

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## DESEMBALSE RÁPIDO EN LADERAS Y PRESAS. PROCEDIMIENTOS AVANZADOS DE ANÁLISIS

Núria M. Pinyol

Eduardo E. Alonso

Sebastià Olivella <sup>1</sup>

*RESUMEN: La condición de desembalse rápido es una situación crítica en cuanto a la estabilidad de taludes en laderas de ríos y de embalses y en espaldones de presas. Los métodos clásicos de cálculo para determinar la distribución de presiones intersticiales debido a desembalse rápido parten de hipótesis que a menudo se alejan de la realidad y llevan a soluciones erróneas que afectan significativamente a los cálculos de estabilidad. En este artículo se analiza el desembalse rápido como un problema acoplado de flujo-deformación en medio saturado/no saturado y se discuten de forma cualitativa los conceptos fundamentales. A continuación, mediante ejemplos sintéticos resueltos con diferentes hipótesis de cálculos, se analiza el efecto de propiedades relevantes de los materiales y se resaltan las limitaciones de los procedimientos simplificados. Finalmente se resuelve el caso real de la presa "Glen Shira" cuyas presiones intersticiales fueron medidas durante un desembalse controlado.*

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería del Terreno y Geofísica de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España.

# 1. INTRODUCCIÓN

Una de las situaciones críticas a considerar en el análisis de estabilidad de taludes en laderas de ríos y embalses y en espaldones de presas es la condición de desembalse rápido. Un descenso en el nivel de agua tiene dos efectos: una reducción en la presión hidrostática exterior y una variación de la presión intersticial en el interior del talud. El segundo efecto ha recibido especial atención en el diseño de presas de materiales sueltos por la situación de inestabilidad que puede conllevar. En Sherard et al. (1963) y en International Committee on Large Dams (1980) se discuten las implicaciones prácticas del desembalse rápido y se presentan varios casos reales de roturas del talud de aguas arriba. Uno de los más notables es la rotura de la presa de San Luis (California) (Von Thun, 1985). En efecto, bajo determinadas condiciones en cuanto a la velocidad de descenso del nivel del agua, la geometría del talud y las propiedades de los materiales que lo constituyen, las presiones intersticiales en la zona afectada pueden mantenerse elevadas después del desembalse (total o parcial) a la vez que desaparece el efecto del peso del agua sobre el paramento del talud. Ello puede crear una situación de inestabilidad.

La condición de desembalse ha sido analizada desde diferentes enfoques en función de los avances en el campo de la ingeniería geotécnica y mecánica de suelos. Los métodos de análisis pueden clasificarse en dos grupos: Métodos de flujo, adecuados para materiales relativamente permeables, y métodos de análisis no drenado aplicables a materiales de baja permeabilidad. Los métodos incluidos en el primer grupo resuelven el problema de flujo de un talud sometido a un cambio en las condiciones de contorno hidráulicas. Con esta metodología se acepta implícitamente que el esqueleto sólido de los materiales involucrados en el desembalse es rígido y los cambios en tensión total no tienen ningún efecto. Tampoco incluyen el efecto de la deformación del suelo en el proceso de disipación de las presiones en el interior del cuerpo del talud. Los trabajos presentados por Reinius (1954) y Cedergren (1967), basados en análisis de flujo, Brahma and Harr (1962) y Stephenson (1978), basados en hipótesis ad-hoc, Desai (1977) y Cividini y Gioda (1984), mediante análisis de elementos finitos en medio saturado y Neumann (1973), Hromadka and Guymon (1980) y Pauls *et al.* (1999), mediante elementos finitos en medio saturado/no saturado, pertenecen a este primer grupo. El segundo enfoque considera únicamente el cambio de presión intersticial debido a la descarga tensional asociada al descenso del nivel del agua. Ello corresponde a un análisis no drenado en el que el flujo de agua es despreciable debido a la rápida velocidad de desembalse respecto a la permeabilidad del material. Se incluyen en este tipo de análisis los trabajos de Skempton (1954), Bishop (1954) y Morgenstern (1963), y más recientemente, Baker et al. (1993) y Lane y Griffiths (2000). En la práctica, las hipótesis de partida de ambas metodologías de análisis se alejan de la realidad y pueden llevar a soluciones erróneas que afecten significativamente a los cálculos de estabilidad.

