

Criterios Básicos para la Evaluación Geotécnica de la Estabilidad de Presas de Enrocado

Odilio Dávila Pablo, Neil Yalán León²

¹Director del departamento de geotecnia de TYPESA-Perú (ondavila@typsa.es)

²Ingeniero especialista en geotecnia en TYPESA-Perú (nyalan@typsa.es)

Publicado el 24 de junio de 2024

Resumen

La evaluación de la estabilidad de una estructura de retención como una presa de enrocado incluye aspectos técnicos que involucran a más de una disciplina. En cuanto a los aspectos relacionados con la geotecnia se evalúan: la identificación de las condiciones más adecuadas para el emplazamiento, la disponibilidad de materiales y sus posibilidades de explotación, la conformación interna de los materiales, evaluación de la estabilidad de los taludes proyectados mediante técnicas de equilibrio límite, evaluación del comportamiento esfuerzo – deformación mediante modelamiento numérico (habitualmente mediante elementos finitos o diferencias finitas), caracterización de la amenaza sísmica, evaluación del desempeño de la estructura proyectada frente a la acción sísmica. El tratamiento de estos aspectos incluye el procesamiento de una campaña geotécnica (con detalle variable según el nivel del proyecto) y la incorporación de criterios de diseño y recomendaciones brindadas por guías de reconocimiento internacional como son ICOLD y SPANCOLD.

1 Introducción

Las presas, dentro de su diversa tipología, desempeñan un rol importante en aquellos casos específicos donde se requieren estructuras de retención con fines de regulación para la gestión del balance hídrico.

La implementación de una presa de enrocado implica la participación de varias disciplinas técnicas; en el ámbito de la geotecnia es necesario prestar especial cuidado en aquellos aspectos mínimos que permitan garantizar su estabilidad en el corto y largo plazo, así como frente a acciones transitorias (sismos, cambios rápidos en el volumen de embalse) y permanentes.

El impacto de estos aspectos en la evaluación de la estabilidad de la presa de enrocado proyectada es variable tanto por los datos de entrada (inputs que dependen del nivel de detalle del proyecto), por los procesos de cálculo involucrados (con dificultades diversas en función del tipo de proyecto y de la naturaleza del fenómeno a estudiar) y la experiencia requerida para el tratamiento de cada aspecto involucrado.

A continuación, se revisan brevemente algunos de los tópicos más incidentes en la evaluación geotécnica de presas de enrocado.

2 Emplazamiento y caracterización geotécnica de materiales

2.1 Definición del emplazamiento

La definición del emplazamiento adecuado para una presa constituye uno de los primeros pasos al momento de iniciar

la ingeniería de este tipo de estructuras. Ésta debe cumplir con:

- **Topografía:** Se busca habitualmente ubicar el embalse en una zona con topografía asociada a una zona de mayor estrechez entre el cauce y las laderas adyacentes, donde la garganta en el valle debe ser estrecha y el área de embalse amplio con fines de reducción del volumen de materiales implementados para su construcción, así como conseguir un mejor control en el comportamiento mecánico de la estructura.
- **Geología y geotecnia:** La presa deberá ubicarse preferentemente en una zona geológicamente estable del valle, donde las condiciones de las cimentaciones y estribos muestren estabilidad, capacidad de carga necesaria, deformabilidad controlada y permeabilidades en rangos que permitan la construcción de la presa.
- **Disponibilidad de materiales de construcción:** Además de la validación técnica, la fuente de materiales que suministrará al proyecto deberá ser lo suficientemente cercana para mantener un equilibrio en los costos asociados a su transporte y explotación. Asimismo, será necesario verificar los aspectos relacionados con arqueología, medio ambiente y saneamiento predial para evaluar las posibilidades de su explotación en tiempo y forma.

A continuación, se muestran imágenes generales y referenciales de la conformación de presas de enrocado y el mallado correspondiente para su implementación en un modelo de elementos finitos.

