

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLO DE PRESAS DE HORMIGÓN EN EL CONTEXTO DEL ANÁLISIS DE RIESGOS

Luis Altarejos García¹

Ignacio Escuder Bueno²

Manuel G. de Membrillera Ortuño³

Armando Serrano Lombillo⁴

RESUMEN: En el campo de la ingeniería de presas, se están desarrollando y perfeccionando metodologías basadas en el Análisis de Riesgos, que tienen como objetivo ayudar a la toma de decisiones en el ámbito de la seguridad de presas. Las metodologías de análisis de riesgos precisan cuantificar el riesgo, lo que en general implica estimar la probabilidad condicional de la respuesta del sistema presa-embalse dado un determinado evento de sollicitación, así como las consecuencias asociadas. Se muestra una metodología que incorpora diversas técnicas para abordar la estimación de la probabilidad condicional de rotura, sobre la base de diferentes modelos de comportamiento de la presa. Dicha metodología se aplica a un caso real correspondiente a una presa de gravedad para el modo de fallo por deslizamiento en el contacto entre presa y cimiento.

¹ Doctor Ingeniero de Caminos. Universidad Politécnica de Valencia. Director Técnico CPS Ingenieros.

² Doctor Ingeniero de Caminos. Universidad Politécnica de Valencia.

³ Doctor Ingeniero de Caminos. Universidad Politécnica de Valencia. OFITECO.

⁴ Ingeniero de Caminos,. Universidad Politécnica de Valencia

1. INTRODUCCIÓN

El riesgo aplicado a la seguridad de presas puede definirse como “la oportunidad de producirse pérdidas o daños, entendidos como una medida de la probabilidad y severidad de los efectos adversos sobre la salud, la propiedad, el medio ambiente u otro elemento de valor” (ICOLD [4]). La ecuación que describe la forma en que se cuantifica el riesgo medio en seguridad de presas sería por tanto la siguiente:

$$\text{Riesgo} = \int P(\text{escenario}) \times P(\text{respuesta} \mid \text{escenario}) \times C(\text{solicitud}, \text{respuesta}) \quad (1)$$

donde el símbolo “ \mid ” representa probabilidad condicional.

La aplicación del Análisis de Riesgos en presas exige, entre otras actividades, realizar una identificación de los posibles modos de fallo de la presa y la posterior estimación cuantitativa de la probabilidad asociada a dichos modos de fallo, es decir, cuantificar la probabilidad condicional de la respuesta del sistema, dada una determinada solicitud (Membrillera et al [6]). Esta probabilidad, P_f , se puede formular de forma general mediante la ecuación (2).

$$P_f [g^*(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0] = \int_{g^*(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (2)$$

donde:

x_1, x_2, \dots, x_n : son las variables que intervienen en el problema (geométricas, propiedades de los materiales, acciones, etc.)

$g^*(x_1, x_2, \dots, x_n)$: es la función de estado correspondiente al modo de fallo analizado, de modo que el fallo se produce si $g^* \leq 0$

f_{X_1, X_2, \dots, X_n} : es la función de densidad de probabilidad conjunta de las variables

Para resolver el problema así planteado existen diversas técnicas estadísticas de fiabilidad estructural, que se clasifican formalmente en tres niveles (Mínguez [7]):

Nivel 1: Método de los coeficientes de seguridad parciales. No proporciona la probabilidad de fallo. La incertidumbre se mide mediante factores arbitrarios.

Nivel 2: Método de los momentos de segundo orden. Puede proporcionar la probabilidad de fallo. Aproxima la función de densidad de probabilidad conjunta $f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ mediante sus dos primeros momentos (media y desviación típica). En algunos casos, se utiliza también una aproximación para la región de fallo $g^*(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Nivel 3: Métodos exactos. Proporciona la probabilidad de fallo. Utiliza la función de densidad conjunta global y métodos específicos para poder realizar la integración.