## 2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Considérese el fenómeno de desembalse en una geometría sencilla (Figura 1). La posición del nivel del agua MO (altura H) define las condiciones de contorno iniciales (hidráulicas y tensionales) en el talud CBO (Figura 1a). La presión de poros es positiva por debajo de la línea  $p_w=0$ . Un desembalse de inten-

sidad  $H_D$  implicará un nuevo nivel de agua  $M'N'O'$  en un tiempo  $t_{DD}$ . Este variación de las condición de contorno implicará: (a) un cambio en la tensión total y (b) un cambio en la condiciones de contorno hidráulicas (Fig. 1b). Las tensiones hidrostáticas iniciales sobre el paramento del talud, OAB, cambiarán a  $O'A'B'$  con el descenso del nivel. El talud OB experimentará una descarga tensional constante de intensidad  $\Delta\sigma = H_D\gamma_w$  en la parte inferior ( $BO'$ ) y una reducción lineal en la parte superior ( $O'O$ ). La base horizontal, CB, experimentará una reducción uniforme de la tensión de valor  $H_D\gamma_w$ . En cuanto a las condiciones hidráulicas, el descenso del nivel del agua define una nueva presión hidrostática en el contorno del talud ( $O'A'B'$  en la parte inclinada y  $M'N'$  en la parte horizontal).

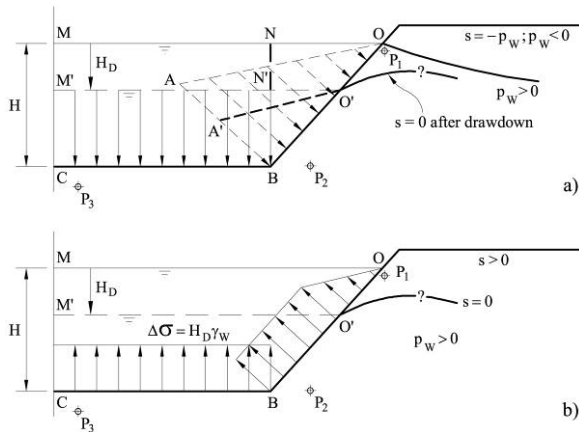


Figura 1. Desembalse. (a) Tensión hidrostática actuando sobre el talud; (b) Variación de la tensión total aplicada debido a un desembalse de altura  $H_D$ .

La distribución de tensiones totales en el interior del talud variará según la condición de contorno. Este cambio inducirá, por lo general, un cambio en la presión de poros. El signo e intensidad de la nueva presión de poros dependerá del comportamiento constitutivo (respuesta tensión-deformación) del esqueleto sólido. Si la respuesta es elástica, el cambio de presión será igual al cambio en la tensión media (octaédrica) total. Si el comportamiento es dilatante (con signo positivo o negativo), el comportamiento a corte afectará a la nueva presión de poros.

Estos cambios en tensión total ocurrirán simultáneamente con el proceso de disipación debido a las nuevas condiciones de contorno hidráulicas. Desde el inicio del desembalse, se establecerá un flujo transitorio de agua hacia el exterior con el fin de alcanzar las condiciones estacionarias. Es importante destacar que la descarga tensional induce un efecto inmediato en la presión de poros mientras que el flujo induce una reducción de la presión disipada en el tiempo. La velocidad de disipación de las presiones dependerá principalmente de la compresibilidad y permeabilidad del material o materiales que constituyan el talud. En términos generales, será necesario considerar un análisis acoplado hidro-mecánico para poder tener en cuenta simultáneamente los fenómenos tensionales y de flujo.

En la Figura 2 se indica en términos cualitativos la evolución temporal de la presión de poros en tres puntos representativos de una ladera ( $P_1, P_2$  y  $P_3$ ) (Fig. 1). Cerca de la parte superior de la ladera,  $P_1$  (Fig. 2a), los cambios en tensiones totales debidos a la descarga tendrán un efecto limitado. El problema se reduce a un problema de flujo con condiciones de contorno transitorias. Incluso bajo estas condiciones, la evolución temporal de las presiones obtenidas mediante un análisis de flujo desacoplado y un análisis acoplado hidro-mecánico pueden ser significativamente diferentes. Un análisis de flujo no considera la deformabilidad del suelo que en el caso de materiales relativamente blandos juega un importante papel en la velocidad de disipación de las presiones intersticiales. La rigidez del suelo controla la capacidad de retención de agua del medio poroso. A igual permeabilidad, una mayor rigidez permite mayor velocidad de disipación. Por ello un análisis de flujo (que supone el ma-

terial rígido) puede subestimar las presiones tal y como se indica esquemáticamente en la Figura 2b.

