante solar.  $I_{SC} = 4870,8 \text{ KJ/hm}^2$

$\phi$  : latitud del emplazamiento

$\delta$  : declinación solar

$h_s$  : módulo del ángulo horario correspondiente a la puesta del Sol, expresado en radianes

La latitud ( $\phi$ ) de un punto  $P$  de la superficie terrestre es la distancia angular entre el punto  $P$  y el Ecuador, medida ésta sobre el meridiano que pasa por el punto; su valor es nulo en el Ecuador y es  $\phi = \pm 90^\circ$  en los polos Norte y Sur respectivamente.

El ángulo horario ( $h$ ) y la declinación ( $\delta$ ) son las coordenadas que definen la posición del Sol respecto a un punto  $P$  de la superficie terrestre cuando se adopta como referencia el sistema ecuatorial (Fig. 2.2).

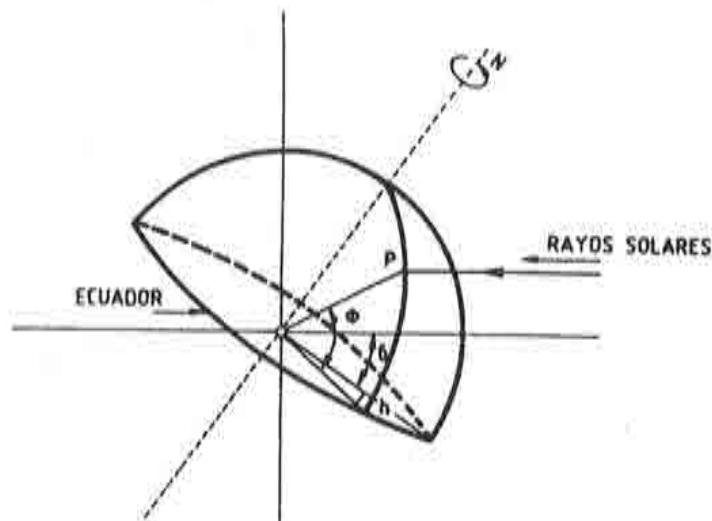


Fig. 2.2.- Latitud, ángulo horario y declinación solar.

La declinación es la distancia angular del Sol al plano del Ecuador y varía a lo largo del año entre los valores de  $23^\circ 27'$  y  $-23^\circ 27'$  correspondientes, respectivamente, a los solsticios de verano y de invierno, siendo nula en los equinoccios de primavera y de otoño.

Para su determinación 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

$$\begin{aligned}\delta = & 0,302 - 22,93 \cos x - 0,229 \cos 2x - \\ & - 0,243 \cos 3x + 3,851 \operatorname{sen} x + \\ & + 0,002 \operatorname{sen} 2x - 0,055 \operatorname{sen} 3x\end{aligned}\quad (2.30)$$

en la cual

$$x = \frac{2\pi Z}{365}$$

o la de Cooper, que resulta menos aproximada, pero más simple de utilización,

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[ 360 \frac{(284 + Z)}{365} \right] \quad (2.31)$$

y en las que  $Z$  es el número del día del año [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 2.1, 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 | $\delta$ (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 2.1. Días medios y su declinación solar.*

El ángulo horario ( $h$ ) es el formado por el plano meridiano que pasa por el punto  $P$  y el plano meridiano que contiene al astro solar, o también, el ángulo que tendría que girar la esfera terrestre para llevar el plano meridiano que pasa por el punto  $P$  a la línea

de rayos solares. Dado que a un giro completo de la Tierra en veinticuatro horas corresponde un ángulo de  $360^\circ$ , a un intervalo de una hora le corresponderá una variación del ángulo horario de  $15^\circ$ .

Cuando el Sol pasa por el meridiano del lugar (mediodía solar) el ángulo horario es nulo, siendo positivo por la tarde y negativo por la mañana; a medianoche el ángulo horario correspondiente es de  $+180^\circ$ .

La posición del Sol respecto a un punto  $P$  de la superficie terrestre puede definirse también mediante el sistema de coordenadas angulares, adoptando como coordenadas el acimut solar ( $\alpha$ ) y la altura solar ( $\beta$ ) (Fig. 2.3).

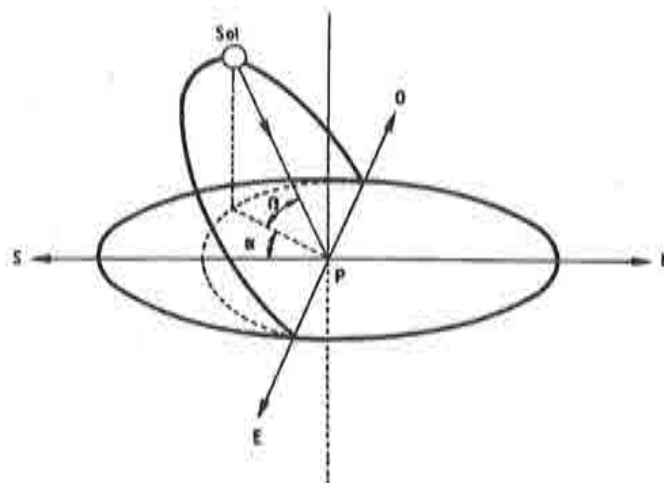


Fig. 2.3. Sistema de coordenadas angulares.

El acimut solar viene definido por el ángulo que forman el plano vertical que pasa por el Sol y el plano meridiano vertical del punto  $P$  considerado, variando entre  $-180^\circ$  y  $180^\circ$ .

La altura solar es el ángulo comprendido entre el plano horizontal que pasa por  $P$  y la dirección definida por el Sol y el punto. Su valor está comprendido entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

Las coordenadas horarias se relacionan con las angulares mediante las expresiones:

$$\text{sen } \beta = \text{sen } \phi \text{ sen } \delta + \cos \phi \cos \delta \cosh \quad (2.32)$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{\cos \delta \text{ sen } h}{\cos \beta} \quad (2.33)$$

Imponiendo la condición de altura solar nula en la ecuación (2.32) se obtiene el ángulo horario,  $h_s$ , correspondiente a la puesta del Sol,

$$\cosh_s = -\text{tg } \phi \cdot \text{tg } \delta \quad (2.34)$$

siendo, con el criterio de signos adoptados,  $-h$ , el ángulo horario a la salida del Sol.

Conocidos los ángulos horarios de salida y puesta del Sol, puede obtenerse la duración del día solar en términos de tiempo solar verdadero (TSV); ésta corresponde al intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasos del Sol por el meridiano del lugar, estando el Sol sobre el meridiano a las 12 horas (TSV).

La relación existente entre el TSV en horas y el ángulo horario en grados, viene dada por

$$h = 15 (TSV - 12) \quad (2.35)$$

y por consiguiente, la hora inicial ( $TSV_i$ ) y la hora final ( $TSV_f$ ) del día solar, así como su duración ( $TSV_o$ ) quedan definidas mediante las relaciones

$$TSV_i = 12 - \frac{1}{15} \arccos(-tg\phi \cdot tg\delta) \quad (2.36)$$

$$TSV_f = 12 + \frac{1}{15} \arccos(-tg\phi \cdot tg\delta) \quad (2.37)$$

$$TSV_o = \frac{2}{15} \arccos(-tg\phi \cdot tg\delta) \quad (2.38)$$

Estas relaciones dependen únicamente del emplazamiento de la presa ( $\phi$ ) y del día del año para el cual se considere el análisis ( $\delta$ ); por tanto, para una presa ubicada en un determinado emplazamiento pueden conocerse las horas de salida y puesta del Sol para cualquier día del año y, en consecuencia, el intervalo en horas solares en el que incide la radiación solar en el emplazamiento considerado. En horas externas a este intervalo se adoptará como nula la radiación solar incidente.

En consecuencia con lo hasta aquí expuesto, a partir de la declinación solar, función del día del año en el que se realice el análisis y de la latitud del emplazamiento de la presa, la ecuación (2.34) define el ángulo horario de la puesta del Sol; mediante la relación (2.28) se evalúa la radiación solar extraterrestre, que conjuntamente con el valor estimado de la radiación global diaria, permiten obtener (ecuación (2.27)) el índice de nubosidad medio mensual y con él evaluar, según (2.26), la radiación diaria difusa sobre superficie horizontal en el emplazamiento de la presa.

La componente directa de la radiación se obtiene, tal como se ha citado anteriormente, por diferencia de la global y la difusa

$$H_b = H_o - H_d \quad (2.39)$$

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 en las distintas horas del intervalo horario correspondiente a la salida y puesta del Sol en el lugar donde la presa está ubicada

Las radiaciones horarias, global y difusa, vienen dadas, respectivamente, por las relaciones

$$H_{h,o} = r_t \cdot H_o \quad (2.40)$$

$$H_{h,d} = r_d \cdot H_d \quad (2.41)$$

en las cuales los factores  $r_t$  y  $r_d$ , que dependen esencialmente de la hora del día y de la duración de éste, pueden evaluarse analíticamente según las expresiones

$$r_d(h, h_s) = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cosh - \cosh_s}{\sinh_s - h_s \cosh_s} \quad (2.42)$$

$$r_t(h, h_s) = \frac{\pi}{24} \cdot (a + b \cosh) \cdot \frac{\cosh - \cosh_s}{\sinh_s - h_s \cosh_s} \quad (2.43)$$

$$a = 0,4090 + 0,5016 \sin(h_s - 1,047) \quad (2.44)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(h_s - 1,047) \quad (2.45)$$

en las que los ángulos que en ellas figuran se expresan en radianes.

La radiación horaria directa se obtiene, en cada hora del intervalo, por diferencia de la horaria global y la horaria difusa.

$$H_{h,b} = H_{h,o} - H_{h,d} \quad (2.46)$$

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 incidente en los paramentos de la misma como suma de sus componentes horarias directa, difusa y reflejada.

La componente directa sobre el paramento ( $I_{h,b}$ ) se expresa por la relación

$$I_{h,b} = R_b \cdot H_{h,b} \quad (2.47)$$

en la que el factor  $R_b$  viene dado por el cociente entre el coseno del ángulo de incidencia de los rayos solares sobre el paramento y el coseno del ángulo cenital, complementario éste de la altura solar.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \psi} \quad (2.48)$$

en donde

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \text{sen}\delta \text{ sen}\phi \cos S - \\ & - \text{sen}\delta \cos\phi \text{ sen}S \cos\gamma + \\ & + \cos\delta \cos\phi \cosh + \\ & + \cos\delta \text{ sen}\phi \text{ sen}S \cos\gamma \cosh + \\ & + \cos\delta \text{ sen}S \text{ sen}\gamma \text{ sen}h \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\cos\psi = \text{sen}\phi \text{ sen}\delta + \cos\phi \cos\delta \cosh \quad (2.50)$$

El ángulo de incidencia ( $\theta$ ) depende de la declinación solar ( $\delta$ ), la latitud del emplazamiento ( $\phi$ ), el ángulo horario ( $h$ ), la inclinación del paramento ( $S$ ) y del acimut de la superficie ( $\gamma$ ), definido éste por el ángulo que forma la proyección de la normal al paramento sobre el plano horizontal y la dirección Sur; el ángulo cenital depende, asimismo, de la declinación solar ( $\delta$ ), la latitud ( $\phi$ ) y el ángulo horario ( $h$ ) (Fig. 2.4).

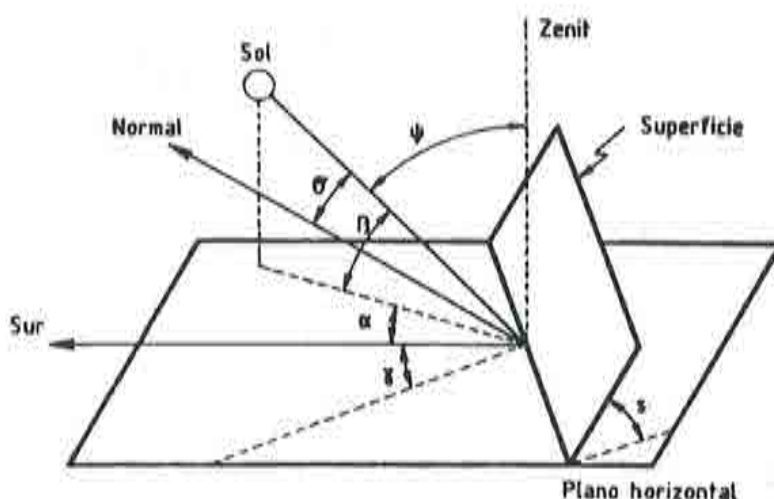


Fig. 2.4. Incidencia de los rayos solares sobre el paramento de la presa.

La componente difusa sobre el paramento se evalúa según la porción de cielo que ve la superficie inclinada y la radiación difusa incidente en el plano horizontal.

$$I_{h,d} = \frac{(1 + \cos S)}{2} \cdot H_{h,d} \quad (2.51)$$

La componente reflejada por el entorno sobre el paramento puede estimarse como una fracción de la radiación global incidente en el plano horizontal.

$$I_{h,r} = \rho \cdot \left( \frac{1 - \cos S}{2} \right) \cdot (H_{h,d} + H_{h,b}) \quad (2.52)$$

En esta expresión  $\rho$  representa un coeficiente medio de reflexión del entorno que rodea la superficie inclinada. En la tabla 2.2 se muestran valores típicos del coeficiente de reflexión para distintos medios, dados por Coronas et al (1982).

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

Tabla 2.2. Coeficiente de reflexión del entorno.

La suma de las componentes horarias directa, difusa y reflejada proporciona la radiación solar total horaria incidente en el paramento de la presa.

$$I_h = I_{h,b} + I_{h,d} + I_{h,r} \quad (2.53)$$

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 se obtiene como suma de las anteriores, extendida desde la hora de la salida a la de la puesta del Sol.

Por tanto, mediante el proceso de cálculo establecido, partiendo de la radiación global incidente en el emplazamiento de la presa ( $H_o$ ) puede estimarse, en cualquier día del año ( $\delta$ ) y cualquier hora del mismo ( $h$ ), la radiación global incidente en el paramento ( $I$ ) en función de datos relativos al emplazamiento de la presa ( $\phi$ ), a su geometría ( $S, \gamma$ ) y al entorno en que está ubicada ( $\rho$ ).

#### 2.2.3.2. Temperatura ambiente

Este parámetro climatológico interviene de forma decisiva en la condición de contorno a imponer en el paramento aguas abajo de la presa. Recordemos que la energía calorífica transferida en la superficie de tal paramento por convección y radiación térmica es proporcional a la diferencia de temperaturas existente entre la superficie expuesta y el ambiente exterior.

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. En la Fig. 2.5 se muestra la función de evolución adoptada para la temperatura ambiente.

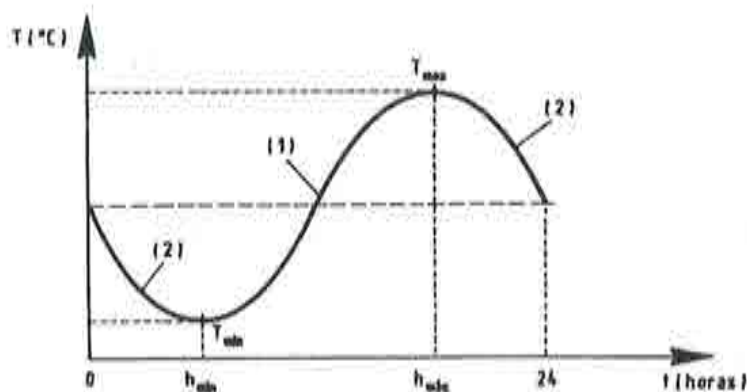


Fig. 2.5. Función de evolución de la temperatura ambiente.

La mencionada función se expresa analíticamente mediante las relaciones siguientes:

$$(1) \quad T = A \operatorname{sen} \left( 2\pi \cdot \frac{t - b_1}{2b_2} \right) + B \quad (2.54)$$

$$(2) \quad T = A \operatorname{sen} \left[ 2\pi \cdot \frac{t + 12 - b_1 - b_2}{2(24 - b_2)} \right] + B \quad (2.55)$$

en las cuales,

$$A = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \quad (2.56)$$

$$B = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (2.57)$$

$$b_1 = \frac{h_{\max} + h_{\min}}{2} \quad (2.58)$$

$$b_2 = h_{\max} - h_{\min} \quad (2.59)$$

En las expresiones precedentes  $T_{\max}$  y  $T_{\min}$  representan, respectivamente, las temperaturas máxima y mínima diaria, mientras que  $h_{\max}$  y  $h_{\min}$  son, respectivamente, las horas del día en que se alcanzan estas temperaturas.

Cuando se trata de analizar el comportamiento térmico de una 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; en el caso de un estudio térmico a nivel de proyecto, estos parámetros pueden estimarse, en primera aproximación, a partir de las temperaturas ambiente registradas en estaciones meteorológicas próximas al emplazamiento.

#### *2.2.3.3. 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; 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 periodo 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 periodos 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.

#### *2.2.3.4. Coeficientes de transmisión de calor*

Ya se ha establecido anteriormente que la energía calorífica transferida en el paramento aguas abajo de la presa debida a los mecanismos de radiación de onda larga y convección depende, además de la diferencia existente entre la temperatura ambiente y la temperatura en superficie, de los respectivos coeficientes de transferencia 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 (2.8), escrita ésta

en el apartado 2.2.1 del presente capítulo; por tanto, su implementación se realiza mediante parámetros que ya han sido analizados.

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; se requiere, por ello, definir con que criterios se realiza su estimación en el presente estudio.

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, no existiendo entre ellas diferencias significativas tal y como se muestra en la Fig. 2.6.

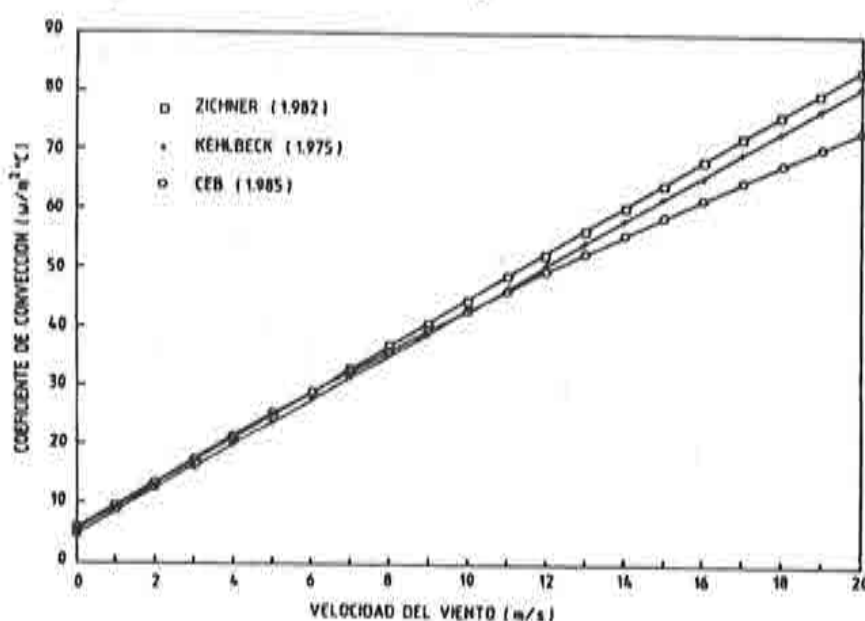


Fig. 2.6. Coeficiente de convección en función de la velocidad del viento, según fórmulas propuestas por distintos autores.

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)].

$$h_c = 3,83 v + 4,67 \quad (2.60)$$

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).

#### **2.2.4. Estructuración del programa de cálculo utilizado**

Se incide en este apartado en algunos aspectos particulares relativos al programa numérico confeccionado para el análisis de la respuesta térmica ambiental; asimismo, se describen las distintas subrutinas de que consta el programa.

Este presenta las siguientes características generales:

- Contempla la posibilidad de refinamiento en la malla de discretización para poder analizar con mayor detalle determinadas zonas.
- Permite cualquier tipo de análisis temporal, abarcando un gran abanico de posibilidades que va desde un análisis del orden de minutos a un estudio interanual.
- Facilita la entrada de datos, dejando libre la gran mayoría de los parámetros ambientales, temporales, térmicos y geométricos que entran en juego en el fenómeno de la transmisión del calor; a su vez, simula de forma muy aproximada y fiable las variaciones mensuales y diarias de los distintos parámetros ambientales que intervienen.
- Requiere poco tiempo de C.P.U. si se compara con programas basados en otros métodos numéricos, en particular con el de los elementos finitos. Recordemos que se precisa de períodos de tiempo grandes para que se aprecie el efecto de la inercia térmica del hormigón a lo largo de las distintas estaciones que se suceden en varios años.

El esquema del programa es relativamente sencillo. Consta de un programa principal desde el cual se llama a las diferentes subrutinas que conforman dicho programa en su totalidad. En la figura 2.7 se muestra el correspondiente diagrama de bloques.

A continuación se describe, de forma sucinta, cada una de las subrutinas de que consta el programa.

#### **Subrutina DATA**

Esta subrutina lee los datos existentes en un archivo de entrada desde el cual resulta posible la modificación de cualquiera de sus valores. Los parámetros que se introducen pueden agruparse en cinco grupos principales:

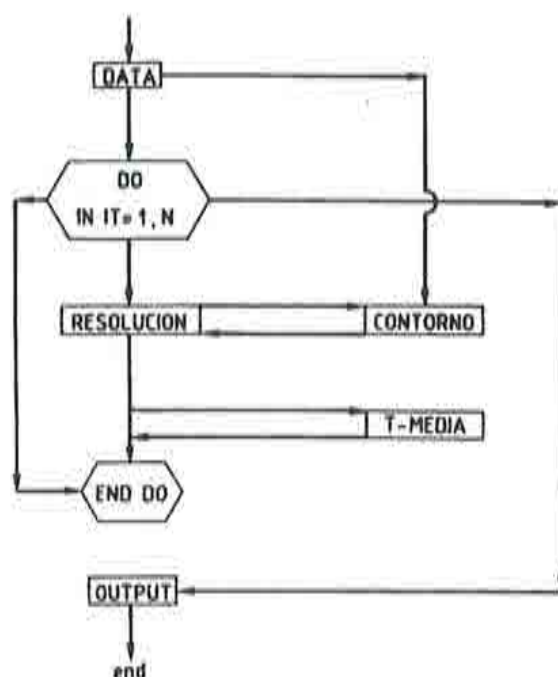


Fig. 2.7. Diagrama de bloques del programa utilizado para la resolución de la transmisión de calor en presas de hormigón en fase de explotación.

#### Parámetros inherentes al programa: variables de decisión

Estas variables permiten, por una parte, una optimización del proceso de cálculo al activar exclusivamente aquellas subrutinas o partes de ellas que son necesarias para la obtención de los resultados; esta posibilidad conlleva una notable economía en el tiempo de C.P.U. Por otra parte, permiten una elección en el archivo de resultados, siendo éste tan completo o resumido como se precise.

#### Parámetros inherentes al método numérico: discretización geométrica y análisis temporal

La discretización geométrica unidimensional de la sección se define por su espesor y por el número de nodos en los que se evalúa la temperatura. Los nodos resultan equidistantes entre sí, variando el tamaño de malla para un espesor dado según el número de éstos que se adopte.

El análisis temporal se caracteriza definiendo el intervalo de tiempo a adoptar en cada caso y el número total de horas del proceso analizado.

A su vez, en esta subrutina se comprueba la condición de estabilidad y convergencia de la solución numérica. En el caso de que se adoptara un incremento de tiempo que no verifique tal condición, este hecho queda reflejado de forma automática en el fichero de

resultados.

#### Parámetros que definen las propiedades térmicas del hormigón

El hormigón queda definido térmicamente por su conductividad, su densidad, su calor específico, su coeficiente de absorción y su emisividad. En consecuencia con las hipótesis adoptadas en relación a las propiedades térmicas del hormigón, los parámetros mencionados se consideran constantes en el tiempo y en el espacio.

#### Parámetros relativos al emplazamiento y la geometría de la presa

El emplazamiento y la geometría de la presa se representan por la latitud del lugar, la pendiente del paramento, el acimut y el espesor. Estos valores son, para cada presa, constantes en el tiempo.

Asimismo, se incluye en este grupo a la declinación solar, estimada por un valor medio mensual, variable mes a mes.

#### Parámetros que definen las condiciones ambientales y del entorno

Las condiciones ambientales y del entorno se reproducen, en el modelo desarrollado, en función de diversos parámetros los cuales se presentan a continuación:

- Temperatura del agua en el embalse definida, en cada cota, por su valor medio mensual, variable de mes en mes.
- Temperatura ambiente dada por las temperaturas ambiente máxima y mínima diarias y las horas solares en que éstas se alcanzan.
- Radiación solar incidente en promedio mensual en el emplazamiento de la presa.
- Coeficiente de convección, adoptando para el mismo una variación mensual.
- Coeficiente de reflexión del entorno que rodea la presa, a través de un valor constante en el tiempo y en el espacio.

Por último, la condición de contorno temporal viene definida por el valor de la temperatura inicial uniforme para todos los nodos de la discretización.

### **Subrutina RESOLUCION**

Esta subrutina calcula la temperatura en todos los nodos de la discretización para todo instante. El código asignado a cada nodo direcciona el programa hacia la ecuación en diferencias finitas correspondiente al nodo en cuestión (nodo interior, nodo perteneciente a las superficies del contorno).

Desde esta subrutina se llama a la subrutina CONTORNO la cual permite obtener, para cada instante, las condiciones de contorno relativas a la radiación térmica y a la temperatura ambiente.

De la subrutina resolución, si interesa, se puede llamar a la subrutina T-MEDIA mediante la que se evalúan el gradiente térmico y la temperatura media en la sección para cada instante de tiempo.

### **Subrutina OUTPUT**

La salida de resultados presenta varias opciones. En general esta ofrece las siguientes:

Para cada intervalo de tiempo:

- Contador. Intervalo de tiempo, tiempo real transcurrido y hora actual.
- Temperatura en todos los nodos de la sección.
- Temperatura media y gradiente térmico en la sección.
- Temperatura ambiente y radiación solar incidente sobre el paramento.
- Radiación solar directa y difusa en el emplazamiento.

Se contempla también en esta subrutina la opción de reflejar en la salida de resultados los distintos parámetros introducidos en el archivo de datos.

## **2.3. CONTRASTACION DEL MODELO**

En el apartado anterior se ha presentado una descripción pormenorizada del modelo de análisis desarrollado para la obtención de la respuesta térmica de la presa en explotación frente a la acción térmica ambiental tanto en lo que hace referencia a las hipótesis en que éste se fundamenta y al método numérico de resolución adoptado, como a los aspectos concernientes a la evaluación e implementación de los distintos parámetros que se contemplan en el mismo; en este apartado, se realiza una contrastación de los resultados teóricos que predice el modelo con los resultados experimentales obtenidos fruto de la auscultación térmica en distintas presas españolas actualmente en explotación.

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 2.3 se muestran, para cada presa, los períodos interanuales en los cuales se han registrado experimentalmente las temperaturas utilizadas para la contrastación.

Por tanto, la contrastación del modelo 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.

| 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 2.3. Periodos interanuales relativos a los datos experimentales utilizados en la contrastación.*

A continuación se exponen los criterios adoptados para la estimación de estos parámetros y para la modelización de los datos experimentales. Seguidamente, se define el método utilizado sistemáticamente en la contrastación y, finalmente, se presentan los resultados más significativos obtenidos en la contrastación realizada para las presas de Baserca, Llauset, Almendra y Mequinenza.

### **2.3.1. Criterios adoptados en la estimación de los parámetros 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 2.4 se muestran en forma detallada los parámetros referidos, señalándose con un asterisco aquéllos que se han estimado tomando como fuente la documentación específica suministrada para cada presa analizada.

Además de los parámetros expuestos en la tabla 2.4, que son fruto del planteamiento físico realizado, deben considerarse otros asociados a la resolución de la ecuación diferencial establecida para obtener la distribución de temperaturas en la presa; sobre estos últimos se incide también posteriormente en este apartado.

#### *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.

|                                              |                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CARACTERIZACION TERMICA DEL HORMIGON         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conductividad</li> <li>- Calor específico</li> <li>- Peso específico</li> <li>- Coeficiente de absorción</li> <li>- Emisividad</li> </ul>                                               |
| CARACTERIZACION DE GEOMETRIA Y EMPLAZAMIENTO | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Latitud (*)</li> <li>- Declinación solar</li> <li>- Acimut (*)</li> <li>- Espesor (*)</li> <li>- Inclinação paramento aguas abajo(*)</li> </ul>                                         |
| CARACTERIZACION TERMICA DEL AMBIENTE         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura ambiente (*)</li> <li>- Temperatura del agua (*)</li> <li>- Coeficiente de convención</li> <li>- Radiación solar</li> <li>- Coeficiente de reflexión del entorno</li> </ul> |

(\*) Valores estimados en función de datos relativos a la presa.

Tabla 2.4. *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 2.5 se muestran los valores adoptados para estos parámetros en la contrastación.

| Caracterización térmica del hormigón |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Conductividad térmica                | 2,5 w/m°C              |
| Calor específico                     | 1000 J/kg °C           |
| Peso específico                      | 2500 kg/m <sup>3</sup> |
| Emisividad                           | 0,88                   |
| Coeficiente de absorción             | 0,50                   |

Tabla 2.5. *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 hormigones dosificados con áridos de distinta procedencia, utilizados en la construcción de diversas presas en Estados Unidos y en Brasil [ACI (1970), 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) y con esta situación como referencia, tomando los valores numéricos de esta magnitud del mapa peninsular contenido en el Times Concise Atlas of the World (1980).

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 2.1, 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

Bajo esta denominación se agrupan aquellos parámetros mediante los cuales se representa la acción térmica ambiental sobre la presa en explotación. Estos son la temperatura ambiente, la temperatura del agua, el coeficiente de transferencia de calor por convección, la radiación solar incidente en el emplazamiento y el coeficiente de reflexión del entorno.

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 periodos 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 periodos 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 compendiados 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 periodo interanual) permiten configurar un año tipo o año modelo durante el cual actúa sobre la presa la acción térmica ambiental modelizada.

#### Parámetros asociados a la resolución de la ecuación diferencial

La obtención de la respuesta térmica de la presa en explotación requiere, además del conocimiento de los parámetros anteriormente expuestos cuyo origen obedece al planteamiento físico realizado, la definición de otros parámetros ligados a la resolución de la ecuación diferencial establecida; éstos son, fundamentalmente, la temperatura inicial y el tamaño de la malla.

La condición inicial o condición de contorno temporal viene definida por el

conocimiento de la temperatura en todo el dominio de integración en un instante determinado que se adopta como origen de tiempos. El tiempo transcurrido hasta llegar a la convergencia en la solución, entendido este tiempo en un intervalo temporal de cálculo adoptado, viene influenciado por la mayor o menor proximidad que la temperatura inicial elegida tenga a la solución de la ecuación diferencial. Por tanto, la elección de la temperatura inicial debe hacerse teniendo en cuenta el intervalo temporal de cálculo que se adopte en cada caso.

En la figura 2.8 se presentan, a modo de ejemplo, las temperaturas obtenidas en el nodo central de un espesor de 20 m (mes de julio) considerando distintos intervalos de tiempo de cálculo (años) y habiendo adoptado en cada uno de ellos diferentes temperaturas iniciales (5, 10, 15 y 20°C); esta figura pone de manifiesto la influencia que tiene la elección de la temperatura inicial en el tiempo de análisis adoptado; en este sentido, la contrastación se ha realizado considerando un intervalo temporal de cálculo de diez años y una temperatura inicial uniforme de quince grados centígrados.

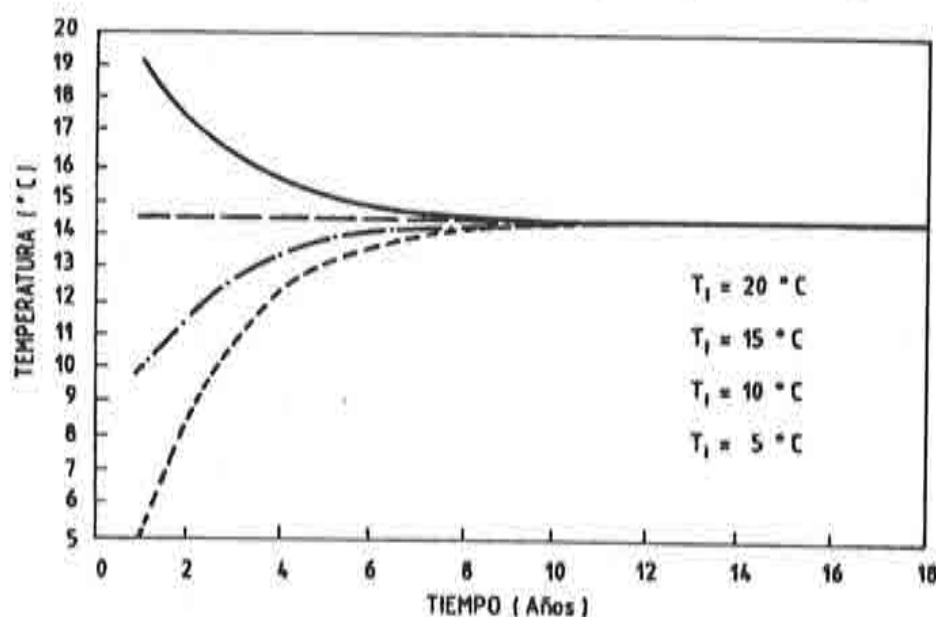


Fig. 2.8. Influencia de la temperatura inicial según distintos tiempos de análisis (años).

Por otra parte, el número de nodos a considerar en cada sección se contempla también como una variable cuyo valor es preciso establecer; este número define, para un espesor dado, el tamaño de la malla unidimensional en que se discretiza el dominio de integración. De los posibles tamaños de malla que aseguran la convergencia y estabilidad de la solución se ha optado por ajustar el número de nodos, en cada espesor considerado, de forma que resulten separaciones entre nodos en el entorno de los 0,20 m; este tamaño de malla se estima adecuado para representar satisfactoriamente la distribución de temperaturas en el hormigón teniendo en cuenta los rangos de los espesores en las presas analizadas.

### 2.3.2. Método seguido en la contrastación

En el apartado precedente se han establecido los criterios que permiten la cuantificación de los distintos parámetros que intervienen en el modelo. Los valores adoptados pretenden ser representativos de las características térmicas de un hormigón tipo utilizado en la construcción de presas y, a su vez, reproducir los aspectos particulares de cada presa en relación a su emplazamiento y geometría; asimismo definen unas condiciones ambientales medias que representan, en un periodo anual modelo, la acción térmica ambiental sobre la presa en explotación.

Por tanto, se está en condiciones de obtener la respuesta térmica de la presa según el modelo propuesto. Esta respuesta puede obtenerse tanto en términos de temperatura puntual en los distintos nodos que representan a los termómetros ubicados en la presa como en forma de temperatura media y gradiente térmico en la sección considerada, o bien teniendo en cuenta simultáneamente ambas opciones.

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 periodos anuales que configuran el periodo 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.

Los resultados se presentan formalmente, para cada presa, según dos ópticas diferentes. Por una parte, y para cada termómetro, se compara la evolución de la temperatura que predice el modelo en el año tipo con las evoluciones de la temperatura en cada uno de los años que configuran el periodo interanual considerado; por otra parte, en secciones a cotas determinadas, se obtiene la distribución teórica de temperatura según el espesor y sobre ésta se comparan los valores experimentales correspondientes a los termómetros en ella ubicados.

### 2.3.3. Resultados

A continuación se presentan los resultados más significativos obtenidos como fruto de la contrastación planteada en secciones a distintas cotas para las presas de Baserca, Llauset, Almendra y Mequinenza, todas ellas actualmente en explotación.

#### Presa de Baserca

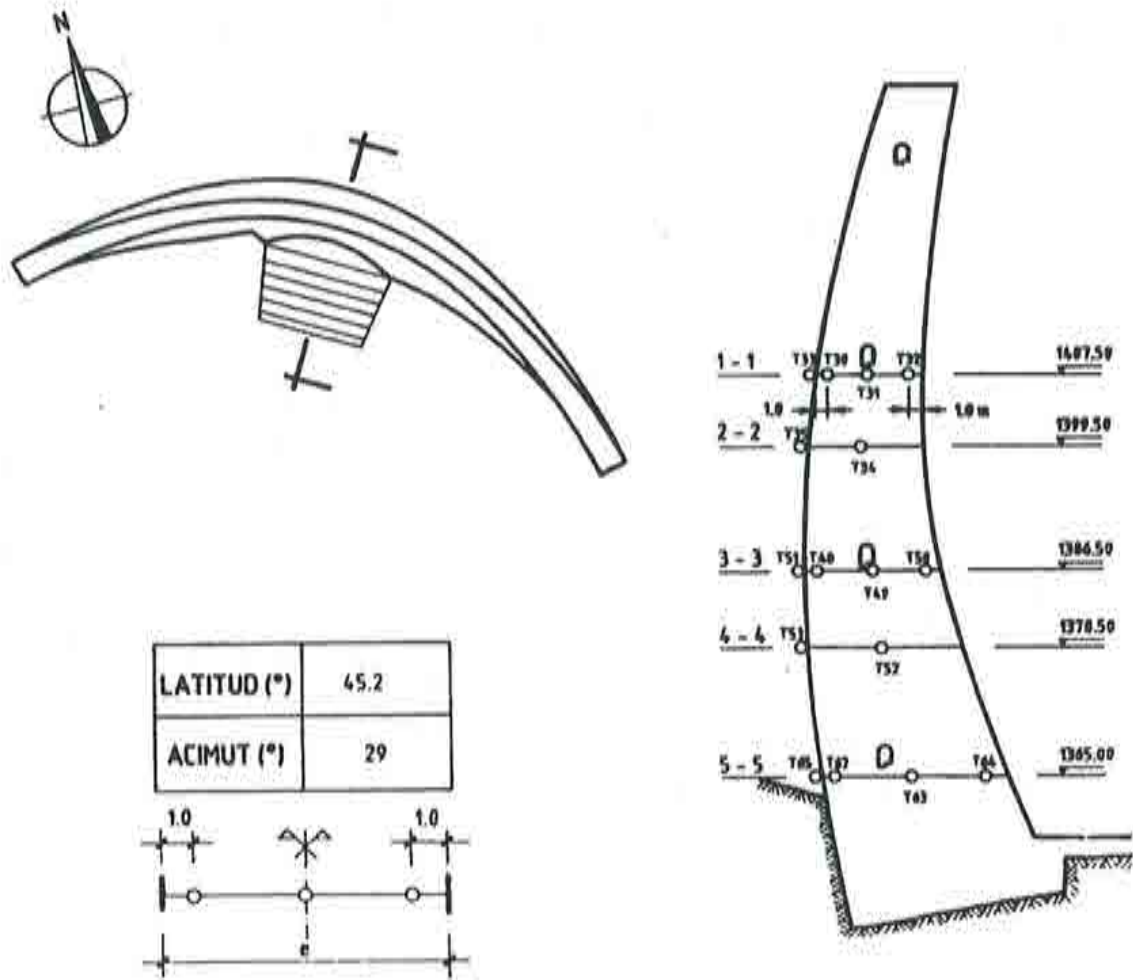
La presa de Baserca está situada en la cuenca del río Noguera Ribagorzana, en el término municipal de Bono (Huesca). Responde a la tipología de presa bóveda con aliviadero en lámina libre y su función principal es la producción de energía eléctrica. Sus características generales se resumen en la tabla 2.6.

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| Altura (m)                                        | 86  |
| Longitud en coronación (m)                        | 322 |
| Volumen de presa ( $10^3 \text{ m}^3$ )           | 225 |
| Volumen de embalse ( $\text{hm}^3$ )              | 12  |
| Superficie de embalse (ha)                        | 96  |
| Capacidad de aliviadero ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 290 |

Tabla 2.6. Características generales de la presa de Baserca [Inventario de Presas Españolas (1986)].

La sección transversal en la que se ha planteado la contrastación corresponde a la sección entre las juntas 10 y 11. En la figura 2.9 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 definen 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.



| SECCION | COTA (m) | TERMOMETROS   | ESPESOR (m) | INCLINACION |
|---------|----------|---------------|-------------|-------------|
| 1-1     | 1407,50  | T30, T31, T32 | 11,00       | 90,00       |
| 2-2     | 1399,50  | T34           | 12,00       | 90,00       |
| 3-3     | 1386,50  | T48, T49, T50 | 14,00       | 79,50       |
| 4-4     | 1378,50  | T52           | 15,50       | 74,50       |
| 5-5     | 1365,00  | T62, T63, T64 | 19,00       | 68,50       |

Fig. 2.9. Características de la sección adoptada en la contrastación.

