

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

SISTEMA INTEGRAL DE AUSCULTACIÓN EN LA PRESA DE RIAÑO PARA EL CONTROL DE LA SEGURIDAD DE SU COMPORTAMIENTO

D. Antonio Rodríguez de la Torre¹

D. Manuel Pastor ², D. Pablo Mira³, D. José Antonio Fernández⁴

D. Carlos Moreno⁵, D. Juan Manuel García⁶

RESUMEN: El Sistema de Auscultación implantado en la Presa de Riaño ha tecnificado la labor de análisis de la información de la auscultación de las presas, fiabilizando y objetivizando la tarea de análisis de los niveles de seguridad ante un determinado nivel de sollicitación o riesgo, mejorando los tiempos de actuación para la toma de decisiones, y en definitiva, haciendo realmente efectiva la herramienta de auscultación para el fin propuesto por el Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. El aspecto más innovador de este método implantado en la Presa de Riaño reside en la interacción auscultación - modelo de elementos finitos, desarrollado en la herramienta GEHOMADRID. El desarrollo de esta herramienta de control para la seguridad en la que se hace intervenir la información de la sensorización para el conocimiento del comportamiento real, el modelo determinista para el conocimiento de los límites admisibles en situaciones extremas y el modelo estadístico para evaluación objetiva del nivel de seguridad, todo ello en tiempo real, es lo que hemos denominado Sistema Integral de Auscultación de la Presa de Riaño.

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Confederación Hidrográfica del Duero.

² Dr.Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

³ Dr.Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

⁴ Dr.Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

⁵ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. EPTISA Ingeniería Instrumentación y Control.

⁶ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. EPTISA Ingeniería Instrumentación y Control.

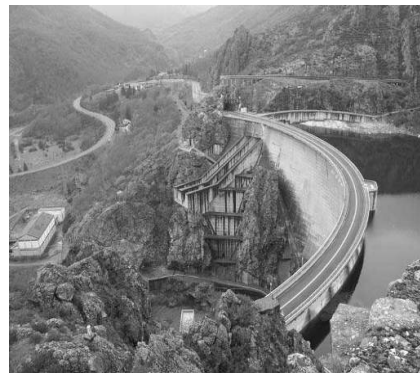
1. CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA

La presa Riaño está situada sobre el río Esla en el término municipal de Crémenes, provincia de León.

La tipología de la presa es de hormigón, **bóveda de doble curvatura**, con una altura sobre cimientos de 101 m y cota de coronación a 1.102,6 m.s.n.m. El desarrollo en coronación es de 337 m y el espesor en la ménsula central variable entre un máximo de 16,5 m y un mínimo de 4,2 m.

Cuenta con un aliviadero central de labio fijo, sobre coronación, con seis vanos y capacidad de desagüe de 530 m³/s, y un aliviadero lateral en el estribo derecho con dos canales de lanzamiento regulados por compuertas y capacidad de desagüe de 1.000 m³/s. Así mismo dispone de dos conductos para desagües de aligeramiento y sendos desagües de fondo.

El río Esla, al cortar oblicuamente una potencia de 250 m de cuarcitas ordovicienses, origina un estrechamiento en el valle, formando una **cerrada asimétrica**, con orientación de estratos E⇒O, buzando al Sur unos 70°.



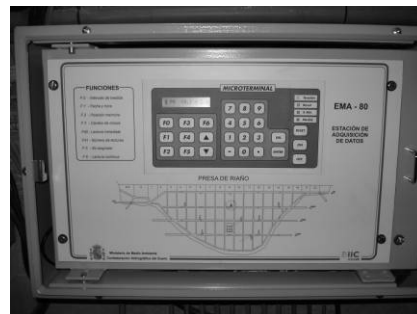
2. SISTEMA DE AUSCULTACIÓN

Entre los años 1968 y 1975, durante las obras de construcción de la Presa de Riaño, se procedió a la instalación de una serie de dispositivos de instrumentación que quedaron instalados convenientemente embebidos en el hormigón. Estos fueron: 8 termómetros (control de temperaturas del agua del embalse y del aire en el paramento de aguas abajo), 97 termorresistencias (control térmico en el interior de los bloques y en los paramentos), 35 flexímetros electroacústicos (movimientos en juntas en el interior de los bloques) y 17 cápsulas tensiométricas (presiones en cuerpo de presa y contacto bóveda-cimiento).