Considérese ahora el otro extremo de la ladera,  $P_3$ , lejos de los efectos del talud. En este caso el análisis se simplifica al tratarse de un problema unidimensional. Es ampliamente conocido que la presión de poros en el suelo, a cualquier profundidad, variará en igual magnitud que la tensión total y de forma instantánea (los cambios en tensión media efectiva serán nulos). Sin embargo, si se pretende reproducir este resultado elemental con herramientas computacionales, es necesario una formulación hidro-mecánica acoplada. De lo contrario (según un análisis de puro flujo), el descenso del nivel del agua únicamente inducirá un flujo transitorio de agua hacia la superficie que conduce a excesos de presión irreales hasta alcanzar la distribución hidrostática de presiones correspondiente al nuevo nivel de embalse (Figura 2c).

El análisis se dificulta al considerar la respuesta en un punto cercano al pie de talud ( $P_2$ ) (Figura 2b). El desembalse inducirá fuertes cambios en la tensión media y desviadora total que llevarán a cambios en las presiones de poros de forma instantánea. Estas presiones difícilmente estarán en equilibrio con las nuevas condiciones de contorno hidráulicas y se establecerá un flujo hacia el exterior del talud.

Un análisis acoplado permite conocer la reducción de presiones debido al cambio en tensión total durante el desembalse, mientras que un análisis de puro flujo (desacoplado) resulta demasiado conservador. La disipación por drenaje, sin embargo, será más rápida en el caso del análisis de flujo al no incluir la deformación del suelo por cambios en tensión efectiva. Por ello, las curvas de presión en el tiempo (Fig. 2b) pueden cruzarse y un cálculo acoplado ofrecer mayores presiones intersticiales que un cálculo de puro flujo. En definitiva, centrándose únicamente en la compresibilidad y permeabilidad de los materiales, un análisis simplificado desacoplado puede sobrestimar o subestimar la presión intersticial siendo difícil de determinar a priori.

Las actuales herramientas numéricas para el cálculo hidro-mecánico acoplado en medios porosos saturado/no saturados son limitadas. Los resultados presentados en este artículo han sido calculados mediante el programa de elementos finitos CODE\_BRIGTH desarrollado en el Departamento de Ingeniería

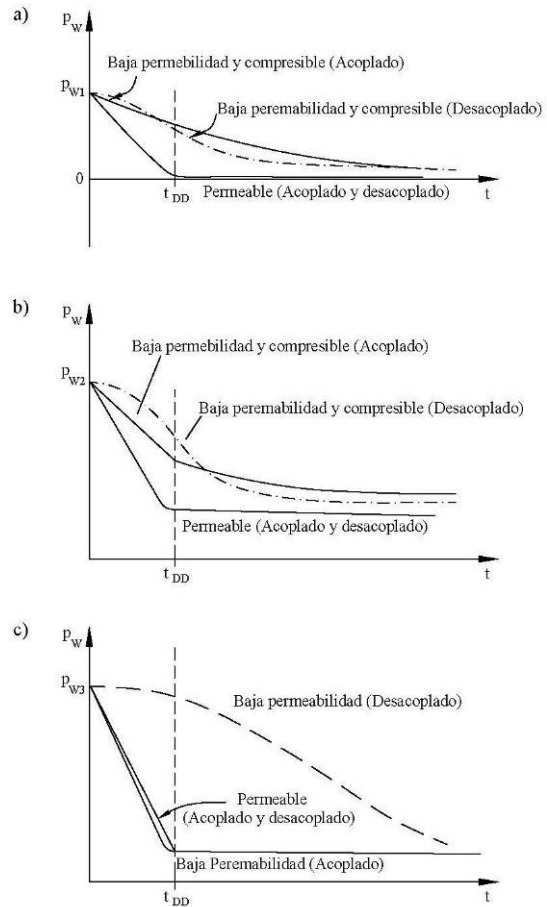


Figura 2. Evolución temporal de la presión de poros en los puntos (a)  $P_1$ , (b)  $P_2$  y (c)  $P_3$  según análisis acoplado y desacoplado y material de baja o alta permeabilidad.

ría del Terreno de la Universitat Politècnica de Catalunya (DIT-UPC, 2002). El código resuelve de manera acoplada problemas termo-hidro-mecánicos en medios porosos. La versión actual permite trabajar con varios modelos constitutivos.