Los valores numéricos que representan la acción térmica ambiental sobre la presa se recogen en la tabla 2.7, en la cual se explicita para cada uno de ellos la fuente utilizada para su estimación.

| Mes | (1)<br>(*) | (2)<br>(**) | (3)<br>(***) | (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 ( $\text{wh/m}^2$ )
- (2) Temperatura ambiente máxima diaria en media mensual ( $^{\circ}\text{C}$ )
- (3) Temperatura ambiente mínima diaria en media mensual ( $^{\circ}\text{C}$ )
- (4) Temperatura media del agua ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Coeficiente de convección ( $v=4,16 \text{ m/s}$ )= $20,63 \text{ w/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (\*\*\*)

(\*) 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 2.7. Valores de los parámetros ambientales adoptados en la contrastación.*

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 2.9, 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 2.9. La proximidad de estos termómetros al paramento de aguas abajo hace que su comportamiento térmico se vea influenciado en gran medida por la condición de contorno impuesta en tal paramento y, en consecuencia, por los valores adoptados en la estimación de los distintos parámetros que

la representan.

La figura 2.10 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 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.

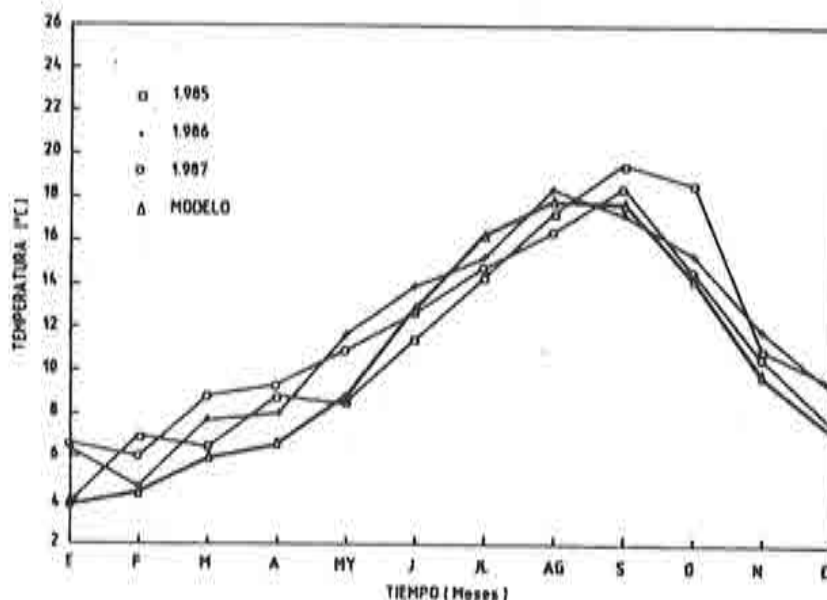


Fig. 2.10. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T-64.

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 2.9. Su proximidad al paramento de aguas arriba condiciona en parte su comportamiento térmico a la evolución adoptada para la temperatura del agua, la cual define la condición de contorno impuesta en tal paramento.

Los resultados obtenidos en la contrastación planteada para estos termómetros son semejantes entre sí, mostrándose en la figura 2.11 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.

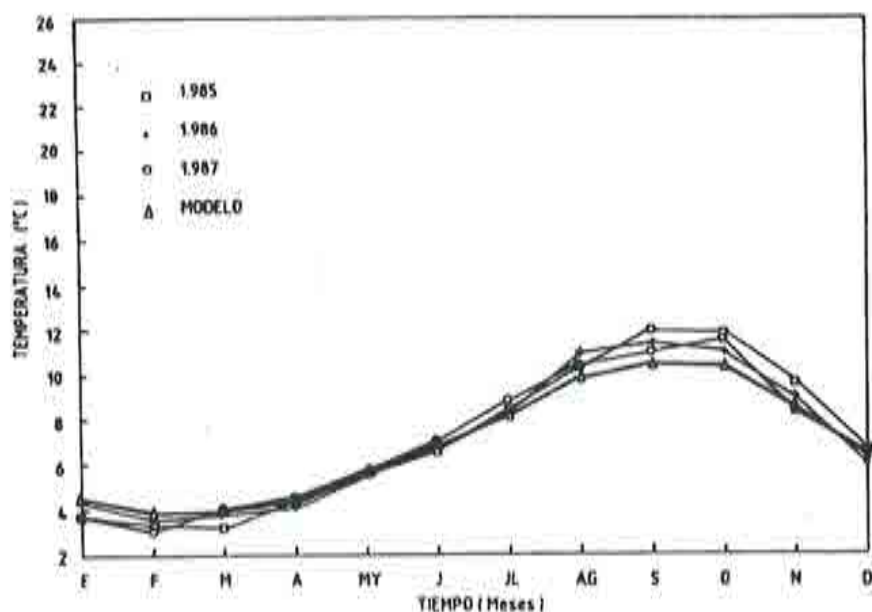


Fig. 2.11. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T48.

Respecto a los termómetros ubicados en zonas centrales del espesor (T31, T34, T49, T52, T63), en la figura 2.12 se muestra la evolución anual de la temperatura en el termómetro T34, alojado éste en el punto medio de una 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.

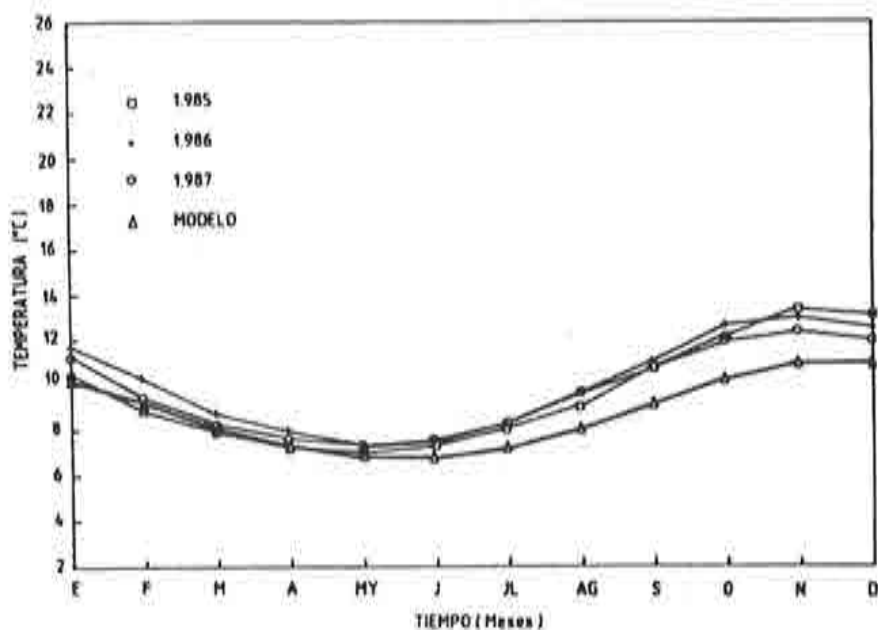


Fig. 2.12. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T34.

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 2.13 se exponen los resultados obtenidos para el termómetro T49, próximo a la galería existente a la cota 1.387, resultados éstos que muestran, en estas condiciones, un comportamiento térmico teórico que se aleja del comportamiento registrado experimentalmente.

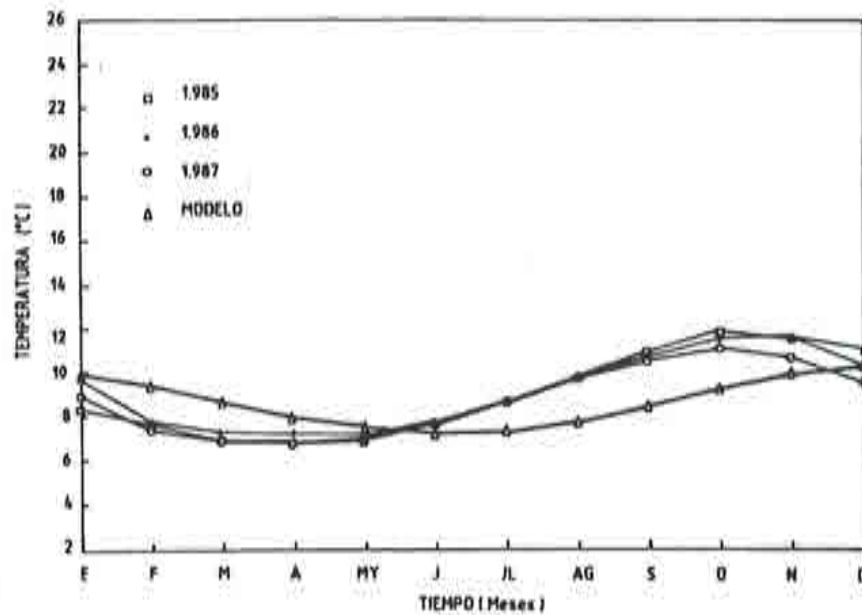


Fig. 2.13. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T49.

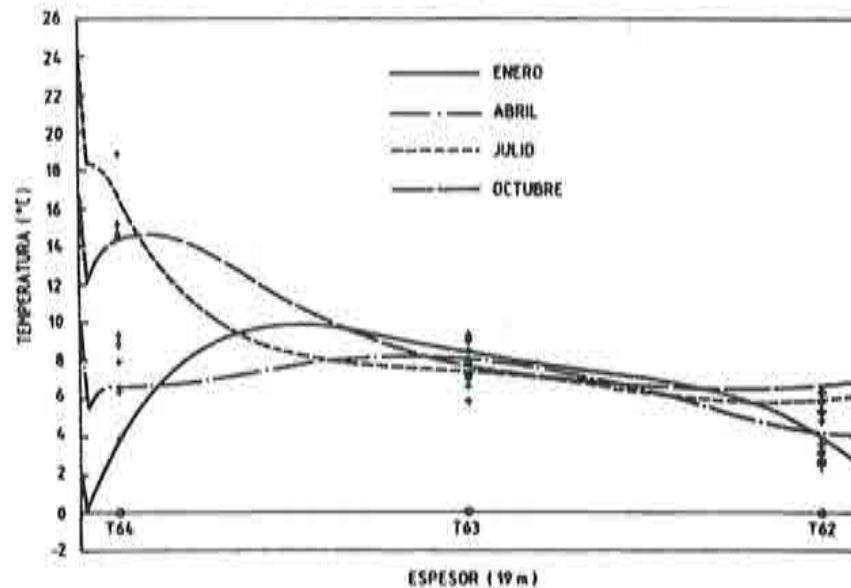


Fig. 2.14. Distribución de temperaturas a nivel sección.

Por otra parte, en la figura 2.14 se presenta la distribución de temperaturas que

predice el modelo en la sección 5-5 en los días medios adoptados como representativos del comportamiento térmico de los meses de enero, abril, julio y octubre; sobre estas distribuciones se han llevado los valores experimentales en los puntos representativos de los termómetros ubicados en esta sección. Esta figura permite visualizar como se distribuye la temperatura a través del espesor a una determinada cota, reflejando la respuesta térmica de la presa a nivel sección frente a la sollicitación térmica ambiental.

### Presa de Llauset

Esta presa responde a la tipología de presa bóveda con aliviadero en lámina libre; está situada en la cuenca del río Llauset en el término municipal de Bono (Huesca) y su uso principal es la producción de energía eléctrica. En la tabla 2.8 se indican sus características generales.

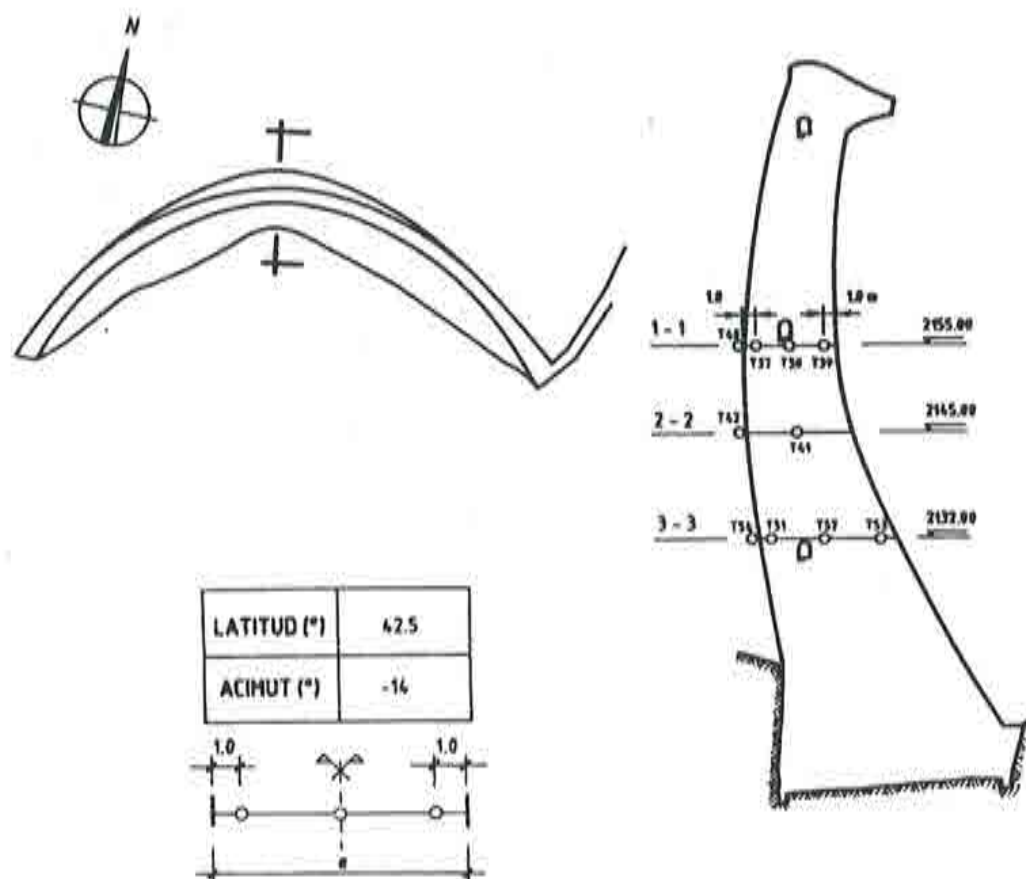
|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| Altura (m)                                        | 82  |
| Longitud en coronación (m)                        | 291 |
| Volumen de presa ( $10^3 \text{ m}^3$ )           | 227 |
| Volumen de embalse ( $\text{hm}^3$ )              | 16  |
| Superficie de embalse (ha)                        | 45  |
| Capacidad de aliviadero ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 35  |

Tabla 2.8. Características generales de la presa de Llauset [Inventario de Presas Españolas (1986)].

La contrastación se ha planteado en la sección transversal que corresponde a la sección entre las juntas 9 y 10. En la figura 2.15 se muestra un croquis de la situación de esta sección en la planta de la presa así como su perfil, en donde se detalla la disposición de los termómetros utilizados en la contrastación; en ella se definen también las secciones a las distintas cotas en las que se ha planteado el análisis y se exponen los valores particulares adoptados para la presa en lo que se refiere a los parámetros geométricos y de emplazamiento.

Los valores numéricos de los parámetros que representan la acción térmica ambiental sobre la presa se presentan en la tabla 2.9, en la cual se explicita para cada uno de ellos la fuente de estimación empleada.

En esta presa se han analizado tres secciones a distintas cotas, obteniéndose la evolución anual de la temperatura en un total de siete termómetros. La disposición de estos termómetros en la presa responde, análogamente a lo que sucede en la presa de Baserca, a las tres ubicaciones anteriormente mencionadas (próximas a paramentos de aguas arriba y de aguas abajo y zona central del espesor).



| SECCION | COTA (m) | TERMOMETROS   | ESPESOR (m) | INCLINACION (°) |
|---------|----------|---------------|-------------|-----------------|
| 1-1     | 2155,00  | T37, T38, T39 | 10,50       | 90              |
| 2-2     | 2145,00  | T41           | 12,50       | 75              |
| 3-3     | 2132,00  | T51, T52, T53 | 16,00       | 64              |

Fig. 2.15. Características de la sección adoptada en la contrastación.

| Mes | (1)<br>(*) | (2)<br>(**) | (3)<br>(***) | (4) Cota (m) (**) |        |        |
|-----|------------|-------------|--------------|-------------------|--------|--------|
|     |            |             |              | 2155,0            | 2145,0 | 2132,0 |
| E   | 1300       | - 3,27      | - 9,17       | 2,45              | 2,32   | 2,06   |
| F   | 2300       | - 1,21      | - 5,03       | 2,35              | 2,20   | 2,76   |
| M   | 3800       | 1,38        | - 5,84       | 2,47              | 2,32   | 2,85   |
| A   | 4400       | 4,98        | - 2,30       | 1,65              | 2,52   | 3,00   |
| MY  | 5400       | 8,98        | 2,27         | 2,55              | 3,22   | 3,21   |
| J   | 6300       | 12,74       | 4,92         | 3,87              | 3,57   | 3,89   |
| JL  | 6800       | 16,65       | 7,97         | 5,51              | 5,16   | 4,51   |
| AG  | 5600       | 15,58       | 7,20         | 6,00              | 5,15   | 4,76   |
| S   | 4500       | 13,31       | 6,38         | 7,65              | 5,68   | 4,76   |
| O   | 3200       | 6,65        | 1,79         | 8,90              | 6,45   | 4,86   |
| N   | 1800       | 3,23        | - 2,09       | 6,15              | 5,83   | 4,45   |
| D   | 1300       | 1,86        | - 2,82       | 3,91              | 3,70   | 3,95   |

- (1) Radiación solar incidente en el emplazamiento ( $\text{wh/m}^2$ )
- (2) Temperatura ambiente máxima diaria en media mensual ( $^{\circ}\text{C}$ )
- (3) Temperatura ambiente mínima diaria en media mensual ( $^{\circ}\text{C}$ )
- (4) Temperatura media del agua ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Coeficiente de convección ( $v=4,16 \text{ m/s}$ )= $20,63 \text{ w/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (\*\*\*)

(\*) 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 2.9. Valores de los parámetros adoptados en la contrastación.*

En las figuras 2.16 y 2.17 se presentan, respectivamente, los resultados obtenidos en el seguimiento anual de la temperatura para el termómetro T51, distante un metro del paramento de aguas arriba, y para el termómetro T53 colocado éste a un metro del paramento de aguas abajo; en la figura 2.18 se muestran los resultados obtenidos para el termómetro T41 ubicado en el punto medio de una sección de 12,50 m. de espesor. Estos resultados también ponen de manifiesto el buen comportamiento del modelo de cara a predecir la evolución térmica anual en los puntos mencionados.

A efectos de visualizar la variación de la distribución de temperaturas a lo largo del espesor en distintos meses del año, en la figura 2.19. se presenta la distribución teórica de temperatura obtenida en la sección 3-3 mediante el modelo en los días medios adoptados respectivamente como representativos de los meses de enero, abril, julio y octubre. Sobre estas distribuciones se han superpuesto las temperaturas registradas experimentalmente en los termómetros ubicados en la sección considerada; la mencionada figura permite apreciar a nivel sección las diferentes zonas, a lo largo del espesor, que se ven influenciadas por las condiciones de contorno impuestas en ambos

paramentos.

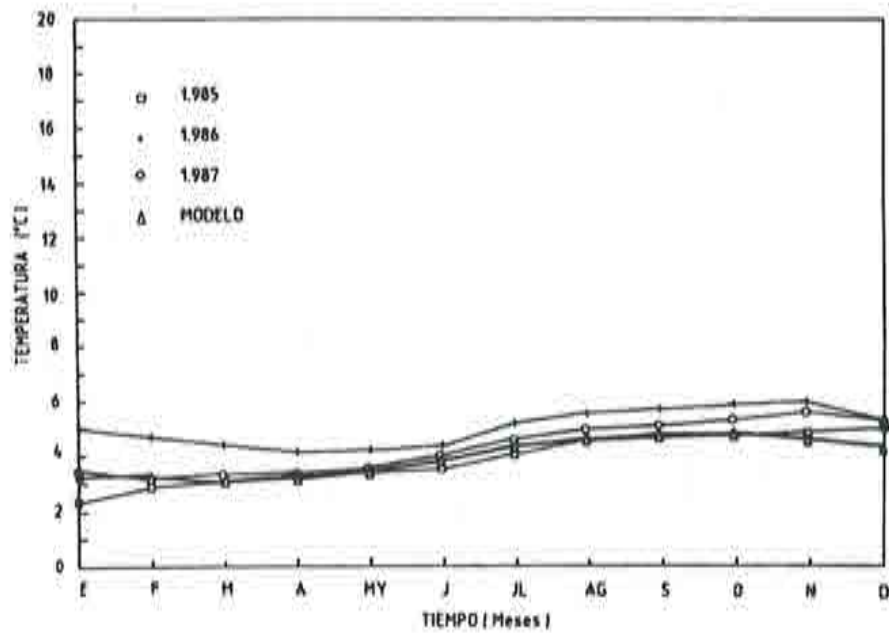


Fig. 2.16. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T51.

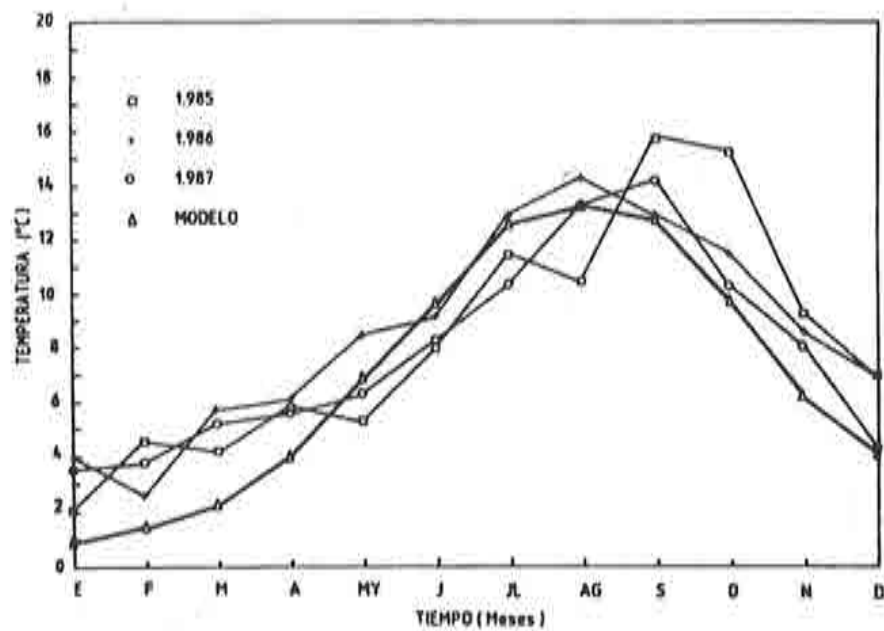


Fig. 2.17. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T53.

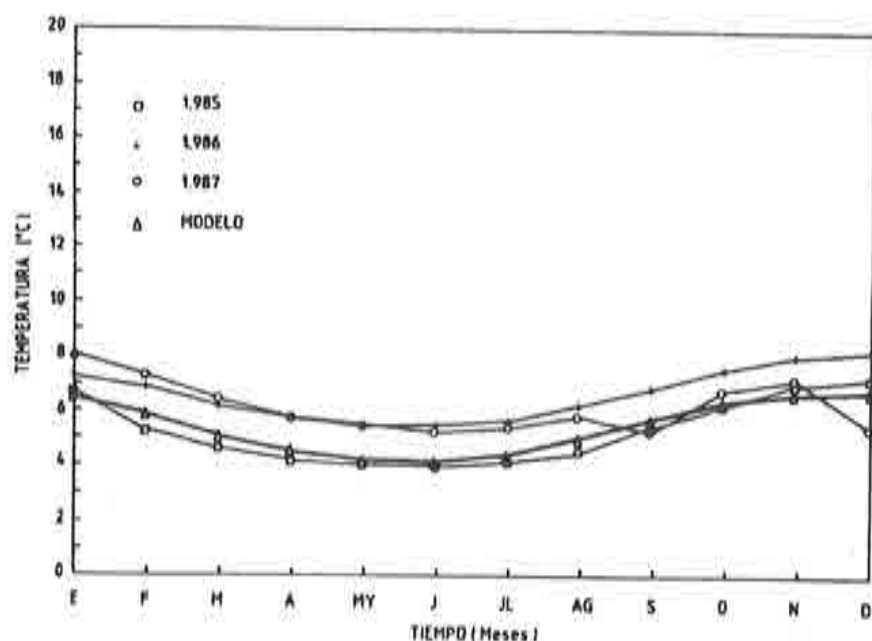


Fig. 2.18. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T41.

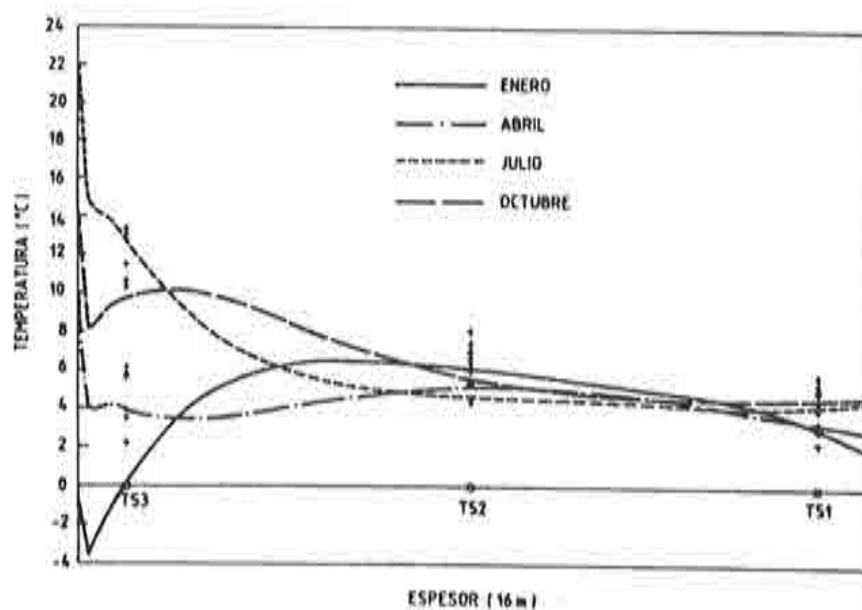


Fig. 2.19. Distribución de temperaturas en la sección.

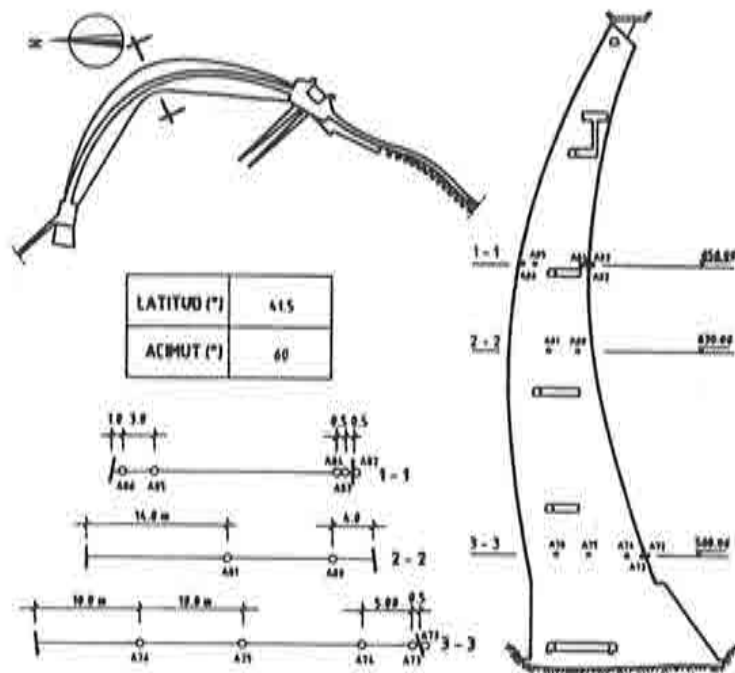
## Presas de Almendra

La presa de Almendra está situada en la cuenca del río Tornos, en los términos municipales de Almendra (Salamanca) y Cibanal (Zamora). Responde a la tipología de presa bóveda con aliviadero de compuertas y su uso principal es la producción de energía eléctrica; en la tabla 2.10 se recogen sus características generales.

|                                                   |      |
|---------------------------------------------------|------|
| Altura (m)                                        | 202  |
| Longitud en coronación (m)                        | 567  |
| Volumen de presa ( $10^3 \text{ m}^3$ )           | 2186 |
| Volumen de embalse ( $\text{hm}^3$ )              | 2649 |
| Superficie de embalse (ha)                        | 8650 |
| Capacidad de aliviadero ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 3000 |

Tabla 2.10. Características generales de la presa de Almendra [Inventario de Presas Españolas (1986)].

La sección transversal considerada para la contrastación corresponde a la sección designada por  $P_1$ . En la figura 2.20 se presenta un croquis de la situación en planta de esta sección y de su perfil, en la cual se expone detalladamente la disposición de los ter-



| SECCION | COTA (m) | TERMOMETROS             | ESPESOR (m) | INCLINACION (°) |
|---------|----------|-------------------------|-------------|-----------------|
| 1-1     | 656,00   | A82, A83, A84, A85, A86 | 23,25       | 90              |
| 2-2     | 630,00   | A80, A81                | 28,00       | 83              |
| 3-3     | 568,00   | A72, A73, A74, A75, A76 | 37,50       | 54,5            |

Fig. 2.20. Características de la sección adoptada en la contrastación.

mómetros que se han utilizado en la contrastación; se definen asimismo en esta figura las distintas cotas en las que se ha planteado el análisis y se muestran los valores particulares adoptados para esta presa en lo que concierne a los parámetros geométricos y de emplazamiento.

Los valores numéricos que representan la acción térmica ambiental considerada se presentan en la tabla 2.11, en donde se explicita para cada uno de ellos la fuente utilizada para su estimación.

| Mes | (1)<br>(*) | (2)<br>(**) | (3)<br>(***) | (4)Cota (m) (**) |
|-----|------------|-------------|--------------|------------------|
|     |            |             |              | 30               |
| E   | 1900       | 6,96        | 1,15         | 10,78            |
| F   | 2900       | 8,90        | 2,10         | 9,09             |
| M   | 4100       | 11,80       | 3,38         | 9,70             |
| A   | 5500       | 13,91       | 4,83         | 12,06            |
| MY  | 6600       | 16,97       | 7,18         | 13,77            |
| J   | 7400       | 23,45       | 11,50        | 15,92            |
| JL  | 7700       | 27,73       | 14,01        | 21,55            |
| AG  | 6800       | 27,27       | 14,43        | 21,15            |
| S   | 5100       | 25,75       | 13,46        | 21,16            |
| O   | 3400       | 17,34       | 8,79         | 18,60            |
| N   | 2300       | 11,67       | 4,65         | 15,02            |
| D   | 1400       | 8,28        | 2,71         | 11,95            |

- (1) Radiación solar incidente en el emplazamiento (wh/m<sup>2</sup>)
- (2) Temperatura ambiente máxima diaria en media mensual (°C)
- (3) Temperatura ambiente mínima diaria en media mensual (°C)
- (4) Temperatura media del agua (°C)
- Coeficiente de convección ( $v=2,77$  m/s)=15,31 w/m<sup>2</sup> °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 2.11. Valores de los parámetros ambientales adoptados en la contrastación.*

En relación a los valores numéricos relativos a la temperatura del agua que figuran en la tabla 2.11, éstos corresponden a las temperaturas medidas a una profundidad de 30 m. durante el periodo 1984-1987. Al no disponerse en este periodo de temperaturas del agua a otras profundidades, no se ha extrapolado una variación de la temperatura del agua con la profundidad y se ha adoptado la misma variación anual en la temperatura del agua para las secciones a distintas cotas que se han considerado en el análisis; ello hace que los resultados obtenidos para los termómetros situados en las proximidades del

paramento de aguas arriba puedan ser poco representativos de cara a su contrastación con las medidas experimentales registradas en éstos.

No obstante, el hecho de que esta presa disponga de termómetros ubicados en la superficie del paramento aguas abajo (A72, A82) ofrece la posibilidad de contrastar la bondad del modelo a efectos de reproducir las variaciones térmicas que experimentan puntos situados en el mencionado paramento, puntos éstos alejados lo suficiente del paramento aguas arriba como para considerar que su comportamiento térmico no se verá afectado por la temperatura del agua impuesta en este paramento.

El paramento aguas abajo recibe directamente la acción térmica ambiental que actúa sobre él y, en particular, la radiación solar incidente en el mismo, cuya intensidad depende en gran medida, y entre otros factores, de la hora del día que se considere en el análisis. Por otra parte, las temperaturas obtenidas mediante el modelo en los puntos situados en la superficie del citado paramento serán más sensibles a los valores adoptados en la estimación que las obtenidas en otros nodos interiores más alejados de este contorno.

A continuación, en las figuras 2.21 y 2.22 se presentan, respectivamente, los resultados obtenidos para la evolución anual de la temperatura en los termómetros A72 y A82, ambos situados en el paramento de aguas abajo en secciones a distinta cota. En este caso se comparan las evoluciones anuales de las temperaturas registradas experimentalmente con la evolución anual de la temperatura que predice el modelo en los días medios representativos del mes, obtenida ésta en dos horas distintas del día que corresponden a una hora en la que hay incidencia de radiación solar (11<sup>00</sup> h) y a otra hora en la cual la radiación solar incidente es nula (23<sup>00</sup> h).

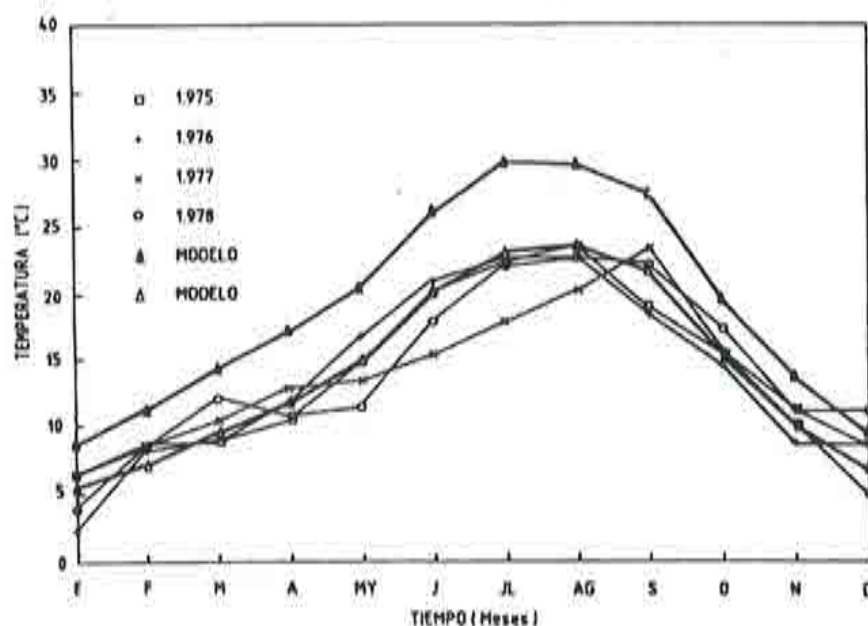


Fig. 2.21. Evolución anual de la temperatura en el termómetro A72.

La evolución anual así obtenida mediante el modelo viene definida por dos curvas teóricas que muestran la influencia que tiene la radiación solar incidente en las variaciones de temperatura que experimentan los puntos situados en la superficie del paramento de aguas abajo.

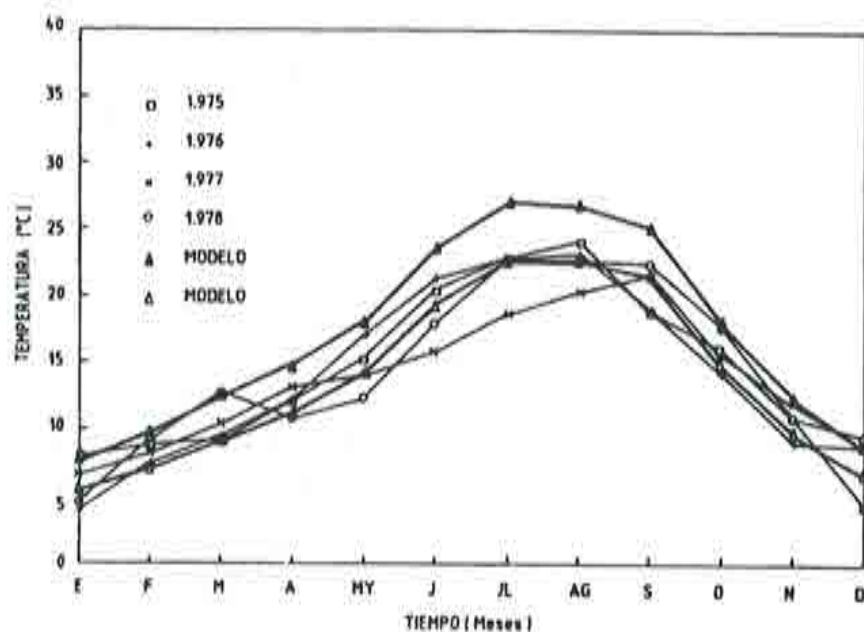


Fig. 2.22. Evolución anual de la temperatura en el termómetro A82.

Los resultados presentados en las figuras 2.21 y 2.22 ponen de manifiesto que el modelo propuesto es asimismo capaz de representar de forma idónea la evolución térmica en termómetros dispuestos en el paramento aguas abajo.

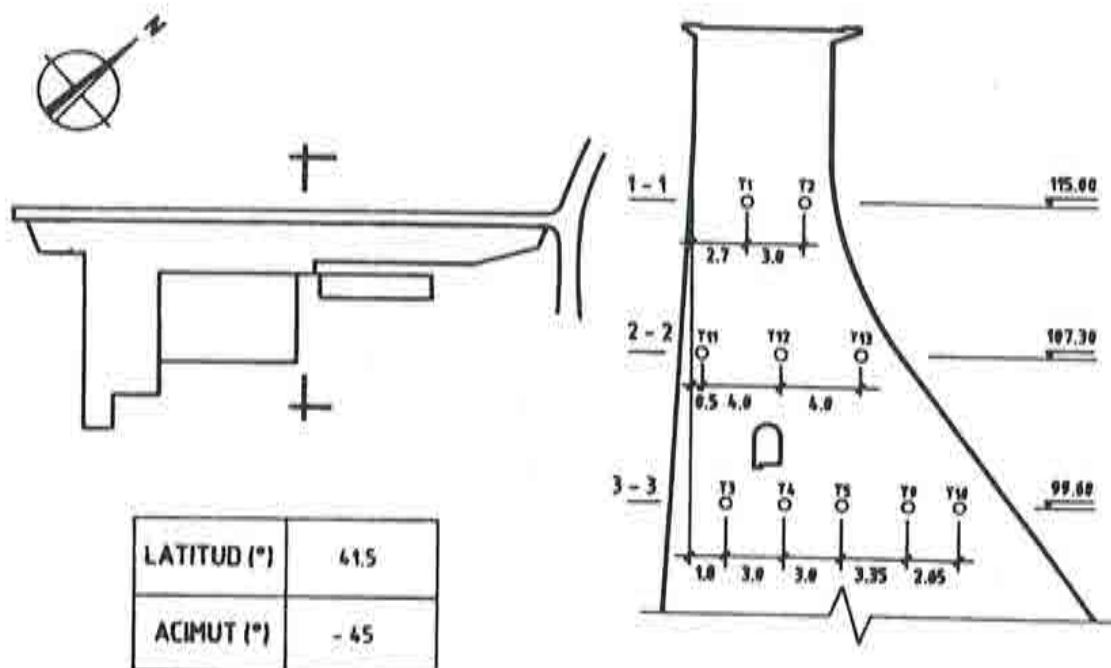
### Presa de Mequinenza

Esta presa responde a la tipología de presa de gravedad con aliviadero de compuertas; está situada en el río Ebro, en el término municipal de Mequinenza (Zaragoza), siendo su uso principal la producción de energía eléctrica. En la tabla 2.12 se exponen sus características generales.

|                                                   |       |
|---------------------------------------------------|-------|
| Altura (m)                                        | 81    |
| Longitud en coronación (m)                        | 451   |
| Volumen de presa ( $10^3 \text{ m}^3$ )           | 1100  |
| Volumen de embalse ( $\text{hm}^3$ )              | 1534  |
| Superficie de embalse (ha)                        | 7720  |
| Capacidad de aliviadero ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 12800 |

Tabla 2.12. Características generales de la presa de Mequinenza [Inventario de Presas Españolas (1986)].