La modelación del comportamiento de la presa puede alcanzar un elevado grado de complejidad, que incluye el empleo de modelos constitutivos no lineales y técnicas de análisis dinámico en el dominio del tiempo. Estos modelos precisan del conocimiento de un número elevado de parámetros, cuya determinación frecuentemente se establece sobre la base de datos escasos, a menudo tomados de casos similares publicados.

2. PROPUESTA METODOLÓGICA

La metodología confeccionada tiene como objetivo la estimación de la probabilidad condicional de fallo y se basa en los siguientes principios básicos (Altarejos [1]):

- Debe siempre considerarse el análisis clásico mediante coeficientes de seguridad como punto inicial de referencia. Todas las presas existentes han sido proyectadas de acuerdo con unos principios y métodos que han demostrado su eficacia, robustez y fiabilidad.
- Para el modo de fallo analizado se propone establecer al menos dos modelos de comportamiento: uno inicial de referencia, lo más sencillo posible, que trate de capturar los fenómenos esenciales involucrados y un segundo modelo, más avanzado, reproduzca con más exactitud el fenómeno analizado.
- Un aspecto clave es la caracterización probabilística de las variables que intervienen en el problema. Esta fase debería realizarse siempre en colaboración con los técnicos que participan en la explotación de la presa, y con grupos de expertos (hidráulica, geotecnia, etc.).
- Se propone el empleo de técnicas de fiabilidad de Nivel 2 como paso previo para determinar el orden de magnitud de las probabilidades así como para discriminar las variables más relevantes
- Una vez discriminadas las variables esenciales, se emplean técnicas de fiabilidad de Nivel 3 que proporcionan valores más exactos de la probabilidad.
- Se deben revisar críticamente los resultados obtenidos.

3. CASO DE ESTUDIO, MODELOS DE ANÁLISIS Y VARIABLES CONSIDERADAS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La metodología se ha aplicado a un caso de estudio, correspondiente a una presa de gravedad. Se considera el escenario hidrológico con 7 niveles de embalse y modo de fallo por deslizamiento en el contacto entre presa y cimiento en la sección por aliviadero (Membrillera [5]). La sección presenta un perfil triangular, con talud 0.05 aguas arriba y 0.75 aguas abajo. La altura de la sección es de 73 m sobre el cimiento. El umbral de vertedero se sitúa a la cota 313 m mientras que el plano de cimentación está en la cota 240 m. La longi-

tud de coronación es de 198 metros y su anchura total de 8 metros, siendo su cota de 322.50 m.

3.2. MODELOS DE CÁLCULO DE LA PRESA

El modelo más sencillo es un modelo de equilibrio límite 2D, con la geometría recogida en la figura 2.