### 3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En este apartado se analiza el desembalse para la geometría sencilla indicada en la Figura 3. En particular se analiza la presión intersticial en los dos puntos indicados ( $P_A$  y  $P_B$ ). Estos puntos representan condiciones típicas en superficies de rotura del talud.

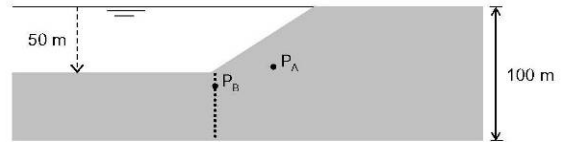


Figura 3. Geometría de la ladera analizada.

Se consideran dos casos. Un desembalse instantáneo y un segundo caso en el que la velocidad de descenso del nivel del agua es de 0.5 m/día. El material de la ladera se ha caracterizado según una ley constitutiva elástica lineal. La curva de retención (relación entre la succión y grado de saturación) ha sido definida según el modelo de van Genuchten y la permeabilidad relativa varía con el grado de saturación según una ley cúbica ( $K_{rel}=S_r^3$ ). El valor de la permeabilidad saturada es de  $10^{-10}$  m/s (correspondiente a un material de baja permeabilidad).

#### 3.1. DESEMBALSE INSTANTÁNEO

Inicialmente el nivel de agua es horizontal a cota máxima. La distribución de presión intersticial corresponde a la situación estacionaria. El desembalse inmediato se simula eliminando el peso total de agua e imponiendo presión de agua nula en el contorno de ladera y pie de talud. Se permite que el agua drene por el talud. El resto de contornos son impermeables.

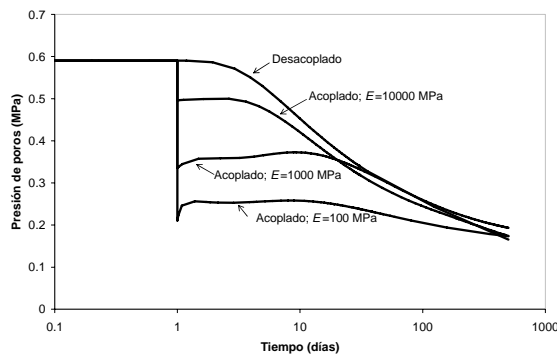


Figura 4. Evolución temporal de la presión de poros después de desembalse instantáneo en el Punto  $P_B$  (ver Figura 3).

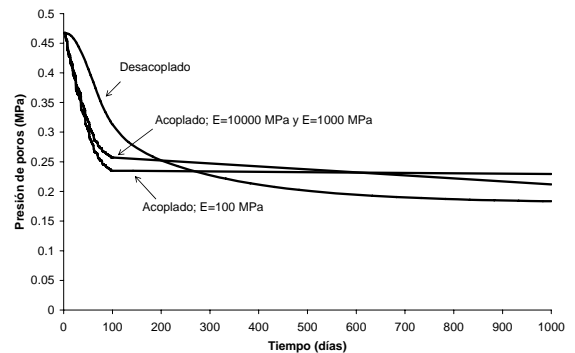


Figura 5. Evolución temporal de la presión de poros después de desembalse progresivo ( $v=0.5$  m/día) en el Punto  $P_A$  (ver Figura 3).

Los cambios de presión de agua inmediatamente después del desembalse son debidos exclusivamente al efecto de la descarga tensional y únicamente pueden simularse mediante un análisis acoplado hidromecánico. Tanto la

magnitud del efecto de la descarga tensional como la velocidad de disipación dependerán de la rigidez del material. En este análisis se comparan tres rigideces ( $E=10000$  MPa (material de alta rigidez, tipo roca arcillos), 1000 MPa (límite superior para un suelo compactado) y 100 MPa (suelo bien graduado y bien compactado)). La Figura 4 muestra la evolución de la presión de poros calculada en el Punto  $P_B$  (Figura 3). El desembalse instantáneo se simula en el día 1. Según el análisis de flujo, la presión intersticial no varía de forma inmediata mientras que el efecto es significativo cuando se modela mediante un análisis acoplado. A menor rigidez, la caída de presión es mayor siendo prácticamente la total en el caso de  $E=100$  MPa. Inmediatamente después del desembalse, se inicia el proceso de disipación. La velocidad de disipación está controlada por la permeabilidad (igual en todos los casos) y la rigidez. Se observa que en el caso desacoplado, la velocidad de disipación es mayor, pues considera, de forma implícita, el suelo infinitamente rígido. Se puede concluir de los resultados mostrados que para valores del módulo de Young ( $E$ ) de 100 MPa, habituales en materiales compactados de presas de tierras, un análisis desacoplado predice una respuesta extremadamente irreal.