En la figura 2.23 se presenta un croquis de la situación en planta de la sección adoptada en la contrastación así como de su perfil, en la cual se muestra detalladamente la disposición de los termómetros empleados en la contrastación; asimismo, se definen en esta figura las distintas cotas a las que se ha planteado el análisis y se exponen los valores particulares adoptados en relación a los parámetros geométricos y de emplazamiento.



| SECCION | COTA (m) | TERMOMETROS         | ESPESOR (m) | INCLINACION (°) |
|---------|----------|---------------------|-------------|-----------------|
| 1-1     | 115,00   | T1, T2              | 7,50        | 85              |
| 2-2     | 107,30   | T11, T12, T13       | 11,25       | 53              |
| 3-3     | 99,60    | T3, T4, T5, T9, T10 | 17,50       | 53              |

Fig. 2.23. Características de la sección adoptada en la contrastación.

Los valores numéricos que representan la acción térmica ambiental sobre la presa se recogen en la tabla 2.13, en la que se explicita para cada uno de ellos la fuente utilizada para su estimación.

| Mes | (1)<br>(*) | (2)<br>(**) | (3)<br>(***) | (4) Cota (m) (**) |       |       |
|-----|------------|-------------|--------------|-------------------|-------|-------|
|     |            |             |              | 115,0             | 107,3 | 99,6  |
| E   | 1900       | 8,11        | 0,03         | 6,58              | 6,51  | 5,72  |
| F   | 2900       | 10,39       | 0,93         | 6,25              | 5,86  | 4,99  |
| M   | 4400       | 14,55       | 3,59         | 8,46              | 7,63  | 6,37  |
| A   | 5700       | 18,23       | 6,64         | 11,67             | 10,40 | 9,12  |
| MY  | 6400       | 21,28       | 9,91         | 15,71             | 13,64 | 11,82 |
| J   | 7200       | 27,36       | 14,70        | 19,60             | 16,85 | 14,57 |
| JL  | 7400       | 31,78       | 15,57        | 22,99             | 19,80 | 17,19 |
| AG  | 6600       | 30,97       | 17,88        | 23,41             | 21,50 | 19,21 |
| S   | 5200       | 28,45       | 15,51        | 22,66             | 21,07 | 20,02 |
| O   | 3600       | 21,23       | 10,77        | 18,78             | 18,88 | 18,26 |
| N   | 2400       | 14,21       | 6,58         | 15,90             | 15,40 | 14,52 |
| D   | 1600       | 8,33        | 2,37         | 10,77             | 10,65 | 9,82  |

- (1) Radiación solar incidente en el emplazamiento (wh/m<sup>2</sup>)
- (2) Temperatura ambiente máxima diaria en media mensual (°C)
- (3) Temperatura ambiente mínima diaria en media mensual (°C)
- (4) Temperatura media del agua (°C)
- Coeficiente de convección ( $v=4,16$  m/s)=20,63 w/m<sup>2</sup> °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 2.13. Valores de los parámetros ambientales adoptados en la contrastación.*

La contrastación se ha planteado en tres secciones a distintas cotas contemplando en conjunto la evolución de la temperatura en un total de diez termómetros.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en dos termómetros, ambos interiores, dispuestos respectivamente en dos secciones que corresponden a cotas diferentes. En la figura 2.24 se muestra la evolución anual de la temperatura en el termómetro T3, ubicado en una sección de 17,50 m. de espesor, mientras que en la figura 2.25 se presentan los resultados obtenidos en el termómetro T1 perteneciente a una sección de 7,50 m. de espesor.

En ambos casos, la respuesta térmica obtenida mediante el modelo reproduce bien, en términos cualitativos, el comportamiento térmico evaluado experimentalmente. En

este sentido, el modelo refleja adecuadamente la inercia térmica del hormigón según los distintos espesores; así, en concordancia con los resultados experimentales, el modelo predice en estos termómetros los valores extremos de la temperatura en los meses de octubre (máximo anual) y de marzo y abril (mínimo anual). Este aspecto, tal como se ha mencionado anteriormente, es de primordial interés para representar de forma idónea la respuesta térmica de la presa en explotación.

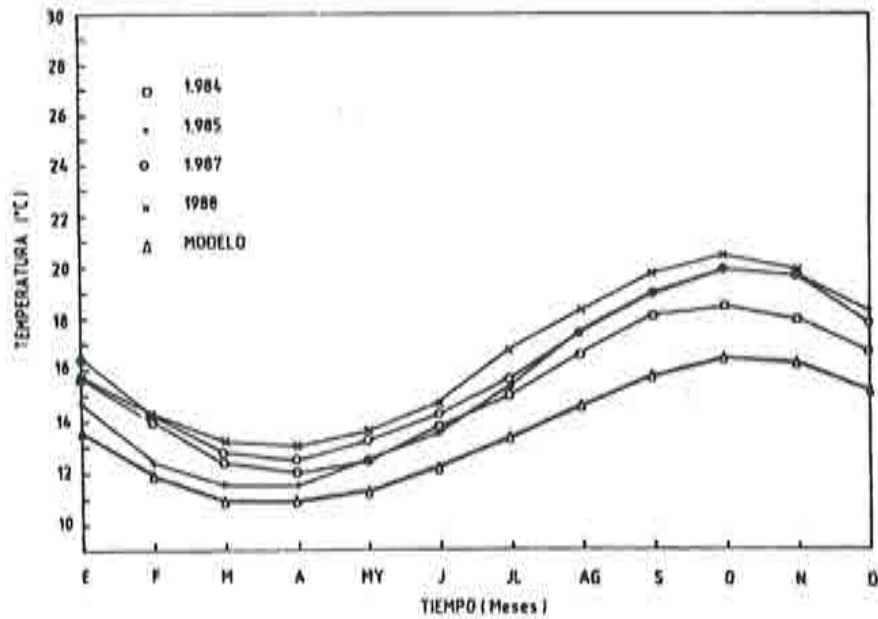


Fig. 2.24. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T3.

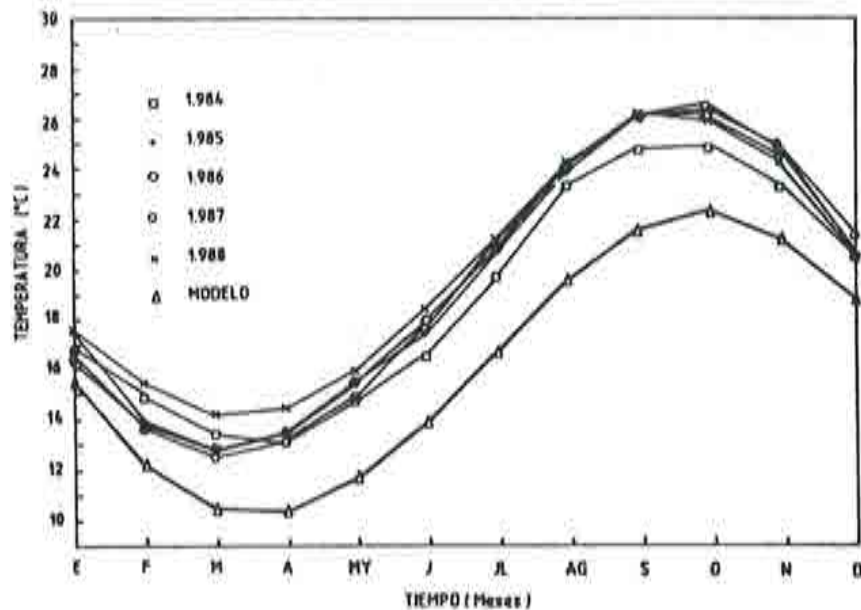


Fig. 2.25. Evolución anual de la temperatura en el termómetro T1.

En la figura 2.26 se muestran las distribuciones de la temperatura según el espesor obtenidas para los meses de enero, abril, julio y octubre juntamente con los valores experimentales registrados en forma puntual en los termómetros ubicados en la sección considerada (sección 2-2). Análogamente a lo ya expuesto para las presas de Baserca y Llauset, en esta figura se visualiza la variación térmica a nivel sección que se obtiene mediante el modelo.

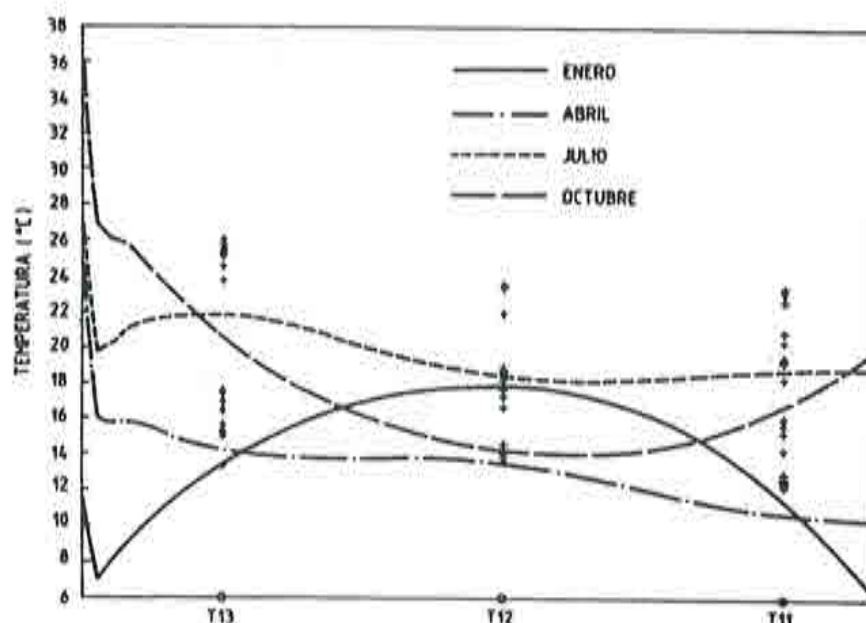


Fig. 2.26. Distribución de temperaturas en la sección.

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, bien en la superficie del paramento 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.

Por otra parte, las distribuciones de temperatura a través del espesor que se han presentado ponen de manifiesto la capacidad de reproducir, mediante el modelo, comportamientos térmicos a nivel sección, lo que permitirá analizar la influencia que tienen, según el espesor, los distintos parámetros que configuran la acción térmica ambiental sobre la presa.

Finalmente, matizar que la contrastación realizada, siguiendo unos criterios y una metodología comunes en todas las presas estudiadas, no debe entenderse en modo alguno

en términos de ajuste cuantitativo del modelo. La incertidumbre asociada tanto a los propios registros experimentales como a los numerosos parámetros estimados hace que tenga poco sentido a priori una contrastación cuantitativa si no se conoce la influencia que tienen en el comportamiento térmico de la presa los distintos parámetros que configuran el modelo presentado.



## CAPITULO 3

### ESTUDIO PARAMETRICO

#### 3.1. INTRODUCCION

En el capítulo anterior se ha presentado el modelo de análisis desarrollado para el estudio del comportamiento térmico de la presa en explotación frente a la acción térmica ambiental y se han contrastado los resultados que este predice con los resultados experimentales obtenidos como fruto de la auscultación térmica de distintas presas españolas actualmente en explotación.

En el presente capítulo se realiza un exhaustivo estudio paramétrico de las numerosas variables que configuran el modelo propuesto con el objeto de acotar su influencia relativa en la respuesta térmica de la presa; estas variables, se agrupan en tres grupos principales que, respectivamente, caracterizan térmicamente al hormigón, al emplazamiento y a la geometría de la presa y a la acción térmica ambiental que actúa sobre ella.

En primer lugar, se establece el método seguido de forma sistemática en este estudio; a continuación, se presentan los resultados obtenidos y el análisis de los mismos para cada uno de los parámetros analizados y, finalmente, se exponen las conclusiones que se derivan del estudio paramétrico realizado.

### 3.2. METODO SEGUIDO EN EL ESTUDIO

El análisis de la respuesta térmica de la presa siguiendo el modelo propuesto contempla, tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior, la presencia de numerosos parámetros que caracterizan térmicamente al hormigón, la geometría de la presa y su emplazamiento y la acción térmica ambiental que actúa sobre ésta.

Para el estudio de la influencia relativa que presentan estos parámetros en el comportamiento térmico de la presa se ha adoptado un conjunto de valores para éstos que define unas condiciones de base o condiciones de referencia respecto a las cuales se realiza el análisis individualizado de la influencia relativa de cada parámetro. Así, para analizar la influencia de un determinado parámetro se establece para el mismo un posible rango de variación y en él una secuencia de valores; seguidamente, se obtiene la respuesta térmica de la presa para cada uno de estos valores adoptándose, en cada caso, para el resto de parámetros los valores dados por las condiciones de referencia.

En la tabla 3.1 se exponen los valores de los parámetros que configuran las condiciones de referencia del estudio, no habiéndose incluido en la misma las correspondientes a la declinación solar para la cual se han adoptado sus valores medios ya expuestos anteriormente en la tabla 2.1 y que corresponden a la declinación solar del día medio del mes; en relación a los valores expuestos en la mencionada tabla 3.1, los que caracterizan la acción térmica corresponden a una zona del noreste peninsular mientras que los que representan térmicamente al hormigón son los valores medios adoptados en el capítulo anterior para la contrastación del modelo. Ello no resta generalidad al estudio ni a las conclusiones que de él puedan derivarse.

Respecto al total de parámetros que intervienen en el modelo presentado, no se ha analizado en este estudio la influencia en la respuesta térmica de la presa del peso específico del hormigón, siempre próximo a los 2.500 Kg/m<sup>3</sup> en el caso de presas, ni de la latitud del emplazamiento magnitud ésta estrechamente vinculada a la radiación solar en el emplazamiento. Los parámetros analizados siguiendo la metodología descrita son los que se detallan en la tabla 3.2.

| Características térmicas del hormigón |                        | Características de emplazamiento y geometría |                 |
|---------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------|-----------------|
| Conductividad                         | 2,5 w/m °C             | Latitud                                      | 41°             |
| Calor específico                      | 1000 J/kg °C           | Acimut                                       | 0°              |
| Peso específico                       | 2500 kg/m <sup>3</sup> | Inclinación                                  | 53°             |
| Emisividad                            | 0,88                   | Espesor                                      | 5, 10, 15, 20 m |
| Coeficiente de absorción              | 0,50                   |                                              |                 |

Tabla 3.1. Condiciones de referencia adoptadas en el estudio paramétrico.

| Características térmicas ambientales |      |      |      |      |
|--------------------------------------|------|------|------|------|
| Mes                                  | (1)  | (2)  | (3)  | (4)  |
| E                                    | 1900 | 8,1  | 0,0  | 6,6  |
| F                                    | 2900 | 10,4 | 1,0  | 6,2  |
| M                                    | 4400 | 14,5 | 3,6  | 8,4  |
| A                                    | 5700 | 18,2 | 6,6  | 11,7 |
| MY                                   | 6400 | 21,3 | 10,0 | 15,7 |
| J                                    | 7200 | 27,4 | 14,7 | 19,6 |
| JL                                   | 7400 | 31,8 | 15,6 | 23,0 |
| AG                                   | 6600 | 31,0 | 17,8 | 23,4 |
| S                                    | 5200 | 28,5 | 15,5 | 22,6 |
| O                                    | 3600 | 21,2 | 10,7 | 18,8 |
| N                                    | 2400 | 14,2 | 6,6  | 16,0 |
| D                                    | 1600 | 8,2  | 2,4  | 10,7 |

- (1) Radiación solar incidente en el emplazamiento ( $wh/m^2$ )
- (2) Temperatura ambiente máxima diaria en media mensual ( $^{\circ}C$ )
- (3) Temperatura ambiente mínima diaria en media mensual ( $^{\circ}C$ )
- (4) Temperatura media del agua ( $^{\circ}C$ )
- Coeficiente de convección,  $h_c = 20,632 \text{ }^{\circ}C$
- Coeficiente de reflexión del entorno,  $r = 0,55$

Tabla 3.1. (Cont.) Condiciones de referencia adoptadas en el estudio paramétrico.

|                                         |                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Relativos al hormigón                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conductividad térmica</li> <li>- Calor específico</li> <li>- Emisividad térmica</li> <li>- Coeficiente de absorción</li> </ul>                                                       |
| Relativos al emplazamiento y geometría  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Acimut de la superficie</li> <li>- Espesor de la sección</li> <li>- Inclinación del paramento</li> </ul>                                                                             |
| Relativos a la acción térmica ambiental | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coeficiente de reflexión del entorno</li> <li>- Velocidad del viento</li> <li>- Radiación solar</li> <li>- Temperatura del agua embalsada</li> <li>- Temperatura ambiente</li> </ul> |

Tabla 3.2. Parámetros analizados en el estudio paramétrico.

La respuesta térmica que se obtiene como fruto de este estudio se analiza atendiendo a distintos aspectos que conciernen al comportamiento térmico de la presa; así, para cada parámetro se presenta la evolución anual de la temperatura media en la sección y la distribución de temperaturas a lo largo del espesor en función de los valores adoptados para el mismo y también su incidencia en la temperatura media anual y en el rango anual de esta temperatura. Salvo indicación expresa en otro sentido los resultados obtenidos corresponden a la temperatura en horas diurnas (11<sup>00</sup> h).

Finalmente, en relación a los resultados obtenidos y particularmente en lo que se refiere a los análisis cuantitativos, éstos deben contemplarse en un contexto relativo, por una parte, al rango de variación adoptado para cada parámetro y, por otra, a las condiciones de referencia, no restando este hecho generalidad a los resultados obtenidos como fruto del estudio.

### **3.3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS RELATIVOS A LOS PARAMETROS QUE CARACTERIZAN AL HORMIGON**

#### **3.3.1. Conductividad térmica**

Esta propiedad, es una de las que caracteriza térmicamente al material en la ecuación diferencial que rige la conducción del calor en el seno de la presa en explotación.

La conductividad térmica del hormigón, si bien depende de diferentes factores, es función primordial del carácter mineralógico del árido con el cual se ha dosificado el hormigón; según este carácter mineralógico y, en menor medida, según su composición y su grado de saturación, la conductividad en hormigones ordinarios puede variar en un rango definido por los valores extremos de 1,5 w/m °C y 3,5 w/m °C, situándose los hormigones dosificados con basaltos en el entorno del valor inferior mientras que para los dosificados con cuarcitas su conductividad térmica se sitúa próxima al extremo superior del rango mencionado.

Para el estudio de la influencia que tiene este parámetro en la respuesta térmica de la presa en explotación se han tomado tres valores de la conductividad (1,5 w/m °C, 2,5 w/m °C, 3,5 w/m °C) que corresponden a los extremos del rango citado y a un valor medio comprendido entre éstos.

Los resultados relativos a la evolución anual de la temperatura media en la sección, indican (figura 3.1) que la conductividad térmica, si bien no influye de forma significativa en la temperatura media anual, sí afecta al rango anual de la temperatura, entendiendo este rango como la diferencia entre las temperaturas medias mensuales máxima y mínima obtenidas en el período anual.

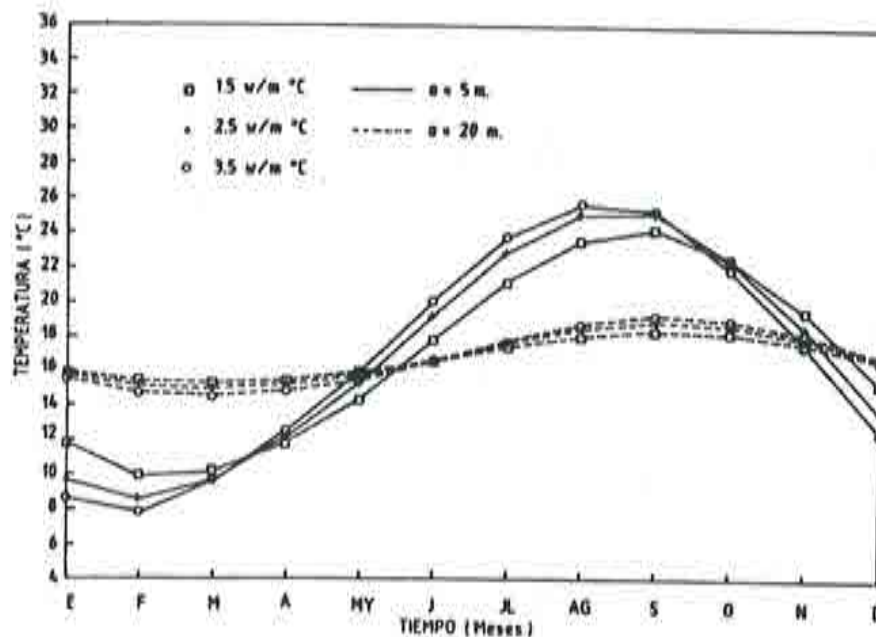


Fig. 3.1. Evolución anual de la temperatura media en función de la conductividad térmica del hormigón.

En este sentido, tomando como valor inicial de la conductividad el de  $1,5 \text{ w/m}^\circ\text{C}$ , a medida que aumenta la conductividad térmica se amplía el rango anual de la temperatura media en la sección. Ello se traduce en que un aumento en la conductividad provoca un aumento en la temperatura máxima anual y, simultáneamente, una disminución en la temperatura mínima anual; en la figura 3.1 anteriormente reseñada se muestra la evolución anual de la temperatura media para los tres valores de la conductividad térmica adoptados, en dos secciones tipo correspondientes a espesores de 5 m. y de 20 m.

Para la sección de 5 m de espesor, la figura 3.1 citada anteriormente, pone de manifiesto la existencia de dos períodos que diferencian en el tiempo el comportamiento térmico del hormigón en relación a su conductividad térmica. Desde marzo-abril hasta septiembre-octubre la temperatura media en la sección crece con los valores crecientes de la conductividad, mientras que desde septiembre-octubre a marzo-abril a valores crecientes de la conductividad corresponden temperaturas decrecientes en el hormigón; por otra parte, la temperatura alcanzada en la sección en las épocas que definen los extremos de estos intervalos es muy poco sensible al valor adoptado para la conductividad. Análogamente, este hecho sucede para la sección de 20 m de espesor, en la cual las épocas frontera de los referidos períodos se trasladan a junio-julio y a diciembre-enero, fruto de la mayor inercia térmica asociada al espesor de 20 m.

Este comportamiento indica que la conductividad del hormigón se relaciona directamente con las ganancias y pérdidas de calor que experimenta la presa, provocando el aumento de la conductividad un aumento del calor que absorbe la presa, y a la vez,

un aumento del calor que ésta cede, con lo cual, en suma, se favorecen los intercambios de calor entre la presa y el ambiente en donde está ubicada.

Respecto al incremento del rango anual de la temperatura en la sección al aumentar la conductividad térmica del hormigón, éste se presenta en los distintos espesores analizados (5, 10, 15 y 20 m) si bien, desde un punto de vista cuantitativo este incremento se ve influenciado por el propio espesor de la sección. Así, en la tabla 3.3 se muestran los rangos anuales de la temperatura, expresados éstos en °C, obtenidos en cuatro espesores correspondientes a las secciones tipo analizadas; en esta tabla se pone de manifiesto que, para una conductividad dada, el rango anual de la temperatura en la sección disminuye con el espesor lo que apunta hacia el espesor de la sección como un parámetro principal en relación a su influencia en el rango anual de la temperatura que se alcanza en la sección.

| Conductividad<br>( $w/m^{\circ}C$ ) | Espesor (m) |       |      |      |
|-------------------------------------|-------------|-------|------|------|
|                                     | 5           | 10    | 15   | 20   |
| 1,5                                 | 14,45       | 6,44  | 4,20 | 3,17 |
| 2,5                                 | 16,78       | 8,86  | 5,42 | 4,06 |
| 3,5                                 | 17,82       | 10,90 | 6,54 | 4,77 |

*Tabla 3.3. Rango anual de la temperatura (°C) en función de la conductividad térmica, según distintos espesores.*

En relación a las temperaturas medias mensuales, su rango de variación, en cada mes, en función de la conductividad térmica del hormigón depende asimismo del espesor de la sección considerada pudiéndose acotar esta variación en un orden de magnitud de  $\pm 3^{\circ}C$  para espesores de 5 m y de  $\pm 1^{\circ}C$  para espesores de 20 m.

La conductividad térmica del hormigón influye también en la distribución de la temperatura a lo largo del espesor, particularmente en las zonas no próximas a los paramentos de la presa; en las figuras 3.2 y 3.3 se presentan, respectivamente, las distribuciones de temperaturas en dos secciones de 5 m y de 20 m de espesor obtenidas en los meses para los cuales se alcanzan las temperaturas anuales extremas en cada sección. En éstas se pone de manifiesto que para los meses fríos (meses de mínima temperatura anual) la temperatura alcanzada por el hormigón en la sección varía inversamente a los valores crecientes de la conductividad y para los meses calientes (meses de máxima temperatura anual) a valores crecientes de la conductividad corresponden valores crecientes de la temperatura.

Asimismo, las mencionadas figuras muestran, a su vez, que este comportamiento térmico tiene diferente repercusión según sea el espesor de la sección considerada; para la sección de 5 m de espesor este efecto se muestra claramente en una amplia zona del espesor mientras que en la sección de 20 m existe una zona central en la cual las

temperaturas alcanzadas por el hormigón son muy poco dependientes del valor adoptado para la conductividad térmica, hecho éste que pone de manifiesto que la sensibilidad térmica de la presa se ve afectada, en gran medida, por el espesor de la sección.

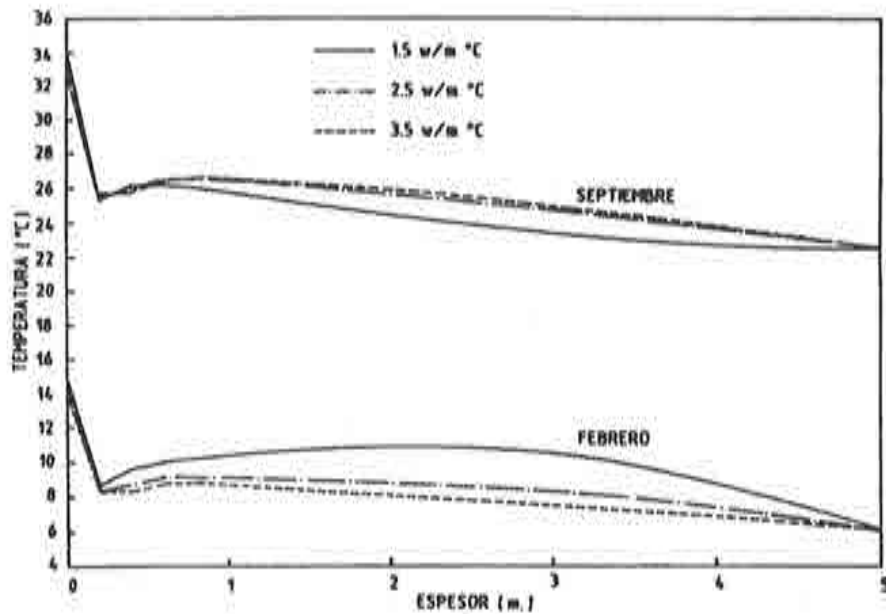


Fig. 3.2. Distribución de la temperatura a nivel sección en función de la conductividad térmica del hormigón ( $e=5,0$  m).

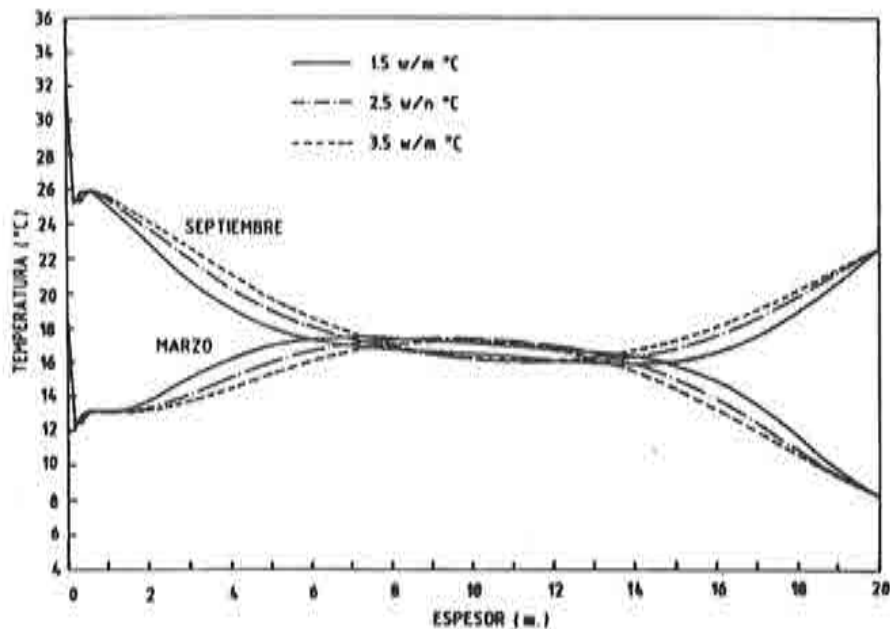


Fig. 3.3. Distribución de la temperatura a nivel sección en función de la conductividad térmica del hormigón ( $e=20,0$  m).

Las distribuciones de la temperatura a nivel sección que se han presentado en este apartado y las que se presentarán seguidamente en otros apartados, se obtienen a través de una interpolación lineal entre las temperaturas obtenidas en los nodos de la malla de discretización. Estas temperaturas son fruto de unas condiciones de contorno de flujo prescrito en el paramento de aguas abajo (origen de espesores) y de una condición de temperatura prescrita sobre el paramento de aguas arriba.

### 3.3.2. Calor específico

El calor específico es otra de las magnitudes que caracteriza térmicamente al hormigón en lo que hace referencia a la conducción del calor en el interior de la presa. Esta propiedad se ve poco influenciada por el carácter mineralógico del árido, siendo el grado de saturación uno de los factores que afectan en mayor medida su valor.

Dependiendo de su composición y, en gran medida, del grado de saturación, el calor específico del hormigón puede variar en un intervalo definido por los valores de 875 J/Kg°C y de 1100 J/Kg°C. Los hormigones secos o con un grado de saturación pequeño (0-20 %) se situarán próximos al extremo inferior y para hormigones saturados o con un alto grado de saturación (80-100 %) su calor específico será próximo al calor adoptado como extremo superior.

La influencia del calor específico en la respuesta térmica de la presa en explotación se ha analizado adoptando junto a los valores extremos de esta propiedad anteriormente señalados un valor medio de 980 J/Kg°C definido entre ambos valores. No obstante, es previsible esperar en el hormigón de la presa un alto grado de saturación, lo cual conduce a que la posible variación de su calor específico se sitúe más propiamente en el intervalo definido por 980 J/Kg°C y 1100 J/Kg°C como valores extremos.

En la figura 3.4 se visualizan los resultados obtenidos en términos de evolución anual de la temperatura media en la sección, en función de los valores considerados para el calor específico y en dos secciones de 5 m y 20 m de espesor.

Análogamente a lo que sucede para la conductividad térmica, las curvas que definen la evolución anual de la temperatura media (figura 3.4) para la sección de 5 m de espesor muestran la existencia de dos periodos distintos en el año que diferencian en el tiempo el comportamiento térmico de la sección según el calor específico del hormigón. Así, en el periodo comprendido entre marzo-abril y septiembre-octubre, la temperatura varía inversamente con los valores crecientes del calor específico, mientras que de septiembre-octubre a marzo-abril la temperatura aumenta cuando aumenta el calor específico; para la sección de 20 m de espesor los meses frontera que diferencian el comportamiento térmico referido se sitúan en junio-julio y diciembre-enero, siendo imputable este desplazamiento de los meses frontera en el tiempo a la mayor inercia térmica que presenta la sección de 20 m de espesor.

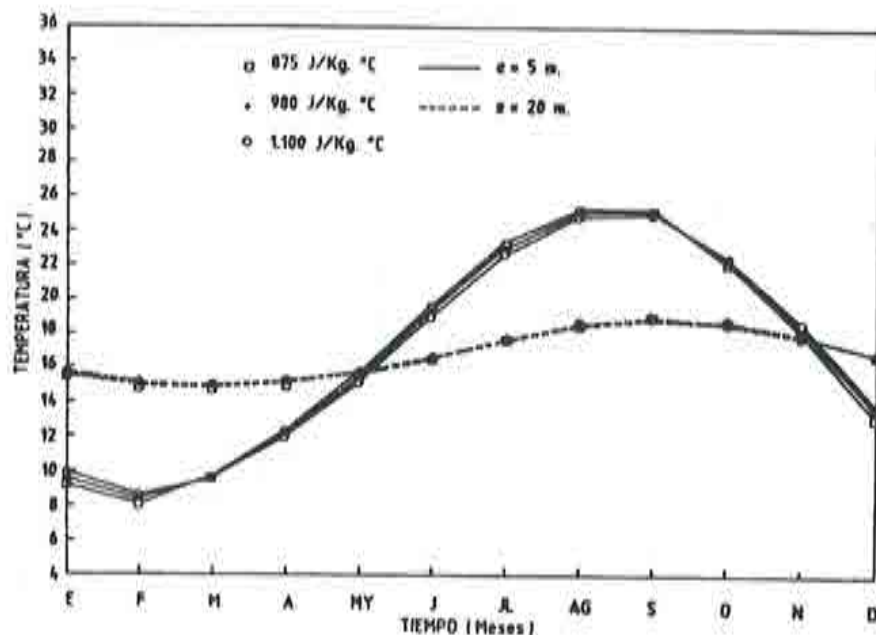


Fig. 3.4. Evolución anual de la temperatura media en función del calor específico del hormigón.

Los resultados obtenidos indican que el calor específico no afecta prácticamente a la temperatura media anual en la sección, pero sí influye en el rango anual alcanzado por la temperatura en el sentido de que el aumento del calor específico disminuye el rango anual de la temperatura media en la sección; esta disminución en el rango anual a medida que aumenta el calor específico se manifiesta en una reducción de las temperaturas máximas anuales y en un aumento de las temperaturas mínimas anuales. En la tabla 3.4 se presentan los rangos anuales de la temperatura media, expresados en °C, obtenidos según los valores adoptados para el calor específico del hormigón y para cuatro secciones tipo correspondientes a espesores de 5, 10, 15 y 20 m.

| Calor Específico<br>(J/Kg°C) | Espesor (m) |      |      |      |
|------------------------------|-------------|------|------|------|
|                              | 5           | 10   | 15   | 20   |
| 875                          | 17,27       | 9,66 | 5,83 | 4,34 |
| 980                          | 16,84       | 8,97 | 5,48 | 4,10 |
| 1100                         | 16,45       | 8,32 | 5,15 | 3,90 |

Tabla 3.4. Rango anual de la temperatura (°C) en función del calor específico, según distintos espesores.

Los valores indicados en la tabla referenciada muestran cuantitativamente la influencia del calor específico del hormigón en el rango anual de la temperatura para los distintos espesores considerados. Asimismo, ponen de manifiesto que para un calor

específico dado, el rango anual que alcanza la temperatura media en la sección es función de su propio espesor, disminuyendo este rango a medida que aumenta el espesor.

En relación a las temperaturas medias mensuales, su rango de variación en función del calor específico del hormigón depende también del espesor de la sección considerada pudiéndose acotar esta variación en un orden de magnitud de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  para espesores de 5 m y de  $\pm 0,30^{\circ}\text{C}$  para espesores de 20 m.

La distribución de la temperatura a lo largo del espesor se ve también afectada por el calor específico del hormigón, tal y como se muestra en las figuras 3.5 y 3.6, en las cuales se presentan, respectivamente, las distribuciones de la temperatura en dos secciones de 5 m y de 20 m de espesor, obtenidas en los meses en los cuales se alcanzan en cada sección las temperaturas medias extremas anuales; éstas ponen de manifiesto que la influencia del calor específico en la distribución de la temperatura en la sección es pequeña en ambos casos.

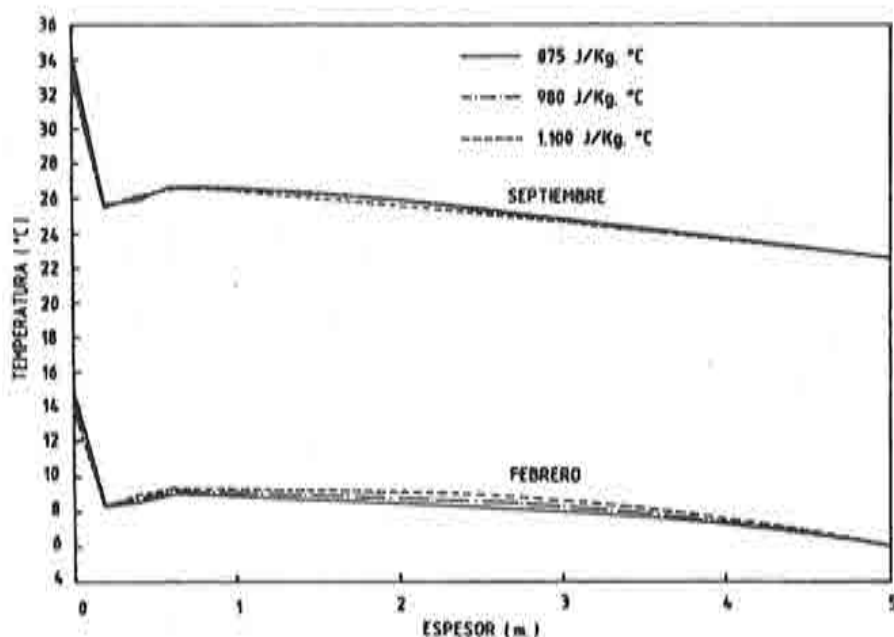


Fig. 3.5. Distribución de la temperatura a nivel sección en función del calor específico del hormigón ( $e=5,0$  m).

Ya se ha comentado anteriormente que es previsible esperar en el hormigón de la presa un importante grado de saturación y, en consecuencia, que su calor específico se aleje bastante del valor de 875 J/Kg°C representativo de un hormigón seco y se aproxime o se mueva en un entorno próximo al valor de 1100 J/Kg°C que corresponde a un hormigón totalmente saturado. Los resultados obtenidos en relación a la influencia del calor específico en el comportamiento térmico de la presa en explotación para valores de esta propiedad comprendidos entre 980 J/Kg°C y 1100 J/Kg°C, valores que pueden estimarse como representativos del hormigón de la presa, ponen de manifiesto la pequeña influencia que tiene este parámetro térmico tanto en lo relativo a las temperaturas medias

mensuales y al rango anual de la temperatura media como a nivel de la distribución de temperaturas alcanzadas en la sección,

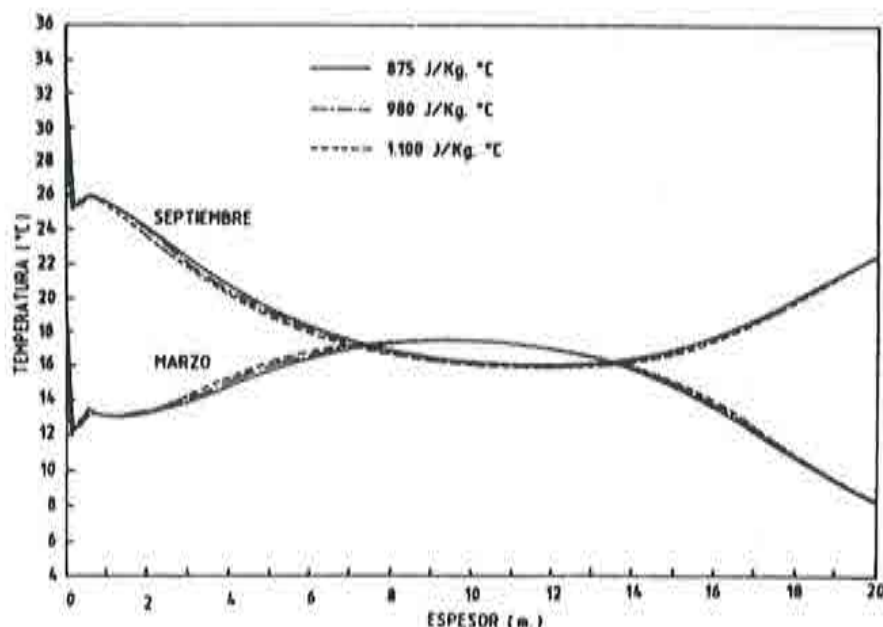


Fig. 3.6. Distribución de la temperatura a nivel sección en función del calor específico del hormigón ( $e=20,0$  m).

