

# Simulación numérica del comportamiento constructivo de la presa de Mora de Rubielos (Teruel, España)

JOSÉ MARÍA BENLLIURE (\*), IGNACIO ESCUDER (\*\*), MANUEL G. MEMBRILLERA (\*\*\*), JURGEN FLEITZ (\*\*\*\*), JOSÉ MANUEL GUTIÉRREZ (\*\*\*\*\*) y DANIEL MUÑOZ (\*\*\*\*\*)

**RESUMEN** Durante los últimos seis años, el segundo autor ha desarrollado una herramienta “cuasi-completa” de análisis de presas de materiales sueltos, cuyas características respecto del cálculo estático y dinámico han sido publicadas y presentadas en anteriores conferencias de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD).

En este artículo, los autores muestran como se ha utilizado y adaptado el modelo para reproducir el comportamiento tenso-deformacional de una presa con núcleo asfáltico (Mora de Rubielos, Teruel, España).

## NUMERICAL SIMULATION OF CONSTRUCTIONAL BEHAVIOUR OF MORA DE RUBIELOS DAM (TERUEL, SPAIN)

**ABSTRACT** A quasi-complete fill dam numerical analysis tool, whose features for static and dynamic analysis of such structures have been presented in previous ICOLD Meetings (Montreal 2003 and Teheran 2005), has been built by the second author during the last six years in FLAC (Itasca, 1994). In this paper the authors show how the model has been used to estimate the constructional behaviour of an embankment dam with an asphaltic concrete core. (Mora de Rubielos, Teruel, Spain).

**Palabras clave:** Presas de núcleo asfáltico, Análisis numérico, Comportamiento tenso-deformacional.

## 1. INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DE LOS TRABAJOS

Una herramienta completa de análisis en código FLAC (Itasca, 1994) ha sido puesta a punto por el segundo autor durante los últimos seis años. El código tiene la capacidad de actualizar estados tensionales a partir de cualquier cambio en deformaciones mediante los modelos constitutivos “proprios” o cualesquiera otros escritos haciendo uso de su lenguaje interno de programación (FISH). Algunas de las características principales de las rutinas de cálculo confeccionadas para el cálculo estático y dinámico de presas de materiales sueltos han sido publicadas en distintos artículos (Refs. [2], [3], and [5] entre otros).

En particular, en este trabajo, los autores muestran como el modelo ha sido inicialmente utilizado para estimar el comportamiento constructivo de una presa de materiales sueltos con núcleo asfáltico (Figura 1: Mora de Rubielos, Teruel, Spain). Fig. 1 Vista de las labores constructivas desde aguas abajo de la presa.

(\*) Ingeniero de Caminos. Confederación Hidrográfica del Júcar.

(\*\*) Dr. Ingeniero de Caminos, M.Sc. Universidad Politécnica de Valencia.

(\*\*\*) Ingeniero de Caminos. Ivalleying and Universidad Politecnica de Valencia.

(\*\*\*\*) Ingeniero de Caminos. Ofiteco.

(\*\*\*\*\*) Ingeniero de Caminos. Fomento.

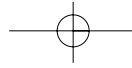
## 2. CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA

### 2.1. CUERPO DE PRESA Y CIMENTACIÓN

La presa de Mora de Rubielos esta ubicada en el barranco de Las Tosquillas, provincia de Teruel (España), unos 4 Km. aguas arriba de la localidad que da nombre a la presa. La presa está siendo construida por la Confederación Hidrográfica del Júcar, perteneciente al Ministerio de Medio Ambiente, para alcanzar algunos objetivos estratégicos relacionados con el abastecimiento de agua, riegos y turismo rural.

Mora de Rubielos es una presa de materiales sueltos de 35 metros de altura con núcleo bituminoso, siendo la longitud de coronación de 215 m. y su capacidad de almacenamiento de aproximadamente 1 Hm<sup>3</sup>, siendo de vital interés optimizar su uso. Las razones de selección del tipo de presa fueron fundamentalmente de carácter medio-ambiental así como el hecho de poder considerar al núcleo asfáltico como quasi-impermeable, resistente a la erosión interna y al envejecimiento, así como por su facilidad de puesta en obra. El aliviadero de la presa consiste en una combinación de aliviadero lateral de labio fijo, común en gargantas estrechas con espacio adyacente a la presa limitado, así como de otro órgano frontal, con compuertas, proporcionando una capacidad óptima de gestión de avenidas.