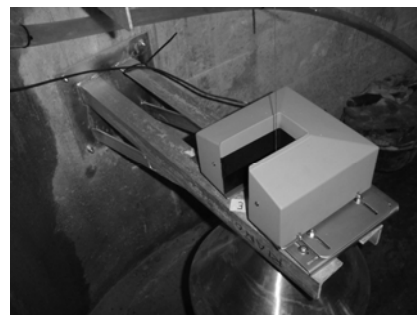
Entre 1988 y 1990 se desarrolla el “*Proyecto de Obras complementarias para la auscultación de la Presa de Riaño*”, que incluía la revisión y puesta a punto de los equipos instalados en fase de construcción, además de la instalación de nuevos dispositivos: 2 balanzas hidrostáticas (nivel de embalse), 1 estación meteorológica (acciones climáticas), 7 péndulos invertidos y 6 directos (movimientos horizontales de la bóveda), sistema de control topográfico, 60 medidores de juntas tridimensionales en las galerías, 24 bases para la medida con clinómetro portátil (control de giros en la estructura), 4 acelerómetros (control de vibraciones), 8 extensómetros de varilla, 3 telemedidores de cinta invar y 6 tuberías extensométricas incrementales (movimientos en cimentación), 6 transductores de desplazamientos para el seguimiento de los posibles

movimientos del Farallón en la margen izquierda, 39 piezómetros de cuerda vibrante (subpresiones) y 10 aforadores tipo Thomson (filtraciones). Con esta ampliación, el número de puntos de control en la presa supera los 600.

Durante esta segunda fase se procede a la centralización, automatización e instalación de sistemas informáticos y de comunicaciones para el sistema de recogida, tratamiento y presentación de datos de auscultación de la presa. Se incorpora el sistema de control de apertura de compuertas de los desagües de aligeramiento y de los aliviaderos, control de accesos y Sistema Automatizado de Adquisición de Datos formado por 7 Estaciones Automáticas, 1 Estación Central de Control en presa, con paneles sinópticos y de indicadores, software de gestión y 1 Estación de Control en las oficinas de la Confederación en León.



Desde el año 2004 se están llevando a cabo los trabajos de inscritos en el marco del Proyecto de **“Revisión de la Instrumentación, actualización de los programas de control y desarrollo de un modelo de comportamiento para la presa de Riaño (León)”**. Como resumen de las actuaciones acometidas cabe destacar la revisión, reparación y adecuación de los equipos de instrumentación instalados en el pasado (red de acelerometría, sistema de control de accesos, automatización de péndulos, actualización de Estaciones Automáticas de Adquisición, Estación Meteorológica, mejora de las redes de comunicación), actualización de equipos informáticos, implantación de nuevos programas de gestión de auscultación de modo que se mejoren significativamente las prestaciones y las condiciones de seguimiento de los datos obtenidos, y diseño de un modelo teórico de comportamiento de la presa que ajustado a los datos reales del histórico de la auscultación.



Para la gestión de todo el Sistema Integral de Auscultación se ha implantado un software (**SAYTL**) en el que se utilizan los últimos avances informáticos y modernos lenguajes de programación para la supervisión constante y en tiempo real de los dispositivos de instrumentación instalados en la presa, advirtiendo cambios significativos en el sistema, generando y enviando mensajes de avisos, alertas y/o alarmas, de acuerdo con las instrucciones configuradas por el usuario. La novedad más destacable de este software con diseño modular es su **integración con el modelo matemático de comportamiento de la presa**.