### 3.3.3. Emisividad térmica

Esta propiedad regula los cambios de temperatura experimentados en los paramentos exteriores de la presa originados por la existencia de transferencia de calor por radiación térmica de onda larga, dependiendo su valor en gran medida de la longitud de onda.

La emisividad de una superficie de hormigón presenta un rango de variación relativamente pequeño, pudiéndose adoptar como representativo de la posible variación de esta magnitud térmica el definido por los valores extremos de 0,79 y 0,96. El estudio de la influencia que tiene este parámetro en la respuesta térmica de la presa en explotación se ha realizado adoptando, junto a los valores extremos ya citados, un valor medio de 0,88.

Los resultados obtenidos en relación a la variación de la emisividad térmica del hormigón, indican en conjunto la escasa significación que suponen estas variaciones en la respuesta térmica de la presa, tanto en lo que se refiere a la evolución anual de la temperatura media, como en lo que concierne a la distribución de la temperatura a lo largo del espesor de la sección, incluso en horas nocturnas (23<sup>00</sup> h).

Respecto a la temperatura media anual, los resultados muestran cualitativamente una ligera disminución de esta temperatura a medida que aumenta la emisividad, si bien la mencionada disminución no presenta, cuantitativamente, significación alguna (del orden

de centésimas de grado); análogamente, el rango anual de la temperatura media tampoco se ve afectado por la variación de la emisividad térmica del hormigón.

En relación a las temperaturas medias alcanzadas en cada mes, los resultados indican (figura 3.7), asimismo, una ligera variación de la temperatura media en el sentido de que estas temperaturas disminuyen con los valores crecientes de la emisividad; no obstante, las diferencias máximas de temperatura en un mismo mes obtenidas en función de los valores extremos adoptados para la emisividad son del orden de décimas de grado.

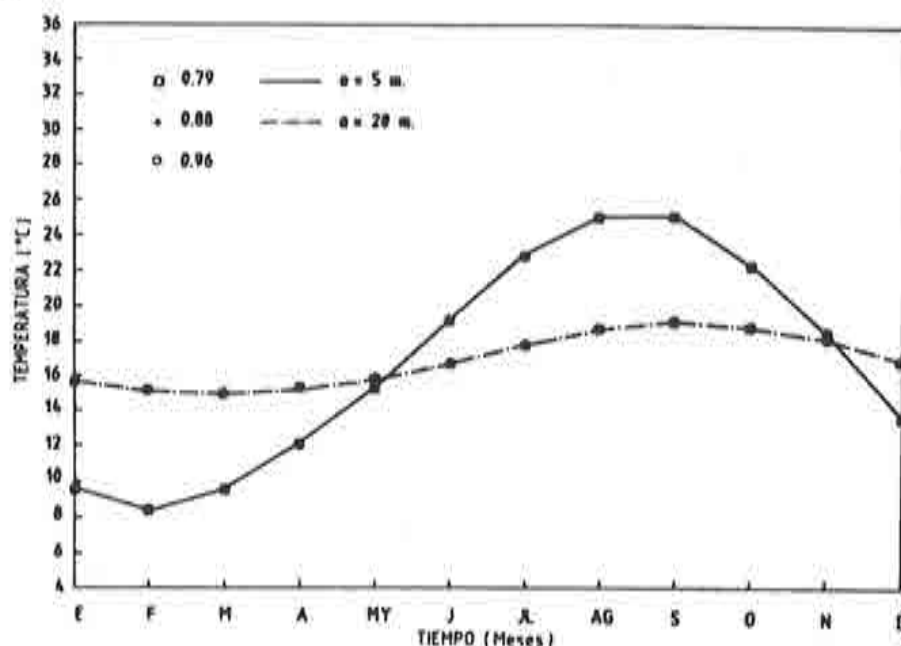


Fig. 3.7. Evolución anual de la temperatura media en función de la emisividad térmica del hormigón.

En la figura 3.7 reseñada anteriormente, se muestra la evolución anual de la temperatura media en dos secciones de 5 m y 20 m de espesor según los distintos valores adoptados para la emisividad; esta figura permite visualizar los aspectos anteriormente reseñados en relación a la poca influencia que presenta esta propiedad térmica en la evolución de la temperatura media de la sección.

Por otra parte, la distribución de la temperatura a nivel sección tampoco se ve sensiblemente afectada por la emisividad del hormigón. Así, en las figuras 3.8 y 3.9 se muestran, respectivamente, de forma gráfica los resultados obtenidos para dos secciones de 5 m y 20 m de espesor en función de las emisividades adoptadas, para los meses en los cuales se alcanzan, en cada sección, las temperaturas anuales extremas; estas gráficas ponen de manifiesto la escasa repercusión que tiene, a nivel de distribución de temperatura en la sección, las variaciones de la emisividad del hormigón.

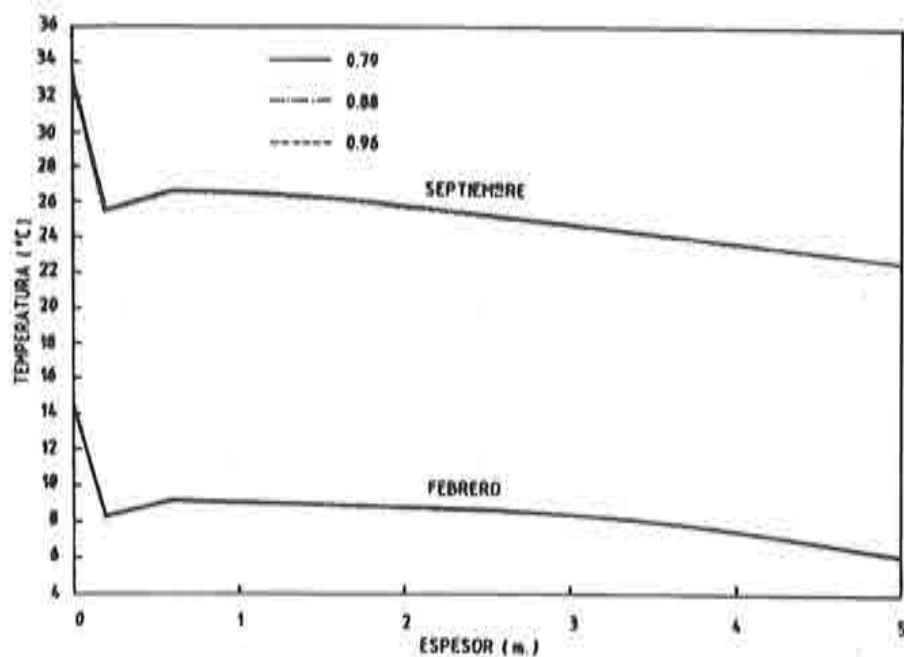


Fig. 3.8. Distribución de la temperatura a nivel sección en función de la emisividad térmica del hormigón ( $e=5,0$  m).

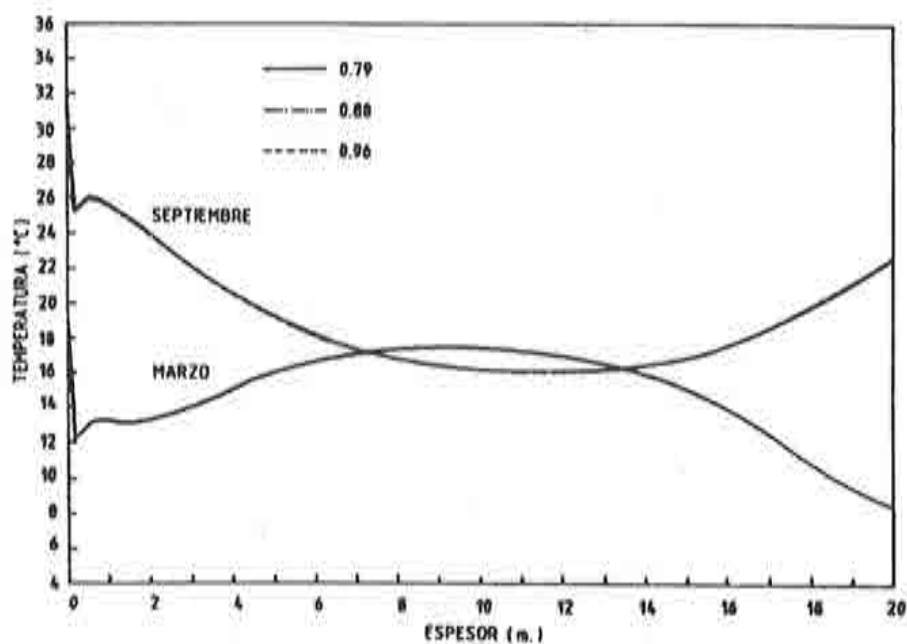


Fig. 3.9. Distribución de la temperatura a nivel sección en función de la emisividad térmica del hormigón ( $e=20,0$  m).

### 3.3.4. Coeficiente de absorción

El coeficiente de absorción solar tiene un papel relevante de cara a la cantidad de

calor que puede absorber la presa debido a la radiación solar incidente en las superficies de la misma expuestas a dicha radiación. Esta propiedad presenta en el hormigón un cierto rango de variación dependiendo, principalmente, del tipo de cemento y del tipo de árido, de la edad del hormigón y del estado y color de la superficie.

El estudio de la influencia que tiene el factor de absorción solar en la respuesta térmica de la presa en explotación se ha realizado adoptando para el mismo los valores de 0,3, 0,5 y 0,7, valores éstos que representan la posible variación de esta magnitud térmica según distintos estados superficiales del hormigón.

Los resultados obtenidos relativos a la evolución anual de la temperatura media (figura 3.10) ponen de manifiesto que el coeficiente de absorción del hormigón afecta tanto a la temperatura en la sección como a la temperatura que se alcanza en el paramento de aguas abajo expuesto directamente a la acción de la radiación solar. Esta influencia se manifiesta en el sentido de que cuando aumenta la absorción también lo hace la temperatura media en el hormigón. Cuantitativamente, este efecto se produce en mayor medida en las temperaturas alcanzadas en el paramento de la presa, tal y como muestran los valores expuestos en la tabla 3.5; asimismo, en la citada tabla, se presentan los rangos anuales de la temperatura en el paramento de aguas abajo y de la temperatura media en la sección.

| Coeficiente de absorción | Temperatura Media (°C) |         | Rango Anual (°C) |         |
|--------------------------|------------------------|---------|------------------|---------|
|                          | Paramento              | Sección | Paramento        | Sección |
| 0,30                     | 20,48                  | 15,98   | 22,97            | 16,44   |
| 0,50                     | 24,21                  | 16,85   | 24,40            | 16,77   |
| 0,70                     | 27,85                  | 17,71   | 26,44            | 17,10   |

*Tabla 3.5. Temperatura media anual y rango anual de la temperatura media en función del coeficiente de absorción del hormigón (e=5,0 m).*

En la figura 3.10 anteriormente referenciada se presenta la evolución anual de la temperatura media en el paramento de aguas abajo y en la sección, obtenida en función de los distintos valores adoptados para la absorción térmica del hormigón, para una sección de 5 m de espesor; esta figura permite visualizar la influencia del coeficiente de absorción en las temperaturas medias mensuales, poniendo de manifiesto que los incrementos térmicos mensuales debidos al aumento de absorción se distribuyen en forma bastante homogénea para las temperaturas medias en la sección, mientras que en el paramento éstos incrementos están notablemente influenciados por la magnitud de la radiación solar incidente sobre el mismo.

En relación a los valores del rango anual que se recogen en la tabla 3.5 expuesta anteriormente, éstos indican que la absorción afecta, principalmente, al rango anual de la temperatura media en el paramento de aguas abajo en el sentido de que el rango

aumenta cuando lo hace la absorción; este incremento del rango anual se origina por un crecimiento simultáneo de las temperaturas mínimas y de las temperaturas máximas anuales, siendo los aumentos que experimentan las temperaturas máximas de magnitud superior a los experimentados por las mínimas, hecho este directamente relacionado con la distinta intensidad en la radiación solar incidente en los meses en los cuales se alcanzan los extremos anuales de la temperatura en la presa.

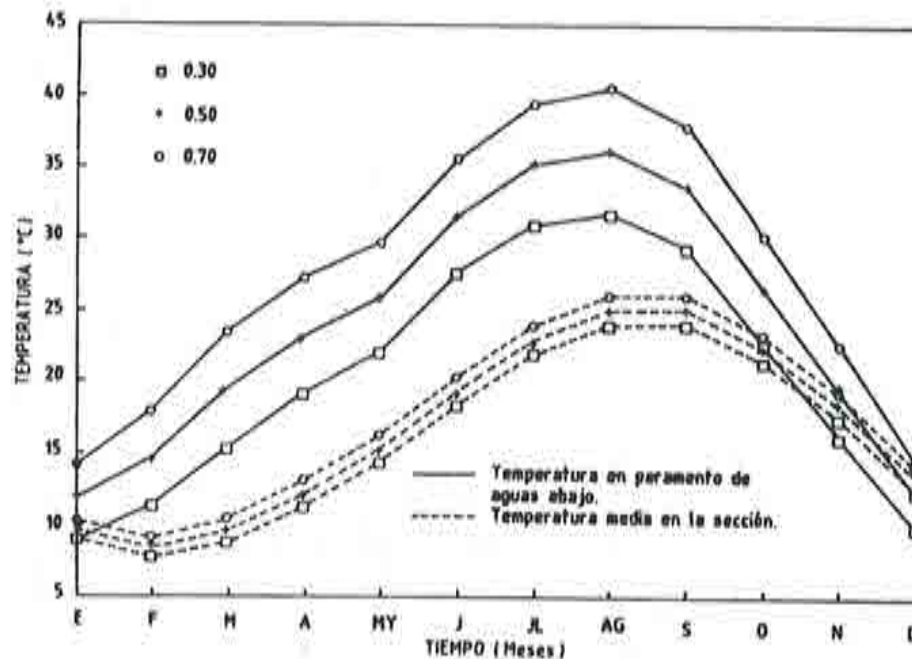


Fig. 3.10. Evolución anual de la temperatura media en la sección y en el paramento de aguas abajo en función de la absortividad del hormigón ( $e=5,0$  m).

El coeficiente de absorción térmica del hormigón afecta también a la distribución de la temperatura a lo largo del espesor (figuras 3.11 y 3.12); su influencia se manifiesta prácticamente en todo el espesor de la sección, a excepción de las zonas próximas al paramento mojado de aguas arriba las cuales se ven influenciadas, primordialmente, por la temperatura del agua embalsada. Esta influencia se traduce en un aumento de la temperatura en los distintos puntos del espesor a medida que aumenta la absorción; en términos cuantitativos, el mayor incremento de temperatura a nivel sección se presenta en el propio paramento de la presa sometida a la radiación solar y, en consecuencia, son éstas superficies las mas afectadas por las variaciones en el coeficiente absorción del hormigón.

Las figuras 3.11 y 3.12 anteriormente referenciadas muestran, respectivamente, la distribución de temperatura en dos secciones de 5 m y de 20 m de espesor, en función de el coeficiente de absorción del hormigón, obtenidas en los meses del año en los cuales se alcanzan, en cada sección, las temperaturas medias extremas; éstas ilustran, a nivel sección, el comportamiento térmico anteriormente expuesto en relación a la absortividad del hormigón.

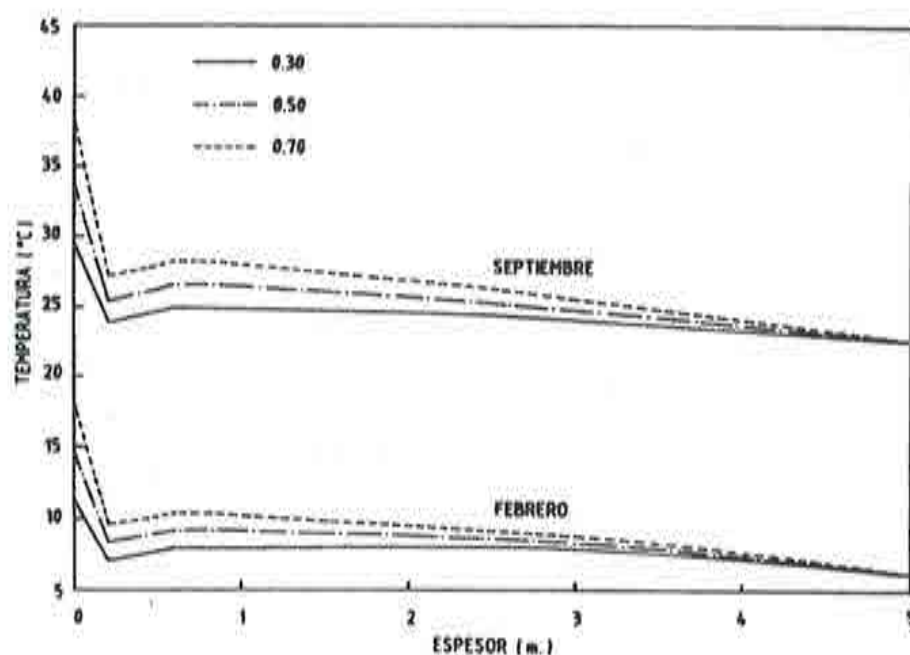


Fig. 3.11. Distribución de la temperatura a nivel sección en función del coeficiente de absorción térmica del hormigón ( $e=5,0$  m).

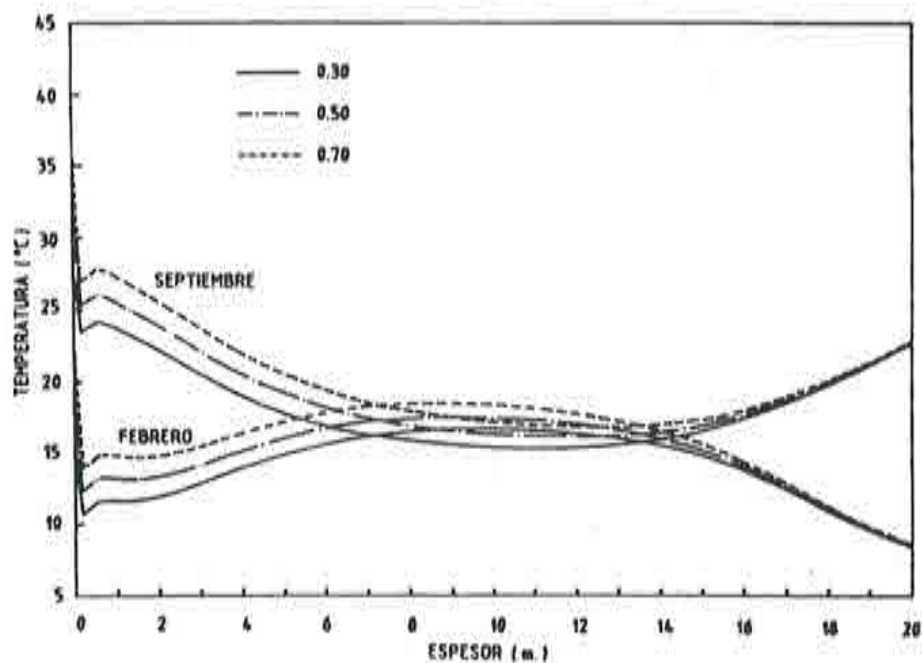


Fig. 3.12. Distribución de la temperatura a nivel sección en función del coeficiente de absorción térmica del hormigón ( $e=20,0$  m).

Finalmente, es conveniente matizar que si bien el estudio relativo a la influencia del coeficiente de absorción se ha realizado para un amplio rango de valores (0,30-0,70) a

fin de analizar la influencia de esta propiedad como tal, el coeficiente de absorción de un hormigón convencional utilizado en la construcción de presas se sitúa entre los valores de 0,5 y 0,7. Este hecho, conduce, junto a los resultados obtenidos, a que la influencia de esta propiedad en la respuesta térmica de la presa sea, primordialmente, sobre el comportamiento térmico del paramento en el que incide la radiación solar.

### 3.4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS RELATIVOS A LOS PARAMETROS QUE CARACTERIZAN A LA GEOMETRIA Y AL EMPLAZAMIENTO

#### 3.4.1. Espesor

Esta variable caracteriza, para una sección transversal dada (perpendicular al eje de presa), la geometría de las secciones a distinta cota en las cuales se plantea el análisis, en relación, fundamentalmente, a la conducción del calor en el seno de la presa.

La influencia que presenta el espesor en la respuesta térmica de la presa en explotación se ha analizado adoptando para el mismo la secuencia de valores dada por 5, 10, 15, 20, 30 y 50 m, en la cual se recogen posibles espesores de secciones transversales que respondan a diferentes tipologías de presas de hormigón.

En la figura 3.13 se visualizan los resultados relativos a las temperaturas medias en la sección obtenidos en función de los distintos espesores adoptados; estos resultados indican, que si bien el espesor no tiene prácticamente incidencia en la temperatura media anual del hormigón, sí la tiene en la distribución anual de las temperaturas medias.

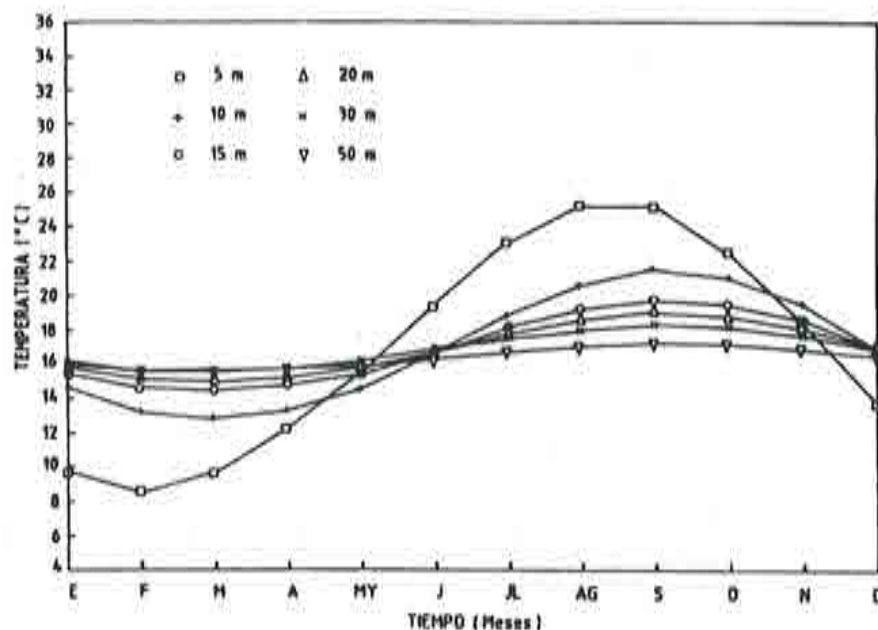


Fig. 3.13. Evolución de la temperatura media en función del espesor de la sección.

Así, a medida que aumenta el espesor de la sección disminuye el rango anual de la temperatura en el hormigón, manteniéndose a su vez prácticamente constante la temperatura media anual; este comportamiento se traduce en una tendencia de la distribución anual de temperaturas hacia la temperatura media anual en la sección ( $17^{\circ}\text{C}$  en las condiciones de referencia adoptadas), tendencia ésta tanto más acusada cuanto mayor es el espesor. Este hecho pone de manifiesto que la sensibilidad térmica de la presa frente a la acción térmica ambiental está directamente relacionada con el espesor en el sentido de que para grandes espesores la presa es térmicamente poco sensible a la acción térmica exterior que incide en ella, teniendo esta acción mayor repercusión cuanto menor es el espesor.

Por otra parte, las distribuciones anuales de la temperatura en la sección presentadas anteriormente, muestran que para el espesor de 5 m, las temperaturas extremas del periodo anual se obtienen en los meses de febrero y agosto-septiembre, mientras que para los espesores superiores a éste se produce un desplazamiento en el tiempo de las temperaturas extremas alcanzándose éstas en los meses de marzo y septiembre. Ello indica que el espesor de la sección, para una misma acción térmica ambiental, afecta también a la época del año en la que la presa alcanza sus temperaturas extremas lo cual es un indicativo de que la inercia térmica de la presa está vinculada, en gran medida, al espesor de la sección; este hecho se corrobora por el desfase existente, próximo a los dos meses, entre los valores extremos de la temperatura alcanzados en la presa para un espesor de 5 m y los correspondientes a otro de 50 m.

En relación a la influencia del espesor en el rango anual de la temperatura media en la sección, la figura 3.14 muestra la variación del rango anual de la temperatura en función del espesor obtenida para las condiciones de referencia adoptadas. El comportamiento que recoge esta figura pone de manifiesto un decrecimiento exponencial del rango para espesores comprendidos entre 5 y 20 m, mientras que para espesores superiores la disminución del rango es más sostenida, apuntando hacia un valor cuasi constante.

Por otro lado, las variaciones que experimentan las temperaturas medias mensuales en la sección frente a un incremento del espesor son función del propio espesor. Así, en la figura 3.15 se presentan las variaciones experimentadas por las temperaturas medias mensuales en función de diferentes incrementos de espesor, en la cual se designa genéricamente por  $\Delta T_{ij} = T_j - T_i$  al incremento de temperatura experimentado en la sección al pasar de un espesor  $i$  ( $i = 5, 10, 15, 20$  m) a un espesor  $j$  ( $j = 10, 15, 20, 30$  m).

Los resultados expuestos en la figura 3.15 muestran que las variaciones de temperatura más acentuadas se presentan al pasar de un espesor de 5 m a otro de 10 m (curva  $\Delta T_{5,10}$ ), mientras que estas variaciones son pequeñas cuando se pasa de un espesor de 20 m a otro de 30 m (curva  $\Delta T_{20,30}$ ). Este hecho pone nuevamente de manifiesto que la sensibilidad térmica de la presa está estrechamente vinculada al espesor en el sentido anteriormente indicado de que cuanto mayor sea éste más amortiguada es la respuesta térmica de la presa.

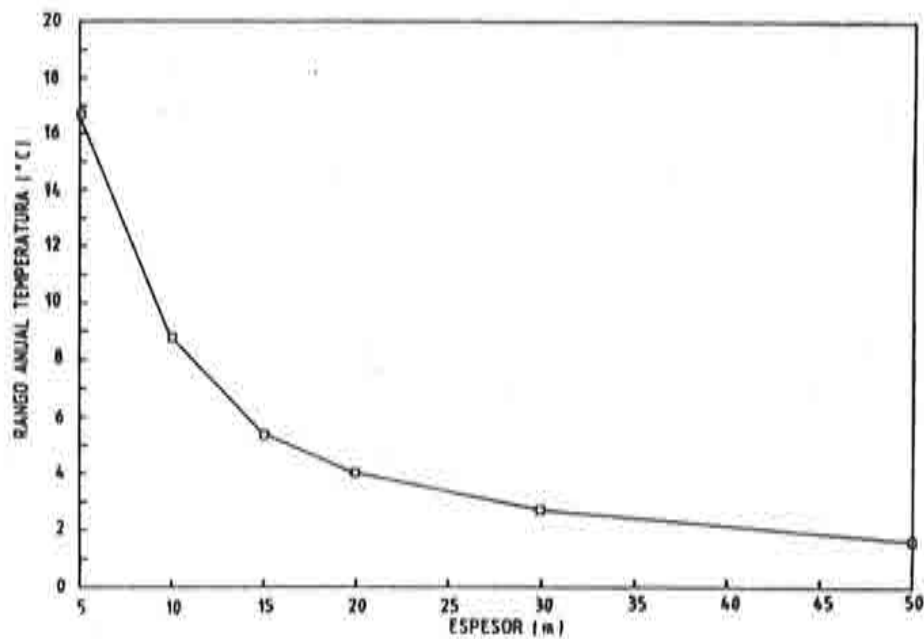


Fig. 3.14. Rango anual de la temperatura media en función del espesor de la sección.

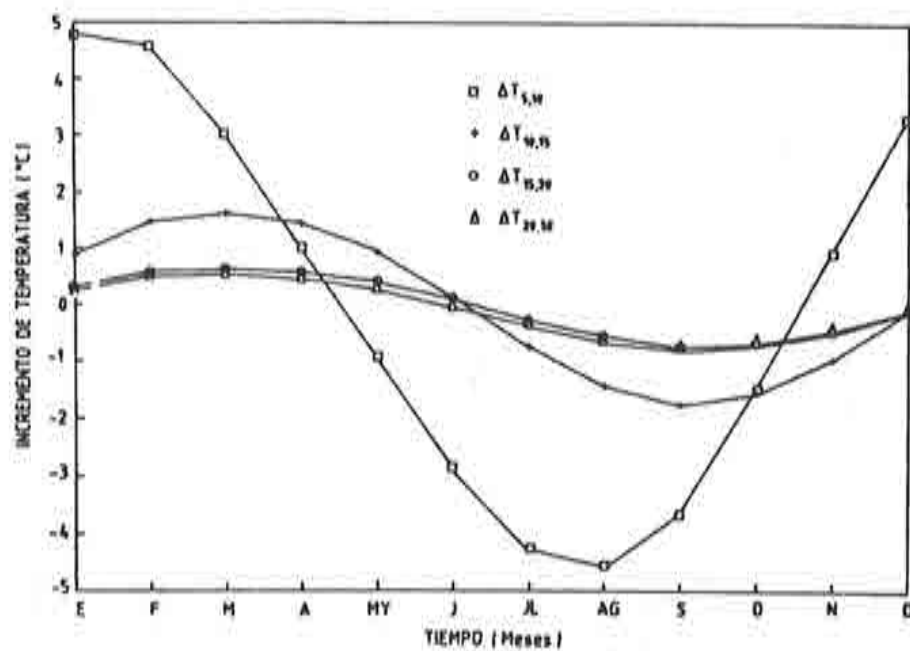


Fig. 3.15. Incremento de la temperatura media en la sección en función de los incrementos de espesor.

Asimismo, respecto a la respuesta térmica a nivel sección, en la figura 3.16 se visualizan las distribuciones de temperatura en cinco secciones de distinto espesor frente a una misma acción térmica definida por las condiciones de referencia, obtenidas en el

mes de septiembre en el cual se alcanza, ante la citada acción de referencia, la máxima temperatura media del periodo anual.

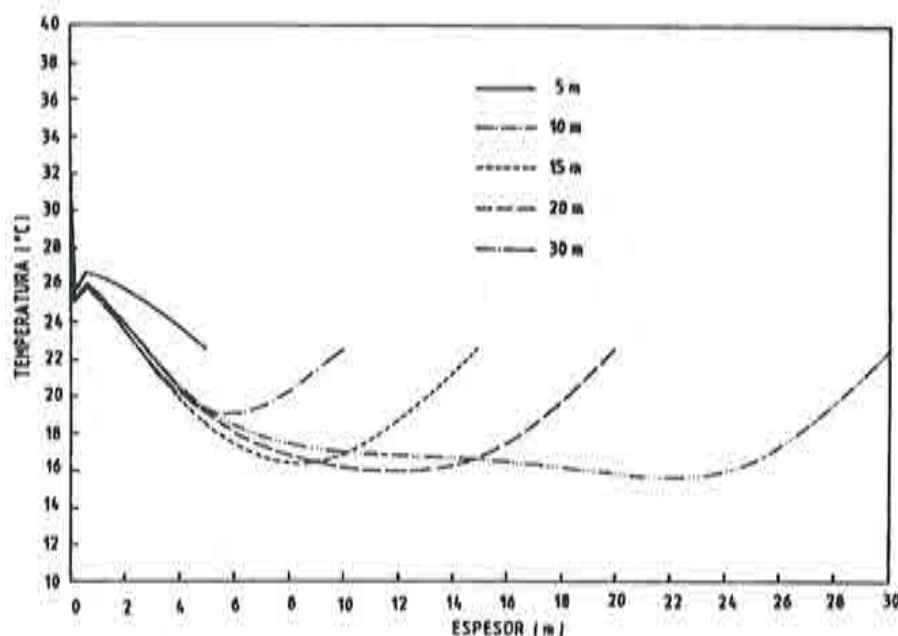


Fig. 3.16.- Distribución de temperaturas en la sección en función de su espesor.

Esta figura muestra la influencia relativa que tiene, en función del espesor, las condiciones térmicas en paramentos sobre el comportamiento térmico de la sección. Así, a medida que aumenta el espesor se desarrolla una meseta térmica en la zona central de la sección, siendo ésta tanto más acusada cuanto mayor es el espesor.

### 3.4.2. Inclinación del paramento de aguas abajo

Este parámetro define la geometría de la sección a la cota en la cual se plantea el análisis en lo que concierne al proceso de cálculo establecido para la estimación de la radiación solar incidente sobre el paramento de aguas abajo de la presa. La secuencia de valores adoptada para analizar la influencia de este parámetro es la dada por 45°, 60°, 75°, 90° y 105°, mediante la que se pretende representar, siguiendo el modelo propuesto, posibles variaciones de la inclinación del paramento con la altura de la presa, pudiéndose ajustar estas inclinaciones a las de distintos paramentos de presas bóveda y de gravedad.

Los resultados obtenidos en lo que concierne a las temperaturas medias indican (figura 3.17) que la inclinación del paramento aguas abajo tiene una mayor incidencia sobre las temperaturas que se alcanzan en este paramento en relación a las temperaturas medias que se obtienen en la sección, traduciéndose cualitativamente esta influencia, en ambos casos, por una disminución de la temperatura a medida que aumenta la inclinación.

En la figura 3.17 anteriormente referenciada se presentan las evoluciones anuales

de la temperatura media en el paramento y de la temperatura media en la sección ( $e=5$  m); en ésta, puede apreciarse que la variación máxima de la temperatura en el paramento en función de su inclinación se sitúa entorno de los  $5^{\circ}\text{C}$ , mientras que para la temperatura media en la sección esta variación térmica función de la inclinación del paramento están alrededor de  $1^{\circ}\text{C}$ . Por otra parte, la distribución anual de las variaciones de temperatura originadas al variar la inclinación no es uniforme a lo largo del periodo anual, correspondiendo los máximos incrementos al periodo estival, para ir disminuyendo hacia los incrementos mínimos, los cuales se presentan en invierno.

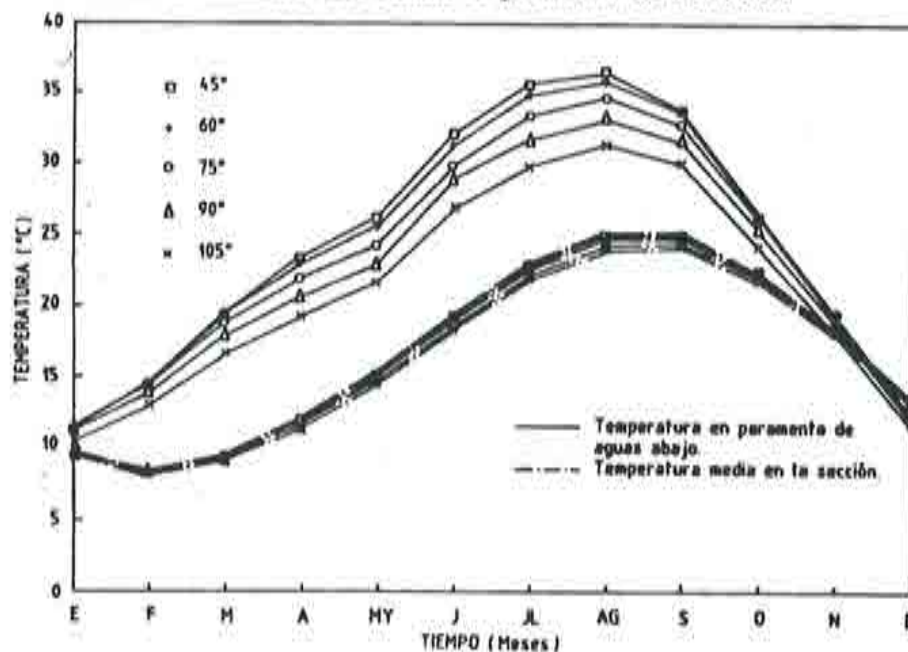


Fig. 3.17. Evolución anual de la temperatura en el paramento de aguas abajo y en la sección en función de la inclinación del paramento de aguas abajo ( $e=5,0$  m).

En la tabla 3.6 se recogen los resultados en cuanto a las temperaturas medias anuales y rangos anuales de temperatura obtenidos en el paramento de aguas abajo y en la sección, los cuales muestran cuantitativamente el comportamiento térmico expuesto relativo a las temperaturas medias; respecto al rango anual, la tabla mencionada pone asimismo de manifiesto que la inclinación del paramento afecta, fundamentalmente, al rango anual de la temperatura alcanzada en el mismo.

En relación a la distribución de temperaturas en la sección, la figura 3.18 muestra las distribuciones para un espesor de 5 m en función de la inclinación del paramento, obtenidas en los meses de agosto y enero en las cuales se alcanzan las temperaturas extremas en el paramento de aguas abajo. El comportamiento térmico a nivel sección que en ella se ilustra pone de manifiesto que la inclinación del paramento repercute en mayor medida en la temperatura que en él se alcanza, para ir disminuyendo su influencia a medida que nos alejamos del mencionado paramento, siendo esta repercusión más notable cuanto mayor es la temperatura alcanzada en el paramento de aguas abajo (mes

de agosto frente a mes de enero).

| Inclinación<br>(°) | Temperatura Media (°C) |         | Rango Anual (°C) |         |
|--------------------|------------------------|---------|------------------|---------|
|                    | Paramento              | Sección | Paramento        | Sección |
| 45                 | 24,31                  | 16,87   | 24,75            | 16,88   |
| 60                 | 24,01                  | 16,80   | 24,20            | 16,67   |
| 75                 | 23,36                  | 16,64   | 23,06            | 16,45   |
| 90                 | 22,42                  | 16,42   | 21,90            | 16,23   |
| 105                | 21,12                  | 16,14   | 20,83            | 16,05   |

Tabla 3.6. Temperatura media anual y rango de la temperatura media en función de la inclinación del paramento de aguas abajo ( $e=5,0$  m).

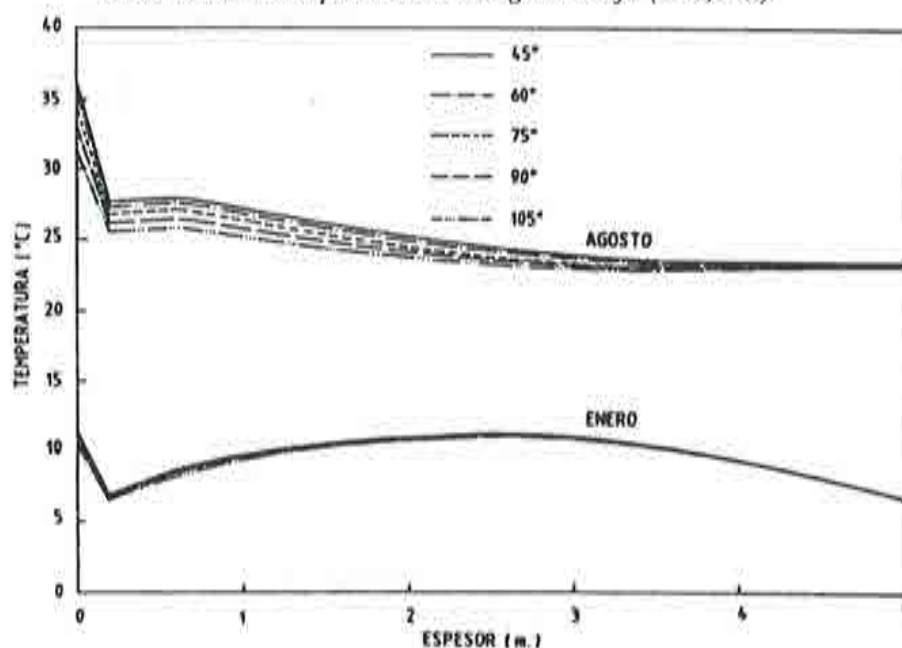


Fig. 3.18. Distribución de la temperatura a nivel sección ( $e=5,0$  m) en función de la inclinación del paramento de aguas abajo.