La cerrada se encuentra formada por materiales cretácicos; caliza masiva y resistente en el cimiento, con un pequeño buzamiento hacia aguas arriba, y una serie de capas alternadas de areniscas en los estribos.



## SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA PRESA DE MORA DE RUBIELOS (TERUEL, ESPAÑA)



**FIGURA 1.** Vista de las labores constructivas desde aguas abajo de la presa.

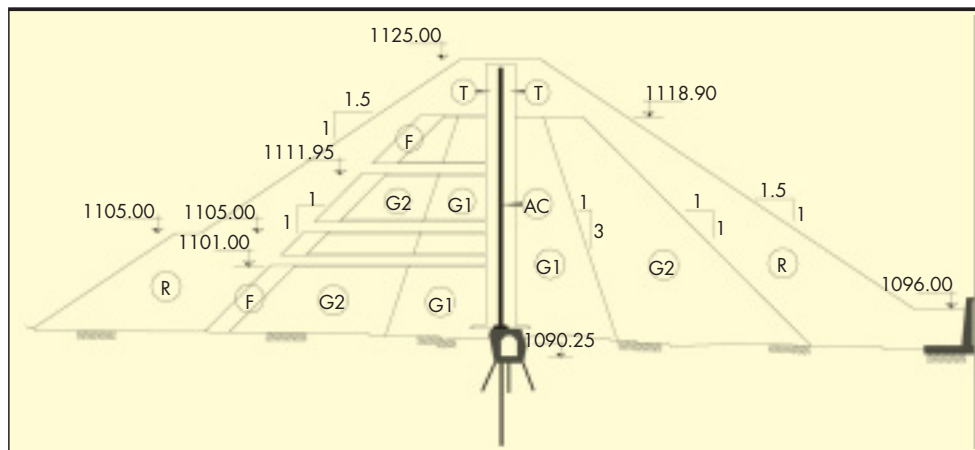
La Figura 2 muestra la típica sección transversal compuesta de escollera caliza en los espaldones exteriores (R), gravas naturales en los espaldones internos (G1 and G2), transiciones (T) de 1,50 m. de ancho y el núcleo asfáltico (AC) de medio metro de anchura. Dada la naturaleza de las gravas extraídas en la cantera de préstamo, ha sido necesario incluir un filtro aguas arriba (F) entre las gravas y la escollera, teniendo que ser algunas de las gravas naturales tamizadas (G1) y habiéndose dispuesto drenes horizontales para prevenir la posible generación de presiones intersticiales no deseables en el espaldón de aguas arriba.

## 2.2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN

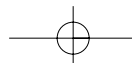
La Tabla 1 resume las características y especificaciones de los materiales de relleno y del núcleo asfáltico. Además, numerosos ensayos de laboratorio han sido realizados para caracteri-

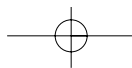
zar la naturaleza y las propiedades mecánicas de los mismos, incluyendo ensayos triaxiales y de corte de gran escala para la caracterización de las gravas y la escollera (por el CEDEX-Spain). En cuanto al núcleo, las muestras de laboratorio se han ensayado en condiciones próximas a las estimadas de servicio, incluyendo ensayos triaxiales con variación en el contenido de betún, tipo de árido y presión de confinamiento (Norwegian Geotechnical Institute). Por último, se han ejecutado terraplenes de ensayo para estudiar y optimizar los procedimientos de puesta de todos los materiales involucrados.

La construcción del cuerpo de presa empezó a mediados de abril de 1995 y se prevé finalice para finales de Agosto de ese mismo año. Debido a que el núcleo y las transiciones se ejecutan simultáneamente para proporcionar al núcleo una presión de confinamiento inmediata, todas las zonas del relleno deben ser construidas de manera cuasi-simultánea.