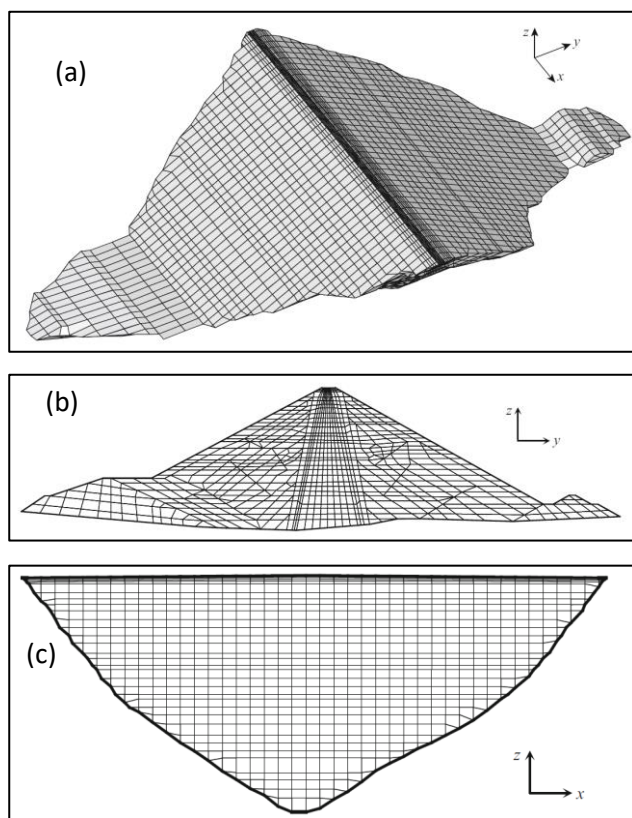


Figure 1. (a) Vista tridimensional de una presa y su mallado (b) vista de una sección transversal de la presa y (c) vista de una sección longitudinal (Yongkang, 2019)

2.2 Definición de solicitaciones en la presa

Las solicitaciones en una presa incluyen:

- Carga estática: Peso propio de la presa y las presiones que genera. Se evalúa también las implicancias del proceso constructivo en los niveles de esfuerzo y deformación alcanzados.
- Cargas sísmicas: Se evalúan ya sea con métodos simplificados o con métodos que permiten incorporar la variación de la fuerza sísmica en el tiempo.
- Presiones hidrostáticas e hidrodinámicas: Evaluación de la presión del agua en diferentes condiciones de operación.

2.3 Definición de materiales en el cuerpo

Los materiales utilizados en el cuerpo de la presa dependerán de la disponibilidad de áridos cercanos; es así como, si se dispone de suficientes fuentes de materiales cercanos se puede optar a la conformación de una presa con zonificación interna de materiales.

Si los materiales cercanos disponibles son de un solo tipo de árido adecuado, se debe apuntar al uso de una presa homogénea; de lo contrario, si este árido disponible no es adecuado, se debe optar por una presa de CFRD.

Es así como las distancias de transporte, la disponibilidad, la cantidad y calidad del material disponible influirá en el tipo de material a emplear en la conformación de una presa.

2.4 Parametrización

Los materiales de cimentación y cuerpo de presa deben ser caracterizados a partir de una campaña geotécnica, la cual se recomienda contenga como mínimo:

- Sondeos y Perforaciones: Para obtener muestras inalteradas y alteradas del suelo y roca. Utilizados para evaluar las características geotécnicas in situ.
- Ensayos de Penetración Estándar (SPT): Para estimar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo de cimentación y la distribución de los estratos en función de su densidad relativa.
- Ensayos de Penetración de Cono (CPT): Para evaluar la resistencia y las propiedades del suelo sin obtener muestras.
- Ensayos de permeabilidad Lefranc y Lugeon: Para evaluar la permeabilidad de los suelos y rocas en la cimentación.
- Prospección geofísica por métodos sísmicos: A fin de evaluar las propiedades elásticas y la estructura del subsuelo.

A partir de las muestras obtenidas de campo, se pueden ejecutar los siguientes ensayos de laboratorio:

- Ensayos de Compresión Triaxial: Para determinar los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante, como cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ).
- Ensayos de Corte Directo: Para evaluar la resistencia al esfuerzo cortante de suelos cohesivos y no cohesivos.
- Ensayos de Consolidación: Para determinar la tasa y el grado de consolidación de los suelos arcillosos.
- Ensayos Proctor: Para determinar la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo.