### 3.4.3. Acimut

En el modelo de análisis presentado, el acimut se contempla como el parámetro que define la orientación de la superficie sobre la cual incide radiación solar (paramento de aguas abajo). El estudio de la influencia que muestra este parámetro en la respuesta térmica de la presa en explotación se ha realizado adoptando para el mismo la secuencia de valores dada por  $-90^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ , valores éstos que cubren ampliamente las posibles orientaciones de la superficie considerada en relación al recorrido del sol en el emplazamiento de la presa desde su salida (orientación Este,  $-90^\circ$ ) a su puesta (orientación Oeste,  $90^\circ$ ).

La figura 3.19 muestra las evoluciones anuales de la temperatura media alcanzada en el paramento de aguas abajo juntamente con las temperaturas medias en la sección ( $e=5$  m), en función de los distintos valores adoptados para el acimut. Los resultados que se visualizan en la mencionada figura ponen de manifiesto la poca incidencia del acimut en la temperatura media de la sección en relación a la mayor incidencia que muestra este parámetro en las temperaturas medias alcanzadas en el paramento de aguas abajo de la presa.

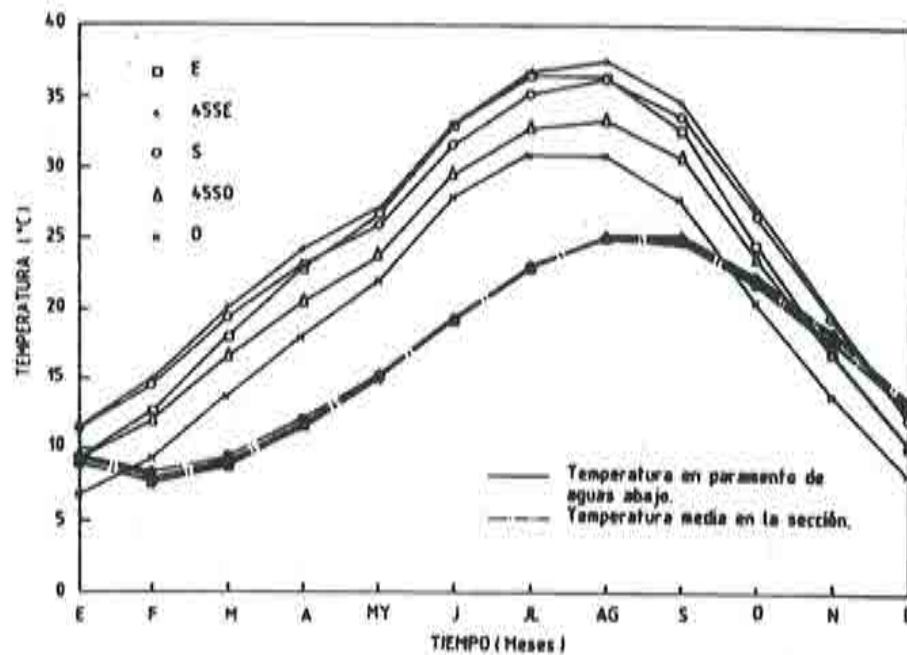


Fig. 3.19. Evolución anual de la temperatura en función del acimut ( $e=5,0$  m).

Respecto a la incidencia que presenta el acimut en las temperaturas medias anuales alcanzadas en la sección y en el rango anual de estas temperaturas, en la tabla 3.7 se exponen los resultados obtenidos para los distintos valores del acimut adoptados. Estos resultados muestran que el acimut incide, principalmente, en el comportamiento térmico

| Acimut<br>(°) | Temperatura Media (°C) |         | Rango Anual (°C) |         |
|---------------|------------------------|---------|------------------|---------|
|               | Paramento              | Sección | Paramento        | Sección |
| - 90          | 23,73                  | 16,46   | 27,09            | 17,39   |
| - 45          | 24,18                  | 16,85   | 24,76            | 16,77   |
| 0             | 24,93                  | 16,79   | 26,06            | 17,03   |
| 45            | 21,70                  | 16,68   | 24,10            | 16,98   |
| 90            | 19,15                  | 16,33   | 24,08            | 17,30   |

Tabla 3.7. Temperatura media anual y rango de la temperatura media en función del acimut ( $e=5,0$  m).

del paramento aguas abajo sometido a la acción de la radiación solar, siendo la orientación Sur por lo cual se obtienen mayores valores de la temperatura media y de su rango anual en relación a los valores obtenidos para las orientaciones extremas Sur-Este y Sur-Oeste.

En relación a la influencia que muestra el acimut a nivel de la distribución de temperaturas a lo largo del espesor, la figura 3.20 ilustra el comportamiento térmico en la sección ( $e=5$  m) en función de las distintas orientaciones consideradas; en ella se presenta la distribución de temperaturas alcanzadas en los meses de agosto y enero en los cuales, respectivamente, se obtienen las temperaturas extremas anuales en el paramento de aguas abajo. Esta figura pone de manifiesto que, a nivel sección, el efecto del acimut en las temperaturas se localiza, primordialmente, en el paramento de aguas abajo y en una zona próxima al mismo.

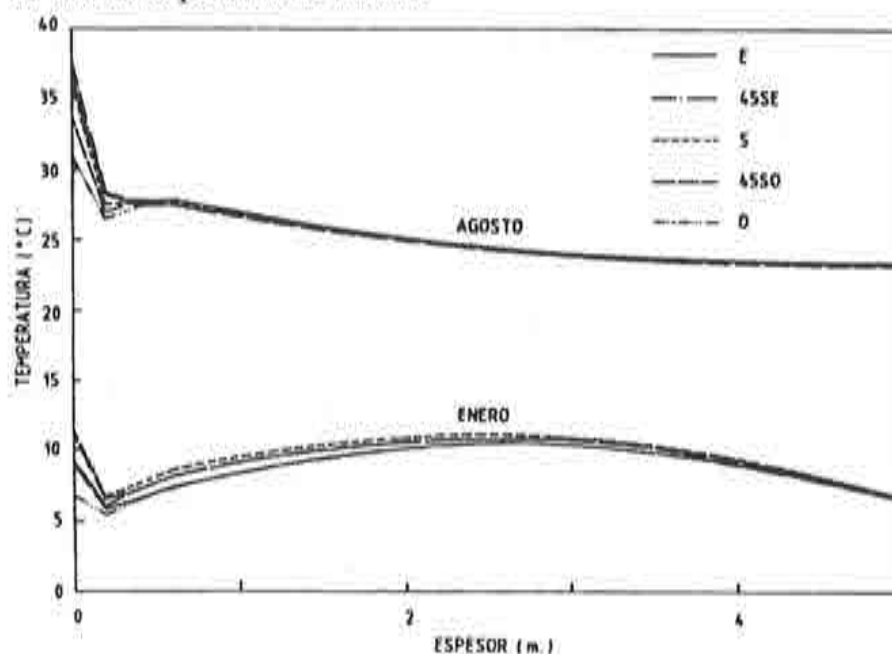


Fig. 3.20. Distribución de la temperatura a nivel sección ( $e=5,0$  m) en función del acimut.

### 3.5. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS RELATIVOS A LOS PARAMETROS QUE CARACTERIZAN A LA ACCION TERMICA AMBIENTAL

#### 3.5.1. Coeficiente de reflexión del entorno

Este coeficiente, de valor comprendido entre 0 y 1, interviene en la cuantificación de la componente de la radiación solar incidente en el paramento de aguas abajo debida a la radiación solar reflejada sobre la presa por el medio ambiente en el cual está inmersa.

La secuencia de valores adoptada para el estudio paramétrico relativos a la influencia del coeficiente de reflexión del entorno viene definida por los valores 0,1, 0,55 y 0,85; el valor inferior es el correspondiente al agua como medio que refleja la radiación solar, el extremo superior corresponde a nieve reciente mientras que el valor intermedio es el asociado a una superficie reflectante de hormigón. Otros valores del coeficiente de reflexión representativos de zonas con distintos tipos de vegetación están comprendidos dentro del rango adoptado para este coeficiente.

Los resultados obtenidos en relación al coeficiente de reflexión indican, tal como se ilustra en la figura 3.21, que su influencia se manifiesta, primordialmente, en las temperaturas medias alcanzadas en el paramento de aguas abajo de la presa, de modo que a medida que aumenta este coeficiente y, en consecuencia, la radiación solar total incidente, también lo hace la temperatura media que se alcanza en el mencionado paramento.

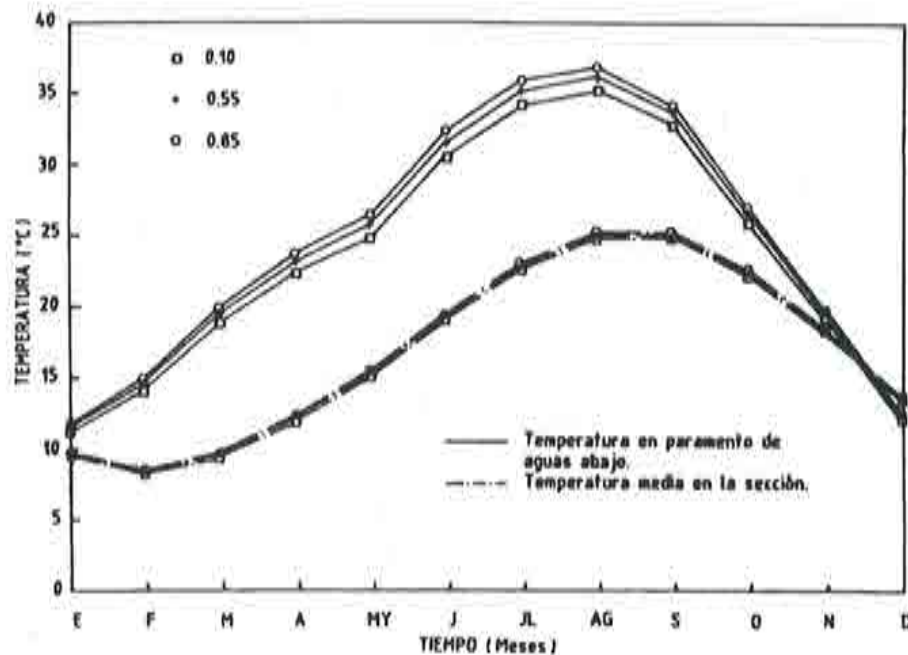


Fig. 3.21. Evolución anual de la temperatura en función del coeficiente de reflexión del entorno ( $e=5,0$  m).

Este comportamiento térmico también se presenta cualitativamente a nivel de las temperaturas medias mensuales en la sección, si bien desde un punto de vista cuantitativo el máximo incremento de la temperatura anual en el paramento es del orden de  $1,70^{\circ}\text{C}$  mientras que para la temperatura media en la sección es del orden de  $0,30^{\circ}\text{C}$ . En la tabla 3.8 se exponen los resultados obtenidos relativos a la temperatura media anual y al rango anual de la temperatura media.

| Coeficiente de reflexión | Temperatura Media (°C) |         | Rango Anual (°C) |         |
|--------------------------|------------------------|---------|------------------|---------|
|                          | Paramento              | Sección | Paramento        | Sección |
| 0,10                     | 23,50                  | 16,68   | 24,09            | 16,65   |
| 0,55                     | 24,18                  | 16,85   | 24,70            | 16,77   |
| 0,85                     | 24,64                  | 16,96   | 25,11            | 16,85   |

Tabla 3.8. Temperatura media anual y rango anual de la temperatura media en función del coeficiente de reflexión del entorno ( $e=5,0$  m).

Estos resultados muestran que la incidencia del coeficiente de reflexión del entorno es, fundamentalmente, de carácter local sobre la temperatura que se alcanza en el paramento de la presa, siendo de escasa significación en el rango anual de la temperatura media tanto en el paramento como en la sección.

Asimismo, la influencia que tiene el coeficiente de reflexión en la distribución de la temperatura según el espesor es pequeña, tal y como se muestra en la figura 3.22 en la cual se presentan las distribuciones de la temperatura en una sección de 5 m de espesor en función del coeficiente de reflexión, obtenidos en los meses de agosto y enero en los que se alcanzan las temperaturas extremas anuales en el paramento de aguas abajo de la presa.

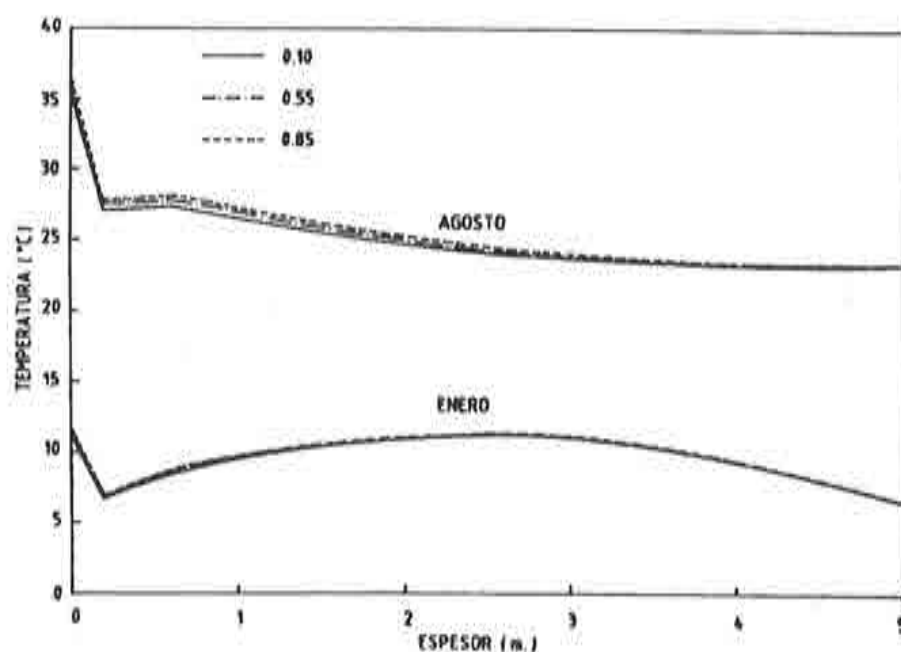


Fig. 3.22. Distribución de la temperatura a nivel sección ( $e=5,0$  m) en función del coeficiente de reflexión del entorno.

### 3.5.2. Velocidad del viento

La estimación del coeficiente de transferencia de calor por convección se realiza en el modelo presentado a través de la velocidad del viento en el emplazamiento de la presa, lo cual permite analizar la incidencia que tiene esta variable climatológica en la respuesta térmica de la presa en explotación. Para ello, se han adoptado para la citada velocidad, en media anual, los valores de 5 Km/h, 15 Km/h y 25 Km/h.

En la tabla 3.9 se recogen los resultados obtenidos en relación a las temperaturas medias anuales en la sección y en el paramento de aguas abajo en el cual se impone la condición de flujo por convección, así como los rangos anuales de las mencionadas temperaturas. Los valores compendiados en esta tabla ponen de manifiesto que la velocidad del viento incide tanto a nivel de las temperaturas que se alcanzan en el paramento como a nivel de la temperatura media en la sección mostrándose esta influencia, cualitativamente, en el sentido de que estas temperaturas disminuyen cuando aumenta la velocidad del viento en el emplazamiento de la presa.

| Velocidad del viento (km/h) | Temperatura Media (°C) |         | Rango Anual (°C) |         |
|-----------------------------|------------------------|---------|------------------|---------|
|                             | Paramento              | Sección | Paramento        | Sección |
| 5                           | 26,61                  | 18,28   | 25,65            | 17,16   |
| 15                          | 24,18                  | 16,85   | 24,70            | 16,77   |
| 25                          | 23,03                  | 16,24   | 24,17            | 16,58   |

*Tabla 3.9. Temperatura media anual y rango anual de la temperatura media en función de la velocidad del viento en el emplazamiento de la presa (e=5,0 m).*

El comportamiento térmico anteriormente reseñado se visualiza en la figura 3.23, en la cual se presentan las evoluciones anuales de la temperatura media en la sección (e=20,0 m) y en el paramento de aguas abajo en función de las velocidades medias del viento adoptadas en este estudio; esta figura, muestra asimismo que las variaciones térmicas originadas por las variaciones de la velocidad del viento se distribuyen de forma bastante uniforme en el periodo anual considerado.

Por otra parte, la figura 3.24 muestra las distribuciones de temperaturas a lo largo del espesor (e=5 m) en función de los valores adoptados para la velocidad del viento, obtenidas en los meses de septiembre y febrero en los cuales se alcanzan en la sección las temperaturas medias extremas del periodo anual considerado; esta figura muestra que la influencia de la velocidad del viento a nivel sección repercute prácticamente en la casi totalidad del espesor de la sección considerada.

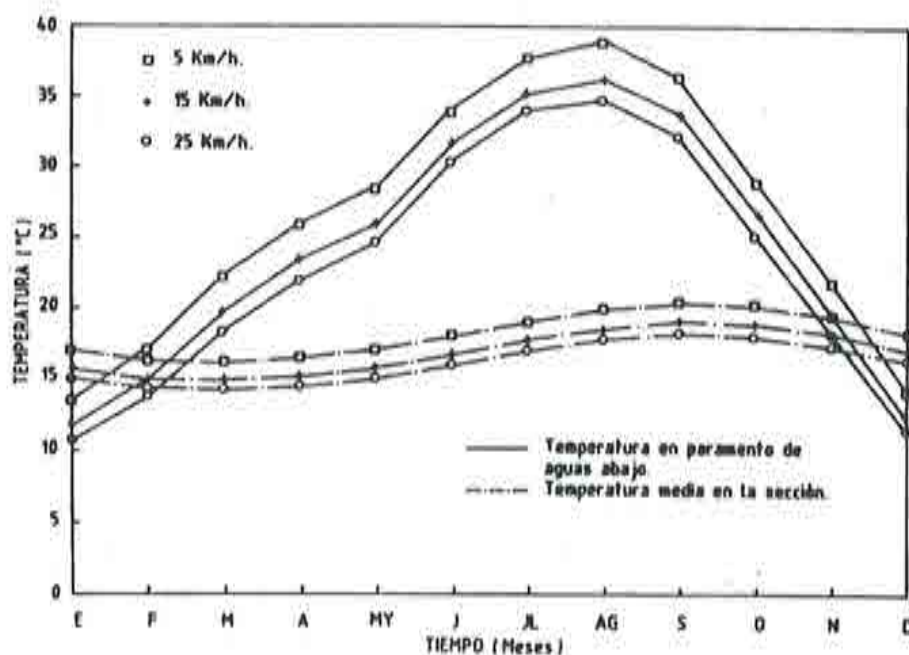


Fig. 3.23. Evolución anual de la temperatura media en función de la velocidad del viento en el emplazamiento ( $e=20,0$  m).

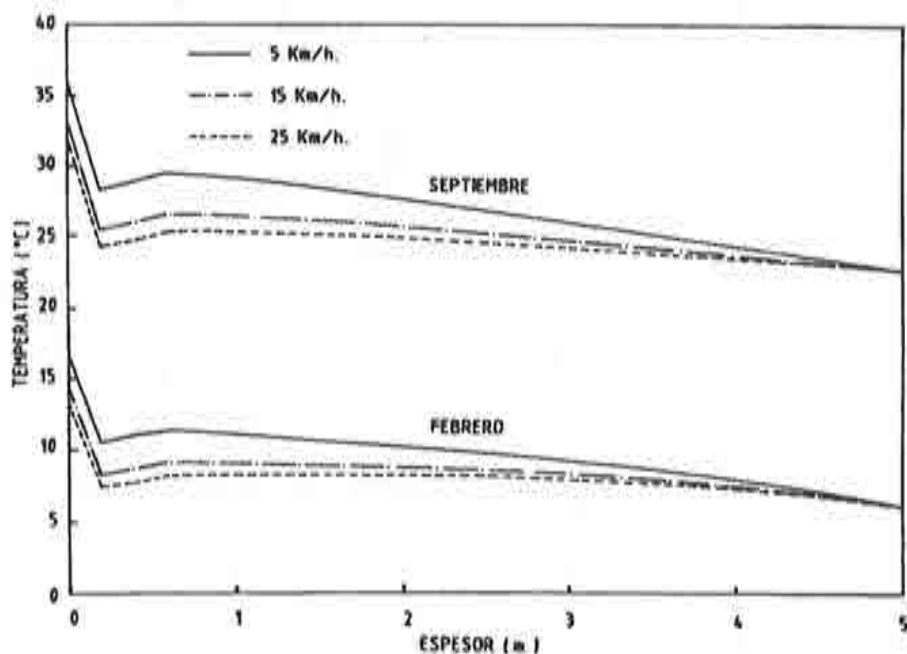


Fig. 3.24. Distribución de temperaturas en la sección en función de la velocidad del viento en el emplazamiento ( $e=5,0$  m).

No obstante a lo anteriormente expuesto, las consecuencias que puedan derivarse en relación a la influencia de la velocidad del viento en la respuesta térmica de la presa

deben plantearse teniendo en cuenta la gran aleatoriedad que lleva asociada esta variable climatológica y que el estudio se ha realizado adoptando para ella una velocidad media anual, en la hipótesis de que ésta actúa durante todos los días del año tipo analizado lo cual puede conducir, en parte, a una magnificación de la influencia de esta variable en el comportamiento térmico de la presa en explotación.

### 3.5.3. Radiación solar

La actuación de la radiación solar sobre el paramento de aguas abajo se ha modelizado, tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior, a partir de la radiación solar global diaria en media mensual que incide en el emplazamiento de la presa y en función de otros parámetros como son la declinación solar, la latitud, el acimut de la superficie, la inclinación del paramento y el coeficiente de reflexión del entorno. Así, mediante el proceso de cálculo que se ha descrito anteriormente, partiendo de la radiación solar global diaria en el emplazamiento (plano horizontal) se obtiene la radiación global incidente en el paramento de la presa (superficie inclinada y orientada) para cada hora del día medio adoptado como representativo del mes.

El estudio de la influencia que presenta la radiación solar incidente en el paramento en relación al comportamiento térmico de la presa se ha planteado adoptando junto a la variación anual de la radiación solar global diaria en el emplazamiento considerada como variación de referencia, otras dos variaciones anuales que difieren, respectivamente, para cada mes del año en  $\pm 20\%$  respecto a los valores mensuales que configuran la citada variación anual de referencia; a su vez, se han mantenido constantes los parámetros anteriormente mencionados que intervienen en la evaluación de la radiación global horaria que actúa sobre el paramento de la presa.

La figura 3.25 muestra la evolución anual de la radiación *global diaria* en media mensual adoptada en este estudio (plano horizontal), en la cual se designa por R2 la evolución anual de esta variable considerada como de referencia, mientras que por R1 y R3 se designan, respectivamente, las evoluciones que difieren de ella en un  $-20\%$  y en un  $20\%$ . Asimismo, en la figura 3.26 se presentan, con análoga nomenclatura, los valores de la radiación *global horaria* incidente sobre el paramento de la presa a las 11,0 h obtenidas numéricamente en base a los valores de la radiación global diaria en media mensual adoptadas y en las mismas condiciones en cuanto a declinación solar, latitud, acimut, inclinación del paramento y coeficiente de reflexión del entorno (valores éstos dados por las condiciones de referencia del estudio).

Los resultados obtenidos en relación a los incrementos de radiación solar en horas diurnas (11,0 h) indican (figura 3.27) que éstos afectan, principalmente, a la temperatura alcanzada por el paramento de aguas abajo sobre el cual actúa la radiación solar y también, aunque en menor medida, a la temperatura media de la sección. En este sentido, y para los incrementos de radiación solar adoptados en este estudio, la temperatura media anual en el paramento experimenta un incremento próximo a  $4,5^{\circ}\text{C}$  mientras que para la temperatura media anual en la sección este incremento es inferior

a 1°C, independientemente del espesor de la sección para un rango de espesores comprendido entre 5 m y 20 m.

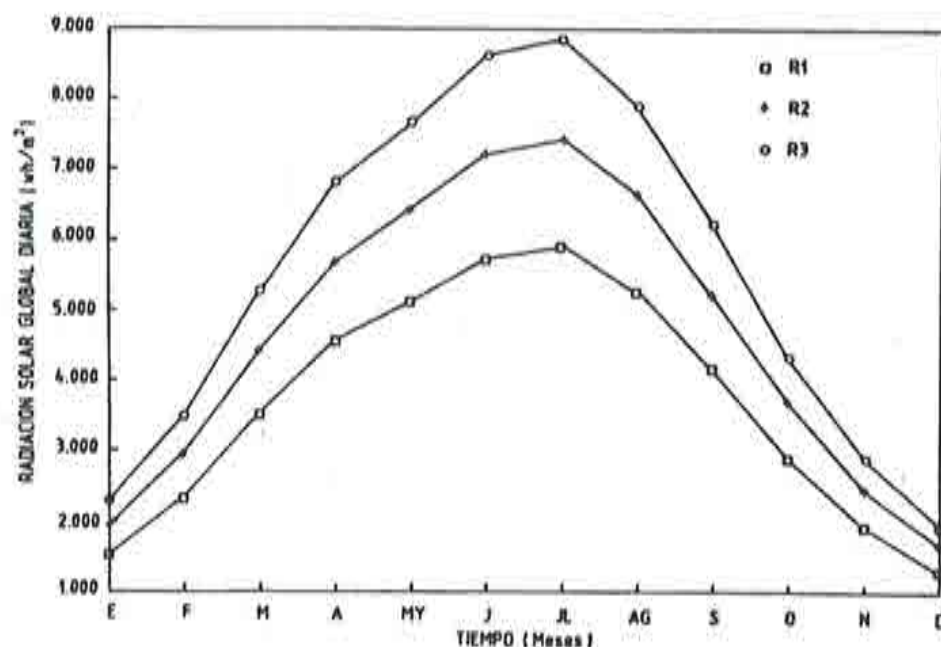


Fig. 3.25. Variación anual de la radiación solar global diaria (en media mensual) incidente en el emplazamiento de la presa.

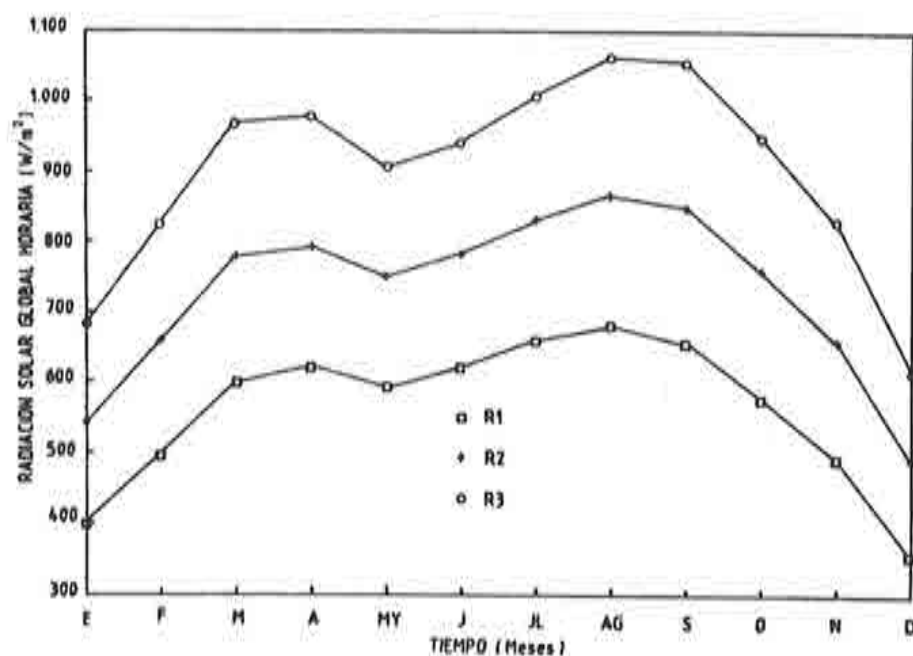


Fig. 3.26. Variación anual de la radiación global horaria incidente sobre el paramento de aguas abajo.

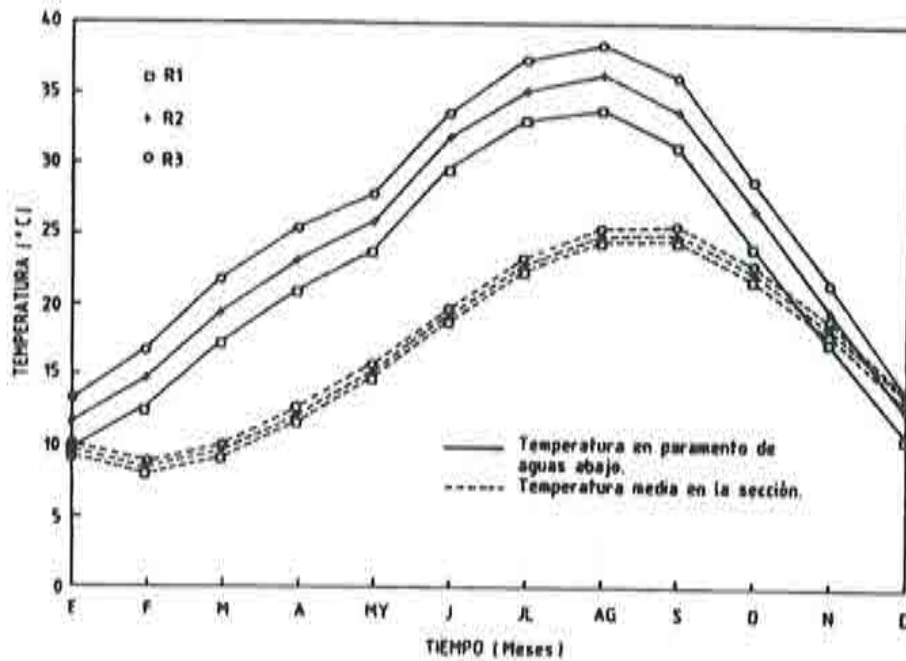


Fig. 3.27. Evolución anual de la temperatura en el paramento de aguas abajo y de la temperatura media en la sección ( $e=5,0$  m) en función de la radiación solar (11,0 h).

Respecto al comportamiento térmico en horas nocturnas, en la figura 3.28 se visualizan las temperaturas medias en el paramento de aguas abajo obtenidas a las 23,0

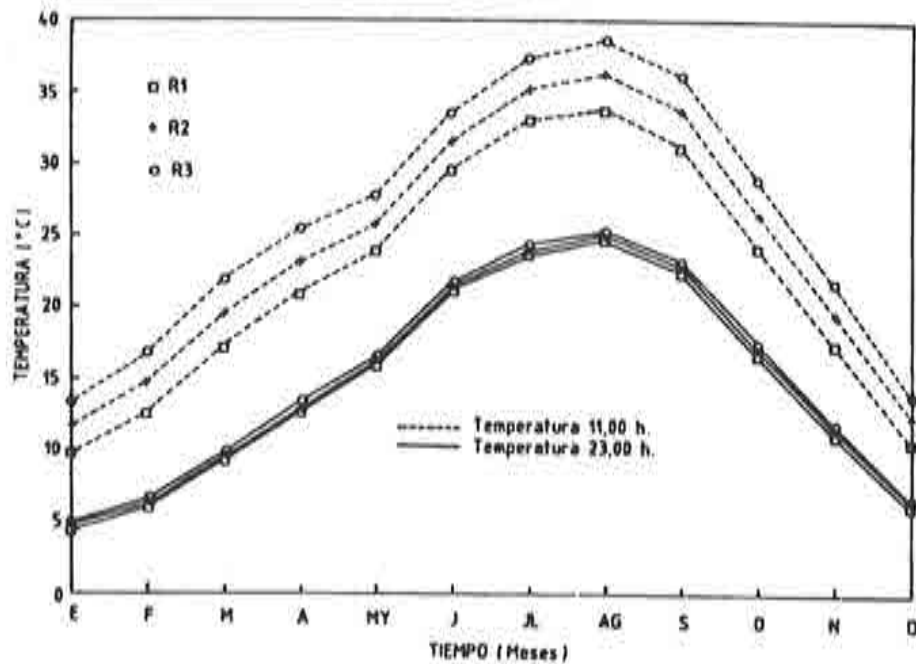


Fig. 3.28. Evolución anual de la temperatura en el paramento de aguas abajo a las 11,0 h y a las 23,0 h en función de la radiación solar.

h junto a las temperaturas en el mencionado paramento obtenidas en horas diurnas (11,0 h); en ella se pone de manifiesto que para una misma radiación solar incidente, su variación diaria se traduce, fundamentalmente, en una disminución de la temperatura en el paramento para las horas nocturnas en relación a la temperatura alcanzada en las horas diurnas, teniendo estas variaciones térmicas diarias derivadas de la actuación de la radiación solar una escasa repercusión en la temperatura media de la sección. De otra parte, los incrementos de radiación solar provocan asimismo en horas nocturnas incrementos de la temperatura en el paramento, si bien éstos son pequeños (alrededor de 0,5°C en términos de temperatura media anual) en comparación con los originados en el mencionado paramento en horas diurnas.

En las tablas 3.10 y 3.11, que a continuación se presentan, se exponen, respectivamente, los resultados obtenidos relativos a la temperatura media anual y al rango anual de la temperatura media alcanzados en la presa en función de la radiación solar, expresada ésta en términos de radiación solar media anual en el emplazamiento.

| Radiación Solar<br>(wh/m <sup>2</sup> )<br>(media anual) | Temperatura Media (°C) |        |         |        |
|----------------------------------------------------------|------------------------|--------|---------|--------|
|                                                          | Paramento              |        | Sección |        |
|                                                          | (11 h)                 | (23 h) | (11 h)  | (23 h) |
| 3.686                                                    | 22,10                  | 14,55  | 16,36   | 16,33  |
| 4.608                                                    | 24,18                  | 14,88  | 16,85   | 16,79  |
| 5.530                                                    | 26,36                  | 15,22  | 17,35   | 17,23  |

Tabla 3.10. Temperatura media anual en función de la radiación solar.

| Radiación Solar<br>(wh/m <sup>2</sup> )<br>(media anual) | Rango Anual (°C) |        |         |        |
|----------------------------------------------------------|------------------|--------|---------|--------|
|                                                          | Paramento        |        | Sección |        |
|                                                          | (11 h)           | (23 h) | (11 h)  | (23 h) |
| 3.686                                                    | 24,12            | 20,15  | 16,67   | 16,67  |
| 4.608                                                    | 24,70            | 20,24  | 16,77   | 16,76  |
| 5.530                                                    | 75,33            | 20,32  | 16,87   | 16,85  |

Tabla 3.11. Rango anual de la temperatura en función de la radiación solar (e=5,0 m).

Estos resultados ponen de manifiesto el comportamiento térmico anteriormente expuesto en relación a las temperaturas medias (tabla 3.10), mientras que en lo que se refiere al rango anual de la temperatura en la presa (tabla 3.11) indican que la radiación solar tiene una pequeña incidencia en el rango anual de la temperatura en el paramento, no afectando prácticamente al rango anual de la temperatura media en la sección.

En lo que concierne a la distribución de temperaturas a lo largo del espesor, la figura 4.29 muestra los resultados obtenidos para una sección de 5 m, los cuales corresponden a las temperaturas alcanzadas en la sección (meses de agosto y enero) en una hora diurna (11,0 h) y una nocturna (23.0 h) en función de las tres variaciones anuales adoptadas para la radiación solar; en ella se designa, respectivamente, por T1, T2 y T3 la respuesta térmica en la sección frente la acción de la radiación solar anteriormente designada por R1, R2 y R3.

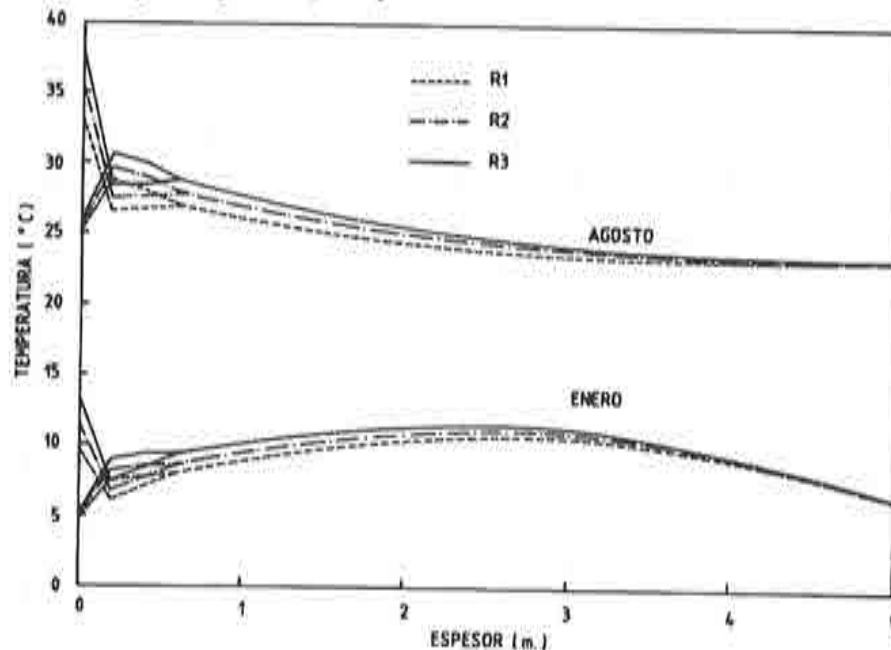


Fig. 3.29. Distribución de temperaturas en la sección en función de la radiación solar

En esta figura se aprecia que la influencia de las variaciones diarias de la radiación solar (hora diurna, hora nocturna) repercuten prácticamente sólo en una zona próxima al paramento sobre el cual éstas inciden, mientras que la variación de radiación solar considerada en el periodo anual afecta también, aunque en menor medida, a la distribución de temperaturas a lo largo de la sección.

#### 3.5.4. Temperatura del agua

La acción térmica del agua embalsada sobre la presa en explotación se representa, siguiendo el modelo de análisis propuesto, mediante una condición de temperatura prescrita en el paramento mojado de aguas arriba; esta condición, se materializa, en cada cota, por un valor medio mensual de la temperatura del agua variable según los distintos meses del año, quedando así configurada la acción térmica del agua en un periodo anual por doce valores medios mensuales de la citada temperatura.

Esta modelización, tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior, responde a la simplificación adoptada de que las variaciones térmicas diarias del agua embalsada son, en general, poco importantes en relación a las variaciones mensuales que definen su

evolución térmica anual; no obstante, el modelo permitiría asimismo reflejar estas variaciones diarias.

El análisis de la influencia que presenta esta variable en la respuesta térmica de la presa en explotación se plantea según dos líneas de actuación:

- Se analiza su influencia en términos de temperatura media anual para lo cual se adoptan, junto a la variación anual de la temperatura del agua de referencia cuya media anual es de  $15^{\circ}\text{C}$ , otras dos distribuciones cuyas temperaturas medias anuales difieren de aquella en  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . En la figura 3.30 se presentan estas distribuciones, designándose en ella por TW2 la correspondiente a la variación de referencia y, respectivamente, por TW1 y TW3 las que difieren de ésta en  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

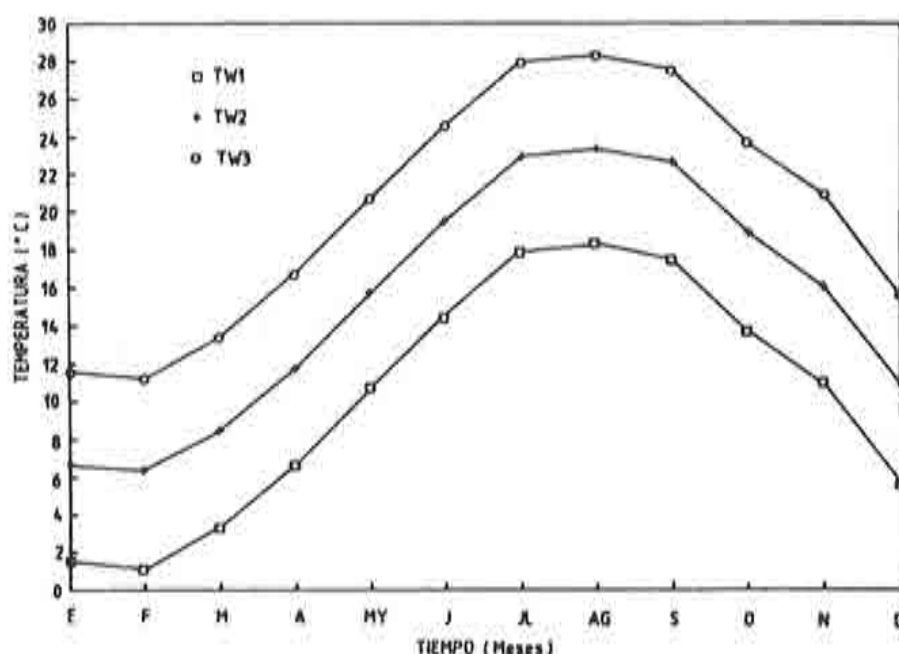


Fig. 3.30. Variaciones adoptadas para la temperatura del agua según distintas temperaturas medias anuales.

