

12 RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. Para analizar la respuesta sísmica del apilamiento de fosfoyesos, situado en en las marismas del Rincón, en la provincia de Huelva, en las inmediaciones de la capital, se han seleccionado tres secciones (1 longitudinal y 2 transversales) representativas de la totalidad de la estructura. Procediendo de esta manera y teniendo en cuenta el notable desarrollo longitudinal en planta que presenta esta balsa se considera que, mediante estas tres secciones, se analiza de manera racional al conjunto de la estructura.
2. Las propiedades geotécnicas de los diferentes materiales implicados correspondientes al comportamiento estático se corresponden con la caracterización de los mismos elaborada por EPTISA para su estudio. También se ha tenido en cuenta la campaña de ensayos de laboratorio dinámicos, llevada a cabo en las instalaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la UPM.
3. De particular importancia resulta conocer el estado tensional preexistente que configura la situación previa a la llegada del terremoto. Para tal fin se ha efectuado un cálculo por medio de la técnica de las diferencias finitas, teniendo en cuenta con detalle el proceso constructivo que se ha llevado a cabo hasta el momento.
4. Los resultados de los cálculos obtenidos bajo condiciones estáticas han sido contrastados con los resultados obtenidos mediante el código informático PLAXIS. La similitud de resultados, bajo los mismos supuestos de partida, es prácticamente total.
5. La reproducción de la generación de presiones intersticiales durante el tiempo que dura la sacudida sísmica se ha efectuado en base al modelo de Finn-Byrne. Para la identificación de sus parámetros más representativos se han utilizado específicamente los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio citados.
6. Se ha introducido de manera justificada e individualizada la degradación de los distintos materiales con el nivel de deformaciones que se alcanza. Básicamente, como amortiguamiento en la rama elástica de los materiales, se ha incorporado un modelo de amortiguamiento histerético, que es el que se considera más adecuado para la modelización de los materiales geotécnicos afectados por sollicitaciones dinámicas. Adicionalmente, se ha empleado un amortiguamiento tipo Rayleigh para evitar que las frecuencias muy elevadas aumenten innecesariamente el tiempo de cálculo.
7. Los cálculos han sido realizados por medio del código informático desarrollado por ITASCA, FLAC3D en su versión 5.01, que se basa en el método de las diferencias finitas.
8. Los resultados de estos cálculos dinámicos han sido también contrastados, en seis posiciones representativas, con los obtenidos mediante cálculos unidimensionales y el célebre código informático SHAKE. Los resultados obtenidos, en términos de la evolución con la altura de la aceleración máxima y los niveles de deformación cíclica alcanzados durante el terremoto, son muy similares, lo que permite confirmar la bondad de los cálculos globales efectuados con las tres secciones analizadas.
9. El esfuerzo de cálculo realizado ha sido más que notable en la medida en la que finalmente se han efectuado, después de un dilatado proceso de depuración y de contraste, 21 cálculos diferentes, (15 bidimensionales y 6 unidimensionales), obteniéndose una

información que ocupa del orden de 117 Gb. Parte de esta información se suministra, a modo de salidas gráficas, en los apartados de resultados (9, 10 y 11).

10. La sismicidad seleccionada se corresponde con un nivel de riesgo mínimo, (con una probabilidad de ocurrencia anual del orden de 10^{-4}), que en ámbitos profesionales se califica con el término de terremoto “extremo”. Como se verá posteriormente, dado que los efectos de este tipo de sismicidad en la respuesta del apilamiento de fosfoyesos es aceptable, no se considera necesario efectuar otros cálculos para probabilidades de ocurrencia mayores.
11. Teniendo en cuenta fundamentalmente la Norma Sismorresistente Española y las recomendaciones presentes en la Guía Técnica de Seguridad de Presas nº 3, para esta sismicidad “extrema” se deduce:
 - a.- Una aceleración máxima, pico, de 0,2g
 - b.- Un espectro de respuesta definido con precisión en la citada normativa (NCSE-02) para la localidad de Huelva.
12. Para la reproducción de la sismicidad, acorde con el punto anterior, se han identificado cinco terremotos a los que, de manera general bastante conservadora, se les ha asignado una duración de 40 segundos, en cuatro casos, y 60 segundos, en un 5º caso, respectivamente, en función de diferentes tipos de funciones de intensidad. Los tres primeros con una función trapezoidal, el sismo 4 con una función exponencial y el quinto con una función compuesta.
13. En la tabla adjunta se presentan los resultados obtenidos, para cada una de las tres secciones y para cada uno de los cinco terremotos supuestos, en términos de desplazamientos horizontales y asientos máximos irreversibles, extraídos de 13 puntos de control en superficie.