A su vez, se pueden emplear correlaciones para obtener parámetros de los suelos de cimentación. Por ejemplo:

- En arenas: $\phi = 20 + 0.25N$ (Bowles, 1996)
- En arcillas: $c_u = q_c/15$ (Robertson & Campanella, 1983).

Para etapas de factibilidad, donde las exploraciones geotécnicas se enfocan en la identificación del terreno de emplazamiento y la caracterización mínima fiable necesaria de los materiales de cantera, es habitual proyectar un menor número de ensayos de laboratorio y exploraciones en campo, cuyos resultados deberían complementarse y contrastarse con correlaciones de la literatura aplicable, con los valores obtenidos y aplicados en proyectos similares y con las recomendaciones

propuestas en las guías de diseño de reconocido prestigio internacional.

3 Análisis de Equilibrio Límite (LEM)

El Análisis de Equilibrio Límite (LEM) es una técnica utilizada para evaluar la estabilidad de taludes y presas considerando un comportamiento de sólido rígido para los materiales (no se incluyen deformaciones externas ni internas) y una evaluación de equilibrio de fuerzas y momentos, obteniendo como resultado un factor de seguridad que representará la relación entre las fuerzas estabilizadoras y aquellas que son desestabilizantes para el sistema proyectado en el modelo de cálculo.

La anisotropía de los materiales no es tomada en cuenta en este tipo de análisis, así como la superficie de falla o de potencial deslizamiento, la cual es predefinida (sea circular o no) y posteriormente se analizan los factores de seguridad compatibles con estas superficies.

Las interacciones hidráulicas (agua y terreno) son representadas a través del coeficiente de presión de poro y no se toma en cuenta la mayor complejidad de esta interacción.

La acción sísmica es representada como una fuerza constante obtenida como el producto de la masa movilizadora por la aceleración, valor fijado como una reducción del PGA, empleando diversos criterios para la definición de esta reducción.

Sin embargo, la implementación de este método resulta rápida y sencilla y permite abordar un mayor número de evaluaciones (correspondientes a diversos escenarios) en un menor tiempo, y brindando, por lo general, factores de seguridad ligeramente conservadores. Por todo ello su uso resulta extendido a diversidad de proyectos incluyendo a las presas de enrocado, donde se evalúan diferentes escenarios tanto para la cara aguas arriba como aguas abajo del cuerpo de la presa como para las singularidades del terreno adyacente que da soporte a la presa.

4 Efectos de sismo

4.1 Estudios de Peligro Sísmico

En zonas de alta sismicidad resulta imperante la evaluación de la amenaza sísmica en el emplazamiento de la presa proyectada. Esta evaluación se puede llevar a cabo por métodos probabilísticos y métodos determinísticos, cuya secuencia se resume escuetamente.

Métodos probabilísticos

- Recopilación, revisión, depuración de eventos similares, depuración de réplicas, análisis de completitud, homogenización e integración del catálogo sísmico.
- Definición consistente de la geometría de las fuentes sísmogénicas de subducción y corticales

- Determinación de los parámetros sísmológicos de las fuentes sísmogénicas mediante análisis de recurrencia y revisión de eventos históricos.
- Selección de GMPE aplicables a la sismotectónica regional del emplazamiento del proyecto y evaluación del proceso de ponderación.
- Definición del peligro sísmico, mediante la estimación de la curva de probabilidad de excedencia a través de un proceso de integración de funciones de probabilidad, GMPE y
- Definición de los espectros de peligro uniforme de acuerdo con los períodos de retorno de interés.

Métodos determinísticos

- Identificación y caracterización de las fuentes sísmogénicas
- Selección de GMPE aplicables
- Selección de los parámetros de distancia entre la fuente y el sitio de análisis (ubicación del proyecto).
- Estimación del espectro de peligro

Es importante notar que para los efectos de diseño sismorresistente se suelen emplear períodos de retorno asociados al nivel de exigencia que incorporan cada tipología estructural. Para estos efectos resulta adecuada la estimación del peligro sísmico por métodos probabilísticos.