### 3.2. DESEMBALSE PROGRESIVO

El análisis presentado en esta sección únicamente se diferencia del anterior en la velocidad de desembalse. En este caso se simula un descenso progresivo del nivel de agua de 0.5 m/s. En la Figura 5 se indican las presiones calculadas en el Punto  $P_A$ . Durante el desembalse y para todas las rigideces consideradas, el análisis desacoplado sobreestima las presiones al no incluir los efectos de la descarga, significativos en este caso. Sin embargo, a los 100 días del desembalse, la mayor velocidad de disipación calculada mediante el análisis de flujo lleva a presiones inferiores que en el caso de análisis acoplado. El periodo necesario para que esto ocurra depende de la relación entre la permeabilidad, la velocidad de desembalse y la compresibilidad de los materiales. Se puede dar el caso contrario al mostrado en la Figura 5 de forma que durante el desembalse, el cálculo desacoplado prediga menores presiones de poros (como ocurre en la simulación de un caso real presentada a continuación).

### 3.2. REVISIÓN DE REGLAS DE DISEÑO

Consideremos en este apartado el caso de materiales relativamente permeables. El acoplamiento mecánico no es aparentemente tan relevante en estos casos por las razones mencionadas previamente. Habitualmente las recomendaciones para estos casos parten de procedimientos numéricos, analíticos o gráficos basados en análisis de flujo. Sin embargo, el desembalse implica que el suelo evolucione progresivamente de un estado saturado a un estado parcialmente saturado. La distribución de poros en el interior de la ladera dependerá de las propiedades de los suelos no saturados, y en particular de la capacidad de retener agua del suelo. Algunos de los procedimientos aproximados ofrecen la estimación de la presión de poros por desembalse rápido en función de la velocidad del desembalse, las propiedades geométricas del talud y algunas propiedades geotécnicas del material que lo constituye.

La Figura 6 muestra un ejemplo de procedimiento gráfico para el análisis de estabilidad de presas de tierras con núcleo impermeable sometidos a des-

embalse rápido (U.S. Army Corps of Engineers, 1970). El gráfico estima la posición de la superficie libre después de un desembalse de altura  $H_D$  a una velocidad  $v$ . El espaldón, con pendiente  $\tan\beta$ , se considera homogéneo y caracterizado por un material de permeabilidad saturada  $K_{sat}$  y porosidad efectiva,  $n_e$ .

Con el objetivo de mostrar las implicaciones de una modelación que incluya el comportamiento propio de un suelo saturado/no saturado se han analizado algunos casos sencillos directamente inspirados en la geometría de la Figura 6. Las propiedades del suelo se indican en la Tabla 1.

Table 1. Propiedades geomecánicas del suelo

Parámetros	Unidades	Valor		
		Caso 1	Caso 2	Caso 3
E	MPa	100	100	100
K <sub>sat</sub>	m/s	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-4}$
$p_0$	MPa	2-0.05	0.2-0.007	0.05-0.0005
$\lambda$	-	0.3	0.3	0.3
$S_{rmax}$	-	1	1	1
$S_{rmin}$	-	0	0	0

La pendiente analizada corresponde a  $b = \cot(\beta) = 1.8$ . La velocidad de desembalse es de 0.5 m/día. Se consideran tres permeabilidad distintas. El Caso 1 típicamente corresponde a una mezcla de gravas, arenas y limos con baja proporción de arcilla. El Ca-

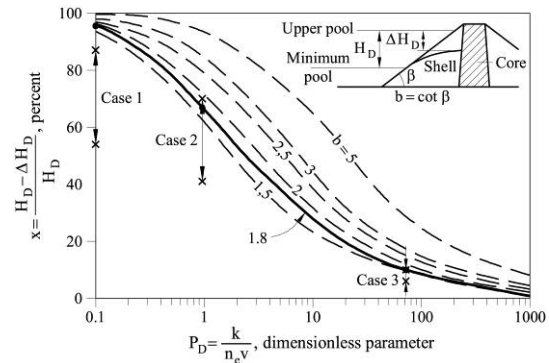


Figura 6. Gráfico para determinar la altura de la superficie libre después de un desembalse. (U.S. Corps of Engineers, 1970).