- Se analiza la influencia de la temperatura del agua en términos del rango anual que presenta esta temperatura, adoptándose para ello dos variaciones anuales de la temperatura cuyo rango anual difiere en un  $\pm 20\%$  del rango anual de la distribución de referencia ( $17^{\circ}\text{C}$ ), teniendo las tres distribuciones anuales la misma temperatura media anual de  $15^{\circ}\text{C}$ . En la figura 3.31 se presenta estas distribuciones, designándose por TWR2 la correspondiente a la variación de referencia y, respectivamente, por TWR1 y TWR3 las que su rango difiere del de esta en un  $\pm 20\%$ .

Los resultados obtenidos en relación a la variación de la temperatura media anual del agua embalsada (figura 3.32) ponen de manifiesto una influencia notable de esta

temperatura en la temperatura media anual alcanzada por el hormigón de la presa, en el sentido de que el incremento en aquella temperatura origina un incremento de la temperatura media anual en el hormigón. Por otra parte, el incremento de la temperatura media anual en el agua no modifica el rango anual de la temperatura alcanzada en el hormigón de la presa.

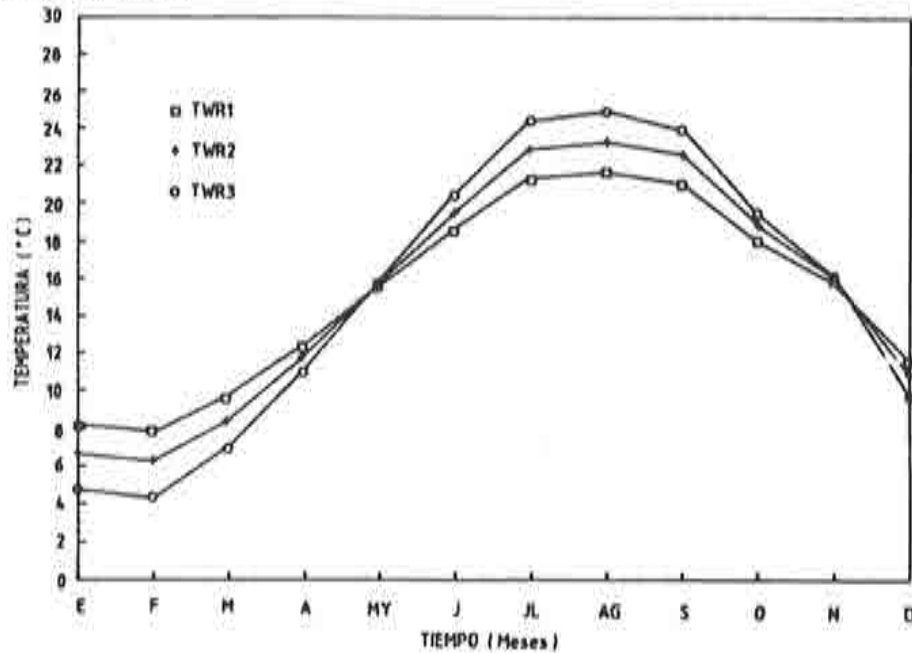


Fig. 3.31. Variaciones adoptadas para la temperatura del agua según distintos rangos anuales.

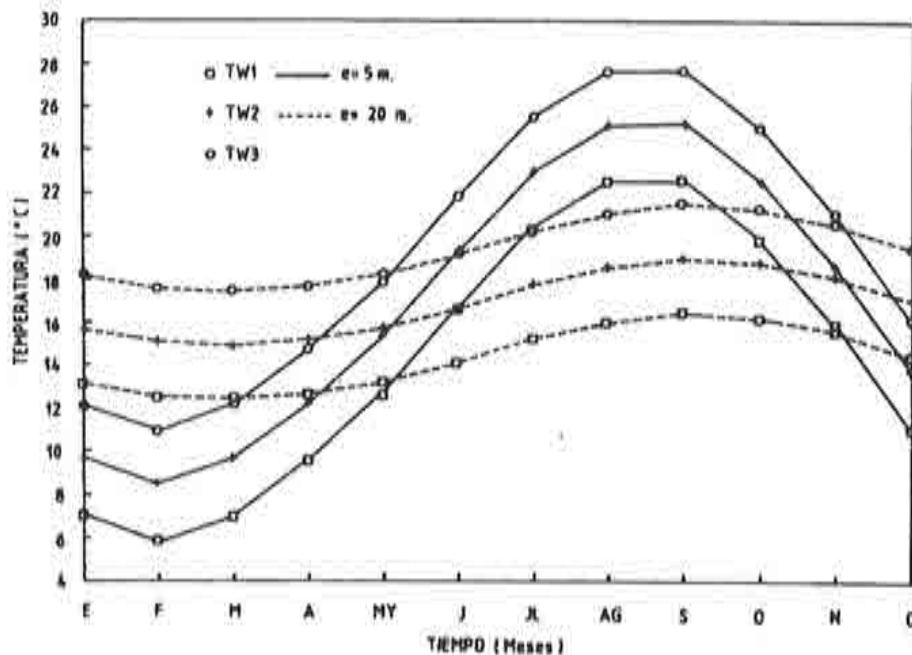


Fig. 3.32. Evolución anual de la temperatura media en la sección en función de la temperatura media anual del agua embalsada.

En la figura 3.32 se muestran las evoluciones anuales de la temperatura media en dos secciones de 5 m y 20 m de espesor según las variaciones térmicas anuales adoptadas para la temperatura del agua, asociadas éstas a las tres temperaturas medias anuales consideradas en este estudio (10°C, 15°C, 20°C); en ella se aprecia que los incrementos de la temperatura media en el hormigón se distribuyen de forma bastante uniforme a lo largo del periodo anual.

Respecto a la influencia del rango anual de la temperatura del agua en la respuesta térmica de la presa, la figura 3.33 visualiza los resultados obtenidos relativos a la evolución anual de la temperatura media en el hormigón, para dos secciones de 5 m y 20 m de espesor. Estos resultados indican que cuando aumenta el rango anual de la temperatura del agua también lo hace el rango anual de la temperatura en el hormigón, estando este comportamiento térmico afectado cuantitativamente por el espesor de la sección, de modo que para un incremento en el rango anual de la temperatura del agua de 7°C el incremento del rango anual de la temperatura en el hormigón se sitúa alrededor de 3°C para un espesor de 5.0 m y de 1°C para una sección de 20 m de espesor; por otra parte, las variaciones del rango anual de la temperatura del agua no afectan la temperatura media anual en la sección.

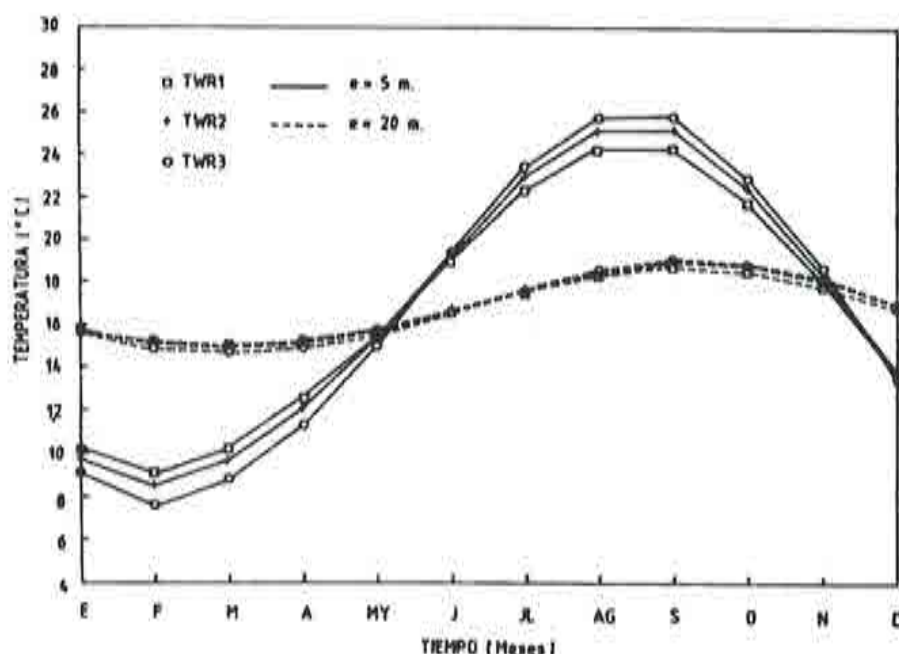


Fig. 3.33. Evolución anual de la temperatura media en la sección en función del rango anual de la temperatura del agua embalsada.

En la tabla 3.12 se recogen los resultados obtenidos en relación a la influencia que tiene la temperatura media anual del agua embalsada en la temperatura media anual del hormigón. Estos resultados ponen de manifiesto que la temperatura media anual de la presa varía linealmente con la temperatura media anual del agua cuando se mantienen constantes el resto de variables que intervienen en la modelización planteada, dadas éstas

por las condiciones de referencia del estudio.

| Temperatura del agua (°C)<br>(media anual) | Temperatura Media<br>(°C) |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| 10                                         | 14,30                     |
| 15                                         | 16,85                     |
| 20                                         | 19,40                     |

*Tabla 3.12. Temperatura media anual en función de la temperatura del agua media anual.*

Respecto al rango anual de la temperatura media en el hormigón, en la tabla 3.13 se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los rangos de la temperatura del agua que se han analizado, relativos éstos a una sección de 5 m de espesor. Los valores que en ella se recogen indican que el rango en el hormigón aumenta cuando lo hace el rango anual de la temperatura del agua ante unas condiciones de referencia que se mantienen constantes.

| Rango anual de la<br>Temperatura del agua (°C) | Rango Anual<br>(°C) |
|------------------------------------------------|---------------------|
| 13,50                                          | 15,25               |
| 17,00                                          | 16,77               |
| 20,50                                          | 18,27               |

*Tabla 3.13. Rango anual de la temperatura en función del rango anual de la temperatura del agua (e=5.0 m).*

En relación al comportamiento térmico a nivel sección, éste se ve asimismo notablemente influenciado por la temperatura del agua que actúa sobre el paramento de aguas arriba de la presa, tal y como se muestra en las figuras 3.34 y 3.35, las cuales representan, respectivamente, la distribución de las temperaturas alcanzadas por el hormigón según distintas temperaturas del agua, en dos secciones de 5 m y 20 m de espesor.

Las distribuciones de temperatura referidas ponen de manifiesto que la influencia de la temperatura del agua a nivel sección no es únicamente local en la zona próxima al paramento mojado de aguas arriba, sino que tiene repercusión en todo el espesor de la presa, a excepción del entorno cercano al paramento de aguas abajo en el cual predomina la influencia de otros parámetros térmicos ambientales que inciden directamente en el mismo (entre éstos, radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiente) frente a la acción térmica del agua embalsada.

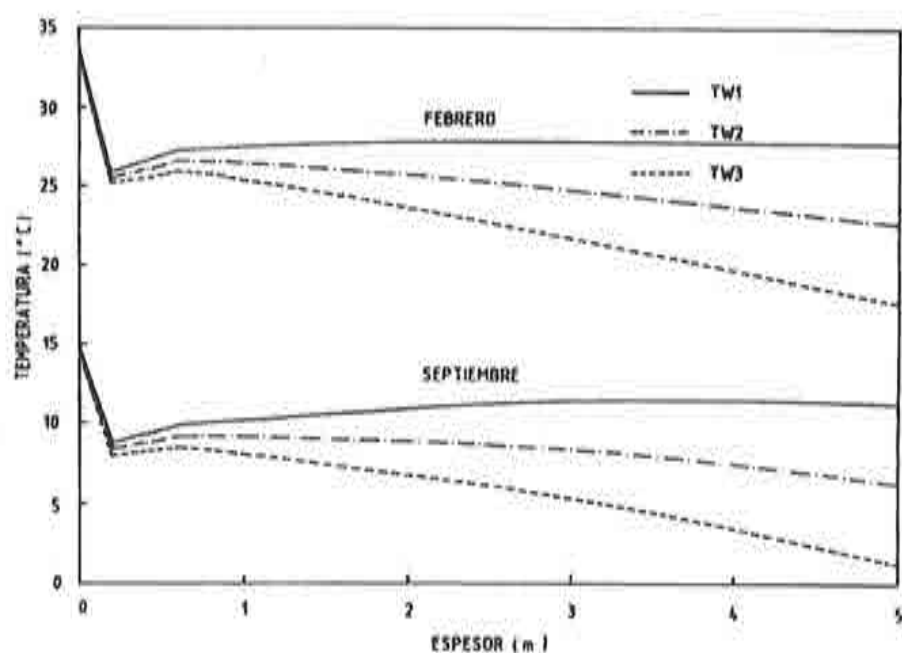


Fig. 3.34. Distribución de la temperatura a nivel sección en función de la temperatura del agua ( $e=5,0$  m).

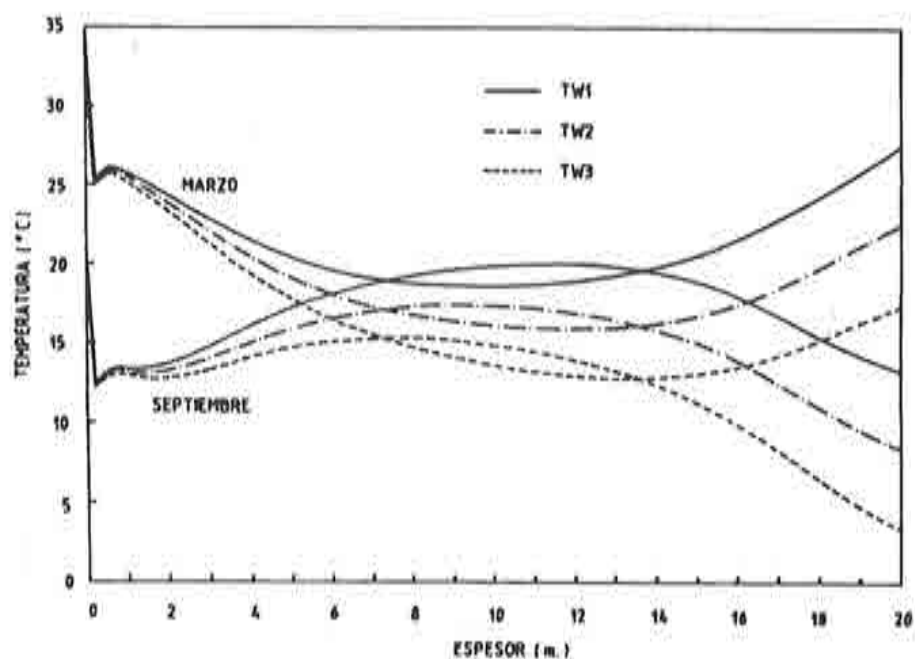


Fig. 3.35. Distribución de la temperatura a nivel sección en función de la temperatura del agua ( $e=20,0$  m).

### 3.5.5. Temperatura ambiente

La temperatura ambiente es un parámetro térmico que juega un papel relevante en los intercambios de calor que tienen lugar entre la presa y su entorno exterior debidos a la transferencia de calor por convección y radiación térmica de onda larga, al ser la energía calorífica transferida en ambos mecanismos proporcional a la diferencia de temperatura existente entre la superficie expuesta y el ambiente exterior.

El estudio de la influencia que muestra la temperatura ambiente en la respuesta térmica de la presa se ha realizado adoptando para esta acción térmica dos hipótesis en lo que se refiere a su forma de actuación:

- Se estudia su influencia en términos de temperatura media anual para lo cual se adoptan, junto a la variación anual de la temperatura ambiente de referencia, cuya media anual es de  $14^{\circ}\text{C}$ , otras dos distribuciones cuyas temperaturas medias anuales difieren de aquella en  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . En la figura 4.36 se presentan estas distribuciones, designándose en ella por TA2 la correspondiente a la variación de referencia y, respectivamente, por TA3 y TA1 las que difieren de ésta en  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , teniendo todas ellas un mismo rango anual de  $20^{\circ}\text{C}$ .

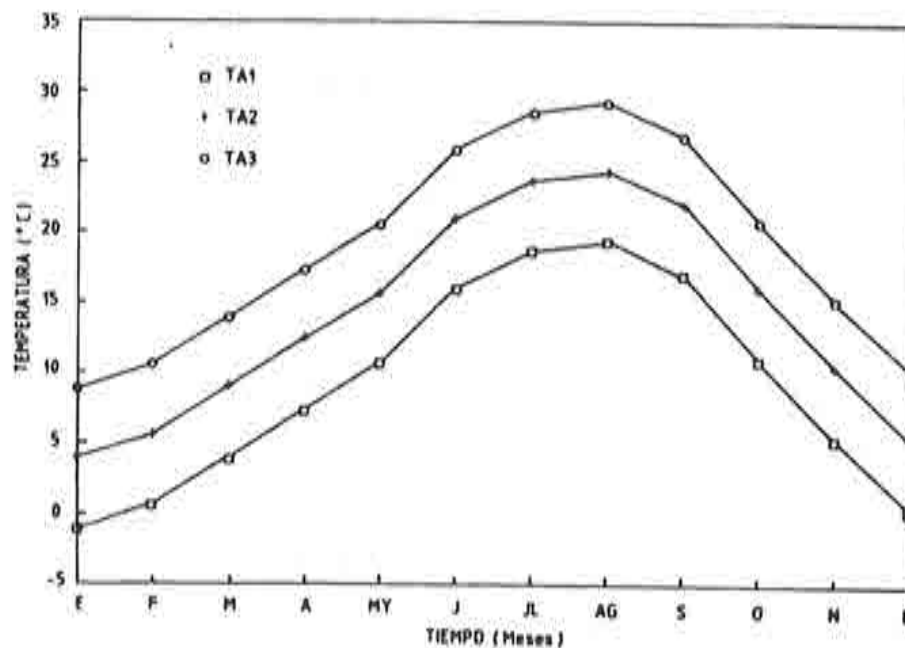


Fig. 3.36. Variación anual de la temperatura ambiente según distintas temperaturas medias anuales ( $T1=9^{\circ}\text{C}$ ,  $T2=14^{\circ}\text{C}$ ,  $T3=19^{\circ}\text{C}$ ).

- Se estudia la influencia de la temperatura ambiente en términos del rango anual que presenta esta temperatura, adoptándose para ello dos variaciones anuales de la temperatura cuyo rango anual difiere del de la de referencia en  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ , siendo el rango anual de la de referencia de  $20^{\circ}\text{C}$ . En la figura 3.37 se presentan estas

variaciones, designándose por TAR2 la correspondiente a la de referencia y, respectivamente, por TAR3 y TAR1 las que su rango difiere del de ésta en  $\pm 10^\circ\text{C}$ . Todas estas distribuciones tienen una misma temperatura media anual de  $14^\circ\text{C}$ .

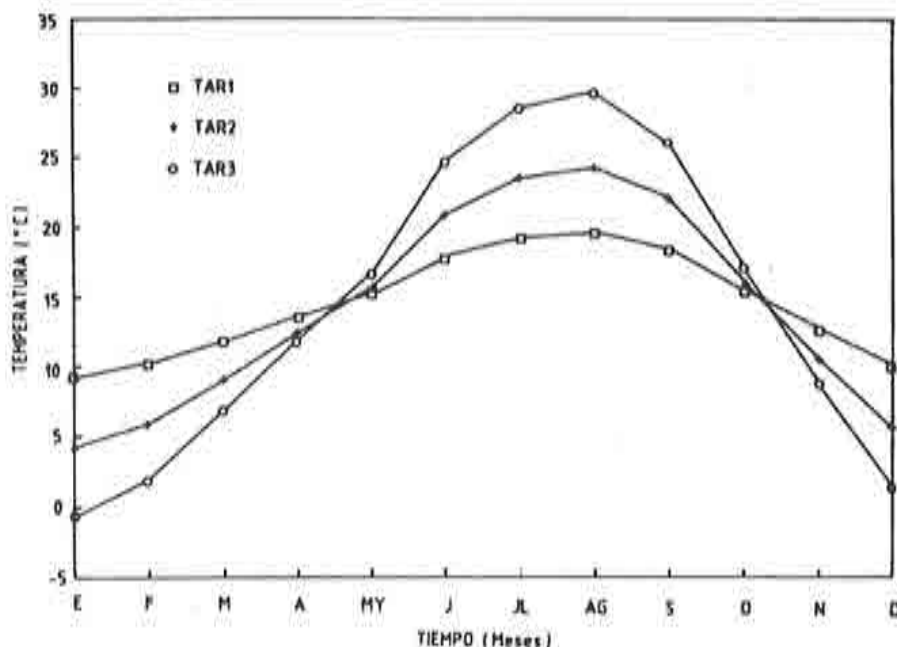


Fig. 3.37. Variación anual de la temperatura ambiente según distintos rangos anuales ( $R1=10^\circ\text{C}$ ,  $R2=20^\circ\text{C}$ ,  $R3=30^\circ\text{C}$ ).

Los resultados obtenidos en relación a la influencia de la temperatura ambiente en cuanto a su variación de temperatura media anual, ponen de manifiesto (figura 4.38) que esta temperatura afecta significativamente a la temperatura media anual del hormigón, de forma independiente del espesor de la sección considerada (rango de espesores entre 5 y 20 m). Esta influencia, para las variaciones térmicas adoptadas en este estudio, se traduce, en términos cuantitativos, en que un incremento de la temperatura ambiente media anual de  $5^\circ\text{C}$  origina un incremento de  $2,5^\circ\text{C}$  en la temperatura en el hormigón de  $5^\circ\text{C}$  cuando el incremento térmico ambiental es de  $1^\circ\text{C}$ ; estos resultados indican que, ante unas condiciones fijas de referencia, la respuesta térmica de la presa en términos de su temperatura media anual varía linealmente con la temperatura ambiente media anual.

Respecto a las temperaturas medias mensuales que configuran las evoluciones anuales presentadas en la figura 3.38, los incrementos que éstas experimentan con la temperatura ambiente tienen una distribución prácticamente uniforme en el periodo anual considerado. Asimismo, la mencionada figura ilustra el hecho de que si bien para una misma temperatura ambiente anual la temperatura media anual en la sección de la presa no depende significativamente del espesor, la distribución anual de temperaturas sí se ve influenciada por esta variable geométrica; esta influencia es en el sentido de que su incremento se traduce en un amortiguamiento de la distribución anual de temperaturas

y, a su vez, en un desplazamiento en el tiempo de los puntos en los cuales se alcanzan los valores extremos de la temperatura en el periodo anual, lo cual es un indicativo de la inercia térmica de la presa asociada al espesor de la sección.

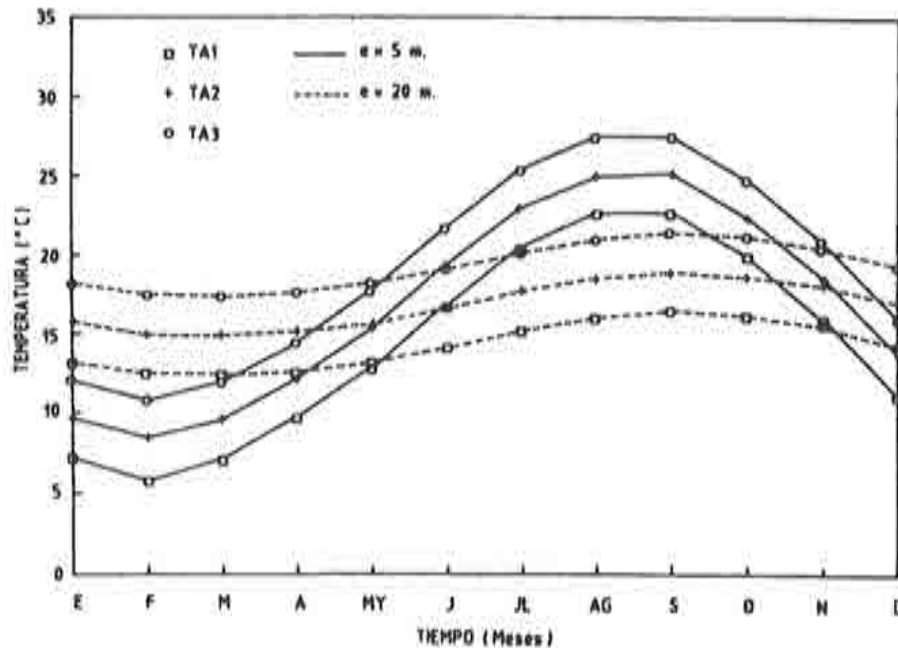


Fig. 3.38. Evolución anual de la temperatura media en la sección en función de la temperatura ambiente.

Por otra parte, en la figura 3.39 se muestran las evoluciones de la temperatura en el hormigón obtenidas en función de los distintos rangos anuales adoptados para la temperatura ambiente. Los resultados que en ella se recogen indican que el rango anual de la temperatura ambiente afecta al rango anual de la temperatura media en la sección en el sentido de que cuanto mayor es el rango anual de la temperatura ambiente, mayor es el rango anual de la temperatura media alcanzada por el hormigón. Desde un punto de vista cuantitativo, este comportamiento térmico se ve a su vez influenciado por el espesor de la sección; así, para un incremento del rango anual de la temperatura ambiente de 20°C, el incremento en el rango anual de la temperatura en el hormigón es de 8°C para un espesor de 3.0 m, mientras que para una sección de 20.0 m de espesor éste incremento en el rango es de 2°C. Este comportamiento térmico pone nuevamente de manifiesto la influencia del espesor de la sección en relación a la sensibilidad térmica de la presa ante las variaciones térmicas ambientales.

Respecto a la influencia de la temperatura ambiente en la temperatura que se alcanza en el paramento de la presa, los incrementos de temperatura ambiente y de su rango se traducen también en incrementos de la temperatura y del rango anual en el mencionado paramento, siendo el comportamiento térmico que presenta el paramento prácticamente independiente del espesor de la sección. No obstante, en términos cuantitativos, los incrementos térmicos en el paramento debidos a las variaciones de la

temperatura ambiente son de un orden de magnitud superior a los que presenta la temperatura media en la sección. En este sentido, para un incremento de 10°C en la temperatura ambiente media anual, el correspondiente incremento térmico en el paramento se sitúa en el orden de los 10°C, mientras que para un incremento en el rango anual de la temperatura ambiente de 20°C el incremento que experimenta el rango anual de la temperatura en el paramento es próximo a los 10°C.

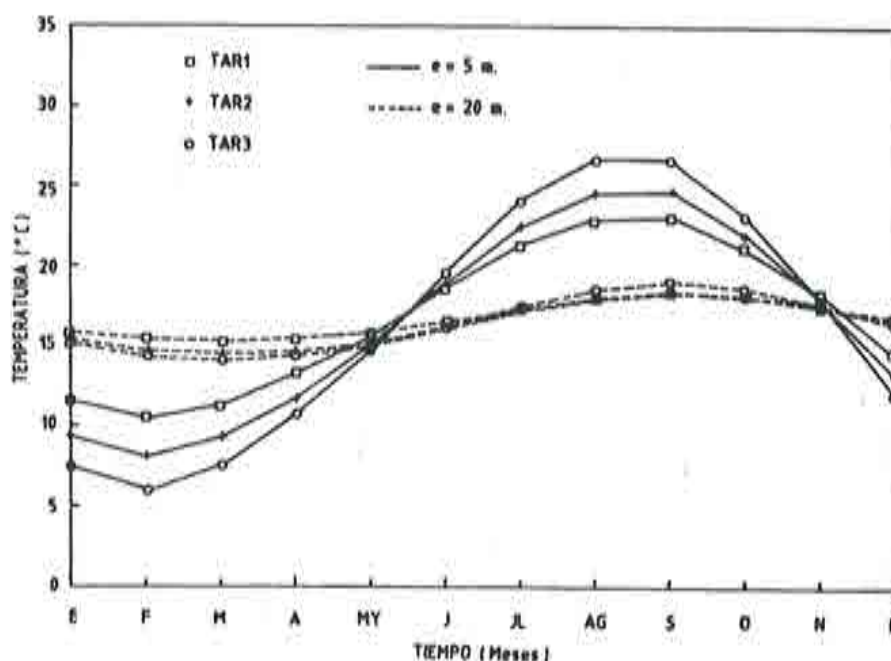


Fig. 3.39. Evolución anual de la temperatura media en la sección en función del rango anual de la temperatura ambiente.

A continuación, en las tablas 3.14 y 3.15 se exponen, respectivamente, los resultados obtenidos en relación a la temperatura media anual y al rango anual de la temperatura media.

| Temperatura ambiente (°C)<br>(media anual) | Temperatura Media (°C) |         |
|--------------------------------------------|------------------------|---------|
|                                            | Paramento              | Sección |
| 9                                          | 19,31                  | 14,42   |
| 14                                         | 24,18                  | 16,85   |
| 19                                         | 29,05                  | 19,28   |

Tabla 3.14. Temperatura media anual en función de la temperatura ambiente media anual.

Los resultados que en ellas se recogen ponen de manifiesto, tanto en lo que se refiere a la actuación de la temperatura ambiente media como al rango anual de esta temperatura que su repercusión en la respuesta térmica de la presa es mayor sobre el

comportamiento térmico del paramento de aguas abajo, el cual recibe directamente la acción térmica exterior, que en el experimentado a nivel sección, donde parte de los efectos superficiales se disipan a través del espesor.

| Rango anual temperatura ambiente (°C) | Rango anual (°C) |         |
|---------------------------------------|------------------|---------|
|                                       | Paramento        | Sección |
| 10                                    | 15,06            | 12,70   |
| 20                                    | 24,70            | 16,77   |
| 30                                    | 34,35            | 20,86   |

Tabla 3.15. Rango anual de la temperatura en función del rango anual de la temperatura ambiente ( $e=5,0$  m).

En relación a la distribución de temperaturas a nivel sección, los resultados obtenidos ponen de manifiesto (figura 3.40) una significativa influencia de la temperatura ambiente en las temperaturas alcanzadas en los distintos puntos que materializan el espesor de la sección.

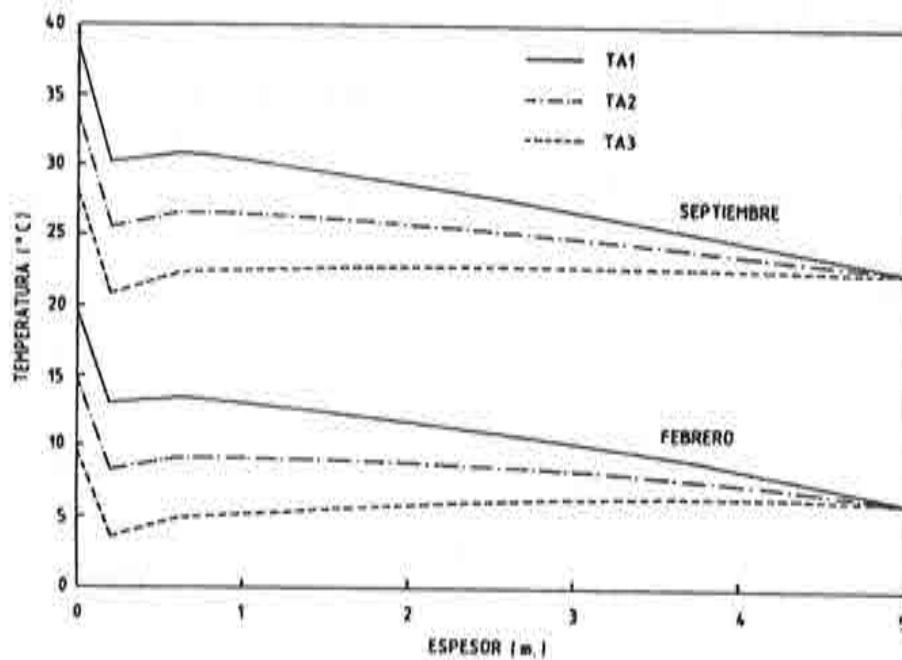


Fig. 3.40. Distribución de la temperatura a nivel sección en función de la temperatura ambiente ( $e=5,0$  m).

La figura reseñada anteriormente visualiza estas temperaturas en una sección de 5.0 m de espesor, en los meses de febrero y septiembre, obtenidas en función de las variaciones de temperatura ambiente adoptadas. Esta muestra que la temperatura ambiente afecta, en gran medida, a la distribución de temperaturas en todo el espesor a

excepción de una zona próxima al paramento de aguas arriba en donde prevalece la influencia de la temperatura del agua que actúa en él.

Por otro lado, y también en relación al comportamiento térmico a nivel sección, en la figura 3.41 se presentan las distribuciones de temperatura a lo largo del espesor obtenidas para una misma variación anual de la temperatura ambiente en los días medios representativos de los meses de enero y agosto en los cuales la temperatura ambiente alcanza sus valores extremos anuales, y en las horas del día para los cuales la temperatura ambiente presenta sus valores máximo y mínimo diarios (respectivamente las 15.0 h y las 3.0 h).

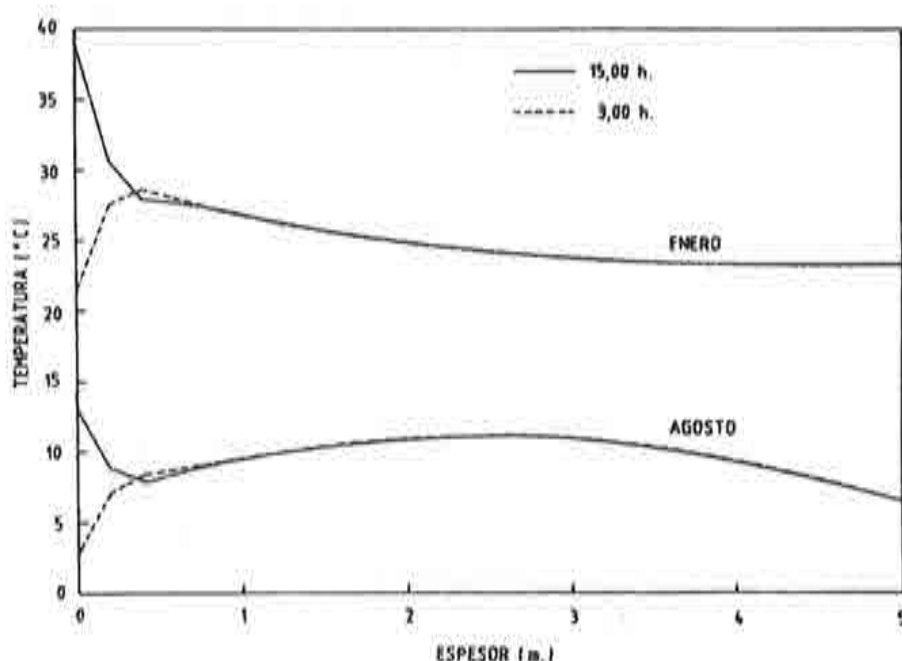


Fig. 3.41. Distribución de temperaturas a nivel sección ( $e=5,0$  m) en horas de temperaturas diarias extremas.

Los resultados que se recogen en esta figura muestran que la influencia de las variaciones diarias de la temperatura ambiente es fundamentalmente de carácter local en una zona próxima al paramento sobre el cual actúa esta temperatura (en el entorno de los 80 primeros centímetros), no teniendo prácticamente repercusión en el resto del espesor.

### 3.6. CONCLUSIONES DERIVADAS DEL ESTUDIO PARAMETRICO

En el apartado precedente se ha realizado un estudio pormenorizado e individualizado de la influencia que tienen en el comportamiento térmico de la presa los distintos parámetros que configuran el modelo desarrollado para el análisis de la respuesta térmica de la presa en explotación frente a la acción térmica ambiental.

A continuación, a modo de resumen, se presentan las conclusiones derivadas del estudio paramétrico realizado encaminadas a priorizar la influencia relativa que tienen los parámetros analizados en términos, principalmente, de la temperatura media anual y del rango anual de la temperatura alcanzados en la presa.

En relación a los parámetros térmicos que caracterizan al hormigón, son su conductividad térmica y su coeficiente de absorción los que muestran una mayor incidencia en el comportamiento térmico de la presa. En este sentido, la conductividad afecta al rango anual de la temperatura media en la sección mientras que la absorción térmica influye, principalmente, a nivel local en la temperatura del paramento expuesto a la radiación solar y al rango anual de esta temperatura y también, aunque en menor medida, en la temperatura media anual de la sección.

Respecto al espesor, éste puede considerarse como un parámetro geométrico de capital importancia en relación al rango anual de la temperatura media que se alcanza en la presa ante una acción térmica ambiental determinada y, en consecuencia, en relación a la sensibilidad térmica que pueda presentar la presa frente a dicha acción. Por otra parte, el espesor gobierna, en gran medida, los desfases existentes en el tiempo entre la acción térmica exterior y la respuesta térmica de la presa, lo cual hace que este parámetro esté directamente relacionado con la inercia térmica del hormigón.

En lo que se refiere al acimut de la superficie, a la inclinación del paramento de aguas abajo y al coeficiente de reflexión del entorno, su efecto en la respuesta térmica de la presa es, eminentemente, de carácter local sobre el paramento de aguas abajo sometido a la radiación solar; en relación a la incidencia de estos parámetros en la temperatura media anual de la sección y a su rango anual, ésta es de escasa significación para el acimut y el coeficiente de reflexión del entorno mientras que para la inclinación del paramento, siendo también pequeña, es de un orden de magnitud superior a la de aquéllos.

En cuanto a la velocidad del viento en el emplazamiento, su influencia se muestra significativa tanto en la temperatura del paramento de aguas abajo y en el rango anual de esta temperatura como en la temperatura media anual de la sección, si bien debe tenerse en cuenta al respecto lo anteriormente indicado en relación a la gran aleatoriedad que puede presentar esta variable climatológica y a la modelización empleada para la misma, hechos éstos que pueden modificar en parte el efecto de esta variable en la respuesta térmica de la presa en explotación.

En lo que concierne al efecto derivado de la actuación de la radiación solar sobre el paramento de la presa, éste es especialmente significativo en el comportamiento térmico del propio paramento, tanto en la temperatura media que se alcanza en él como en el rango anual de esta temperatura mientras que su incidencia en la temperatura media anual de la sección es menor. Por otra parte, los incrementos térmicos originados por las variaciones diarias de la radiación solar afectan primordialmente al paramento sobre el cual ésta actúa, no teniendo estos incrementos repercusión a nivel de comportamiento

térmico medio en la sección.

En relación a la influencia que presenta la temperatura del agua en la respuesta térmica de la presa, el estudio realizado pone de manifiesto que esta temperatura afecta considerablemente a la temperatura media anual de la sección y al rango anual de esta temperatura y, también, a la distribución de temperatura que se alcanza a través del espesor. De ello se deriva que, dentro del grupo de parámetros que configuran la acción térmica ambiental, la temperatura del agua es uno de los parámetros principales que rige, en mayor medida, el comportamiento térmico de la presa en explotación.

Finalmente, respecto a la temperatura ambiente, los resultados obtenidos indican que esta variable es, junto a la temperatura del agua, uno de los parámetros que tiene mayor incidencia en la respuesta térmica de la presa; su influencia es significativa tanto en lo que se refiere a la temperatura media anual en la sección y a su rango anual, a la distribución de temperaturas a lo largo del espesor y también en las variaciones térmicas experimentadas por el paramento de la presa.