En el caso de los métodos determinísticos, éstos nos permiten identificar el peligro sísmico asociado a un escenario identificado y latente para la zona de estudio, que, sin embargo, no va asociado a un período de retorno.

Los estudios de peligro sísmico nos permiten obtener los espectros de peligro uniforme o de peligro a nivel superficial. Es práctica habitual llevar a cabo las estimaciones considerando la presencia de roca (suelo tipo B según las clasificaciones internacionales) en superficie y en los casos en los que se cuente con materiales sobre la roca en espesores importantes será necesario llevar a cabo una evaluación de la propagación de las ondas in situ, ya sea mediante análisis simplificados como el análisis de propagación unidimensional (método lineal, lineal equivalente o no lineal), propagación en banda (mediante elementos finitos) o mediante propagación bidimensional o tridimensional (mediante elementos finitos, sin embargo, de poco uso).

Los procedimientos descritos de manera breve permitirán obtener la demanda sísmica a la que se verá sometida la presa de enrocado.

4.2 Metodologías de análisis sísmico en presas de enrocado

Una vez definido el nivel de demanda sísmica, el cual puede quedar representado por espectros de respuesta, acelerogramas o espectros de Fourier, será necesario

definir el tipo de análisis sísmico que se empleará para evaluar a la presa proyectada.

Los análisis más simplificados corresponden a la representación de la acción sísmica mediante una fuerza constante obtenida como el producto de la masa movilizadora por un valor de aceleración representativa (PGA reducido). En estos casos se debe prestar especial atención, pues el nivel de simplificación conlleva obviar el análisis del contenido de frecuencias involucrado en la señal que se esperaría atravesarse el terreno de fundación y luego atravesarse el propio cuerpo de la presa, así como el nivel de amortiguamiento propio del cuerpo de la presa y los efectos de la topografía en la evolución de la señal en su propagación vertical principalmente. Estos análisis se suelen denominar análisis pseudoestáticos y son habitualmente empleados en las fases de factibilidad o como complemento de los análisis en una ingeniería de nivel definitivo.

La evaluación del comportamiento sísmico de una presa de enrocado en el dominio del tiempo, brindando la posibilidad de que la acción sísmica varíe, tal como sucede en la realidad es denominada análisis dinámico. Estos análisis requieren de un tratamiento previo de los registros sísmicos a incluir en la base del modelo, pues deben estar asociados a un período de retorno específico (según la tipología de la presa) y ser compatible con el perfil dinámico del terreno subyacente, además de ser insertado dentro del modelo idealmente a una profundidad donde los materiales presenten alta rigidez.

Para abordar adecuadamente los análisis sísmicos del tipo dinámico se requiere además que los materiales del terreno subyacente y de la propia presa de enrocado se encuentren caracterizados mediante modelos constitutivos compatibles con este tipo de análisis (los modelos que incluyen endurecimiento y que son capaces de incorporar las altas rigideces del terreno a muy bajas deformaciones son deseables), que la caracterización del amortiguamiento del terreno sea la adecuada (es práctica habitual emplear modelos de amortiguamiento del tipo matricial), que la geometría del modelo sea lo suficientemente grande para evitar dispersiones de onda al momento de la propagación de éstas, que las condiciones de borde permitan una absorción de las ondas en lugar de reflejarlas, que los registros sísmicos hayan sido corregidos (correcciones por línea base y por filtrado), que la geometría de los elementos finitos o diferencias finitas sea tal que la longitud de onda de la señal pueda propagarse adecuadamente sin generar efectos adicionales o distorsiones asociadas a que los tamaños mínimos de los elementos resulten ser mayores que los máximos compatibles con la propagación de las ondas.

Los análisis del tipo modal espectral, bastante empleados en la evaluación del comportamiento de estructuras

elevadas sobre la superficie del terreno, con masas relativamente concentradas (edificaciones), no resulta aplicable en presas de enrocado.

4.3 Obtención de registros acelerográficos

Es poco frecuente contar con registros sísmicos de eventos reales obtenidos cerca de la zona del proyecto (sobre un perfil geotécnico similar) y que, además, sean compatibles con el período de retorno aplicable al diseño de la presa de enrocado.