**FIGURA 2.** Sección transversal Tipo de la presa de Mora de Rubielos.





**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA PRESA DE MORA DE RUBIELOS (TERUEL, ESPAÑA)**

Zone		Material	Espesor de capa (m)	Peso del rodillo vibrante (Tons)	Nº de pasadas
R	Escollera	Tamaño máximo = 60 cm Pasa Tamiz 1" < 30 % Pasa Tamiz no.200 < 10 % Resistencia a Compresión Simple > 50 MPa	0,60	16 t + agua	4
G1	Relleno-1	Pasa Tamiz no.200 < 12 % Tamaño máximo = 30 cm	0,20 + 0,20	12 t + agua 100% mod.proctor wopt-1 - wopt+2	4
G2	Relleno-2	Pasa Tamiz no.200 < 20 % Tamaño máximo = 30 cm	0,20 + 0,20	12 t + agua 100% mod.proctor wopt-1 - wopt+2	4
F	Filtro	Cumple criterios de filtro entre la escollera y la grava natural	0,40	12 t + agua 100% mod.proctor wopt-1 - wopt+2	4
AC	Nucleo	El árido con el filler cumple la curva de Fuller Tipo de Betón (B60/70) Tº de Compactación 160º-180º Contenido de betón en peso = 7,3 %	0,20	0,5 t	Hasta huecos < 3%
T	Transicion	d100 ≤ 60mm      d10 ≤ d100nucleo d50 > 10mm      d100 ≥ d15 < 10mm      0,25d100espaldón k > 10 <sup>4</sup> cm/s	0,20	2,5 t+agua 70-80% Dr wopt-2 - wopt+2	5

**TABLA 1.** Propiedades de los materiales y de la puesta en obra.

**3. MODELO NUMÉRICO**

**3.1. MODELOS CONSTITUTIVOS**

El modelo Hiperbólico no lineal utilizado fue formulado por Duncan y Chang (Ref. [1]) habiéndose hecho algunas modificaciones al mismo algunos años después (Ref [2]). Esta formulación actualizada del modelo incorpora las siguientes características fundamentales:

- El módulo de elasticidad secante y tangente para carga primaria y en procesos de descarga y recarga se mantiene tal cual estaba en la formulación original:

$$E_s = (1-R_f(1-\sin\phi)\cdot(\sigma_1-\sigma_3))/(2\cdot C\cdot\cos\phi+2\cdot\sigma_3\cdot\sin\phi)\cdot k\cdot P_a(\sigma_3/P_a)^{nd}$$

$$E_t = (1-R_f(1-\sin\phi)\cdot(\sigma_1-\sigma_3))/(2\cdot C\cdot\cos\phi+2\cdot\sigma_3\cdot\sin\phi)^2\cdot k\cdot P_a(\sigma_3/P_a)^{nd}$$

$$E_{ur} = k_{ur}\cdot P_a(\sigma_3/P_a)^n$$

- Se incorpora la dependencia del Módulo Volumétrico respecto a la presión de confinamiento:

$$B = k_b\cdot P_a\cdot(\sigma_3/P_a)^{md}$$

- Los valores del parámetro de fricción se ajustan mediante una función logarítmica:

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi\cdot\log_{10}(\sigma_3/P_a)$$

- El Módulo de Cortante y el Coeficiente de Poisson se hacen consistentes con el Módulo de Elasticidad y el Módulo Volumétrico.

$$\nu = 0.5\cdot E_t/(6\cdot B)$$

- El estado tensional que separa la carga primaria de los procesos de descarga y recarga queda claramente identificado.

$$SL = ((1-\sin\phi)\cdot(\sigma_1-\sigma_3))/(2\cdot C\cdot\cos\phi+2\cdot\sigma_3\cdot\sin\phi)\cdot(\sigma_3/P_a)^{0.25}$$

Donde B = Módulo Volumétrico; C = Cohesión; E<sub>s</sub> = Módulo de Young Secante; E<sub>t</sub> = Módulo de Young Tangente; E<sub>ur</sub> = Módulo en descarga-recarga; σ<sub>1</sub> = Tensión principal mayor; σ<sub>3</sub> = Tensión principal menor; (σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>ult</sub> = valor asintótico del desviador de tensiones; ν = Coeficiente de Poisson.

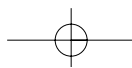
Siendo K, k<sub>b</sub>, k<sub>ur</sub>, P<sub>a</sub>, m<sub>d</sub>, n<sub>d</sub>, R<sub>f</sub>, φ, φ<sub>0</sub> son los parámetros del modelo.