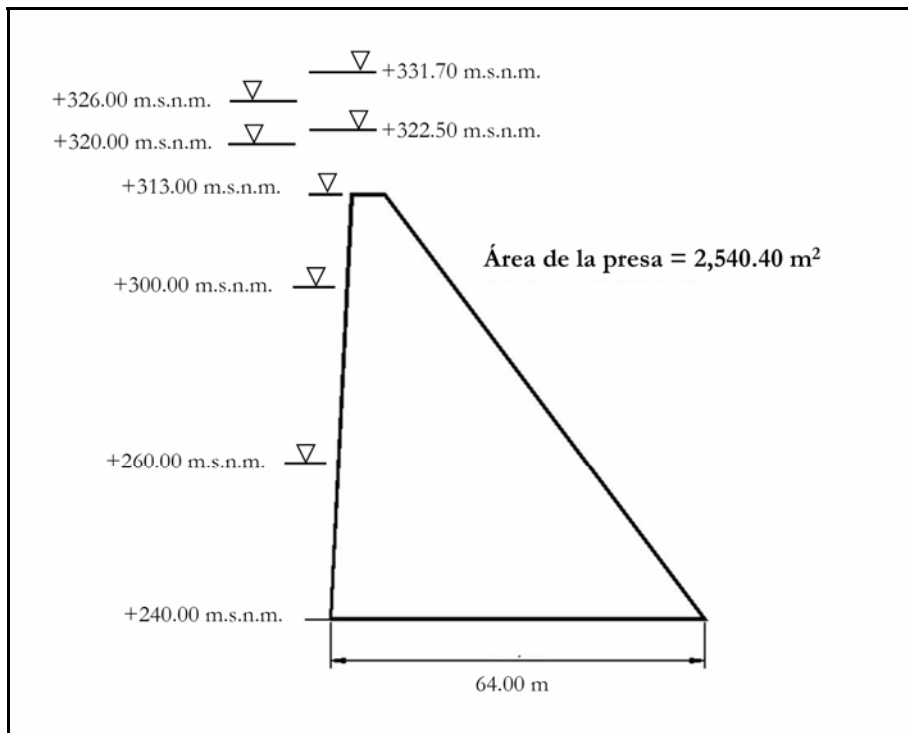


Figura 1: Sección de cálculo simplificada de la presa de estudio.

El modelo presenta una única interfaz predefinida, que es el contacto entre presa y cimiento. En esta interfaz se puede movilizar una cierta resistencia a tracción (Ruggeri et al [9]). La resistencia al deslizamiento se define mediante un modelo de Mohr-Coulomb, en función del ángulo de rozamiento y de la cohesión. En el segundo modelo empleado tanto la presa como el cimiento se tratan como sólidos deformables elásticos. Para el cálculo se utilizó el código bidimensional en diferencias finitas FLAC 2D (Itasca Consulting Group, Inc., 1994). Se definen dos regiones: presa y cimiento, junto con la interfaz entre ambas. La región del cimiento se extiende aguas arriba y aguas abajo hasta una distancia horizontal de 120 m de los pies de la presa y abarca los primeros 80 m de profundidad bajo el plano de apoyo de la presa. Se ha adoptado una malla que supone una solución de compromiso entre la necesidad de evitar concentraciones de tensión falsas y asegurar una mínima densidad de malla, sobre todo en la base de la presa, a fin de reproducir adecuadamente la apertura y propagación de una fisura. La malla escogida se muestra en la figura 2.

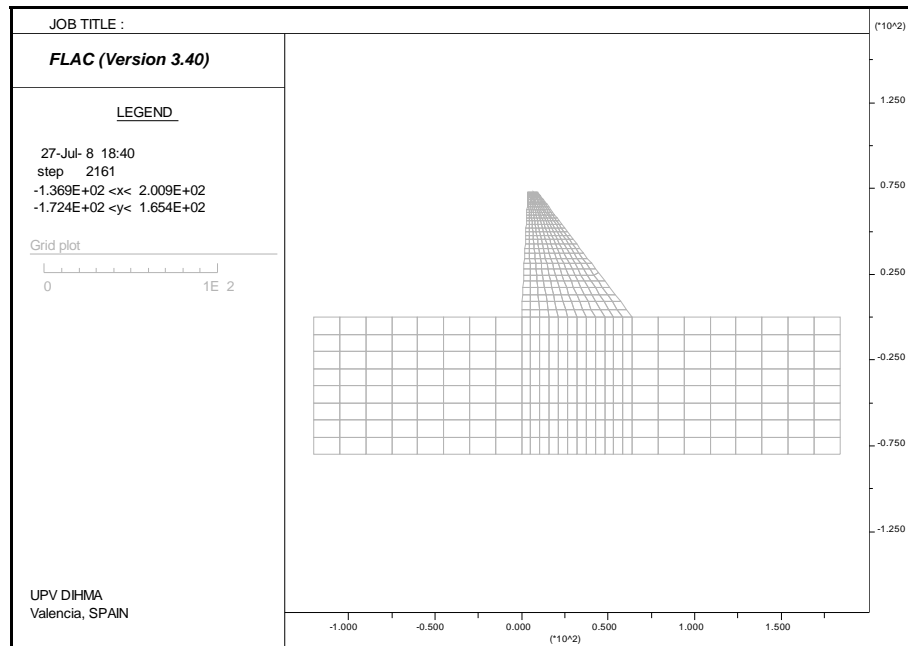


Figura 2: Sección por aliviadero. Modelo geométrico. Malla de cálculo

3.3. VARIABLES CONSIDERADAS

Se consideran las 10 variables aleatorias recogidas en el cuadro 1.