Por ello, existen metodologías para la obtención de registros acelerográficos, ya sea partiendo de registros semilla (eventos existentes que cumplen ciertos criterios) o con criterios específicos para su construcción completamente artificial:

- **Acelerograma artificial:** Metodología presentada por Gasparini & Vanmarcke (1976), basada en el espectro objetivo (obtenido a partir de la aplicación de los GMPE o una ponderación de varios de ellos) y la función de forma (que define la envolvente de la señal). Los registros son obtenidos a partir de la función de densidad espectral de potencia. Se suele emplear más de un par de funciones de forma con el objetivo de contar con varias alternativas de aproximación al registro.
- **Acelerograma sintético:** Inicialmente propuesto por Hallodorsen & Papageorgiou (2005). Esta metodología está orientada a la construcción inicial de un acelerograma inicial basado en las características generales del evento sísmico que se pretende similar (magnitud, distancia epicentral, tipo de fuente sísmica, tipo de terreno, entre otros), luego de ello, el espectro de respuesta de este acelerograma se ajusta al espectro objetivo definido por los criterios de diseño aplicables a la presa de enrocado.
- **Ajuste espectral:** Constituye la modificación de un acelerograma de partida a partir del ajuste de su espectro de respuesta hasta llevarlo hacia un espectro objetivo. El espectro objetivo generalmente corresponde a un espectro de peligro uniforme y el procedimiento de ajuste espectral se lleva a cabo siguiendo la teoría de Abrahamson (2010), el cual indica la adición y sustracción de wavelets. Se recomienda llevar a cabo el ajuste para el rango de períodos de interés.

En los procedimientos anteriores será necesaria la revisión constante de los niveles de convergencia obtenidos para cada señal resultante a fin de verificar los niveles de distorsión de las señales originales, así como revisar la forma de los registros obtenidos y parámetros de interés como la intensidad de Arias.

4.4 Tratamiento de Señales

Previo la utilización de los registros semilla o registros base y antes de emplear cualquier procedimiento posterior para la obtención de los registros a aplicar en nuestros modelos es necesario evaluar la pertinencia de correcciones por línea base y aplicación de filtros a nuestra señal.

- **Filtrado de señales:** Procedimiento orientado a la revisión de los contenidos de frecuencias que contiene el registro y a la eliminación de aquellos rangos de frecuencia que no son compatibles con el comportamiento esperado del terreno. Generalmente se eliminan los contenidos de frecuencias muy bajos y altos pues no forman parte del comportamiento esperado y corresponden a anomalías introducidas en los propios procesamientos y manipulaciones de la señal.
- **Corrección por línea base:** Procedimiento asociado a la eliminación de desplazamientos y velocidades residuales en la señal presentados en la parte final de los registros, que corresponde al momento en el que el evento ha terminado y existe un escenario de reposo.
- **Modificación del paso temporal:** Este procedimiento nos permite pasar de pasos temporales menos discretizados a otros más discretizados (por ejemplo, de 0.02 s a 0.01 s) y viceversa. Este procedimiento se debe llevar con cuidado pues al añadir pasos temporales es necesario que éstos correspondan a puntos intermedios ubicados entre los pasos temporales originales. El proceso inverso debe tomar también nuestra atención, pues elimina pasos de temporales de cálculo y puede incorporar márgenes de error significativos; este procedimiento está orientado a la reducción de los tiempos de cómputo de los modelos numéricos. Es recomendable que los pasos de tiempo objetivo en el modelo numérico sean compatibles con los pasos de tiempo de la señal original (semilla) para reducir en lo posible la incorporación de errores numéricos.

4.5 Análisis Lineal Equivalente vs Elementos Finitos

Los procedimientos que permiten llevar un registro sísmico desde la superficie hasta cierta profundidad (deconvolución) y viceversa (convolución) son empleados para los tratamientos de los registros sísmicos obtenidos en superficie y se desean trasladar hasta cierta profundidad, compatible con los criterios de implementación del modelo numérico.