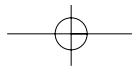
Los parámetros que han sido preliminarmente ajustados para cada uno de los materiales de la presa se resumen en la Tabla 2.

Material	Kb	k	m <sub>d</sub>	n <sub>d</sub>	Rf	C	Δφ	φ <sub>0</sub>
Escollera	300	600	0.2	0,45	0,79	0	15	43,5
Grava G1	250	500	0.2	0,76	0,6	0	9	40
Grava G2	200	400	0.2	0,8	0,7	3500	7	39
Filtro	225	450	0.2	0.4	0,6	0	10	42

**TABLA 2.** Parámetros estimados para los materiales de Presa (P<sub>a</sub>, presión atmosférica = 10<sup>5</sup> Pascales).

**NOTA:** La cimentación y el núcleo asfáltico han sido considerados en primera aproximación materiales elásticos con Módulo Volumétrico y de Cortante de 867 MPa y 400 MPa para la cimentación y 100 MPa y 60 MPa para el núcleo.





## SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA PRESA DE MORA DE RUBIELOS (TERUEL, ESPAÑA)

### 3.2. CAPACIDADES DEL SOFTWARE

FLAC 2D (Ref. [4]) es un código en diferencias finitas bi-dimensional (esquema explícito) que permite simular el comportamiento de suelos, rocas, etc. El programa está basado en el esquema de cálculo Lagrangiano, y su formulación básica asume un estado generalizado bi-dimensional en deformación plana. Cada elemento se comporta de acuerdo a una ley tensión-deformación preestablecida, como respuesta a las fuerzas aplicadas y las coacciones en los contornos.

FLAC cuenta con un programa interno de programación (FISH) que permite definir cualquier orden de cálculos (p.e. complejas secuencias constructivas) así como la propia naturaleza de dichos cálculos (p.e. modelos constitutivos definidos por el usuario). Estas características hacen

de FLAC un programa muy útil a efectos investigadores. En suma, el mayor potencial del código reside en la capacidad de actualizar estados tensionales haciendo uso de cualquiera de sus modelos internos o de otros definidos por el usuario.

### 3.3. MODELO GEOMÉTRICO

La reproducción de una secuencia constructiva “cuasi-real” se ha llevado a cabo equilibrando independientemente filas de elementos de un metro de altura (Figuras 3 y 4). Además, dada la necesidad de reproducir de forma realista la interacción entre el núcleo y el relleno, se ha definido una interfaz en la superficie de contacto, caracterizada por los criterios de apertura y deslizamiento de Mohr Coulomb.

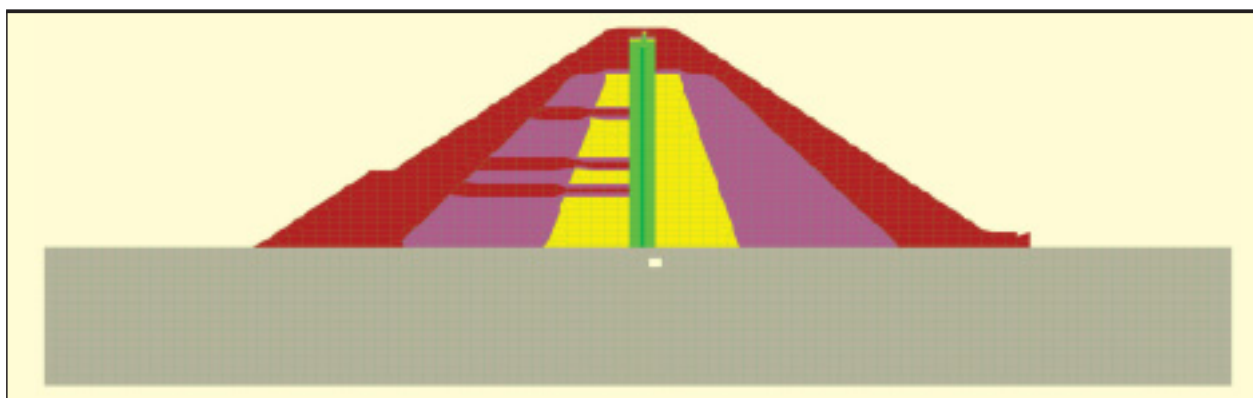


FIGURA 3. Modelo Geométrico.