so 2 a un material más drenante, típicamente un material graduado y bien compactado. Y finalmente el Caso 3 es propio un material permeable como son las gravas arenosas. La porosidad efectiva escogida refleja el tipo de suelo en cada caso. Los tres casos se han incluido en la Figura 6. Una propiedad adicional es la capacidad del suelo de retener agua. En este apartado se analiza el efecto de esta propiedad sobre la posición de la superficie libre después del desembalse que se compara con las estimaciones del procedimiento gráfico presentado. La capacidad del suelo de retener agua se define mediante la curva de retención de van Genuchten. Por consiguiente, se deben considerar como parámetros adicionales:  $p_0$  (parámetro que controla el valor de entrada de aire),  $\lambda$  (que define la forma de la curva de retención) y el grado de saturación máximo ( $S_{rmax}$ ) y mínimo ( $S_{rmin}$ ). Se consideran únicamente variaciones razonables del valor  $p_0$  según el tipo de material y se fijan el resto de parámetros. Los valores de los parámetros se indican en la Tabla 1. Las Figuras 7 y 8 muestran las distribuciones de presión calculadas con los valores extremos de  $p_0$  para los Caso 1 y 2. El descenso del nivel freático al finalizar el desembalse en el límite de aguas arriba del núcleo se indica en el pie de las figuras. Estos valores, junto con los correspondientes al Caso 3, también se indican en la Figura 6 y pueden compararse con el valor estimado por el procedimiento gráfico. Se observan discrepancias significativas. Únicamente en el caso más permeable, la predicción del procedimiento gráfico se ajusta a los resultados calculados. El efecto del valor de  $p_0$  es significativo y, contrariamente a las expectativas, la altura del nivel freático decrece cuando el valor de entrada de aire aumenta. Este resultado es válido para un determinado valor de la per-

meabilidad. Por ello, esta conclusión tiene sentido cuando se considera un rango limitado y razonable de los valores de  $p_0$  de acuerdo con la permeabilidad saturada escogida. Los resultados obtenidos en los cálculos pueden ser explicados con mayor facilidad si se considera la distribución del grado de saturación en el interior del talud.

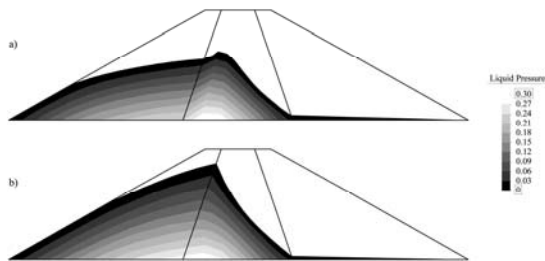


Figura 7. Distribución de presión de poros después de desembalse total para el Caso 1: (a)  $p_0=2$  MPa.  $\Delta H_D=23$  m y (b)  $p_0=0.05$  MPa.  $\Delta H_D=6$  m.

La Figura 9 muestra el grado de saturación en un perfil vertical a media altura del talud para el Caso 2. Dada una permeabilidad, la cantidad de agua drenada durante el desembalse es similar para los dos valores de  $p_0$  considerados. Por encima del nivel freático (succión mayor a cero), si  $p_0$  es menor, incluso para bajas succiones (cerca del valor de entrada de aire), el grado de saturación decrece significativamente y la cantidad de agua drenada de la parte no saturada del talud es relativamente elevada. Por lo contrario, si  $p_0$  es mayor, la zo-

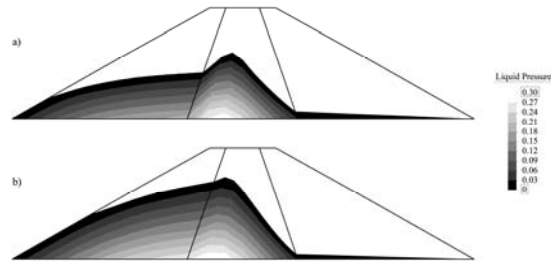


Figura 8. Distribución de presión de poros después de desembalse total para el Caso 2: (a)  $p_0=0.2$  MPa.  $\Delta H_D=29$  m y (b)  $p_0=0.007$  MPa.  $\Delta H_D=15$  m.