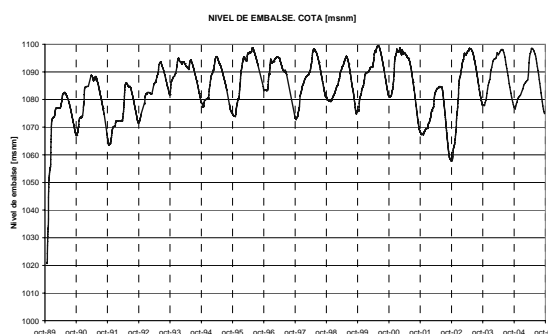
Este último módulo está diseñado a modo de Asistente, de forma que el usuario puede definir en sencillos pasos sucesivos, la caracterización mecánica de los distintos materiales que componen el modelo creado, la definición del estado de carga de referencia y seleccionar, a partir de los datos recibidos de los dispositivos de instrumentación, los estados de carga a calcular, a partir de la combinación de cargas simples correspondientes a peso propio, estado térmico (interpolación de la temperatura real de la presa a los nodos del modelo) y carga hidrostática (nivel de embalse).

3. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRESA

Se ha realizado un completo **análisis del comportamiento histórico** de la **Presa de Riaño**, basándose en los datos de auscultación registrados por el Sistema de Adquisición Automático, entre los años 1989 y 2005, un período de dieciséis años hidrológicos, ajustándose a los criterios establecidos en la “*Guía Técnica para la elaboración del informe anual de presas y embalses*”, elaborada por el Área de Inspección de Presas del Ministerio de Medio Ambiente. A partir de estos datos, facilitados por la *Confederación Hidrográfica del Duero*, se ha desarrollado un ajuste estadístico del comportamiento real de la presa para las distintas variables de control anteriormente relacionadas. En el presente apartado se realiza una breve síntesis de los aspectos principales utilizados para el desarrollo y contraste del modelo matemático elaborado, en cuanto a las acciones sobre la presa y su respuesta real en términos de desplazamientos y deformaciones.

3.1. CONTROL DE ACCIONES EXTERIORES

Atendiendo a valores extremos, el nivel máximo del periodo de explotación se obtuvo en Junio de 2000 con una cota de 1099,53 msnm. y el mínimo en Noviembre de 1989 con una cota de 1020,70 msnm, siendo la máxima variación del nivel en este periodo de 78,73 m, lo que representa un 80,4 % de la carga hidrostática máxima.

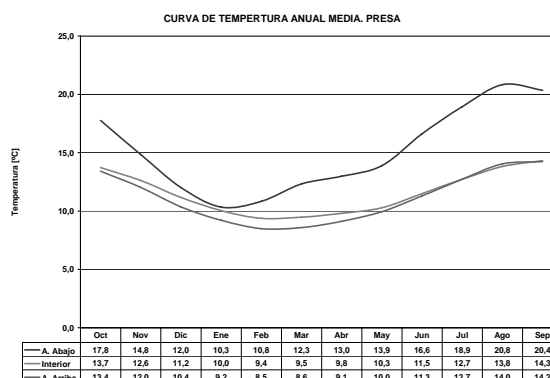


Por otro lado, realizando los correspondientes promedios de los dieciséis años hidrológicos, resultan los siguientes valores medios del Año Hidrológico tipo:

Variable	Máximo	Mínimo	Variación
Nivel Embalse	1094,0 (Mayo)	1075,1 (Octubre)	18,9 m
Temperatura media diaria	13,3 °C (Octubre)	9,2 °C (Mayo)	4,1 °C
Temperatura agua	9,5 °C (Noviembre)	7,8 °C (Marzo)	1,7 °C