Algunas variantes para desarrollar los procesos de deconvolución:

- **Deconvolución analítica:** Describe una deconvolución de carácter unidimensional. Se cuenta con 3 variantes: modelo lineal, lineal equivalente y no lineal; resultando el más empleado el modelo lineal equivalente, el cual trabaja con aproximaciones sucesivas de la respuesta del

terreno para simular su no linealidad. Su implementación es relativamente rápida, aunque requiere de conocimientos específicos.

- **Deconvolución con modelos numéricos en banda:** Se emplea un modelo numérico en el cual se implementa el perfil estratigráfico correspondiente, incluyendo modelos constitutivos adecuados, el amortiguamiento correspondiente y la caracterización de la degradación del módulo de corte. El ancho del modelo numérico es reducido (por ejemplo, 1 m). El tiempo de cómputo no es prolongado. Se suele trabajar en conjunto con la deconvolución analítica para contrastar resultados.
- **Deconvolución con modelos numéricos en escala completa:** El modelo numérico incorpora todas las complejidades geométricas horizontales y verticales admisibles dentro de la extensión del modelo numérico. Sin embargo, su calibración puede tomar un tiempo considerable, además de la demanda de tiempo de cómputo, lo que hace poco frecuente su uso.

4.6 Análisis de Frecuencias

El análisis del contenido de frecuencias de los registros involucrados en las fases más tempranas (tratamientos en superficie y señales semilla) como en el propio análisis dinámico pueden incluir la utilización de herramientas más visuales como el espectrograma.

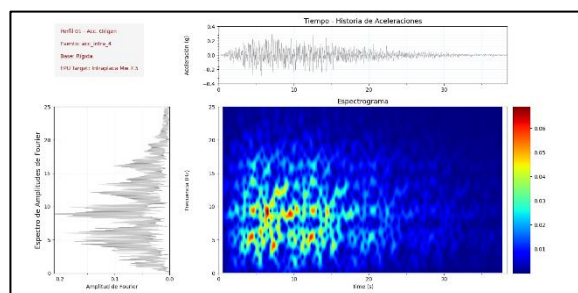


Figura 2: Espectrograma de sismo sintético desarrollado en código propio en Python

Los espectrogramas permiten una visualización de doble entrada entre los rangos de frecuencias involucrados en la señal (eje vertical) y los tiempos en los que predomina su presencia (eje horizontal)

En el gráfico de ejemplo se puede observar el contenido de frecuencias de este registro artificial, con el rango predominante entre 4.5 a 14 Hz.

4.7 Modelos Tiempo-Historia

Los modelos tiempo-historia simulan la respuesta dinámica de la presa a lo largo del tiempo bajo cargas sísmicas. Proporcionan una visión detallada de las deformaciones y tensiones inducidas por el sismo a lo largo de la extensión del modelo, permitiéndonos incorporar puntos de control específicos para capturar la

evolución de la respuesta (a nivel de desplazamientos, velocidades y aceleraciones) durante la ocurrencia del evento introducido.

La caracterización dinámica del terreno, el tratamiento y análisis de señales, la evolución del amortiguamiento y la degradación del módulo de corte, la extensión del modelo numérico, sus condiciones de borde y la definición de los tamaños mínimos de los elementos o diferencias finitas permiten abordar estas simulaciones complejas que, hoy en día, constituyen la representación más cercana del comportamiento que se espera en este tipo de estructuras.

Es recomendable llevar a cabo al menos 3 simulaciones, con 3 registros diferentes para cubrir una diversidad de escenarios posibles y evaluar las tendencias y valores máximos en todos los casos.

5 Modelo Numéricos (FEM, FDM)

5.1 Definición del objetivo principal del modelo

El objetivo principal del diseño geotécnico en presas de enrocado es determinar, para diferentes fases de la vida operativa de la presa, la distribución de esfuerzos, deformaciones dentro del cuerpo y terreno de cimentación, así como las consecuencias de dicha distribución sobre el comportamiento de la presa.