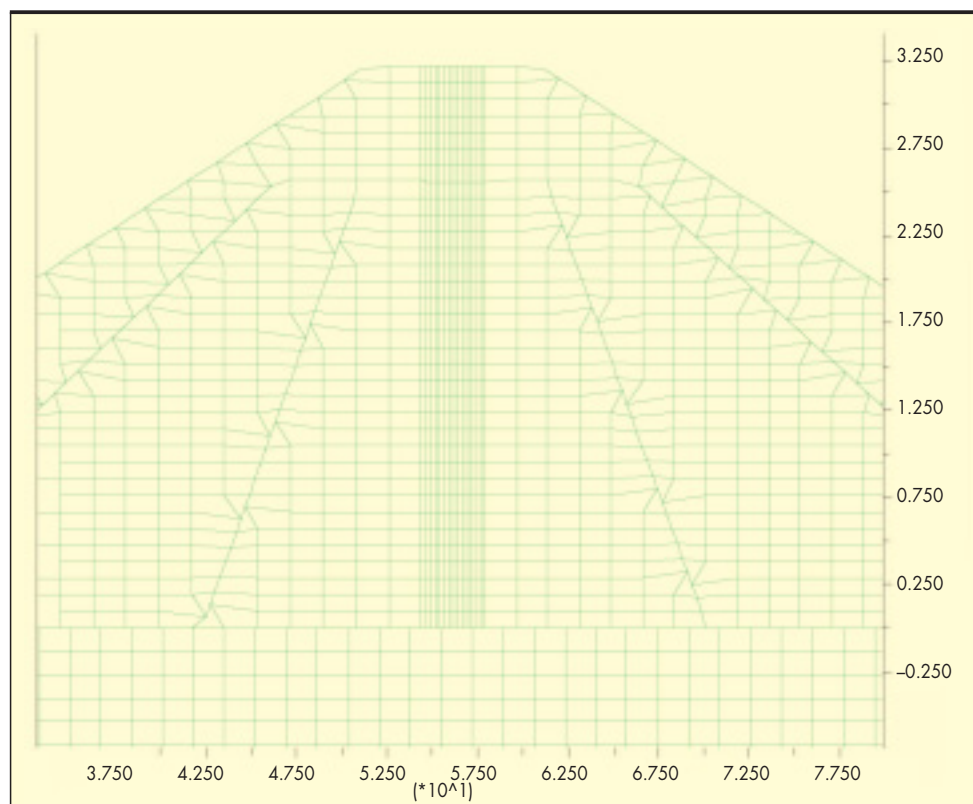
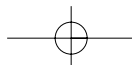
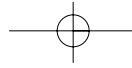


FIGURA 4.  
Detalle de la malla.





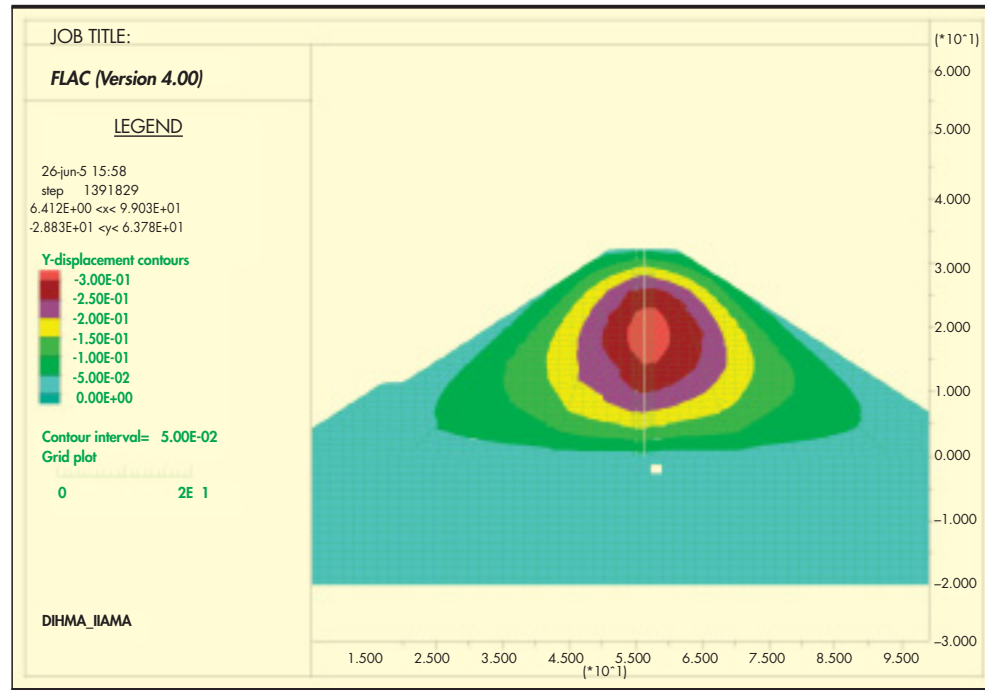
**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA PRESA DE MORA DE RUBIELOS (TERUEL, ESPAÑA)**