3.2. CONTROL TÉRMICO DE LA ESTRUCTURA

Las condiciones térmicas en la presa presentan unas tendencias de comportamiento que se repiten cíclicamente año a año, con ligeras variaciones. Los factores que condicionan actualmente el comportamiento térmico en la presa son: el nivel de las aguas, que actúa modificando las condiciones de temperatura de contorno en el paramento de aguas arriba, la evolución de



la propia temperatura del hormigón y el ambiente exterior que provoca variaciones en la temperatura de la presa dando origen al fenómeno térmico estacional. La **evolución anual de las temperaturas medias**, tanto en los paramentos como en el interior de la bóveda han sido ajustadas con las siguientes curvas senosoidales, con coeficientes de correlación mínimos de 0,97.

Zona	Ecuación senoidal de ajuste
Paramento A. Abajo	$T [^{\circ}\text{C}] = 15,3 + 5,2 \cdot \cos[(2\pi / 365) \cdot (t - 300)]$
Interior Bóveda	$T [^{\circ}\text{C}] = 11,7 + 2,5 \cdot \cos[(2\pi / 365) \cdot (t - 330)]$
Paramento A. Arriba	$T [^{\circ}\text{C}] = 11,3 + 2,9 \cdot \cos[(2\pi / 365) \cdot (t - 330)]$

3.3. CONTROL DE MOVIMIENTOS HORIZONTALES

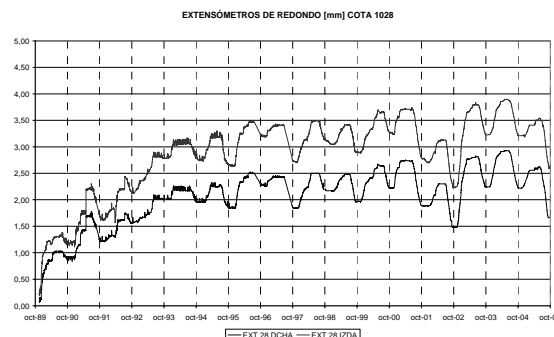
Del control realizado con los péndulos se obtienen recorridos máximos desde el inicio de la puesta en carga que no sobrepasan los 35 mm en sentido radial y los 11 mm en sentido tangencial. Los máximos desplazamientos se obtienen en la ménsula central con un recorrido resultante medio en el periodo de 27,5 mm al año. Los desplazamientos medidos en los bloques de la margen derecha son superiores a los de la margen izquierda con motivo del contacto asimétrico de la bóveda para ajustarse a la geometría de la cerrada.

Los desplazamientos absolutos radiales y tangenciales evolucionan siguiendo la onda térmica anual del aire y respondiendo a las variaciones de la carga hidrostática del embalse, alcanzando valores extremos dentro de cada año en los meses de octubre y mayo. Por otro lado se comprueba que los **máximos y mínimos movimientos** relativos en los sucesivos años hidrológicos **permanecen estables**, si se comparan situaciones similares en cuanto a carga hidrostática actuante sobre la bóveda y estado térmico de la presa.

Se han obtenido para cada uno de los péndulos de la presa las superficies estadísticas de ajuste que relacionan los movimientos en coronación (variable dependiente) con el nivel de embalse y estado térmico de la bóveda, resultando unos coeficientes de correlación superiores a 0,90.

3.4. CONTROL DE MOVIMIENTOS EN CIMENTACIÓN

La deformación total producida en el cimientamiento de la presa está generada por la carga hidrostática. Así la mayor parte de las deformaciones acumuladas, plásticas no recuperadas, se originaron, en una primera fase, entre octubre de 1989 y octubre de 1993, respondiendo posteriormente el cimientamiento con deformaciones elásticas, recuperables, a las variaciones del nivel de embalse.



Se apreció como se obtenían mayores deformaciones en la margen izquierda, donde es más relevante la presencia de fallas profundas y donde hay menor resistencia.

4. DEFINICIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

El Modelo de Comportamiento se ha realizado empleando el Método de Elementos Finitos, desarrollando los cálculos en régimen elástico.

El modelo es tridimensional, reflejando lo más fielmente posible la geometría de la presa, tanto de la bóveda como en su cimentación y estribos. Un aspecto relevante es que se ha tenido en cuenta el hecho de que durante la construcción de la presa se emplearon diferentes tipos de hormigones, por lo que se han empleado elementos con distintas características resistentes.

El modelo refleja de forma suficientemente aproximada la topografía, geología y características geotécnicas del terreno. El modelo del terreno contempla las discontinuidades y fallas existentes que, por su importancia, puedan alterar el comportamiento de la presa, y permite la definición de características elásticas a esos elementos que simulen su comportamiento real.

Los cálculos del modelo se realizan con el programa **GEHOMADRID**, elaborado por el Grupo de Modelos Matemáticos en Ingeniería (M2i) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid y del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), en colaboración con la Universidad de Hohai en Nanking (China). El programa, basado en la aplicación del lenguaje FORTRAN 90 a un código de elementos finitos, tiene por objeto el análisis mediante elementos finitos del problema del sólido continuo.

4.1. CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA

Topografía de la cerrada: La topografía del terreno se ha obtenido a partir de la digitalización del Plano Tectónico de la Cerrada [2], con curvas de nivel cada 1 m. Los accidentes tectónicos y las fallas más importantes y los volúmenes de las excavaciones se han obtenido de los planos de proyecto [1].

Bóveda: Se han calculado, a interdistancias en cota (Z) de 1 metro, las coordenadas de las juntas del cuerpo de presa, en la sección central y en los paramentos de aguas arriba y aguas abajo a partir de las ecuaciones que definen el *Perfil Central de Definición* (valores de alejamientos de polos (m), distancias de fibra media a superficie de referencia (D) y canto en perfil central (C_c) en función de Z), las *Secciones horizontales* (radio de curvatura (ρ), desarrollo (S) y canto (C) según Z) y los *Ángulos de incidencia* de las secciones horizontales en la margen izquierda (β_i) y en la derecha (β_d) en función de Z).

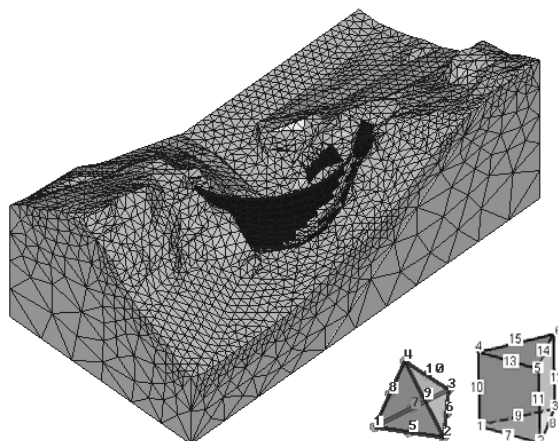
4.2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Terreno: Módulo de elasticidad $E = 350.000 \text{ kg/cm}^2$; Módulo de Poisson $\nu = 0,20$; Peso específico $\rho = 2,60 \text{ tn/m}^3$; Coeficiente dilatación térmica $\alpha = 10^{-5}$; Angulo de rozamiento: $\phi = 40^\circ$; Cohesión $c = 1,0 \text{ kg/cm}^2$.

Hormigones: $E_1 = 375.000 \text{ kg/cm}^2$; $E_2 = 225.000 \text{ kg/cm}^2$; $\nu = 0,20$; $\rho = 2,45 \text{ tn/m}^3$; $\alpha = 9,2 \cdot 10^{-6}$.