Cuadro 1: Variables consideradas

Variable	Unidad	PDF	Media	Desviación típica	Valor Min	Valor Max
Densidad hormigón (ρ_c)	kg/m ³	Normal	2350	49.67	2150	2550
Ineficacia del drenaje (K)	-	Triangular	0.37	0.22	0.00	1.00
Δ Subpresión $H > NMN$ (α)	-	Uniforme	0.50	0.29	0.00	1.00
Peso esp. sediment. (γ_{sed})	N/m ³	Triangular	873.3g	98.7g	650g	1130g
Altura sedimentos (H_{sed})	M	Uniforme	7.75	4.47	0.00	15.50
Empuje sediment. (K_{sed})	-	Triangular	0.415	0.035	0.333	0.500
R. Compresión cim. (σ_{cm})	MPa	Lognormal	9.06	0.60	0	$+\infty$
Fricción en contacto (φ)	°	Normal	50	8.79	30	70
Cohesión en contacto (c)	MPa	Lognormal	0.418	0.298	0.00	2.00
Tracción en contacto ($\sigma_{i,t}$)	MPa	Normal	0.90	0.22	0.00	1.80

Estas variables se consideran estadísticamente independientes entre sí y se les ha asignado una función de distribución de probabilidad (PDF) partiendo de la información disponible (Altarejos [1]). Además, para los cálculos con el modelo de sólido deformable se incluyen las propiedades tenso-deformacionales de la presa ($E_c=15$ GPa; $\nu_c=0.24$) y el cemento ($E_t=5.45$ GPa; $\nu_t=0.26$).

4. COEFICIENTES DE SEGURIDAD OBTENIDOS

Para poder realizar una comparación consistente con los valores obtenidos mediante el modelo de equilibrio límite, se hace una definición alternativa del coeficiente de seguridad para el modelo de sólido deformable. Así, el coeficiente de seguridad se define como la relación entre el valor esperado de una variable y el valor correspondiente a la situación de fallo (Serrano [10]), como se indica en la ecuación (3). Los resultados obtenidos se recogen de forma gráfica en la figura 3.