Con el objeto de acotar la influencia relativa de las variables analizadas en orden a definir cuales son los parámetros principales que rigen en mayor medida el comportamiento térmico de la presa, a continuación, en la tabla 3.16, se muestra, para el conjunto de variables estudiadas, la influencia relativa que tiene cada una de ellas en la respuesta térmica de la presa, representada ésta en términos de la temperatura media anual y del rango anual de esta temperatura que se alcanzan en la sección y en el paramento de aguas abajo. Para ello se han considerado las temperaturas obtenidas en horas diurnas (11<sup>00</sup>h) tanto en lo que concierne al comportamiento térmico a nivel sección como al del paramento de aguas abajo; respecto al rango anual, éste se ha establecido para un espesor de referencia de 5 m siendo para espesores superiores su comportamiento térmico relativo al rango anual cualitativamente semejante al experimentado por el espesor de referencia.

Esta influencia relativa se ha priorizado obteniendo, en primer lugar y para cada una de las variables analizadas, los incrementos de la temperatura media anual y de su rango anual cuando la variable en cuestión adopta los distintos valores establecidos para ella en el estudio paramétrico realizado; seguidamente, contemplando en su conjunto los incrementos térmicos así obtenidos para cada variable, se ha asignado el valor 100 al correspondiente a la variable que presenta un mayor incremento y respecto a éste se han establecido los porcentajes relativos del resto de las variables estudiadas.

En base a este criterio se ha definido un índice, *i*, de influencia relativa en función del cual se adoptan cuatro niveles de influencia que corresponden a los símbolos que a continuación se explicitan y que permiten la interpretación de la tabla anteriormente referenciada:

|      |                    |                |
|------|--------------------|----------------|
| xxx; | máxima influencia, | $80 < i < 100$ |
| xx;  | influencia,        | $20 < i < 80$  |
| x;   | poca influencia,   | $5 < i < 20$   |
| -;   | nula influencia,   | $i < 5$        |

| Variables Estudiadas                 |                         | Sección     |                 | Paramento Aguas Abajo |             |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|-------------|
|                                      |                         | Temp. Media | Rango Anual (*) | Temp. Media           | Rango Anual |
| Caracterización Térmica del Hormigón | - Conductividad         | -           | x               | -                     | -           |
|                                      | - Calor específico      | -           | -               | -                     | -           |
|                                      | - Absorción             | xx          | -               | xx                    | x           |
|                                      | - Emisividad            | -           | -               | -                     | -           |
| Geometría y Emplazamiento            | - Espesor               | -           | xxx             | -                     | -           |
|                                      | - Inclinação paramento  | x           | -               | xx                    | x           |
|                                      | - Acimut                | -           | -               | xx                    | x           |
| Acción Térmica Ambiental             | - Reflexión del entorno | -           | -               | x                     | -           |
|                                      | - Velocidad del viento  | xx          | -               | xx                    | x           |
|                                      | - Radiación solar       | xx          | -               | xx                    | x           |
|                                      | - Temperatura del agua  | xxx         | xx              | -                     | -           |
|                                      | - Temperatura ambiente  | xxx         | xx              | xxx                   | xxx         |

(\*) Para un espesor de referencia de 5 m.

Tabla 3.16. Influencia relativa de las variables en la respuesta térmica de la presa



## **CAPITULO 4**

# **CONSIDERACIONES DE DISEÑO**

### **4.1. INTRODUCCION**

El estudio paramétrico realizado en el capítulo anterior ha puesto de manifiesto la incidencia que, a distintos niveles, presentan en el comportamiento térmico de la presa las distintas variables analizadas, las cuales configuran el modelo de análisis desarrollado. Asimismo, se ha priorizado la influencia relativa de estas variables en cuanto a su incidencia en el comportamiento térmico de la sección y en el comportamiento térmico del paramento de aguas abajo, lo cual proporciona un punto de partida para definir, de entre éstas, cuales son las variables o parámetros principales que rigen, en mayor medida, estos comportamientos térmicos.

En este capítulo y de cara al proyecto y/o explotación se establecen, en su primera parte, los parámetros principales que gobiernan el comportamiento térmico anual de la sección y en función de éstos, adoptados como parámetros de diseño, se proponen dos formulaciones analíticas que proporcionan, respectivamente, la temperatura media anual y el rango anual de la temperatura en la sección. Estas, a su vez, permiten configurar un modelo de comportamiento térmico en diseño que representa la evolución anual de la temperatura media en la sección.

A continuación, se definen los parámetros principales que rigen el comportamiento térmico del paramento de aguas abajo de la presa, destacándose los aspectos particulares que confieren a este paramento un comportamiento térmico diferenciado en relación al experimentado por la sección. Asimismo, se hace una breve referencia a las tensiones térmicas autoequilibradas que en él aparecen como fruto de la no linealidad de la distribución de temperaturas en la sección. Este tratamiento tensional, no contemplado como objetivo principal en este trabajo, tiene por objeto definir un orden de magnitud de las tensiones de origen térmico en explotación y hacer énfasis en la importancia de las mismas.

Finalmente, retomando distintas facetas que se han puesto de manifiesto en el desarrollo de este trabajo, se realizan unas consideraciones relativas a la auscultación térmica de la presa en explotación y se presenta una propuesta alternativa a la práctica usual en la actualidad, encaminada a obtener una óptima información.

## **4.2. CONSIDERACIONES RELATIVAS AL COMPORTAMIENTO TERMICO DE LA SECCION**

### **4.2.1. Consideraciones relativas a la temperatura media anual en la sección**

El estudio paramétrico realizado ha puesto de manifiesto que la temperatura media anual en la sección se ve influenciada por el coeficiente de absorción del hormigón, la inclinación del paramento de aguas abajo, la velocidad del viento, la radiación solar y las temperaturas ambiente y del agua. Asimismo, la influencia relativa de estas variables tiene, tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior, distinta significación siendo, en este sentido, la temperatura ambiente y la temperatura del agua las que afectan en mayor medida la respuesta térmica de la presa en términos de su temperatura media anual.

Estos resultados se han obtenido, para cada parámetro, en función de un intervalo de valores adoptado para el mismo, intervalo éste que se ha definido siguiendo dos criterios básicos; por una parte, que en él se encuentren representados valores posibles del parámetro en cuestión y, por otra parte, que su amplitud represente condiciones extremas en relación a la variable analizada. Ello puede conducir, en algún caso, a que se sobrestime la influencia relativa de la variable.

Así, para la absorción del hormigón su influencia relativa en la temperatura media anual se ha establecido en base a un intervalo definido por los valores extremos de 0,3 y 0,7, cuando, en general, el coeficiente de absorción del hormigón en la presa es previsible que se sitúe alrededor de su valor medio adoptado en las condiciones de referencia (0,5) o bien adopte valores comprendidos en el subintervalo superior (0,5-0,7). Ello conduce a considerar que, en tales circunstancias, la influencia relativa del coeficiente de absorción en la temperatura media anual es pequeña, siendo su orden de magnitud comparable al que presenta la inclinación del paramento de aguas abajo.

Por otro lado, en relación a la incidencia de la velocidad del viento, ya se ha expuesto anteriormente en el apartado correspondiente del estudio paramétrico que su influencia puede quedar en parte modificada debido a la modelización adoptada para esta variable, en el sentido de que su actuación se ha representado mediante un valor medio anual, lo cual dista de la gran aleatoriedad que rige la actuación real de la mencionada velocidad.

De todo ello se deriva que si bien el coeficiente de absorción del hormigón, la inclinación del paramento de aguas abajo y la velocidad del viento influyen en la temperatura media anual, son la temperatura ambiente, la temperatura del agua y, en menor medida que éstas, la radiación solar los tres parámetros principales que determinan la temperatura media anual en la presa.

En consecuencia, considerando valores medios para el conjunto de las variables no principales cuya influencia relativa en la temperatura media anual se ha estimado como nula o pequeña, puede pensarse en expresar la temperatura media anual mediante una función de los tres parámetros principales que muestran mayor incidencia en ella:

$$T_{media} = f_T(H, T_a, T_w) \quad (4.1)$$

siendo

- $T_{media}$ : temperatura media anual en la sección.
- $H$ : radiación solar media anual en el emplazamiento.
- $T_a$ : temperatura ambiente media anual.
- $T_w$ : temperatura media anual del agua.

Adoptando para las variables no principales los valores medios de referencia del estudio paramétrico y manteniendo constante la radiación solar global diaria media anual en el emplazamiento ( $R = 4.608 \text{ wh/m}^2$ ), se ha obtenido la temperatura media anual para una sección de 5,0 m de espesor en función de distintas temperaturas ambiente y del agua. El espesor adoptado no resta generalidad al estudio dado que esta variable no influye en la temperatura media anual; estos resultados se presentan, a continuación, en la tabla 4.1.

Por otra parte, tal y como se deriva del estudio paramétrico realizado, los incrementos de radiación solar anual en el emplazamiento se relacionan cuasi linealmente con los correspondientes incrementos experimentados por la temperatura media anual en la sección, de manera que para un incremento en la radiación solar media anual de  $922 \text{ wh/m}^2$  el correspondiente incremento en la temperatura media anual del hormigón es de  $0,5^\circ\text{C}$ , o lo que es lo mismo, de  $1^\circ\text{C}$  por cada  $1.844 \text{ wh/m}^2$ .

Definiendo el parámetro  $\alpha_t$  como la media de la temperatura ambiente media anual, ( $T_a$ ), y de la temperatura media anual del agua, ( $T_w$ ), es decir:

$$\alpha_t = \frac{T_a + T_w}{2} \quad (4.2)$$

y teniendo en cuenta los incrementos de la temperatura media anual en la sección debidos a los incrementos de radiación solar en el emplazamiento, se obtiene, en base a los resultados expuestos en la tabla 4.1, la temperatura media anual en el hormigón en función del parámetro  $\alpha_e$  y de la radiación solar en el emplazamiento; los valores numéricos de esta temperatura se exponen, seguidamente, en la tabla 4.2.

| T-Ambiente (°C)<br>( $T_a$ ) | T-Agua (°C)<br>( $T_w$ ) | T-Hormigón (°C)<br>( $T_{media}$ ) |
|------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 9,15                         | 6,00                     | 9,7283                             |
| 14,15                        | 6,00                     | 12,3666                            |
| 9,15                         | 15,225                   | 14,3826                            |
| 14,15                        | 10,225                   | 14,3186                            |
| 14,15                        | 15,225                   | 16,8479                            |
| 19,15                        | 15,225                   | 19,3125                            |
| 14,15                        | 20,225                   | 19,3771                            |
| 19,15                        | 20,225                   | 21,8323                            |

Tabla 4.1. Temperatura media anual en la sección ( $e=5,0$  m) en función de la temperatura ambiente media anual y de la temperatura media anual del agua (Radiación solar,  $R=4.608$  wh/m<sup>2</sup>).

| $\alpha_e = \frac{T_a + T_w}{2}$ (°C) | Temperatura media Anual (°C)  |                               |                               |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                                       | $R = 3.686$ wh/m <sup>2</sup> | $R = 4.608$ wh/m <sup>2</sup> | $R = 5.530$ wh/m <sup>2</sup> |
| 7,5750                                | 9,2283                        | 9,7283                        | 10,2283                       |
| 10,0750                               | 11,8666                       | 12,3666                       | 12,8666                       |
| 12,1875                               | 13,8826                       | 14,3826                       | 14,8826                       |
| 14,6875                               | 16,3479                       | 16,8479                       | 17,3479                       |
| 17,1875                               | 18,8125                       | 19,3125                       | 19,8125                       |
| 19,6875                               | 21,3323                       | 21,8323                       | 22,3323                       |

Tabla 4.2. Temperatura media anual en la sección ( $e=5,0$  m), en función del parámetro  $\alpha_e$  y de la radiación solar en el emplazamiento.

Estos valores son susceptibles de ser representados en un sistema cartesiano rectangular llevando sobre el eje de abscisas los valores del parámetro  $\alpha_e$  y sobre el eje de ordenadas los correspondientes a la temperatura media anual en la sección; de este modo, en la figura 4.1 se visualiza la variación de la temperatura media anual en el hormigón en función del parámetro  $\alpha_e$ , para cada uno de los valores de la radiación solar media anual considerados.

Esta figura, pone de manifiesto una dependencia de carácter marcadamente lineal

entre la temperatura media anual y el parámetro  $\alpha_p$ , definido éste anteriormente por la semisuma de la temperatura media anual del agua y la temperatura ambiente media anual. Ello conduce a poder formular una expresión analítica sencilla que, ajustándose a los valores representados en la figura 4.1, proporciona un acotado orden de magnitud de la temperatura media anual en función de la temperatura media ambiente, de la temperatura media del agua (representados éstas a través del parámetro  $\alpha_p$ ) y de la radiación solar media incidente en el emplazamiento. Así, la temperatura media anual puede expresarse, en una formulación estrictamente matemática, mediante la relación

$$T_{media} = 2,26991 + \left( \frac{R_o - 4.608}{1.844} \right) + 0,993252 \alpha_p \quad (4.3)$$

obtenida con un coeficiente de correlación de 0,99 y en la cual  $R_o$  es la radiación solar media anual en el emplazamiento expresada en  $wh/m^2$ , cuyo valor puede estimarse a partir de los datos al respecto contenidos en el Atlas de la Radiación Solar en España publicado por el Instituto Nacional de Meteorología (1984).

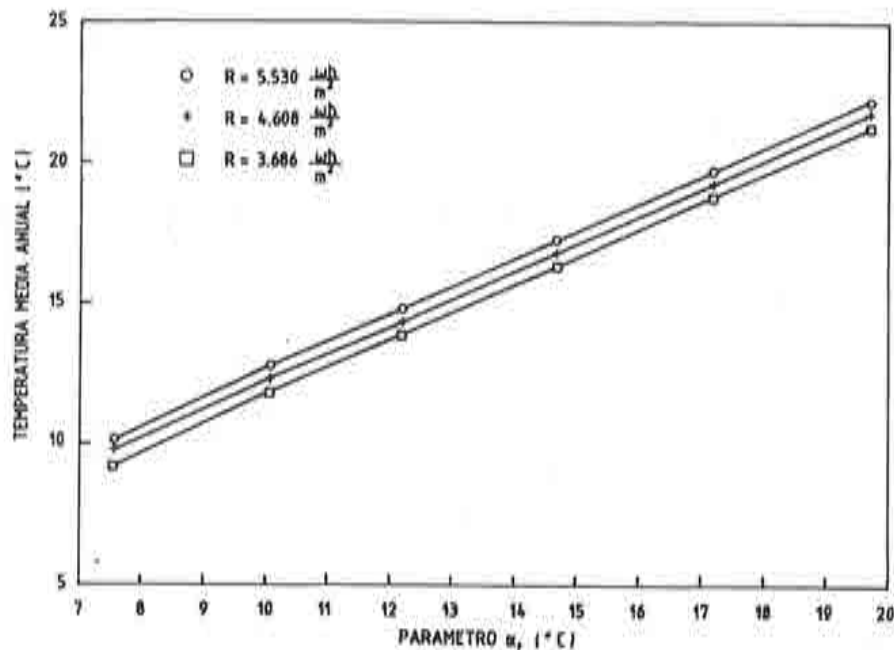


Fig. 4.1. Temperatura media anual en la sección en función del parámetro  $\alpha_p$ , según tres valores distintos de la radiación solar global diaria media anual.

No obstante, desde un punto de vista práctico, cuando se trata de una temperatura media anual en la sección tiene poco sentido una formulación estricta como es la obtenida (4.3) por lo cual, ésta puede escribirse de forma más sencilla y no por ello menos precisa, de acuerdo con la expresión

$$T_{media} = a_o + \alpha_p \quad (4.4)$$

en donde  $a_o$  depende de la radiación solar media anual y viene dado por la relación

$$a_o = 2,30 + \frac{R_o - 4.608}{1.844} \quad (4.5)$$

siendo  $R_o$ , tal y como se ha definido anteriormente, la radiación solar media anual en el emplazamiento expresada en  $wh/m^2$ , y en la cual las temperaturas se expresan en  $^{\circ}C$ .

Por tanto, la relación (4.4) proporciona un acotado orden de magnitud de la temperatura media anual en la sección en función únicamente de las temperaturas medias anuales del agua y del ambiente y de la radiación solar media anual en el emplazamiento.

#### 4.2.2. Consideraciones relativas al rango anual de la temperatura media de la sección

Tal y como se deriva del estudio paramétrico realizado, el rango anual de la temperatura media en la sección depende, fundamentalmente, del espesor de la sección en lo que se refiere a la geometría de la presa y de los rangos anuales de la temperatura ambiente y de la temperatura del agua en relación a la acción térmica ambiental. En este sentido, la radiación solar no afecta significativamente al rango anual de la temperatura media en la sección siendo su influencia de mayor significación cuando se trata del rango anual de la temperatura en el paramento de aguas abajo sobre el cual incide directamente esta acción.

Asimismo, de las propiedades que caracterizan térmicamente al hormigón es su conductividad térmica la que muestra mayor incidencia en el rango anual de la temperatura media si bien esta incidencia es pequeña respecto a la que muestran las variables anteriormente citadas.

En consecuencia, considerando como parámetros principales el espesor de la sección, el rango anual de la temperatura ambiente y el rango anual de la temperatura del agua y adoptando los valores medios de referencia para los parámetros no principales, puede pensarse de forma análoga a como se ha realizado con anterioridad en expresar el rango anual de la temperatura media en la sección mediante una función de los parámetros principales que inciden en él, es decir:

$$R = f_R(e, R_a, R_w) \quad (4.6)$$

en donde:

- $R$  : Rango anual de la temperatura media en la sección.
- $e$  : Espesor de la sección.
- $R_a$  : Rango anual de la temperatura ambiente.
- $R_w$  : Rango anual de la temperatura del agua.

Con este objeto, se han estudiado seis secciones tipo de espesores respectivos 5, 10, 15, 20, 30 y 50 m, los cuales recogen los posibles espesores asociados a distintas tipologías de presas de hormigón. En cada una de estas secciones se ha obtenido el rango anual de la temperatura media en la sección en análogas condiciones en relación a los rangos anuales de la temperatura del agua y de la temperatura ambiente.

Las condiciones adoptadas en lo que hace referencia al rango anual de la temperatura del agua pretenden ser representativas de dos situaciones extremas que corresponden, respectivamente, a un rango anual en superficie ( $R_w = 17^\circ\text{C}$ ) y a un rango anual en profundidad ( $R_w = 2^\circ\text{C}$ ); para cada una de estas situaciones relativas al rango del agua (superficie, profundidad) se han adoptado tres rangos anuales de la temperatura ambiente ( $R_a = 10^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}$ ) como representativos de los posibles rangos anuales de esta temperatura.

De esta forma, se definen las condiciones teóricas para los rangos anuales de la temperatura del agua y de la temperatura ambiente en función de las cuales se obtiene el rango anual de la temperatura media en la sección para cada espesor. En relación a estas condiciones teóricas y en particular a las combinaciones ( $R_w, R_a$ ) en superficie, conviene matizar que éstas pueden no ser todas físicamente concomitantes al estar influenciada la evolución de la temperatura del agua en superficie por la evolución de la temperatura ambiente.

A continuación, en la tabla 4.3 se exponen los resultados así obtenidos mientras que en la figura 4.2 se representan gráficamente estos resultados en términos de variación del rango anual de la temperatura en la sección con el espesor.

| $R_w$<br>( $^\circ\text{C}$ ) | $R_a$<br>( $^\circ\text{C}$ ) | Espesor de la sección (m) |        |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                               |                               | 5                         | 10     | 15    | 20    | 30    | 50    |
| 17,20                         | 10,35                         | 12,704                    | 6,661  | 4,075 | 3,055 | 2,056 | 1,258 |
|                               | 20,35                         | 16,776                    | 8,857  | 5,418 | 4,060 | 2,727 | 1,660 |
|                               | 30,25                         | 20,863                    | 11,051 | 6,760 | 5,064 | 3,400 | 2,065 |
| 2,00                          | 10,35                         | 5,867                     | 3,074  | 1,879 | 1,406 | 0,927 | 0,525 |
|                               | 20,35                         | 9,970                     | 5,269  | 3,223 | 2,410 | 1,598 | 0,925 |
|                               | 30,35                         | 14,106                    | 7,463  | 4,565 | 3,414 | 2,271 | 1,331 |

*Tabla 4.3. Rango anual de la temperatura en la sección ( $^\circ\text{C}$ ) en función del rango anual de la temperatura del agua y del rango anual de la temperatura ambiente, para distintos espesores de la sección.*

Considerando el conjunto de resultados obtenidos puede plantearse obtener, en base a ellos, una expresión que relacione el rango anual de la temperatura en la sección con el espesor y con los rangos anuales de la temperatura del agua y de la temperatura

ambiente, tal como se ha dicho con anterioridad.

La figura 4.2 anteriormente referenciada que muestra que la variación del rango anual de la temperatura con el espesor en las distintas hipótesis adoptadas en relación a los rangos del agua y del ambiente, sugiere, en primera aproximación, adoptar para el rango anual en la sección una expresión del tipo

$$R = \alpha_r \cdot \beta(e) \quad (4.7)$$

en donde  $\alpha_r$  es un coeficiente que recoge la influencia relativa de los rangos anuales de la temperatura del agua y de la temperatura ambiente, y  $\beta(e)$  es una función del espesor.

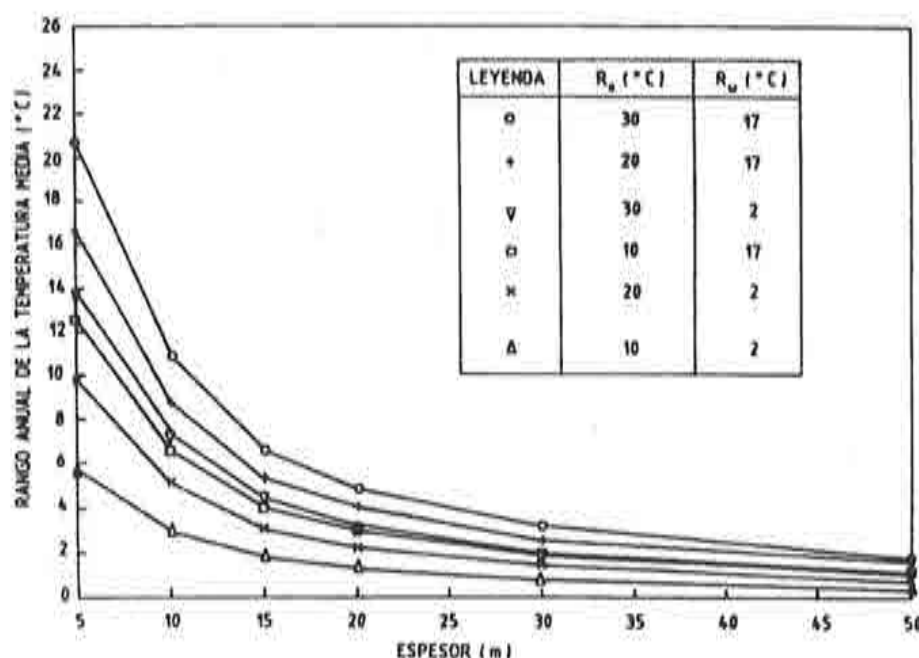


Fig. 4.2. Rango anual de la temperatura en la sección en función del espesor para diferentes rangos anuales de la temperatura ambiente y de la temperatura del agua.

Definiendo el coeficiente  $\alpha_r$  por el valor medio de los rangos anuales de la temperatura ambiente ( $R_a$ ) y de la temperatura del agua ( $R_w$ ),

$$\alpha_r = \frac{Ra + Rw}{2} \quad (4.8)$$

y, teniendo en cuenta los valores del rango anual de la temperatura en la sección obtenidos para cada espesor y para cada par de valores ( $R_a$ ,  $R_w$ ) que definen el correspondiente  $\alpha_r$  (tabla 4.3) puede pensarse en analizar la función  $\beta(e)$  dada por la relación

$$\beta(e_o) = \frac{R(e_o, \alpha_r)}{\alpha_r}, \quad (e_o = 5, 10, 15, 20, 30, 50 \text{ m}) \quad (4.9)$$

en donde  $R(e_o, \alpha_r)$  es el rango anual de la temperatura en la sección de espesor  $e_o$  obtenido para los valores de  $(R_a, R_w)$  que definen  $\alpha_r$ .

| $\alpha_r = \left( \frac{R_a + R_w}{2} \right)$ | $e_o = 5,0 \text{ m}$ |              | $e_o = 10,0 \text{ m}$ |              |
|-------------------------------------------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|
|                                                 | $R(e_o, \alpha_r)$    | $\beta(e_o)$ | $R(e_o, \alpha_r)$     | $\beta(e_o)$ |
| 6,175                                           | 5,867                 | 0,95012      | 3,0774                 | 0,498364     |
| 11,175                                          | 9,970                 | 0,892170     | 5,2690                 | 0,471498     |
| 13,775                                          | 12,704                | 0,922250     | 6,661                  | 0,483557     |
| 16,175                                          | 14,106                | 0,872086     | 7,463                  | 0,461391     |
| 18,775                                          | 16,776                | 0,893528     | 8,857                  | 0,471744     |
| 23,775                                          | 20,863                | 0,877518     | 11,051                 | 0,464815     |

| $\alpha_r = \left( \frac{R_a + R_w}{2} \right)$ | $e_o = 15,0 \text{ m}$ |              | $e_o = 20,0 \text{ m}$ |              |
|-------------------------------------------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|
|                                                 | $R(e_o, \alpha_r)$     | $\beta(e_o)$ | $R(e_o, \alpha_r)$     | $\beta(e_o)$ |
| 6,175                                           | 1,879                  | 0,304291     | 1,406                  | 0,227692     |
| 11,175                                          | 3,223                  | 0,288411     | 2,410                  | 0,215659     |
| 13,775                                          | 4,075                  | 0,295825     | 3,055                  | 0,221778     |
| 16,175                                          | 4,565                  | 0,282225     | 3,414                  | 0,221066     |
| 18,775                                          | 5,418                  | 0,288575     | 4,060                  | 0,216245     |
| 23,775                                          | 6,76                   | 0,284332     | 5,064                  | 0,212996     |

| $\alpha_r = \left( \frac{R_a + R_w}{2} \right)$ | $e_o = 25,0 \text{ m}$ |              | $e_o = 50,0 \text{ m}$ |              |
|-------------------------------------------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|
|                                                 | $R(e_o, \alpha_r)$     | $\beta(e_o)$ | $R(e_o, \alpha_r)$     | $\beta(e_o)$ |
| 6,175                                           | 0,927                  | 0,150121     | 0,525                  | 0,085020     |
| 11,175                                          | 1,598                  | 0,142997     | 0,925                  | 0,082774     |
| 13,775                                          | 2,056                  | 0,149255     | 1,258                  | 0,091324     |
| 16,175                                          | 2,271                  | 0,140401     | 1,331                  | 0,082287     |
| 18,775                                          | 2,727                  | 0,145246     | 1,660                  | 0,088415     |
| 23,775                                          | 3,400                  | 0,143007     | 2,065                  | 0,086855     |

Tabla 4.4. Coeficiente  $\beta(e_o)$  en función de  $\alpha_r$  y del rango anual de la temperatura en la sección.

Los resultados expuestos en la tabla 4.4 indican que la función  $\beta(e_o)$  varía muy poco en cada espesor, siendo los valores medios de la misma y las respectivas desviaciones típicas para cada espesor las que se muestran seguidamente en la tabla 4.5, en la cual se pone de manifiesto que la desviación típica es siempre, en cualquier espesor, inferior al 3,5% del valor medio correspondiente.

| $e_o(m)$ | $\beta_{\text{media}}(e_o)$ | $\sigma\beta(e_o)$ |
|----------|-----------------------------|--------------------|
| 5,0      | 0,901279                    | 0,027034           |
| 10,0     | 0,475228                    | 0,012453           |
| 15,0     | 0,290610                    | 0,007450           |
| 20,0     | 0,217573                    | 0,005609           |
| 30,0     | 0,145171                    | 0,003496           |
| 50,0     | 0,086113                    | 0,003162           |

Tabla 4.5. Valores medios y desviaciones típicas de  $\beta(e_o)$

Asimismo, en la figura 4.3 se visualizan los valores medios de  $\beta(e_o)$  obtenidos para cada uno de los espesores  $e_o$  considerados en este estudio.

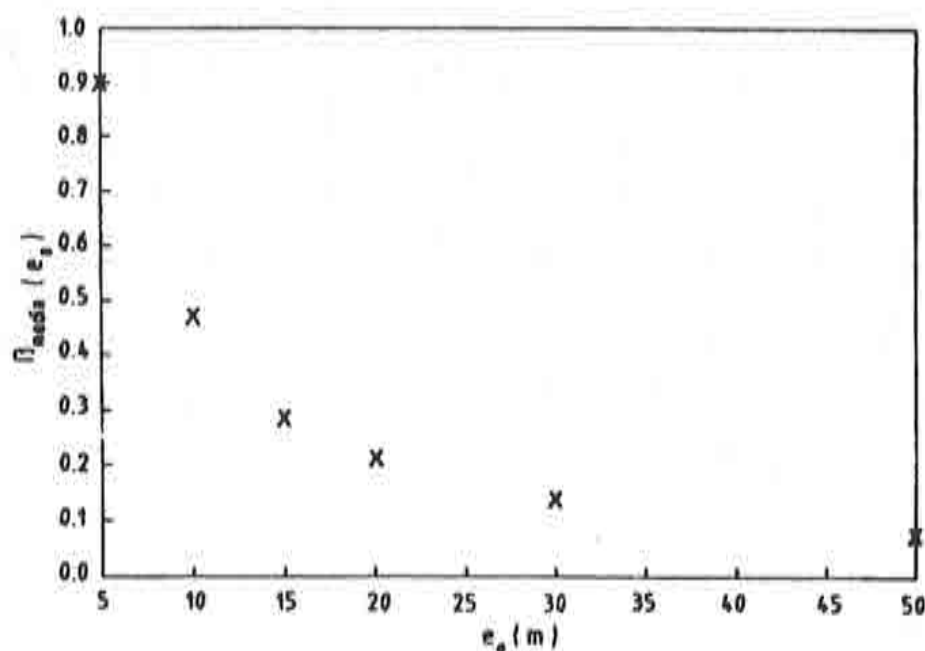


Fig. 4.3. Valores medios de  $\beta(e_o)$ .

Adoptando para cada espesor el valor medio de  $\beta(e_o)$  como representativo del valor que toma en él la función del espesor  $\beta(e)$ , ésta función puede aproximarse por la relación

$$\frac{1}{\beta(e)} = -0,12410 + 0,23459 \cdot e \quad (4.10)$$

obtenida con un coeficiente de correlación de 0,99 y en la cual  $e$ , es el espesor de la sección expresado en metros, o bien estimarse de forma discreta para cada espesor según los valores medios de  $\beta(e_o)$  que figuran en la tabla 4.5, e interpolando linealmente para los espesores intermedios comprendidos entre los que figuran en la citada tabla.

Por tanto, la relación (4.7) permite obtener un orden de magnitud del rango anual de la temperatura alcanzada en la sección en función de su espesor ( $\beta(e_o)$ ) y de los rangos anuales de la temperatura ambiente y de la temperatura del agua ( $\alpha_r$ ).

#### 4.2.3. Consideraciones relativas al comportamiento térmico anual de la sección

Los apartados precedentes (4.2.1 y 4.2.2) han puesto de manifiesto que puede obtenerse un orden de magnitud de la temperatura media anual y del rango anual de la temperatura en cualquier sección de la presa en función del valor medio anual de la radiación solar global en el emplazamiento, de la temperatura ambiente media anual, de la temperatura media anual del agua y de los rangos anuales de estas temperaturas, parámetros éstos que rigen en gran medida el comportamiento térmico anual de la sección.

Estos parámetros, para una presa determinada, pueden ser estimados según distintas fuentes. Así, el valor medio anual de la radiación solar en el emplazamiento puede obtenerse, tal y como se ha expuesto anteriormente, en función de la localización geográfica de la presa a partir de los datos publicados por el Instituto Nacional de Meteorología recogidos en el Atlas de la Radiación Solar en España (1984) mientras que en relación a la temperatura ambiente media anual y a su rango anual éstos pueden obtenerse de los registros de la temperatura ambiente que habitualmente se toman en la propia presa o bien de los datos publicados por el Instituto Nacional de Meteorología (1982, 1983).

Respecto a la temperatura media del agua y a su rango anual, su estimación más fiable será también la obtenida como fruto de registros experimentales en la presa, si bien estos registros no son habituales en gran parte de las presas españolas actualmente en explotación. Por ello, en general será necesario estimar estas variables mediante correlaciones las cuales deberán obtenerse teniendo en cuenta, especialmente para la definición del comportamiento térmico en superficie, la incidencia que pueda presentar el régimen de explotación particular del embalse y la evolución de la temperatura ambiente.

Por otra parte, retomando algunos aspectos relativos a la distribución anual de la temperatura media en la sección ya reseñados en capítulos anteriores, esta distribución presenta un carácter marcadamente sinusoidal alcanzando sus valores extremos anuales en los meses de septiembre-octubre (máximo anual) y de marzo-abril (mínimo anual) dependiendo fundamentalmente del espesor de la sección y de las condiciones térmicas ambientales. En este sentido el espesor es la variable geométrica que rige los desfases existentes en el tiempo entre los valores extremos de la acción térmica ambiental y las

temperatura extremas que se alcanzan en la sección, los cuales son representativos de la inercia térmica de la presa.

Por tanto, una vez estimados los parámetros que determinan la temperatura media anual y el rango anual de la temperatura para cada espesor correspondiente a las distintas cotas de la sección transversal de la presa, mediante la relación (4.4) se obtiene la temperatura media anual y mediante la relación (4.7) se obtiene el rango anual de la temperatura en cada espesor (o lo que es lo mismo, en cada cota). Adoptando la hipótesis de que los valores extremos de la temperatura media en la sección en el periodo anual se alcanzan en los meses de marzo-abril (mínimo anual) y de septiembre-octubre (máximo anual), se puede obtener una función sinusoidal, de periodo anual, que permita modelizar la evolución anual de la temperatura media en la sección para cada uno de los espesores (cotas) que se consideren en el análisis térmico de la sección transversal de la presa.

Así, representando los valores extremos de la temperatura media en el periodo anual en función de la temperatura media anual,  $T_{media}$ , y del rango anual de temperatura,  $R$ ,

$$T_{Máx.} = T_{media} + \frac{R}{2} \quad (4.11)$$

$$T_{Mín.} = T_{media} - \frac{R}{2} \quad (4.12)$$

una evolución anual teórica de la temperatura en la sección puede obtenerse mediante la relación

$$T = T_{media} + \frac{R}{2} \operatorname{sen} \left[ \pi \left( \frac{t}{6} - \frac{\varphi_o}{\pi} \right) \right], \quad 1 \leq t \leq 12 \quad (4.13)$$

en donde  $t$  se expresa en meses, siendo el valor  $t = 1$  el correspondiente al mes de enero y  $t = 12$  el que corresponde al mes de diciembre y en la cual  $\varphi_o$  se obtiene en función de los meses en los cuales se alcancen las temperaturas extremas anuales, resultando

$$\varphi_o = 6 \frac{\pi}{6}, \text{ para extremos en marzo y septiembre}$$

$$\varphi_o = 7 \frac{\pi}{6}, \text{ para extremos en abril y octubre}$$

Sustituyendo en (4.13) la temperatura media anual y el rango anual de la temperatura en la sección por sus expresiones obtenidas en función de los parámetros principales que rigen el comportamiento térmico anual de la sección (respectivamente 4.4 y 4.7), se tiene

$$T = a_o + \alpha_t + \frac{\alpha_r \cdot \beta(e_o)}{2} \operatorname{sen} \left[ \pi \left( \frac{t}{6} - \frac{\varphi_o}{\pi} \right) \right] \quad (4.14)$$

o lo que es lo mismo

$$T = 2,30 + \frac{R_o - 4.608}{1.844} + \left( \frac{T_a + T_w}{2} \right) + \left( \frac{R_a + R_w}{4} \right) \cdot \beta(e_o) \cdot \sin \left[ \pi \left( \frac{t}{6} - \frac{\varphi_o}{\pi} \right) \right] \quad (4.15)$$

expresión que proporciona la evolución anual de la temperatura media en la sección de espesor  $e_o$  en función de la radiación solar global media anual en el emplazamiento ( $R_o$ ), de la temperatura ambiente media anual ( $T_a$ ), del rango anual de esta temperatura ( $R_a$ ) y de la temperatura media anual del agua ( $T_w$ ) y del rango anual de esta temperatura ( $R_w$ ), estimados los dos últimos en la cota correspondiente al espesor ( $e_o$ ).

La expresión (4.15) que define la evolución anual teórica de la temperatura media en la sección en función de los parámetros de diseño, es susceptible de ser contrastada retomando los datos experimentales y las características geométricas que se han utilizado en el capítulo 2 para la contrastación del modelo de análisis desarrollado de cara a la obtención de la respuesta térmica de la presa en explotación.

Estos datos, para las presas de Baserca, Llauset y Mequinenza son referentes a:

- La geometría de la sección transversal y la disposición de los termómetros ubicados en ella.
- La evolución de la temperatura ambiente.
- La evolución de la temperatura del agua a distintas profundidades.
- La evolución de la temperatura del hormigón en los distintos termómetros de la sección.

mientras que para la presa de Almendra se dispone de todos ellos a excepción de los relativos a la variación de la temperatura del agua con la profundidad. Los datos referidos se han presentado anteriormente en las tablas 2.7, 2.9 y 2.13 y figuras 2.9, 2.15 y 2.23 del mencionado capítulo 2 y por ello no se exponen nuevamente en éste.

En consecuencia, sin mas que estimar la radiación solar en el emplazamiento, para las presas de Baserca, Llauset y Mequinenza se dispone de los registros experimentales necesarios para definir los parámetros de diseño que configuran la evolución anual teórica de la temperatura media en cualquier cota de la sección transversal considerada.

A continuación, en la tabla 4.6 se exponen los valores de los parámetros de diseño obtenidos en tres secciones respectivamente correspondientes a cada una de las citadas presas.

La elección de estas secciones, para las presas de Baserca y de Llauset, obedece a que en ellas los termómetros dispuestos en los puntos centrales del espesor están alejados de las galerías de visita. Respecto a la presa de Mequinenza se ha elegido esta sección

por ser la correspondiente a la cota en la cual hay dispuestos un mayor número de termómetros.

| Presa      | $e_o$<br>(m) | $T_a$<br>(°C) | $R_a$<br>(°C) | $T_w$<br>(°C) | $R_w$<br>(°C) | $R_o^*$<br>(wh/m²) |
|------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|
| Baserca    | 19,0         | 7,5           | 19,7          | 5,0           | 4,6           | 3.892              |
| Llauset    | 16,0         | 3,6           | 18,5          | 3,8           | 2,8           | 3.892              |
| Mequinenza | 17,5         | 14,1          | 20,4          | 12,6          | 15,0          | 4.608              |

(\*) Valor obtenido del Atlas de la Radiación solar en España (1984).

Tabla 4.6. Valores de los parámetros de diseño que definen la evolución anual teórica de la temperatura media en la sección.

Por otra parte, en relación a los registros experimentales de la temperatura en el hormigón, éstos corresponden a las temperaturas puntuales en cada termómetro. Ello conduce a tener que adoptar un criterio para determinar la temperatura media de la sección en función de los registros puntuales obtenidos en los termómetros ubicados en ella.

Un criterio para evaluar la temperatura media de la sección es el de definir esta temperatura por la media ponderada en el espesor de las temperaturas puntuales según la regla del trapecio (figura 4.4), con lo cual la temperatura media en la sección se expresa por:

$$T_M = \frac{\left(\frac{T_o + T_1}{2}\right) h_1 + \left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right) h_2 + \dots + \left(\frac{T_{n-1} + T_n}{2}\right) h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \quad (4.16)$$

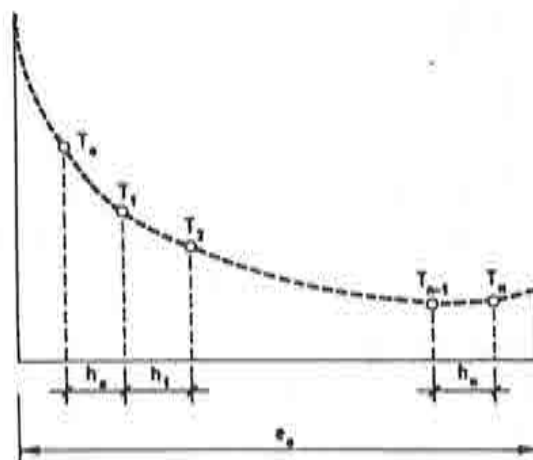


Fig. 4.4. Definición de la temperatura media en la sección en función de los registros puntuales de la temperatura.