**3.4. MODELO TENSO-DEFORMACIONAL**

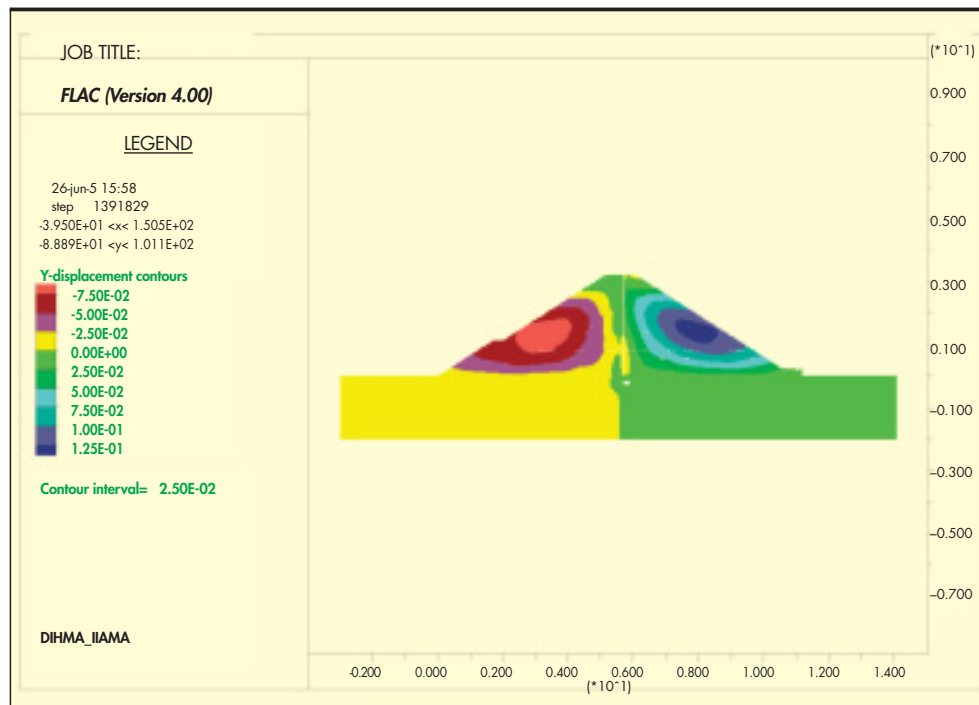
Por otra parte, como se ha detallado con anterioridad, la relación tensión-deformación utilizada corresponde con la última versión del modelo hiperbólico. (Ref. [1]). En particular, los parámetros de dicho modelo se actualizan para cada nueva capa construida, haciéndose numéricamente necesario definir un valor umbral de los parámetros tenso-deformacionales tangentes

para la obtención de valores realistas con bajas presiones de confinamiento. Otra necesidad identificada (Ref. [2]) consiste en controlar los valores del desviador de tensiones que pueden parecer consistentes y sin embargo haber superado el valor último del mismo definido como una asíntota en el modelo.