$$FS = \frac{\varphi}{\varphi_{ult}} = \frac{c}{c_{ult}} \quad (3)$$

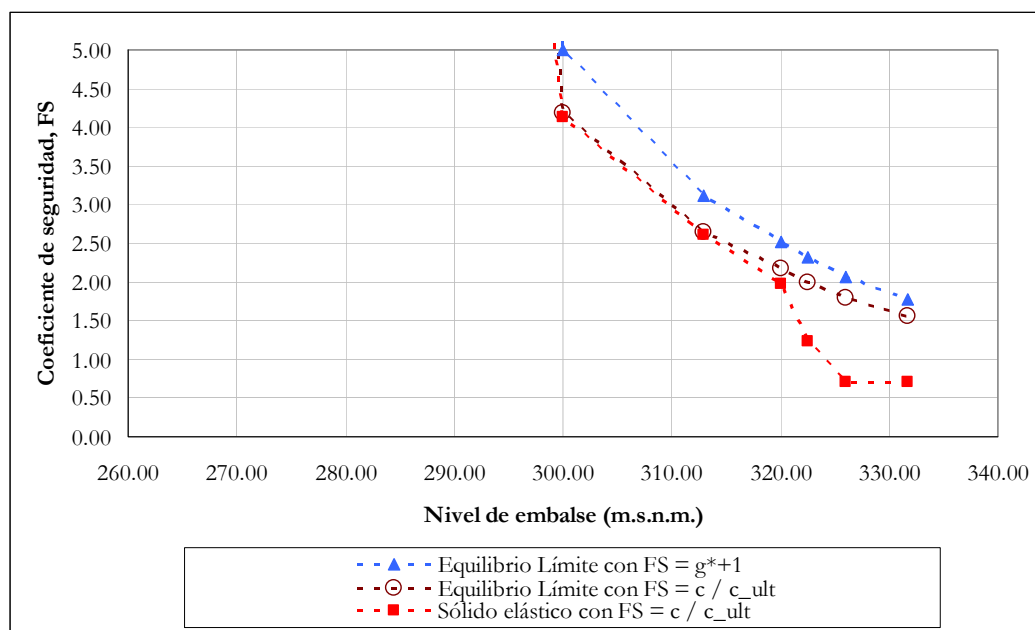


Figura 3: Coeficientes de seguridad obtenidos

Hay que recordar que estos coeficientes de seguridad han sido obtenidos con los valores medios de las variables correspondientes a la mejor estimación de los mismos, y no con los valores “del lado de la seguridad” habitualmente utilizados en la práctica.

5. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES MÁS RELEVANTES

Sobre la base del modelo de equilibrio límite, y mediante la aplicación de uno de los métodos de fiabilidad de Nivel 2 (método FOSM de Taylor) y la consideración inicial de las diez variables aleatorias descritas con anterioridad, se ha obtenido, para los 7 niveles de embalse establecidos, la contribución de las diferentes variables aleatorias a la variabilidad de la función de estado, g^* , como se recoge en la figura 4.