Sin embargo, antes de la implementación de un modelo numérico, será necesario definir los objetivos específicos del modelo numérico, pues es conocido que este tipo de modelos no suelen representar con significativa precisión, de forma paralela, a todos los eventos que pueden afectar a una estructura o la interacción de una estructura con el terreno, por lo que será necesario evaluar los aspectos relevantes a capturar en los modelos numéricos y probablemente desarrollar distintos modelos con diferentes orientaciones y objetivos de cálculo asociado.

Otro criterio importante está basado en la calidad y cantidad de información geotécnica disponible, in situ, de antecedentes primarios y secundarios y de bibliografía aplicable, que permitirán evaluar la naturaleza de los resultados a obtener. Validar si estos resultados nos permiten llegar a un diseño definitivo o, más bien, nos permiten solamente contar con rangos de sensibilidad de la respuesta de la presa y del terreno de cimentación.

La fase en la que se encuentra el proyecto sea de factibilidad o de ingeniería definitiva, también incorpora los matices que impactan en el nivel de precisión de los análisis a implementar con los modelos numéricos.

5.2 Modelos Constitutivos Aplicables

Los modelos constitutivos describen la relación entre las tensiones y deformaciones en los materiales de una presa de enrocado, incorporando en su variedad posibilidades de capturar con predominancia: cambios volumétricos,

fenómenos de licuefacción, fenómenos de consolidación, comportamientos acoplados, entre otros.

En el caso de evaluaciones sísmicas se recomienda el uso de aquellos modelos constitutivos capaces de incorporar la variación de la rigidez del terreno en función de los niveles de deformación y esfuerzos aplicados en un rango tal que queden adecuadamente representadas las rigideces que corresponden a niveles de deformación bajos y muy bajos.

El Modelo Hiperbólico, que se basa en la relación entre el esfuerzo y la deformación, describe cómo el suelo se deforma bajo cargas crecientes hasta alcanzar un estado crítico o de rotura.

Este modelo es de interés específico para el análisis de presas porque incluye tres efectos relevantes del comportamiento de los enrocados: la no linealidad de la relación esfuerzo-deformación, la dependencia de la presión confinante y una relación de Poisson variable.

5.3 Impactos del Mallado

La precisión en la representación del modelo numérico respecto al comportamiento del terreno frente a cargas variables en el tiempo y a la propagación de ondas depende del tamaño y la calidad del mallado. Un mallado fino proporciona resultados más precisos y adecuados, sin embargo, aumenta el tiempo de cómputo, en contraparte un mallado grueso proporciona menores tiempos de cómputo y una reducción significativa en la representatividad de los resultados.

Para obtener el tamaño máximo de los elementos de la malla en los modelos, es necesario considerar el contenido de frecuencias del registro sintético como la velocidad de la onda, estas características afectan la precisión numérica del análisis.

Kuhlemeyer y Lysmer (1973) muestran que, para una representación precisa de la transmisión de las ondas a través de un modelo, el tamaño del elemento espacial (Δl), debe ser menor que aproximadamente de una décima a una octava parte de la longitud de onda (λ) asociada con la frecuencia más alta componente de la onda de entrada. Donde esta longitud de onda es la relación entre la velocidad de propagación de la onda de corte (V_s) en el elemento y la frecuencia asociada al elemento (f).

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} = \frac{V_s}{10f}$$

5.4 Discusión de resultados esperados

La interpretación de los resultados del modelo numérico debe considerar:

- Revisión de los factores de seguridad obtenidos en evaluaciones en condición estática y pseudoestática por equilibrio límite.

- Revisión de los factores de seguridad obtenidos en evaluaciones en condición estática mediante modelos numéricos (elementos o diferencias finitas).
- Revisión de la distribución de deformaciones y esfuerzos en el cuerpo de la presa en las etapas constructivas, en condiciones de construcción final (estáticas).
- Revisión de la evolución temporal de los esfuerzos y deformaciones durante la ocurrencia del evento sísmico aplicado.
- En caso de contar con pantallas de concreto (aguas arriba), revisión de los esfuerzos y deformaciones inducidos en la pantalla, especialmente en condiciones sísmicas y condiciones de llenado y desembalse rápido.
- Revisión de posibilidades de fisuración en la pantalla para adecuaciones en sus diseños.
- Evaluación de deformaciones: Identificación de desplazamientos locales y globales para las diferentes condiciones de operación.
- Análisis de recomendaciones de operación asociadas al comportamiento de la presa. Por ejemplo, velocidad máxima de desembalse.