4.3. DISCRETIZACIÓN

Para la generación de la malla que compone el modelo de elementos finitos de la presa de Riaño se parte de las curvas de nivel del terreno, incluyendo excavación y de las coordenadas de las juntas de la propia presa, estribo derecho y placa de anclaje. A partir de estos datos se generan y definen las correspondientes superficies y volúmenes de los elementos a discretizar. Estas operaciones se realizan con el programa de pre/post-proceso GID versión 8.0 (CIMNE). Una vez generados los volúmenes correspondientes el programa realiza el mallado de forma automática, una vez definidos el tipo y tamaño del elemento finito a emplear, asignándose las características de materiales respectivas descritas y verificando la estabilidad de la discretización generada.

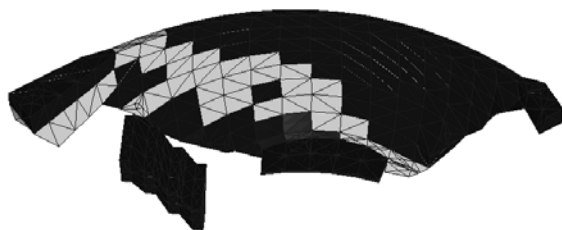


Para el mallado del terreno, bóveda, estribos y placa de anclaje se han considerado tetraedros cuadráticos de diez (10) nodos. Las fallas se modelizan mediante prismas de quince (15) nodos, para simular superficies de contacto.

El modelo completo resulta finalmente compuesto por un total **27.724 tetraedros cuadráticos, 938 prismas cuadráticos y 41.823 nodos**.

4.4. CONDICIONES DE CONTORNO

Para el cálculo del modelo se han considerado en los planos límite verticales y horizontal, movimientos nulos en los ejes globales X e Y. Así mismo, en el plano horizontal inferior se impide el movimiento según la dirección vertical (eje Z).



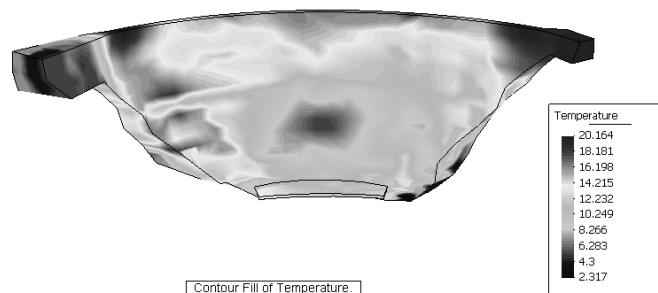
4.5. ACCIONES CONSIDERADAS

Teniendo en cuenta que el modelo está formado por 41.823 nodos, con tres (3) grados de libertad por nodo, resulta necesario resolver, para el cálculo de los 125.469 grados de libertad resultantes, un total de **118.641 ecuaciones**, por estado de carga. El método de cálculo elegido (PBCG), permite la resolución del modelo en un tiempo de 1.064 segundos (17,7 minutos).

Peso Propio: El cálculo de la carga debida al peso propio se realiza teniendo en cuenta las densidades de los materiales (terreno y hormigón) y considerando la acción de la gravedad según el eje vertical Z.

Carga Hidrostática: está caracterizada en cada momento por la cota del nivel de embalse. El programa toma como datos la altura de la superficie del agua (nivel de embalse), el peso específico del agua, la conectividad con los elementos de la cara mojada y el número del elemento asociado. Esta acción se aplica como carga distribuida, adoptando en cada nodo un valor de $P = \gamma \cdot h$, siendo γ el peso específico del agua y h la altura de la columna de agua (diferencia entre cota de embalse y cota del nodo correspondiente).

Temperatura: La definición de los estados térmicos de la presa, se genera a partir de los datos de auscultación obtenidos. A partir de las temperaturas registradas por los sensores el programa de forma automática interpola las temperaturas a todos los nodos de la presa empleando el **Método de Interpolación de Shepard (1968)**.