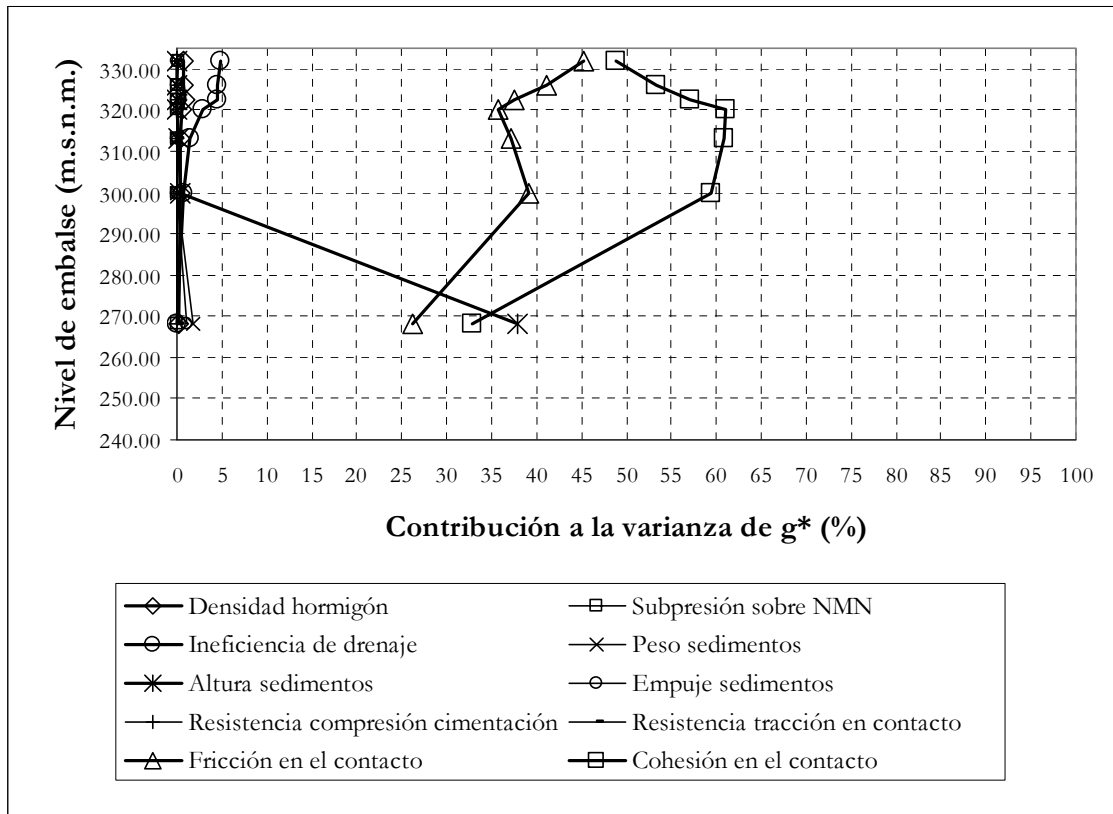


Figura 4: Contribución de las variables a la función de estado

Como se puede observar, para todos los niveles de embalse analizados, las variables con una mayor contribución a la varianza de la función de estado son el ángulo de fricción y la cohesión, siendo claramente inferior la contribución del resto de variables. Si se calcula la probabilidad de fallo considerando como variables aleatorias únicamente estas dos y manteniendo el resto con valores fijos, se comprueba que los resultados son muy similares a los obtenidos con 10 variables aleatorias.

6. PROBABILIDADES OBTENIDAS

Sobre la base del modelo de equilibrio límite, una vez seleccionadas las dos variables aleatorias con mayor contribución a la varianza de la función de estado y considerando el resto de variables como determinadas con valores igua-

les a sus valores medios, se realiza un análisis de fiabilidad de Nivel 2 mediante tres métodos: FOSM-Taylor, Point Estimate Method (Rosenblueth [8]) y ASM (Hasofer & Lind [3]) y un análisis de fiabilidad de Nivel 3 mediante técnicas de simulación de Monte Carlo, que proporcionan una estimación más exacta de la probabilidad de fallo.

Se pasa a continuación al cálculo de probabilidades sobre el modelo de sólido deformable. En este caso no se ha realizado el análisis de fiabilidad de Nivel 2 ya que las definiciones de las funciones de estado correspondientes al modelo de sólido elástico y al modelo de equilibrio límite son de naturaleza esencialmente distinta, por lo que no se considera significativa la comparación entre los valores de probabilidad que se obtengan con ambos modelos utilizando los métodos de Nivel 2. Por ello, se pasa directamente al análisis de fiabilidad de Nivel 3 mediante técnicas de Monte Carlo. La estrategia seguida ha consistido en el empleo de la herramienta de simulación numérica de sólido deformable para la determinación de la superficie límite, que configura la zona de frontera entre la región segura y la región de fallo en el espacio de las variables consideradas. Una vez definida esta superficie (una línea curva en el caso de un espacio bidimensional con dos variables aleatorias), la obtención de la probabilidad de fallo mediante las técnicas de Monte Carlo es inmediata (Cho [2]), como se ilustra en la Figura 5.