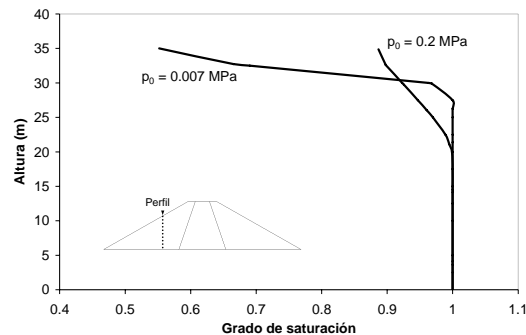


Figura 9. Grado de saturación después de desembalse total a lo largo del perfil vertical indicado por el Caso 2.

na por encima del nivel freático, aunque a presiones negativas, está prácticamente saturada (altos valores del grado de saturación). Por consiguiente, el nivel freático desciende más a fin de drenar la misma cantidad de agua.

#### 4. CASO REAL : GLEN SHIRA DAM (ESCOCIA)

La presa Glen Shira fue sometida a un desembalse rápido controlado durante el cual se tomaron medidas de presión en los puntos indicados en la Figura 10 de la sección central. Los datos fueron publicados por Paton y Semple (1961). En la Figura 10 también se indica la geometría de la presa y los materiales que la constituyen. Nótese la presencia de una capa de material drenante bajo el espaldón de aguas arriba que facilita su drenaje. La evolución del nivel del embalse se indica en la Figuras 11-13. La altura máxima de desembalse (9.1 m) descendió en cuatro etapas separadas por un intervalo de tiempo en el que el nivel se mantuvo constante. La velocidad media de desembalse es de 7.2 m/día (una velocidad alta). Se comparan las medidas presión con los resultados calculados en las Figuras 11-13 para tres de los piezómetros.



En la Tabla 2 se indican las propiedades de los materiales obtenidas a partir de Paton y Semple (1961) utilizadas en los cálculos. Por simplicidad, se considera únicamente la respuesta elástica de los materiales.

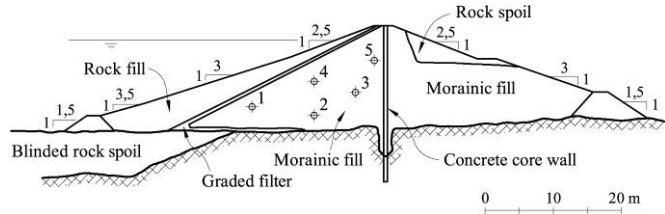


Figura 10. Sección central de la presa Shira.

Tabla 2. Propiedades de los materiales de la presa Shira

Parámetros	Unidades	Valor	
		Suelo morrénico	Escollera
Propiedades mecánicas			
Módulo de Young	MPa	100	100
Coefficiente de Poisson	-	0.3	0.3
Propiedades hidráulicas			
Permeabilidad saturada	m/s	$1.6 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Parámetro van Genuchten, $p_0$	MPa	0.05	0.01
Parámetro van Genuchten, $\lambda$	-	0.2	0.4

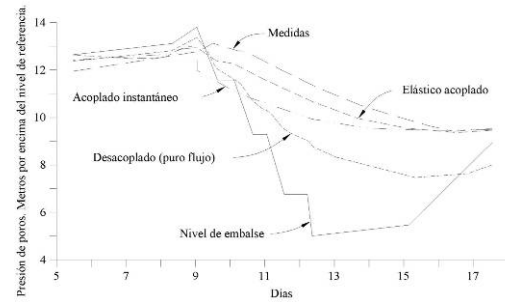


Figura 11. Evolución temporal de la presión en el desembalse de la presa de Shira. Piezómetro 3

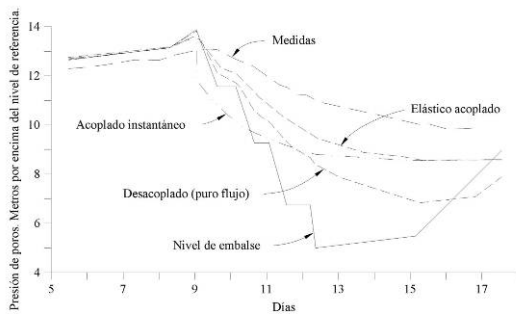


Figura 12. Evolución temporal de la presión en el desembalse de la presa de Shira. Piezómetro 4.

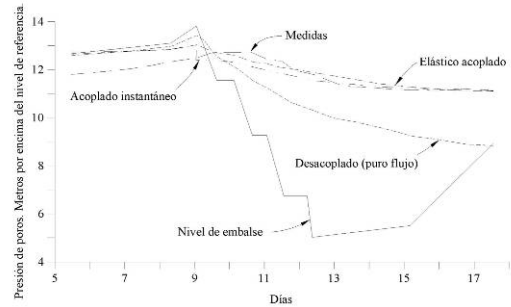


Figura 13. Evolución temporal de la presión en el desembalse de la presa de Shira. Piezómetro 5.