5.5 Tiempos de cómputo

Los análisis dinámicos más detallados y precisos requieren mayor tiempo de procesamiento, es por ello por lo que se requiere establecer un paso de tiempo máximo que permita optimizar los tiempos de análisis sin afectar la precisión de los resultados.

Los cálculos del paso del tiempo en un análisis dinámico están en función del amortiguamiento, la velocidad de onda y el volumen/tamaño del elemento más pequeño del modelo. Resulta conveniente implementar mallas de tamaño uniforme a los diferentes suelos en un modelo dinámico, con el fin de evitar divergencias no deseadas y obtener tiempos de cómputo razonables y compatibles con el cronograma del proyecto, según la fase en la que se encuentre, teniendo en cuenta que la calidad técnica de los trabajos deberá prevalecer.

De este modo, para un modelo de una presa de enrocado de 130 m (ver Figura 3) con longitud de 1.05 km y un ancho de 1.0 km, además de un tamaño máximo de elementos de 10 m en el cuerpo de presa y de 15 m para la roca, se puede alcanzar un tiempo de cómputo de 80 horas con un paso de tiempo de 2.13×10^{-5} s.

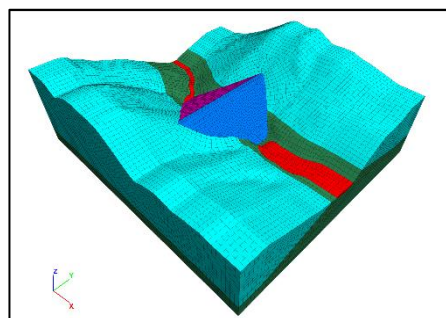


Figura 3: Espectrograma de sismo sintético desarrollado en código propio en Python

6 Guías técnicas aplicables

Las guías técnicas proporcionan normas y recomendaciones para el diseño, construcción y evaluación de presas. Ejemplos incluyen:

- SPANCOLD (Sociedad Española de Presas y Embalses): Proporciona directrices específicas para la evaluación de estabilidad y seguridad de presas en España.
- ICOLD (International Commission on Large Dams): Ofrece estándares internacionales que ayudan a asegurar la seguridad y sostenibilidad de las presas a nivel global.
- Normativas locales aplicables a la tipología de presa proyectada.

Estas guías no sólo proponen metodologías para el cálculo y revisión, sino también criterios (habitualmente del lado conservador) para la propia conformación geométrica de la presa, composición interna, definición del comportamiento de los materiales (por ejemplo, rangos de ángulo de fricción).

Referencias

- Al Atik, L., Abrahamson, N.: An improved method for nonstationary spectral matching, Earthquake Research Institute. 2010.
- Duncan, J., Byrne, P., Wong, K., Mabry, P.: Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses, College of Engineering of Resear Services, Berkeley.1980.
- Kramer, S.: Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall international series, Berkeley.1996.
- Kuhlemeyer, R., Lysmer, L.: Finite element method accuracy for wave propagation problems, Journal of soil mechanics & Foundation Division, ASCE, 1999.
- Martínez, F.: El problema de la selección del tipo de presa en un proyecto: criterios y métodos de apoyo a la toma de decisiones, Universidad Politécnica de Cartagena, 2019.
- Duncan, J., Chang, C.: Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Journal of soil Mechanics & Foundation Division, 1970.

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D.: Geotechnical Engineering of Embankment Dams. Balkkema/ Rotterdam/ Brookfield, 1992

Comité Nacional Español de Grandes Presas: Estudios geológico-geotécnicos y de prospección de materiales, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos – Guías Técnicas de Seguridad de Presas, 1999.

Verdugo, R., Sitar, N., Frost, D.: Seismic performance of earth structures during the february 2010 Maule, Chile, Earthquake: Dams, Levees, Tailing Dams, and retaining walls, Earthquake Spectra, Vol 28, 2012.