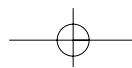
Las Figuras 5 y 6 muestran la estimación de asentos y de movimientos horizontales obtenida en la sección de referencia. La Figura 6 muestra la distribución de esfuerzos de

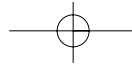


**FIGURA 5.** Asiento estimado en metros (durante la construcción).



**FIGURA 6.** Movimientos horizontales estimados en metros (terminada la construcción).





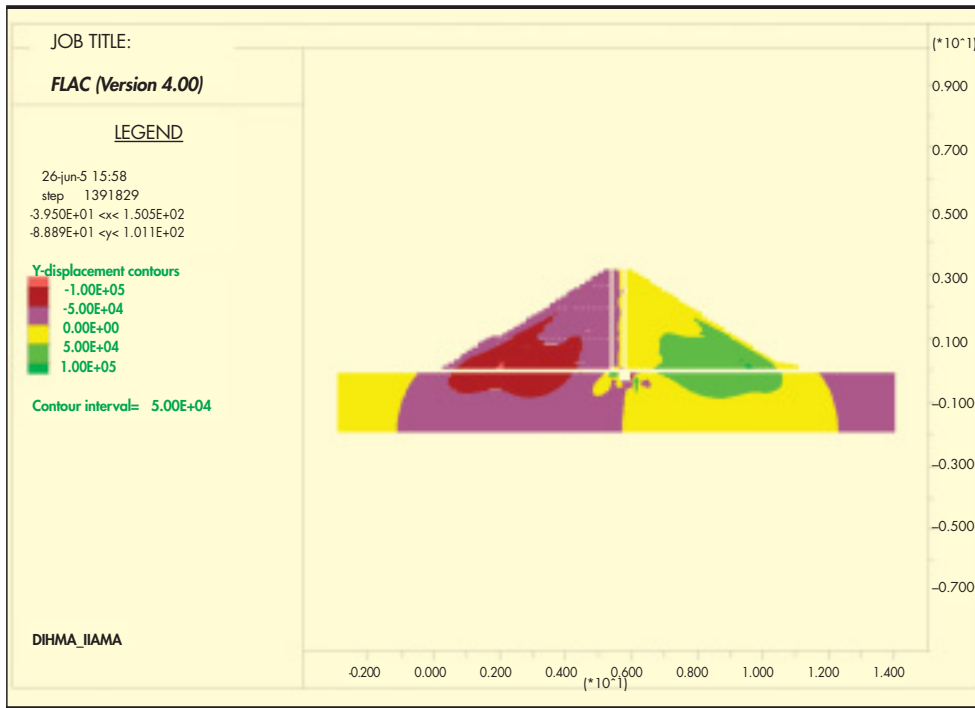
**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA PRESA DE MORA DE RUBIELOS (TERUEL, ESPAÑA)**

cortante y la Figura 7 una estimación preliminar de los desplazamientos durante el primer llenado.

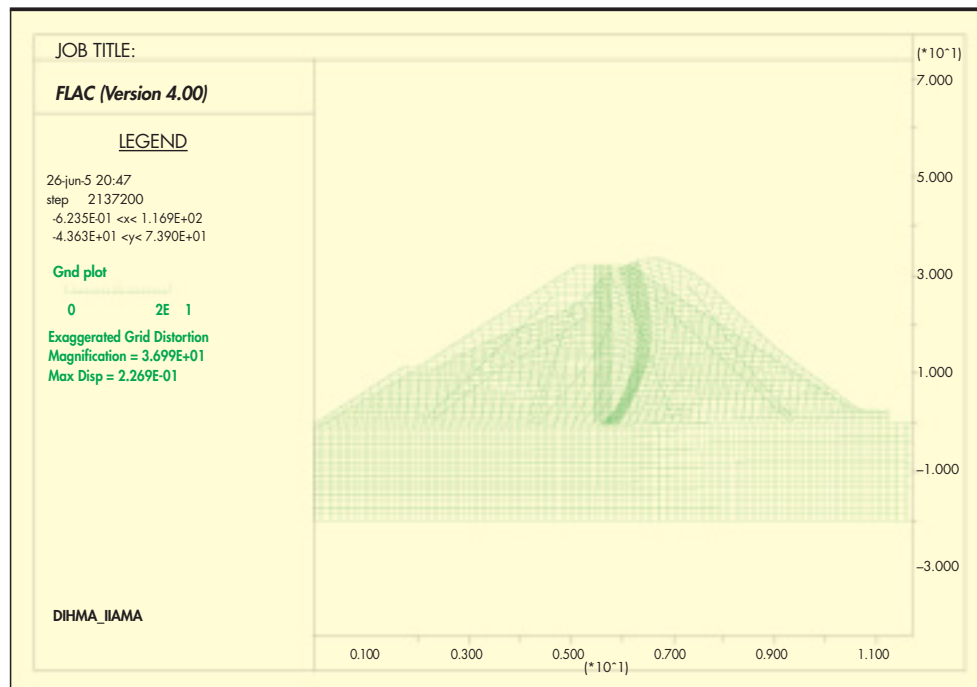
Como se muestra en las Figuras, y a expensas de la calibración del modelo con datos de auscultación, los máximos asentamientos esperados durante la construcción son de 30 cm. y los desplazamientos horizontales máximos son de 12 cm. Por último, el primer llenado no debería conllevar movimientos superiores a los 25 cm.