Se ha realizado el cálculo del modelo, para doce estados térmicos, uno por cada mes del año. Se han considerado los valores medios de temperatura registrados por los sensores disponibles en cada mes, una vez comprobada la estabilidad térmica de la presa y la repetición cíclica de las temperaturas en el interior de la bóveda.

4.6. ESTADO DE REFERENCIA

Como estado de cargas de referencia en el modelo se considera inicialmente el resultante de la combinación de las siguientes acciones: *Peso propio*, del terreno y presa, se considera actuante y constante para todos los estados de carga; *Carga hidrostática*, embalse vacío, nivel de embalse a cota 1.020 msnm; *Temperatura*, estado térmico del mes de octubre, inicio del año hidrológico. Este estado de cargas coincide con el estado de carga real al que estaba sometida la presa de Riaño en **octubre del año 1.989**, fecha en la que entra en funcionamiento el Sistema de Auscultación Automatizado y desde la que se tienen registros históricos de los datos aportados por los dispositivos de instrumentación.

Una vez definido el estado de cargas de referencia el programa de cálculo procesa el modelo y obtiene las **tensiones iniciales** en cada uno de los nodos del mismo. Para las distintas combinaciones de variaciones en el nivel de embalse y evolución anual de las temperaturas, los resultados calculados en desplazamientos y en tensiones, están referidos al estado de cargas inicial aquí considerado.

4.7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Una vez desarrollado el modelo completo, se han comprobado los resultados en situaciones de cargas normales y con unas características de los materiales razonables, observándose si en alguna zona se obtienen valores no espe-

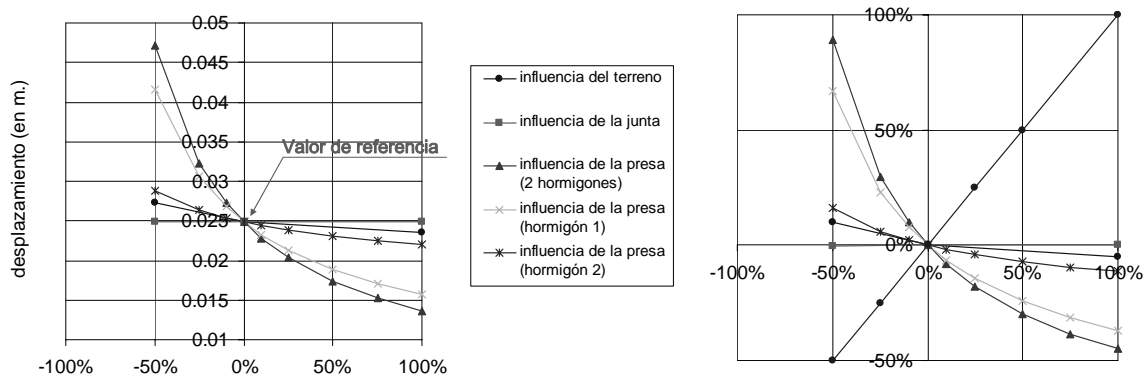
rables, tanto en deformaciones como en tensiones. Comprobada de esta manera la validez del modelo por conocimiento de la realidad, se ha procedido a realizar un estudio de la sensibilidad del mismo frente a modificaciones de los distintos parámetros que en él intervienen (características elásticas y térmicas de los materiales empleados), con el objeto de determinar su peso en la respuesta.

Para realizar este análisis se han variado los módulos de elasticidad (E) de los dos hormigones de la presa, multiplicando los correspondientes valores de referencia, por unos coeficientes de 0,50 a 2,00. Este análisis no sólo se ha realizado variando simultáneamente y en la misma magnitud ambos materiales empleados, sino que se ha estudiado la influencia que tiene en el comportamiento de la presa el variar únicamente el módulo de uno de los hormigones, manteniendo el otro en su valor de referencia, y viceversa. Así mismo, se ha comprobado la influencia en la variación del coeficiente de dilatación del hormigón, empleando coeficientes de 0,50 a 2,00, para multiplicar el valor de referencia.