MOVIMIENTOS MÁXIMOS HORIZONTALES Y ASIENTOS FINALES, “POST-TERREMOTO”						
TERREMOTO EXTREMO	SECCIÓN LONG. (Perfil 1)		SECCIÓN TRASV. 1 (Perfil 2)		SECCIÓN TRASV. 2 (Perfil 3)	
	Horiz.	Asientos	Horiz.	Asientos	Horiz.	Asientos
Sismo 1	+4 cm -2 cm	-1,8 cm	+5,8 cm -4 cm	-4,2 cm	+3,8 cm -5 cm	-3,5 cm
Sismo 2	+2 cm -2 cm	-0,9 cm	+2 cm -4 cm	-2,7 cm	+3,7 cm -3,8 cm	-2 cm
Sismo 3	+1,3 cm -1 cm	-0,6 cm	+1,8 cm -2,4 cm	-1,2 cm	+2 cm -2,4 cm	-1,1 cm
Sismo 4	+4 cm -1 cm	-1,2 cm	+4 cm -4 cm	-1,7 cm	+2,6 cm -5 cm	-2,4 cm
Sismo 5	+2,3 cm -0,5 cm	-0,2 cm	+2,5 cm -4 cm	-1,4 cm	+4 cm -3,8 cm	-1,5 cm

Tabla 4.- Resumen de movimientos irreversibles “post-terremoto”

14. Del análisis de las respuestas tenidas, en términos de desplazamientos irreversibles, por las 3 secciones representativas de la presa seleccionadas, solicitadas por los 5 terremotos “extremos” también seleccionados, puede afirmarse que el comportamiento esperable de esta estructura frente a la sismicidad de la zona es enteramente satisfactorio. El asiento máximo irreversible calculado, en general, ronda los pocos cms (el orden de 1; 2 ó 3 cms) y es inferior en todos los caso a los 5 cms. Como era de esperar los peores movimientos se

producen en general para la hipótesis de Sismo 1 que se corresponde con una función de intensidad del tipo trapezoidal donde el tiempo de meseta es máximo.

15. No se ha producido comportamiento asociado a deslizamiento alguno.
16. En la tabla adjunta se muestran los resultados obtenidos, en los puntos monitorizados, respecto de la generación de presiones intersticiales. Los valores alcanzados, dependiendo de las hipótesis de partida, son muy reducidos o en las materiales más sensibles del orden del 10% al 20%, con un caso extremo del 30%. De nuevo las mayores presiones intersticiales se generan durante la hipótesis de Sismo 1.

INCREMENTO DE PRESIONES INTERSTICIALES GENERADAS TRAS EL SISMO (EXPRESADAS CON RESPECTO A LA PRESIÓN DE PORO ESTÁTICA)						
TERREMOTO EXTREMO	SECCIÓN LONG. (Perfil 1)		SECCIÓN TRASV. 1 (Perfil 2)		SECCIÓN TRASV. 2 (Perfil 3)	
	Punto C	Punto D	Punto C	Punto D	Punto C	Punto D
Sismo 1	20%	13%	5%	14%	14%	30%
Sismo 2	17%	14%	5%	14%	14%	16%
Sismo 3	8%	8%	2%	11%	9%	14%
Sismo 4	8%	9%	3%	9%	7%	18%
Sismo 5	7%	6%	1%	9%	8%	20%

Tabla 5.- Resumen de incrementos de presión de poro "post-terremoto"

17. No se llega a producir un incremento de presión de poro significativamente elevado en ningún punto de los modelos calculados y monitorizados, por lo que se puede concluir que no se producirá licuefacción en los materiales del apilamiento y su cimentación.
18. Resulta fácil comprender que, dado el buen comportamiento mostrado en los cálculos realizados, bajo las hipótesis de la sollicitación correspondiente al terremoto "extremo", la respuesta antisísmica de la balsa es enteramente satisfactoria.
19. No obstante, se deberá llevar a cabo un control de las diferentes variables físicas y geotécnicas implicadas, (presiones de poro, filtraciones, movimientos, etcétera), para confirmar la bondad de las hipótesis de partida asumidas.
20. En este sentido, en particular, se considera conveniente la instalación de una estación sismológica, preferiblemente para el registro en términos de aceleraciones, que se deberá colocar en alguna de las superficies horizontales, bermas, más altas, en una posición correspondiente a una sección principal. Debería ser energéticamente autosuficiente.

Madrid, Enero de 2016



Firmado: Claudio Olalla Marañón
Catedrático de "Ingeniería del Terreno"

ETSICCP-UPM