**4. TRABAJOS PENDIENTES**

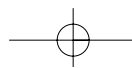
Una vez construido el modelo base, la calibración de los parámetros del mismo podrá llevarse a cabo cuando se disponga de registros de auscultación (p.e. buscando el ajuste que permita minimizar las diferencias cuadráticas entre asiento medido y estimado). Además, un modelo constitutivo apropiado para el núcleo asfáltico deberá incorporarse al

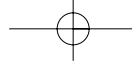


**FIGURA 7.** Distribución de esfuerzos de cortante en Pascales (terminada la construcción).



**FIGURA 8.** Movimientos preliminares estimados en metros durante el primer llenado.





### SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA PRESA DE MORA DE RUBIELOS (TERUEL, ESPAÑA)

modelo para reproducir adecuadamente las características (viscosas, etc.) del mismo.

Finalmente, una estimación rigurosa de los efectos de humectación y fluencia también se llevará a cabo cuando se disponga de suficiente información para ello.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha sido realizado parcialmente en el contexto del proyecto de investigación titulado “Análisis de la influencia de la disminución de riesgos de rotura de presas sobre el incremento de riesgos de la insatisfacción de las demandas en sistemas de recursos hídricos” financiado por el Ministerio Español de Educación y Ciencia (30%) y fondos FEDER de la Unión Europea (70%). También mostramos nuestro agradecimiento a José Estaire (CEDEX, SPAIN) y KAARE HÖEG (Norwegian Geotechnical Institute).

#### 6. REFERENCIAS

[1] DUNCAN, J.M.; BYRNE, P.; WONG, K.S. and MABRY, P.: “Strength, stress-strain and bulk modulus parameters

for finite element analyses of stresses and movements in soil masses”. University of California, Berkeley. (USA). 1984.

[2] ESCUDER, I.; ANDREU, J.; RECHEA, M.: “An analysis of stress-strain behaviour and wetting effects on quarried rock shells”. Canadian Geotechnical Journal .Vol. 1. N: 42. Pages: 51 – 60. 2005. 2005.

[3] ESCUDER, I.; LORENZO, J.; FLEITZ J.; MEMBRILLERA, M.: “Study of Dams Behaviour: uncertainties in instrumentation records and numerical modelling. Study cases and recent approaches”. 73rd ICOLD Annual Meeting Workshop and Symposium. Teheran (Iran). 2005.

[4] FLAC MANUALS. ITASCA, 1994.

[5] UTRILLAS, J.L. and ESCUDER, I.: “Building a new Tous Dam dynamic model”. ICOLD Congress. (Q-83. Oral Contributions). Montreal (Canadá). 2003.

[6] HÖEG, KAARE: “Asphaltic Concrete Cores for Embankment Dams”. Norwegian Geotechnical Institute, ISBN 82-546-0163-1. Norway (1993).

OFICINA TÉCNICA DE ESTUDIOS Y CONTROL DE OBRAS, S. A.

*Una Ingeniería  
con vocación de  
futuro*

Guzmán El Bueno, 133. Edificio Britannia – 1ª planta. 28003 Madrid. Teléfono 91 535 22 10. Fax 91 535 37 42. www.ofiteco.es