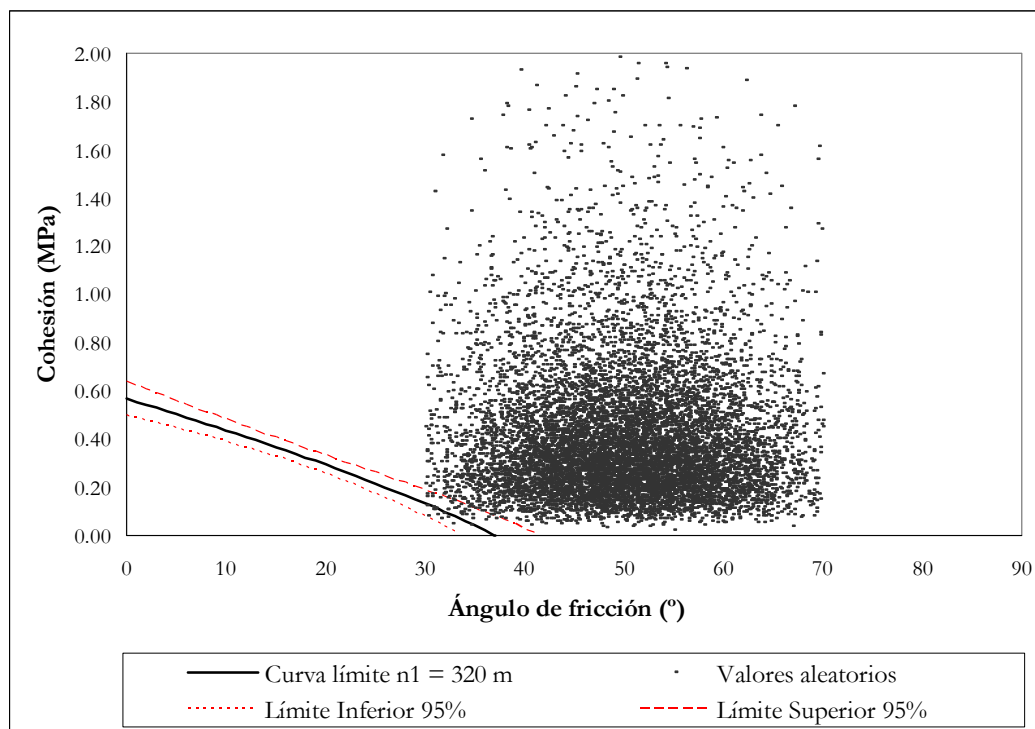


Figura 5: Aplicación del método de Monte Carlo sobre la superficie límite

Las curvas Nivel de embalse-Probabilidad de fallo obtenidas con los dos modelos de comportamiento empleados y para los diferentes métodos de fiabilidad utilizados se recogen en la figura 6.