Es interesante comparar los resultados del análisis acoplado con los de un desembalse instantáneo de igual magnitud y calculado también de forma acoplada. De esta forma se puede diferenciar el efecto de la descarga tensional y la posterior disipación de los excesos de presión. El análisis de flujo no incluye la caída de presión por descarga (significativa sobre todo en la parte inferior del talud). Sin embargo sobreestima la disipación y las presiones calculadas son inferiores a las reales y a las calculadas mediante análisis acoplado. Un estudio de estabilidad basado en estas presiones dejaría el análisis del lado de la inseguridad. Como conclusión, en el caso particular de la presa de Shira, un análisis acoplado es capaz de captar la evolución de la distribución de presión de poros debida a un desembalse mientras que la simplificación de flujo desacoplado lleva a errores significativos. Posiblemente un ajuste más preciso de las medidas podría obtenerse si se modelara la respuesta constitutiva de los materiales de una forma más realista como por ejemplo considerando su comportamiento elastoplástico.

## 5. CONCLUSIONES

La distribución de la presión de poros en una ladera o talud inicialmente sumergido y sometido a un desembalse rápido depende de varios parámetros y de las condiciones externas: permeabilidad (saturada y no saturada), capacidad de retener agua, comportamiento mecánico (tensión-deformación), velocidad de desembalse y condiciones de contorno geométricas. El artículo señala que la adecuada consideración de estos aspectos es únicamente posible si se considera el comportamiento hidro-mecánico acoplado en condiciones saturadas y no saturadas de los materiales involucrados. En su gran mayoría, los procedimientos simplificados son únicamente adecuados en casos extremos (muy permeables o materiales muy rígidos) que a menudo no están presentes en la práctica. La mayor dificultad recae en que es difícil conocer a priori si estos métodos simplificados ofrecen una solución próxima a la real y si están o no del lado de la seguridad. Dejando aparte las consideraciones propias de un análisis en suelos saturados/no saturados, existen dos mecanismos que controlan la presión de poros resultante de un desembalse rápido: los cambios de presión de poros inducidos por la descarga tensional y los cambios en las condiciones de contorno hidráulicas. Ambos efectos deben ser considerados desde un punto de vista acoplado para poder ser interpretados adecuadamente.

## 5. REFERENCIAS

- Brahma, S.P. y M.E. Harr (1962), Transient development of the free surface in a homogeneous earth dam. *Géotechnique*, 12, 283-302.
- Cedergren, H.R. (1967), Seepage, drainage and flow nets, edited by Wiley, New York.
- Cividini, A. y G. Gioda (1984), Approximate F. E. analysis of seepage with a free surface. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 8, 6, 549-566.
- Desai, C.S. (1977), Drawdown analysis of slopes by numerical method. *Jnl. of the Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, N° GT7: 667-676.
- DIT-UPC (2002) CODE\_BRIGHT. A 3-D program for thermo-hydro-mechanical analysis in geological media. *USER'S GUIDE*. (CIMNE), Barcelona.
- Hromadka, T. V. y G. L. Guymon (1980), Some effects of linearizing the unsaturated soil moisture transfer diffusivity model. *Water Res. Res.* 16 (4), 643-650.
- Lane, P.A. y D.V. Griffiths (2000), Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. *Jnl. Geotech. and Geoenv. Engng.* 126(5): 443-450.
- Neumann, S.P. (1973), Saturated-unsaturated seepage by finite elements. *Jnl. Hydraul. Div.*, ASCE, 99, HY12: 2233-2250.
- Paton, J. y N. G. Semple (1961), Investigation of the stability of an earth dam subjected to rapid drawdown including details of pore pressure recorded during a controlled drawdown test. *Pore pressure and suction in soils*, 85-90. Butterworths, London.
- Pauls, G.J., E. Karlsauer, E.A. Christiansen y R.A. Wigder (1999), A transient analysis of slope stability following drawdown after flooding of highly plastic clay. *Can. Geotech. Jnl.*, 36, 1151-1171.
- Sherard, J.L., R.J. Woodward, S. F. Gizienski y W. A. Clevenger (1963), Earth and earth-rock dams, edited by John Wiley and Sons, New York.
- Skempton, A.W. (1954), The pore pressure coefficients A and B. *Géotechnique*, 4(4), 143-147.