Para el caso del terreno y fallas, el estudio se ha realizado multiplicando los valores de referencia del módulo de elasticidad (terreno) y altura de elementos finitos (fallas) por unos coeficientes de 0,50 y 2,00.

De esta forma, resultan un total de **treinta y cuatro (34) variaciones de las características del modelo** desarrollado para el estudio de sensibilidad.

Se recogen de forma sintetizada los resultados obtenidos para el punto de control situado en coronación en la ménsula central de la presa (bloque 9), para una situación de carga hidrostática de embalse lleno (cota nivel de embalse 1.100 msnm). Los desplazamientos (u), en metros, obtenidos en dicho punto, según se han variado las características mecánicas y deformacionales de los materiales empleados son los presentados en los gráficos siguientes. Nótese la baja influencia que supone la variación de las características del terreno y la prácticamente nula influencia de las fallas.



4.8. AJUSTE MODELO - REALIDAD

Este análisis ha permitido, en el momento de calibrar el modelo y ajustarlo a las cargas y respuestas reales, conocer los parámetros que más influyen y

por tanto reducir tiempo y esfuerzos en la obtención de unos resultados lo más próximos posibles a la realidad.

Se comparan a modo de ejemplo los resultados de desplazamientos obtenidos en coronación de la presa en la ménsula central entre los meses de octubre de 2002 y junio de 2003. Entre estas fechas el nivel de embalse ascendió entre la cota 1.060 y la 1.100 msnm, mientras que la temperatura en la bóveda descendió de 12,9 °C a 9,6°C ($\Delta T = 3,3^\circ\text{C}$). Entre estas fechas el péndulo correspondiente registro movimientos de 2,69 mm y 31,92 mm hacia aguas abajo, con un recorrido de 29,23 mm. Calculando estos estados de carga en el modelo numérico se obtiene un movimiento relativo de 30,67 mm, con lo que la variación entre la realidad y el modelo es inferior al 5 %.

5. REFERENCIAS

- [1] Justificación Técnica del Proyecto Reformado de la Presa del embalse de Riaño. Confederación Hidrográfica del Duero (Febrero 1970).
- [2] Informe sobre la cerrada del embalse de La Remolina. Río Esla (León). Servicio Geológico de Obras Públicas (Enero 1967).
- [3] Estudio de la cimentación de la Presa de Riaño. Informe nº 1.393. Sociedad de Reconocimientos Geofísicos (Noviembre 1968).
- [4] Anejo IV del Proyecto de la Presa del embalse de Riaño (León). Comprobación de la seguridad de la cimentación al deslizamiento. CONSULPRESA (Consultores de Presas y Aprovechamientos Hidráulicos, S.A.).
- [5] Cartografía de detalle de la margen izquierda de la Presa de Riaño (León). EPTISA (Octubre 1988).
- [6] Estudio de las bajas resistencias de los hormigones de la Presa de Riaño (León) durante la campaña del año 1968. Confederación Hidrográfica del Duero (Diciembre 1973).
- [7] Informes sobre el control de las vibraciones producidas por la ejecución de un túnel en las inmediaciones de la Presa de Riaño, León. Ingeniería de Instrumentación y Control S.A. (Marzo y Noviembre 1983).
- [8] Estudio en modelo reducido del comportamiento de la Presa del Embalse de Riaño (León), en fase elástica y rotura. Laboratorio Central de ensayo de materiales de construcción. CEDEX (1974).
- [9] Informe Histórico de Auscultación de la Presa de Riaño. Periodo: 01/10/89 - 30/10/05. Ingeniería de Instrumentación y Control [2005]
- [10] Informe del Modelo de Elementos Finitos de la Presa de Riaño. Ingeniería de Instrumentación y Control [2006]
- [11] Método de Elementos Finitos. O.C. Zienkiewicz y R.L. Taylor. Ed. Internacional Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).