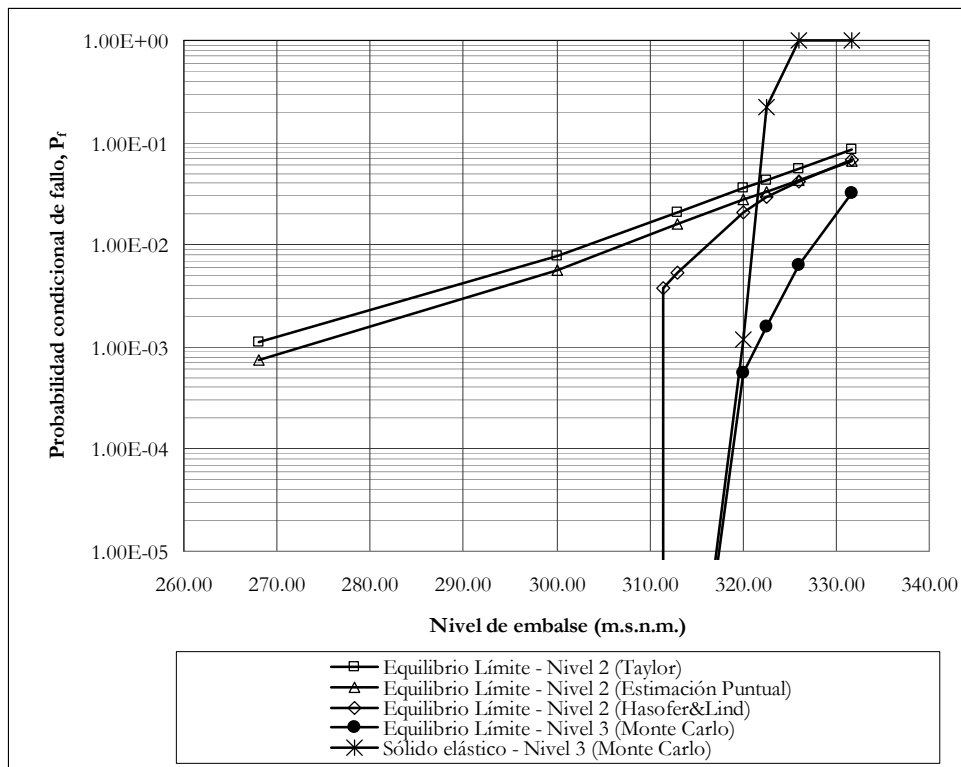


Figura 6: Curvas Nivel de embalse-Probabilidad de fallo obtenidas

7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos se comprueba que sobre el modelo de equilibrio límite los métodos de fiabilidad de Nivel 2 proporcionan valores de la probabilidad de fallo superiores a los de Nivel 3. Estos valores son más altos cuanto más sencillo es el método de fiabilidad utilizado. La curva de niveles de embalse-probabilidad de fallo obtenida con el análisis de fiabilidad de Nivel 3 sobre el modelo numérico de sólido elástico muestra una forma similar a la deducida con el modelo de equilibrio límite, siendo el hecho más relevante que conforme los niveles de embalse se aproximan a la coronación, las probabilidades de fallo obtenidas son mayores con el modelo numérico. Este hecho apunta a que los modelos de comportamiento más sencillos pueden infravalorar la probabilidad de fallo para niveles altos de embalse. Factores como la resistencia a la tracción en la interfaz entre presa y cimiento y la influencia sobre la misma del “efecto de escala” parecen jugar un papel clave.

Los resultados de probabilidad obtenidos, además, deben contextualizarse teniendo en cuenta los diversos tipos de incertidumbre existentes en el proceso: (a) la incertidumbre asociada a la aleatoriedad o variabilidad natural, tanto espacial como temporal, de las variables; (b) la incertidumbre epistémica sobre los parámetros de los materiales derivada del escaso número de datos disponibles de ensayos; y (c) la incertidumbre epistémica asociada a la limitada ca-

pacidad que los modelos matemáticos o numéricos de comportamiento empleados tienen para representar fielmente la realidad.

Dada la gran dispersión resultados obtenidos se considera interesante evaluar la repercusión que esta variabilidad puede tener sobre los resultados globales en términos de riesgo y que incidencia puede tener sobre la toma de decisiones relacionadas con la seguridad de la presa.

REFERENCIAS

- [1] ALTAREJOS, L. (2009). Contribución a la estimación de la probabilidad de fallo de presas de hormigón en el contexto del análisis de riesgos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- [2] CHO, S.E. (2009). Probabilistic stability analyses of slopes using the ANN-based response surface. *Computers and Geotechnics* 36 pp.787-797.
- [3] HASOFER, A.M.; LIND, N.C. (1974). Exact and invariant second moment code format. *Journal of Engineering Mechanics*. 100, EM1, 111-121
- [4] ICOLD – International Commission on Large Dams (2009). Guidelines for use of numerical models in dam engineering. Proposal for new bulletin. Ad-Hoc Committee on Computational Aspects.
- [5] MEMBRILLERA, M.G. de (2007). Contribución a la aplicación del análisis y declaración de riesgos en presas españolas, incluyendo priorización de inversiones. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- [6] MEMBRILLERA, M.G. de; ESCUDER, I.; GONZÁLEZ, J; ALTAREJOS, L. (2005). Aplicación del análisis de riesgos a la seguridad de presas. Ed. Universidad Politécnica de Valencia.
- [7] MÍNGUEZ, R. (2003). Seguridad, fiabilidad y análisis de sensibilidad en obras de ingeniería civil mediante técnicas de optimización por descomposición. Aplicaciones. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- [8] ROSENBLUETH, E. (1981). Two-point estimates in probabilities. *Applied mathematical modeling*, 5.
- [9] RUGGERI, G.; PELLEGRINI, R.; RUBIN DE CELIX, M.; BERNSTEN, M.; ROYET, P.; BETTZIECHE, V.; AMBERG, W.; GUSTAFFSON, A.; MORISON, T. and ZENZ, G. (2004). Sliding safety of existing gravity dams. Final report. ICOLD European Club. Working group on sliding safety of existing gravity dams.
- [10] SERRANO, A. (2007). SERRANO, A. (2007). Modelación numérica del comportamiento de presas en el contexto del análisis de riesgos. Universidad Politécnica de Valencia.