En la tabla 4.7 que se presenta seguidamente, se explicitan para cada presa los termómetros correspondientes a las secciones en las que se ha planteado la contrastación.

| Presa      | Cota (m) | Termómetros         |
|------------|----------|---------------------|
| Baserca    | 1.365,0  | T62, T63, T64       |
| Llauset    | 2.132,0  | T51, T52, T53       |
| Mequinenza | 99,6     | T3, T4, T5, T9, T10 |

Tabla 4.7. Termómetros empleados para la definición de la temperatura media experimental.

Por tanto, siguiendo el método expuesto, se está en condiciones de comparar la evolución anual de la temperatura media en la sección que predice la formulación teórica propuesta con los valores de la temperatura media en la sección obtenidos como fruto de los registros experimentales en el hormigón. En las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se visualizan, respectivamente, los resultados obtenidos para las presas de Baserca, Llauset y Mequinenza.

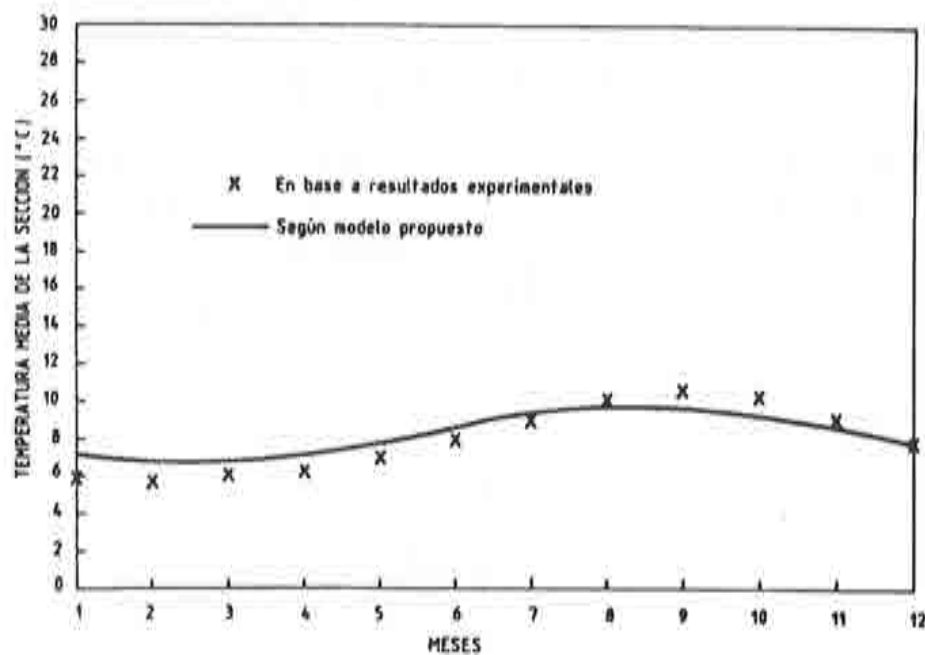


Fig. 4.5. Variación anual de la temperatura media de la sección. Presa de Baserca.

Los resultados presentados en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 ponen de manifiesto en conjunto que la formulación teórica propuesta es capaz de reproducir adecuadamente la evolución anual de la temperatura media en la sección para distintos espesores y diferentes condiciones térmicas ambientales. Asimismo, estos resultados muestran cuantitativamente que el error medio anual referido a las temperaturas experimentales se sitúa entre los valores extremos de un 3,5% en la presa de Baserca y de un 12% para

la de Mequinenza, siendo el error obtenido para la presa de Llauset de un 10,5%.

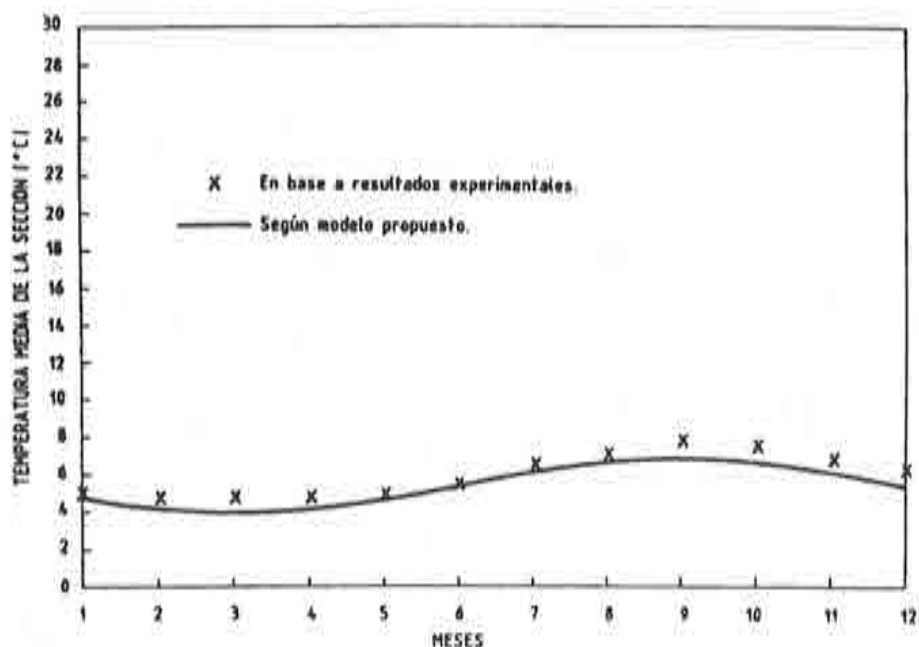


Fig. 4.6. Variación anual de la temperatura media de la sección. Presa de Llauset.

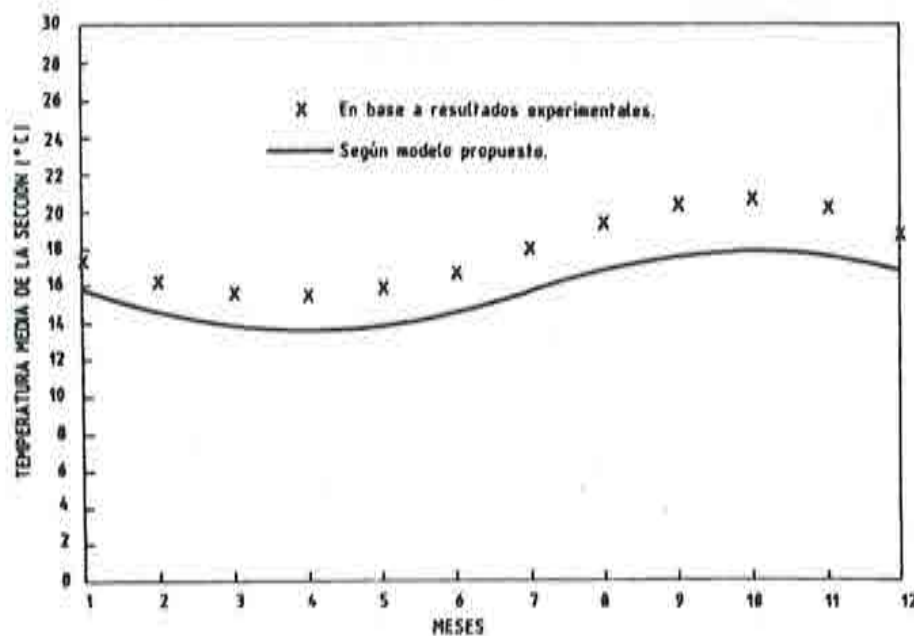


Fig. 4.7. Variación anual de la temperatura media de la sección. Presa de Mequinenza.

Por tanto, la relación (4.15) proporciona una herramienta útil de cara a la obtención de la evolución anual de la temperatura media en cualquier cota de la sección transversal de la presa en función de su geometría y de los parámetros ambientales de diseño

anteriormente expuestos los cuales son, todos ellos, susceptibles de ser evaluados mediante registros experimentales externos a la presa.

#### **4.3. CONSIDERACIONES RELATIVAS AL COMPORTAMIENTO TERMICO DEL PARAMENTO DE AGUAS ABAJO**

El modelo desarrollado para el análisis del comportamiento térmico de la presa en explotación contempla el paramento de aguas abajo como el paramento sobre el cual inciden directamente las variables climáticas y ambientales que configuran la acción térmica sobre la presa (radiación solar, temperatura ambiente, velocidad del viento, reflexión del entorno); estas variables, tal y como se deriva del estudio paramétrico realizado, determinan en gran medida el comportamiento térmico del mencionado paramento. Asimismo, otros parámetros como son la absorción térmica del hormigón, la inclinación del propio paramento y el acimut afectan también el comportamiento térmico del paramento de aguas abajo tanto en lo que se refiere a la temperatura en él alcanzada como al rango de esta temperatura.

Por otra parte, la temperatura ambiente y la radiación solar, además de variaciones estacionales o anuales, experimentan variaciones diarias cuyo efecto recibe directamente el paramento de aguas abajo y que repercuten en una zona de influencia que puede acotarse en el entorno de los 0,80 m como orden de magnitud. También, este comportamiento térmico del paramento se ve directamente afectado por la aleatoriedad asociada a la actuación de la acción térmica ambiental, particularmente en lo que concierne a la actuación de la velocidad del viento.

Por tanto, existe una clara diferenciación entre el comportamiento térmico del paramento de aguas abajo de la presa y el comportamiento térmico medio de la sección, en el cual los efectos que inciden localmente sobre el paramento se disipan, en gran medida, a través del espesor.

En consecuencia con las consideraciones expuestas, es poco viable, en principio, establecer una modelización sencilla de la respuesta térmica del paramento de aguas abajo que permita representar adecuadamente la incidencia de los distintos aspectos de carácter local que rigen el comportamiento térmico del citado paramento.

No obstante, si bien no es objeto principal de este trabajo entrar en temas tensionales, puede obtenerse un orden de magnitud del efecto derivado de la actuación de la acción térmica ambiental sobre el paramento de aguas abajo en términos de las tensiones autoequilibradas que en él se originan como fruto de la no linealidad de la distribución de temperaturas en la sección.

Estas tensiones pueden evaluarse, en cada sección correspondiente a una determinada cota, en función de la distribución no lineal de temperaturas en la sección y de la distribución lineal obtenida mediante un plano equivalente de deformaciones, del

módulo de deformación del hormigón y de su coeficiente de expansión térmica. En la figura 4.8 se visualizan cualitativamente ambas distribuciones de temperaturas para una sección tipo de espesor  $e_o$ .

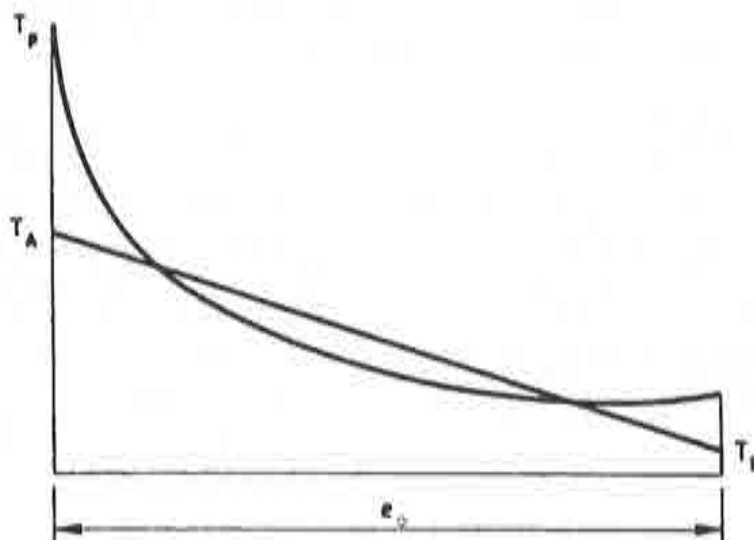


Fig. 4.8. Distribución no lineal de temperaturas y distribución lineal equivalente.

Designando por  $T_p$  la temperatura del paramento de aguas abajo como resultado de la no linealidad de la distribución de temperaturas en la sección y por  $T_A$  la temperatura que se alcanza en él en virtud de la distribución lineal equivalente, la tensión autoequilibrada en el paramento,  $\sigma_p$ , se expresa por la relación

$$\sigma_p = \alpha \cdot E \cdot (T_p - T_A) \quad (4.17)$$

en la cual  $\alpha$  es el coeficiente de dilatación térmica del hormigón y  $E$  su módulo de deformación y en donde para  $(T_p - T_a) > 0$  resultan tensiones de compresión.

Al objeto anteriormente expuesto de obtener un orden de magnitud extremo de las tensiones autoequilibradas en el paramento de aguas abajo, se han considerado dos secciones tipo de espesores respectivos 5,0 m y 50,0 m sometidas a una acción térmica configurada, en lo que concierne a su actuación sobre el paramento de aguas abajo, por una radiación solar elevada, una velocidad del viento baja y un rango anual de la temperatura ambiente elevado, factores todos ellos que incrementan la diferencia entre la temperatura en el paramento obtenida según la ley lineal equivalente y la temperatura obtenida mediante el modelo (considerando la no linealidad de la distribución de temperaturas en la sección).

Respecto a la temperatura del agua, para la sección de 5,0 m de espesor se han adoptado unas condiciones representativas de un comportamiento térmico en superficie mientras que para el espesor de 50,0 m se han adoptado las correspondientes a un

comportamiento térmico en profundidad.

De esta manera se ha obtenido en cada sección la evolución diaria de las tensiones autoequilibradas en dos días respectivamente representativos de los meses de enero y de julio, en los cuales se presentan situaciones extremas en el periodo anual en relación a la actuación de la acción térmica sobre el paramento de aguas abajo; asimismo, para ello se han adoptado unos valores medios del coeficiente de dilatación térmica del hormigón ( $\alpha = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) y de su módulo de deformación ( $E = 2 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2$ ).

A continuación, en la figura 4.9 se visualiza la evolución de la tensión autoequilibrada obtenida que aparece en el paramento de aguas abajo durante las 24 horas de cada uno de los días analizados y en cada una de las secciones consideradas.

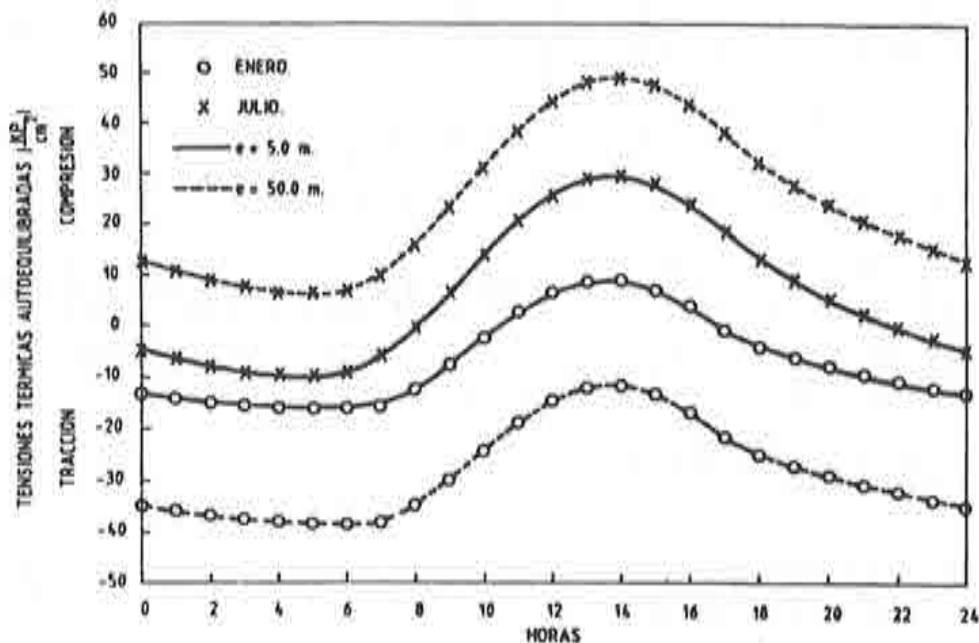


Fig. 4.9. Variación diaria de la tensión térmica autoequilibrada en el paramento de aguas abajo.

La figura anteriormente referenciada, pone de manifiesto la existencia de unos valores máximo y mínimo diarios de la tensión en el paramento de aguas abajo cuya magnitud y sentido (tracción, compresión) dependen del espesor de la sección y del día representativo del mes analizado; estos valores extremos diarios de la tensión se exponen, seguidamente, en la tabla 4.8.

Los valores que se recogen en la tabla 4.8 dependen, tal y como se ha expuesto anteriormente, del coeficiente de dilatación térmica del hormigón y del módulo de deformación que se adopten para el cálculo tensional. Ello conduce a que las tensiones presentadas en la citada tabla sean, en este sentido, susceptibles de variar según se estimen estos parámetros relativos al hormigón.

| Tensiones<br>(kp/cm <sup>2</sup> ) | Enero               |                      | Julio               |                      |
|------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
|                                    | $e = 5,0 \text{ m}$ | $e = 50,0 \text{ m}$ | $e = 5,0 \text{ m}$ | $e = 50,0 \text{ m}$ |
| $\sigma_{\max}$                    | 9,0                 | - 11,0               | 30,0                | 50,0                 |
| $\sigma_{\min}$                    | - 16,0              | - 38,0               | - 10,0              | 6,0                  |

Tabla 4.8. Tensiones máximas y mínimas diarias en el paramento de aguas abajo.

No obstante, entendiendo los resultados presentados en términos de orden de magnitud, éstos indican que las variaciones diarias de la acción térmica ambiental provocan en el paramento de aguas abajo unas tensiones autoequilibradas que no son desdeñables, en particular las de tracción, sobre las cuales conviene llamar la atención especialmente debido al hecho de que éstas o bien son infravaloradas o bien no se tienen en cuenta generalmente en el cálculo de la presa.

En el paramento de aguas arriba, y en condiciones de embalse lleno, las tensiones térmicas autoequilibradas que en él aparecen son de cuantía y rango de variación notablemente inferiores a las que se suscitan en el paramento de aguas abajo.

Contemplando la actuación de la acción térmica ambiental en el contexto de los ciclos diarios que pueden tener lugar durante la vida útil de la presa, cabe plantearse la posibilidad de que la acción térmica ambiental sea capaz, por sí misma, de causar deterioros en el paramento de aguas abajo fruto de las fluctuaciones en el tiempo de las tensiones autoequilibradas que aparecen en el citado paramento, derivadas éstas de la no linealidad de la distribución de temperaturas en la sección.

#### 4.4. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA AUSCULTACION TERMICA DE LA PRESA EN EXPLOTACION

Actualmente la auscultación térmica de la presa en explotación se desarrolla, en líneas generales, siguiendo dos vías paralelas de actuación. Por una parte, mediante registros internos que proporcionan puntualmente la temperatura alcanzada en el hormigón y, por otra parte, mediante registros externos relativos, principalmente, a la temperatura ambiente y, con menor frecuencia, a la temperatura del agua.

Los registros internos de la temperatura en la presa se obtienen como fruto de la instrumentación interna, la cual se materializa por medio de termómetros de distinto tipo. Estos termómetros se ubican en diferentes secciones transversales de la presa; dentro de una misma sección transversal, se disponen, a su vez, a distintas cotas. Su disposición en una de estas cotas a lo largo del espesor es generalmente selectiva en el sentido de que suelen distribuirse entre puntos centrales y puntos distantes del orden de 1,5 m de los paramentos.

Los registros térmicos obtenidos se traducen en términos de un seguimiento en el tiempo de la evolución puntual de la temperatura en cada termómetro, obteniéndose en base a ellos las líneas isotermas mediante las cuales se representan los distintos estados térmicos que se suceden en la presa. Estas líneas se construyen interpolando entre las temperaturas registradas en los diferentes termómetros, lo cual conduce, en general, a interpolar con un número no grande de puntos base el cual, en ocasiones, se ve disminuido al tenerse que descartar registros por causa de anomalías en los termómetros, anomalías estas que pueden presentarse con cierta frecuencia.

No obstante a lo anteriormente expuesto, es conveniente destacar el hecho de que si se contemplan en su conjunto las numerosas presas de hormigón que están actualmente en explotación en nuestro país, son pocas las presas que disponen de instrumentación térmica interna.

Si bien lo anteriormente descrito es lo usual cuando se utilizan medidas directas de temperatura en el hormigón (termómetros), también puede analizarse indirectamente su incidencia a través de mediciones de alineaciones y/o nivelaciones mediante bases situadas en coronación o en otras cotas.

La situación actual de obtención de datos térmicos en la presa en explotación es claramente mejorable como consecuencia de los trabajos presentados en los capítulos anteriores, lo cual conduce a realizar una propuesta en esta línea. Dicha propuesta se expresa a continuación.

El estudio realizado en este trabajo ha puesto de relieve que el comportamiento térmico medio a nivel sección depende, fundamentalmente, de las temperaturas ambiente y del agua, de los rangos de variación de estas temperaturas y de la radiación solar en el emplazamiento, parámetros todos ellos susceptibles de ser registrados exteriormente a la presa. En este sentido, ya se ha expuesto anteriormente que la influencia relativa de la velocidad del viento se rige, en gran medida, por la aleatoriedad y por el eminente carácter local de su actuación.

Asimismo, se han destacado los comportamientos térmicos particulares tanto del paramento de aguas abajo como de las zonas interiores próximas a las galerías de visita. En este sentido, el comportamiento térmico del paramento de aguas abajo viene condicionado, en gran medida, por los ciclos térmicos diarios que repercuten directamente en él y en un entorno próximo, el cual se ha acotado en un orden de magnitud de 0,80 m; respecto a las zonas interiores próximas a galerías, su comportamiento térmico difiere del de otras zonas interiores a la presa debido a que en aquéllas su proximidad a galerías supone una significativa modificación de las condiciones térmicas de contorno.

Todo ello conduce, por una parte, a plantearse la posibilidad de potenciar la instrumentación externa en la presa frente a la actualmente existente, la cual se limita, en la mayoría de las presas en explotación, a los registros periódicos de la temperatura

ambiente. En este sentido, además de la temperatura ambiente que se registra habitualmente, es necesario registrar la temperatura del agua y, especialmente, la variación de esta temperatura con la profundidad, la radiación solar en el emplazamiento y la velocidad del viento.

La información así obtenida proporcionará, en cada presa, los parámetros que rigen, en gran medida, el comportamiento térmico medio de cada sección. Asimismo, esta instrumentación externa no supone en conjunto un coste excesivamente elevado y presenta la ventaja de ser accesible para las operaciones de control y mantenimiento de la misma.

Por otra parte, respecto a la instrumentación interna, ésta deberá orientarse, primordialmente, en el sentido de que permita reflejar los comportamientos térmicos particulares. Así, con este objeto, será de utilidad disponer un mayor número de termómetros en el entorno próximo al paramento de aguas abajo (0,80 m) y sobre el propio paramento. En relación a las zonas próximas a galerías, la disposición de termómetros deberá hacerse teniendo en cuenta que las temperaturas que se registran en ellos no son representativas de la temperatura media de la sección. A continuación, en la tabla 4.9 se resumen los distintos aspectos relativos a la instrumentación térmica que se han expuesto con anterioridad.

| Instrumentación térmica | Objeto principal                      | Variables a medir                                                                                                                                                                             |
|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Externa                 | Comportamiento térmico medio          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura ambiente</li> <li>- Temperatura del agua a distintas profundidades</li> <li>- Radiación solar</li> <li>- Velocidad del viento</li> </ul> |
| Interna                 | Comportamientos térmicos particulares | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperaturas en el hormigón</li> <li>* paramento de aguas arriba y zonas próximas a él</li> <li>* zonas próximas galerías (*)</li> </ul>             |

(\*) Con las matizaciones anteriormente expuestas.

*Tabla 4.9. Propuesta de instrumentación térmica de la presa en explotación.*

Todo ello conforma una propuesta de instrumentación térmica de la presa en explotación, la cual supone en su conjunto un cambio de filosofía en relación a los criterios con los que ésta se realiza actualmente.

Ello representa, en relación a la instrumentación interna, una redistribución de termómetros respecto a la situación actual en el sentido de reducir el número de

termómetros en las zonas centrales de una sección y llevarlos hacia el paramento. Seguidamente, en la figura 4.10 se esquematiza la instrumentación propuesta para la presa en explotación.

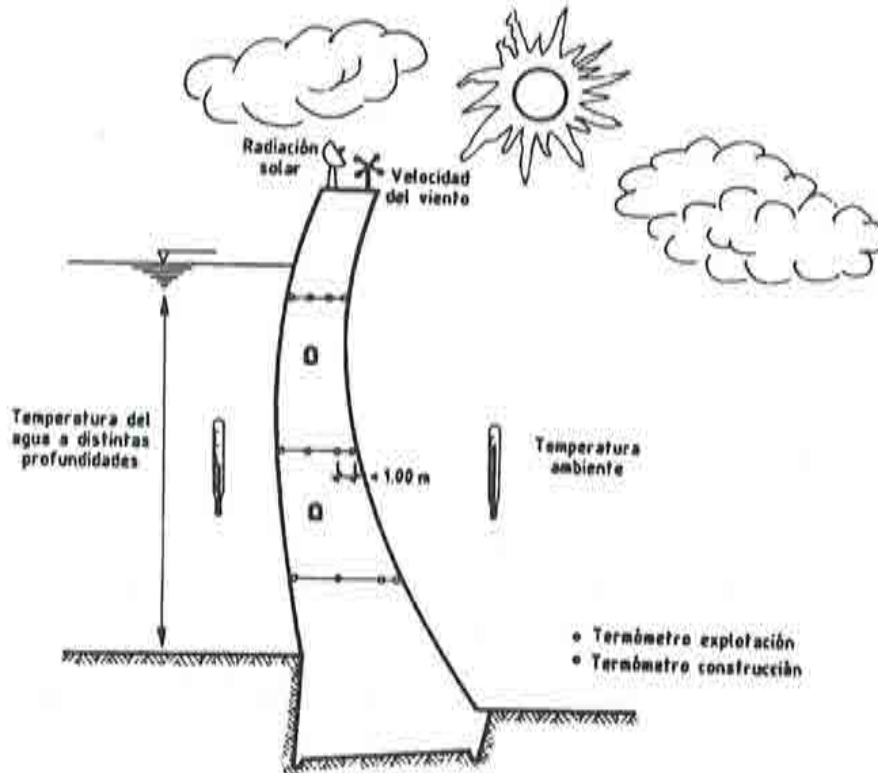


Fig. 4.10. Esquema de la instrumentación propuesta para la presa.

Finalmente, es destacable el interés que puede tener la instrumentación térmica externa en un contexto más amplio que el estrictamente térmico en el cual se ha desarrollado el presente trabajo. Así, ésta puede ser de utilidad cuando se trata de analizar globalmente comportamientos anómalos (p.ej.: los derivados de una expansión del material) que puedan presentarse en presas más antiguas en las que no se dispone de registros internos de temperatura y cuya auscultación suele estar limitada a registros de la temperatura ambiente y al control de niveles de embalse y movimientos en coronación. En estos casos, mediante los datos proporcionados por la auscultación térmica exterior puede estimarse bien el comportamiento térmico de la presa y, en base a éste, determinar un orden de magnitud de los corrimientos en coronación imputables al estado térmico. Estos corrimientos, junto a los derivados de la acción del empuje del agua embalsada, permitirán realizar un contraste sistemático con los corrimientos en coronación obtenidos como resultado de la auscultación de la presa. De esta manera podrá obtenerse, en términos de corrimientos, un orden de magnitud de este efecto anómalo y de su evolución en el tiempo lo cual proporciona un punto de partida para analizar las consecuencias que puedan derivarse de su actuación en orden a establecer un nivel de daños admisible en la presa.



## **CAPITULO 5**

### **CONCLUSIONES**

#### **5.1. INTRODUCCION**

En este capítulo se exponen, las conclusiones que se derivan de los distintos estudios desarrollados a lo largo de este trabajo. Estas conclusiones se presentan en forma de conclusiones generales y de conclusiones específicas.

Las conclusiones generales responden al cumplimiento de los objetivos principales que han guiado el desarrollo de este trabajo. Estos, se han dirigido, por una parte, al desarrollo de un modelo numérico capaz de reproducir adecuadamente las temperaturas que se alcanzan en la presa, el cual ha permitido, en base a un exhaustivo estudio paramétrico, definir las variables principales que gobiernan el comportamiento térmico de la presa en explotación. Por otra parte, como fruto de este estudio, a formular una propuesta de cara al proyecto y a la explotación de la presa.

Las conclusiones específicas obedecen a distintos aspectos concretos referentes a los estudios que se han realizado encaminados a conseguir los objetivos propuestos.

## 5.2. CONCLUSIONES GENERALES

- El modelo numérico desarrollado para la obtención de la respuesta térmica de la presa en explotación está basado en un esquema explícito de diferencias finitas. Este, constituye un modelo sencillo el cual, contemplando la presencia de distintas variables que caracterizan al hormigón, al emplazamiento y a la geometría de la presa y a la acción térmica ambiental, proporciona la temperatura en los nodos de la malla de discretización en cualquier instante.

El modelo permite representar bien el comportamiento térmico de la presa tal y como muestran los resultados obtenidos fruto de la contrastación de las temperaturas que él predice con los registros térmicos experimentales de distintas presas españolas actualmente en explotación correspondientes a diferentes emplazamientos y tipologías (Almendra, Baserca, Llauset y Mequinenza).

- La realización de un amplio y exhaustivo estudio paramétrico, ha enmarcado el estudio de la influencia relativa que presentan sobre la distribución de temperaturas en la presa las variables que contempla el modelo. Este estudio ha puesto de manifiesto la existencia de un grupo de parámetros principales que gobiernan, en mayor medida, su comportamiento térmico.

La temperatura media anual de la sección depende, fundamentalmente, de la temperatura ambiente media anual, de la temperatura media anual del agua y de la radiación solar global diaria media anual en el emplazamiento.

El rango anual de la temperatura media de la sección se ve primordialmente influenciado por su espesor y por los rangos anuales de la temperatura ambiente y de la temperatura del agua.

Ambas variables son las que configuran el comportamiento térmico medio anual de la sección.

El comportamiento térmico del paramento de aguas abajo, si bien se rige en gran medida por la temperatura ambiente se ve asimismo influenciado de forma significativa por la radiación solar, la velocidad del viento, la reflexión del entorno, la inclinación y orientación (acimut) del paramento y la absortividad del hormigón.

- El modelo numérico desarrollado, una vez contrastado y definidas las variables principales que gobiernan el comportamiento térmico de la presa, ha sido utilizado para realizar una propuesta encaminada hacia el proyecto y la explotación de la presa. Adoptando como parámetros principales las temperaturas medias anuales ambiente y del agua, los rangos anuales de estas temperaturas, la radiación solar global diaria media anual y el espesor de la sección, se han obtenido sendas formulaciones analíticas que proporcionan la temperatura media anual y el rango anual de la temperatura media en la sección.

Ambas formulaciones configuran el nuevo modelo teórico propuesto para representar el comportamiento térmico medio de la sección. Este permite predecir, tanto en proyecto como en explotación, la evolución anual de la temperatura media en cualquier sección en función de su geometría (espesor), de la radiación solar global diaria media anual en el emplazamiento, de la evolución anual de la temperatura ambiente y de la evolución anual de la temperatura del agua a distintas cotas.

El nuevo modelo que se propone para obtener las temperaturas medias de la sección se ha contrastado satisfactoriamente con las temperaturas medias obtenidas mediante registros experimentales en distintas secciones correspondientes a las presas de Baserca, Llauset y Mequinenza.

La sencillez de su formulación matemática, el pequeño número de parámetros que lo definen y el buen comportamiento mostrado en su contrastación hacen que el modelo propuesto sea una herramienta útil tanto de cara al proyecto como a la explotación de la presa.

- La utilización del modelo en explotación conduce a una propuesta alternativa en relación al planteamiento actual de la auscultación térmica de la presa.

Esta propuesta va encaminada, por una parte, a potenciar la instrumentación externa registrando experimentalmente los parámetros que determinan el comportamiento térmico medio de la presa los cuales, a excepción del espesor, son todos ellos susceptibles de ser medidos exteriormente a ella. Por otra parte, a una redistribución de los termómetros internos en el sentido de disminuir el número de éstos que se disponen en las zonas centrales de una sección y concentrarlos hacia el paramento a efectos de poder registrar su comportamiento térmico diferenciado respecto al comportamiento medio experimentado por la sección.

### **5.3. CONCLUSIONES ESPECIFICAS**

#### **5.3.1. Conclusiones relativas al modelo numérico de obtención de la respuesta térmica de la presa en explotación**

- El modelo numérico desarrollado para la obtención de la respuesta térmica de la presa en explotación, basado en un esquema explícito en diferencias finitas destaca por su sencillez y escaso tiempo de cálculo en ordenador.
- Las condiciones de convergencia y estabilidad numéricas referentes al método explícito de diferencias finitas son más restrictivas en el nodo exterior en el cual se impone la condición de contorno de flujo prescrito que en los nodos interiores. Asimismo, el incremento de tiempo adoptado en el cálculo asegura la convergencia y estabilidad de la solución numérica.

- El tiempo total de análisis debe ser lo suficientemente amplio para que la solución que represente la temperatura en la presa sea tal que no varíe en dos años consecutivos. El estudio realizado al respecto indica que el tiempo total de análisis debe ser superior a cinco años.
- El modelo desarrollado representa bien la inercia térmica de la presa, aspecto éste de capital importancia cuando se analiza el comportamiento térmico de la presa en explotación.
- La implementación numérica de las distintas variables climáticas y ambientales que configuran el modelo permite representar la acción térmica ambiental sobre la presa en cada cota de cualquier sección transversal. En particular, se obtiene la radiación solar horaria incidente sobre el paramento de aguas abajo (superficie inclinada y orientada) a partir de la radiación solar global diaria en el emplazamiento (superficie horizontal).
- El modelo numérico desarrollado permite, sin modificaciones sustanciales, contemplar la presencia de galerías así como analizar el comportamiento térmico de la presa en condiciones de embalse vacío.

### **5.3.2. Conclusiones relativas a la influencia de los parámetros que caracterizan al hormigón, a la geometría y al emplazamiento de la presa y a la acción térmica ambiental**

- De entre los parámetros que caracterizan térmicamente al hormigón, son su conductividad térmica y su absorptividad o coeficiente de absorción los que muestran mayor incidencia en el comportamiento térmico de la presa.

La conductividad térmica del hormigón afecta, principalmente, al rango anual de la temperatura media de la sección en el sentido de que este rango aumenta cuando lo hace la conductividad térmica. Ello se traduce, dentro del período anual, en un incremento de la temperatura media mensual máxima y, a su vez, en una disminución de la temperatura media mensual mínima.

En cuanto al coeficiente de absorción, éste influye sobre las temperaturas del paramento de aguas abajo y en las temperaturas medias de la sección. Sin embargo, para el rango de valores de esta propiedad en el hormigón de la presa (0,5-0,7) su influencia es pequeña, siendo ésta algo más relevante en las temperaturas alcanzadas en el paramento de aguas abajo.

- En relación a los parámetros analizados que caracterizan la geometría y el emplazamiento de la presa, es el espesor de la sección la variable principal que condiciona el rango anual de la temperatura media en la sección. Este rango disminuye a medida que aumenta el espesor.

La influencia de la inclinación y de la orientación (acimut) del paramento de aguas abajo es de mayor relieve sobre las temperaturas que se obtienen en el mencionado paramento. En este sentido las temperaturas aumentan cuanto menor es la verticalidad del paramento y más hacia el sur esta orientada la sección.

- Las variables que configuran la acción térmica ambiental que actúa sobre la presa - radiación solar en el emplazamiento, velocidad del viento y temperatura ambiente- influyen en la temperatura del paramento de aguas abajo, y en la temperatura media de la sección así como en su rango anual. Asimismo, la temperatura del agua condiciona también, junto a las mencionadas variables, la evolución de las temperaturas medias alcanzadas en la sección.

En relación al coeficiente de reflexión del entorno, es el que presenta menor incidencia, siendo ésta localizada en las temperaturas que se alcanzan en el paramento de aguas abajo.

- El análisis conjunto de la influencia relativa que presentan las distintas variables en la respuesta térmica de la presa permite priorizar su influencia relativa y definir cuales son, de entre ellas, las variables principales que rigen el comportamiento térmico de la presa en explotación.

En este sentido, la temperatura media anual de la sección depende, fundamentalmente, de las temperaturas medias anuales ambiente y del agua y de la radiación solar global diaria en el emplazamiento. El rango anual de la temperatura media se rige, principalmente, por el espesor de la sección y por los rangos anuales de la temperatura ambiente y de la temperatura del agua. Estas variables, en consecuencia, son las que determinan el comportamiento térmico medio de la sección.

### **5.3.3. Conclusiones relativas al comportamiento térmico del paramento de aguas abajo**

- El comportamiento térmico experimentado por el paramento de aguas abajo se ve influenciado por la absortividad del hormigón, la inclinación y orientación del paramento, el coeficiente de reflexión del entorno, la velocidad del viento, la radiación solar global en el emplazamiento y la temperatura ambiente. De ellas, la radiación solar es la que determina, en mayor medida, la temperatura en el citado paramento.
- El paramento de aguas abajo es el paramento sobre el cual inciden directamente la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento. En consecuencia, las temperaturas que en él se alcanzan se rigen, en gran medida, por las variaciones en el tiempo que puedan presentar estas variables ambientales y, en particular, por sus variaciones diarias.

Este hecho, junto al de que son muchos los parámetros que condicionan su

comportamiento térmico, confiere a la respuesta térmica de la presa en el paramento de aguas abajo un aspecto claramente diferenciado en relación a la respuesta térmica de la presa considerada a nivel sección, en donde gran parte de las influencias térmicas de carácter superficial se disipan a través del espesor.

- Si bien este trabajo se ha centrado fundamentalmente en la respuesta térmica de la presa en términos de las temperaturas que en ella se alcanzan, se ha hecho una breve referencia a las tensiones térmicas autoequilibradas que aparecen en el paramento de aguas abajo como fruto de la no linealidad de la distribución de temperaturas en la sección.

En relación a estas tensiones conviene hacer una llamada de atención sobre los órdenes de magnitud obtenidos y su rango de variación, fruto de las fluctuaciones diarias de la acción térmica ambiental.

#### **5.3.4. Conclusiones relativas al modelo teórico propuesto para representar el comportamiento térmico medio anual de la sección**

- El modelo teórico propuesto predice la temperatura media anual y el rango anual de la temperatura media de la sección; ambos configuran la evolución anual de la temperatura de la sección mediante una función sinusoidal de período anual. Para su completa definición es necesario determinar, en cada sección, el desfase existente dentro del período anual entre los valores máximo y mínimo de la temperatura media, los cuales se obtienen en función de los parámetros de diseño.

Este desfase, si bien es relativo a unas condiciones térmicas ambientales, depende fundamentalmente del espesor de la sección. Tras los estudios realizados, para su definición se recomienda adoptar como referencia para las temperaturas mínima y máxima, respectivamente, la de los meses de marzo y septiembre para secciones de 5 m de espesor y la de los meses de abril y octubre para espesores de 50 m.

#### **5.3.5. Conclusiones relativas a la auscultación térmica de la presa en explotación**

- La propuesta presentada, en su vertiente de potenciar la instrumentación térmica exterior de la presa, debe tenerse particularmente en consideración en presas que no dispongan de termómetros interiores. En estos casos, la instalación de una instrumentación externa permitirá evaluar in situ los parámetros necesarios para estimar la evolución anual de la temperatura media en la presa.
- El modelo teórico propuesto para representar el comportamiento térmico medio de la sección no contempla la incidencia que pueda tener sobre la temperatura media de la sección la existencia de las galerías de visita.

Ello hace, por una parte, que la predicción de las temperaturas sea mejor en las secciones no próximas a galerías, mientras que, por otra parte, sea necesario disponer

---

termómetros en galerías si se quiere reflejar su comportamiento térmico singular en relación al comportamiento térmico medio experimentado por las secciones alejadas de éstas.



## BIBLIOGRAFIA

- ACI (1987)  
"Mass Concrete". ACI Committee 207. ACI 207.1R-87.
- AGUADO, A., AGULLO, L., VAZQUEZ, 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.
- ATLAS DE LA RADIACION 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 n° 67. C.E.B. Lausanne. Janvier

