

## ESTUDIO DE SENSIBILIDAD AL USO DE COMBINACIONES DE DIFERENTES ELEMENTOS FINITOS EN UN MODELO NUMÉRICO 2D Y 3D DE UNA PRESA DE MATERIAL SUELTO

Miguel E. Ruiz<sup>a</sup>, Leonardo J. Cocco<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina, <http://www.efn.unc.edu.ar/>*

**Keywords:** Evaluación sísmica, modelos planos, interacción suelo-estructura.

**Abstract.** Numerosas presas de material suelto poseen torres y conductos de toma que permiten captar el agua del reservorio y conducirla a través del cerramiento de la presa. Su buen desempeño durante eventos sísmicos es crucial para permitir la descarga controlada de agua en el caso de la falla de la presa, razón por la cual suelen ser objeto de numerosos análisis y evaluaciones sísmicas. En muchas ocasiones las presas poseen un importante desarrollo longitudinal por lo que se pueden estudiar usando modelos de Elementos Finitos (EF) de deformación plana. Sin embargo, la presencia de estructuras de toma pone en duda la exactitud de los resultados de modelos bidimensionales para estudiar las secciones de la presa que contienen estas estructuras. Esto lleva a la elaboración de modelos más complejos y a la posibilidad de combinar elementos de distinta formulación para simplificar los modelos.

En este trabajo se presentan comparaciones de análisis dinámicos bidimensionales y tridimensionales y con diferentes tipos de elementos, de una presa de material suelto con una torre de control, localizada Estados Unidos, llamada Succes Dam. La torre de control de la presa fue evaluada sísmicamente en el año 1981 por consultores norteamericanos quienes desarrollaron un modelo bidimensional en donde se utilizaron elementos planos para la torre y el cuerpo de la presa. Mediante este estudio se arribó a una verificación seccional de la estructura de la torre, a través de la cuantificación de los esfuerzos de corte para un sismo de diseño.

En este artículo se presentan modelos de EF 2D y 3D con el objeto de compararlos con modelos simplificados elaborados originalmente para evaluar sísmicamente la torre. Para ello se desarrollaron tres modelos distintos: (a) Modelo plano con elementos de deformación plana para el cuerpo de la presa y elementos de viga para la torre, (b) Modelo 3D con elementos sólidos para el cuerpo de la presa y elementos de viga para la torre, y (c) Modelo 3D en donde se utilizaron elementos sólidos para la presa y la torre. Para los modelos (a) y (b) se utilizó el programa SAP2000, mientras que el modelo (c) se desarrolló en ABAQUS. Se evaluó el comportamiento de los distintos modelos (entre sí y en relación al modelo 2D equivalente del año 1981) para un acelerograma de terremoto y para un espectro de respuesta utilizados en la evaluación sísmica de la presa. Los resultados indican que el modelo tridimensional en donde tanto la presa como la torre se discretizan con elementos sólidos, arroja esfuerzos en la torre que son muy similares a los del modelo bidimensional aproximado, mientras que los otros modelos predicen cortantes menores que los anteriores modelos, para la mayor parte de la torre. Esto podría indicar que la combinación de elementos de viga con elementos sólidos y elementos planos introduce incertidumbre en los resultados, por cuanto los esfuerzos resultantes en los elementos de viga son sensiblemente menores a los que se obtienen con modelos más elaborados.

## 1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan los principales resultados obtenidos con modelos de elementos finitos (EF) bidimensionales y tridimensionales de la presa Success sometida a excitaciones sísmicas. La presa Success es de material suelto que cuenta con una torre de toma de agua en el faldón de aguas arriba y cuenta con un conducto horizontal de toma de agua que pasa por debajo de la presa y corre en dirección transversal a su cresta. Se desarrollaron un total de seis modelos de EF del conjunto presa – torre de toma para estudiar dos objetivos: Uno, estimar las diferencias en los resultados al realizar análisis bidimensionales y tridimensionales del sistema presa-torre de toma, el otro, estudiar la influencia que pueda tener en los resultados de los análisis la combinación de elementos de viga con elementos sólidos (tanto sólidos de tensión plana como de sólidos tridimensionales). Cuatro de los modelos de EF se desarrollaron en SAP2000 y dos en el programa ABAQUS. Los análisis corresponden a modelos lineales sometidos a dos tipos de excitaciones sísmicas: acelerograma y espectro de respuesta. Además, se estudia el comportamiento de la presa cuando se considera el conducto horizontal de toma de agua que pasa transversalmente por debajo de la presa y cuando no se lo considera. Para realizar una validación de los modelos construidos, se comparan los resultados obtenidos con aquellos estimados por la compañía CSI quien realizara en 1981 un análisis bidimensional del comportamiento dinámico de la presa.

## 2 ANTECEDENTES Y ALCANCE DEL TRABAJO

En el año 1981 una compañía norteamericana llevó a cabo una evaluación sísmica de la presa Success (CSI, 1981) con el objeto de ponderar los esfuerzos cortantes en la torre de toma de la presa, frente a eventos sísmicos extremos. Los resultados obtenidos a partir de este análisis indican que la torre está dimensionada correctamente, por lo que la evaluación sísmica se consideró satisfactoria. Sin embargo, el estudio mencionado se llevó a cabo a través de un modelo 2D que simplifica la naturaleza tridimensional del problema, debido a que en la sección de la presa en donde se encuentra la torre los postulados de los problemas de deformación plana no se cumplen con exactitud.

Debido a las incertidumbres de los estudios planos efectuados el cuerpo de ingenieros de Estado Unidos decidió realizar un nuevo análisis de la presa, utilizando el programa FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua, Itasca, 1986). Este estudio, tridimensional, arrojó resultados significativamente distintos al primero lo que tendió un velo de preocupación sobre los responsables de la toma de decisiones acerca de la seguridad de la presa. El estudio realizado con FLAC indica que los cortantes que existirían en la base de la torre de toma serían de un orden de magnitud superior a los hallados originalmente mediante un análisis bidimensional simplificado (USACE, Sacramento District 2004).

Las razones expuestas motivan la presente investigación, en la cual se elaboraron una serie de modelos de elementos finitos con el objeto de evaluar nuevamente los esfuerzos cortantes en la torre de toma. Los modelos elaborados consisten en modelos 2D y 3D de la presa, en donde la torre de toma se discretizó con elementos de viga (y la presa con elementos de deformación plana para los modelos 2D y elementos sólidos para los tridimensionales). Además se elaboró un modelo 3D de la presa y torre, en donde tanto la presa como la torre se discretizaron con elementos sólidos. Cada uno de los tres modelos citados anteriormente se completó luego con el agregado de un conducto de toma que pasa por debajo de la presa, perpendicular a su eje de desarrollo, para evaluar la incidencia que puede tener este elemento en el comportamiento global del sistema. En la Tabla 1 se presentan los modelos elaborados y cuyos resultados se resumen en este artículo.

Modelo	Descripción	Programa utilizado	Discretización de la torre y conducto de toma	Discretización de la presa
1	Modelo 2D considerando sólo la torre de toma	SAP2000	Elementos de viga	Elementos de deformación plana
2	Modelo 3D considerando sólo la torre de toma	SAP2000	Elementos de viga	Elementos sólidos 3D
3	Modelo 3D considerando sólo la torre de toma	ABAQUS	Elementos sólidos 3D	Elementos sólidos 3D
4	Modelo 2D considerando la torre y el conducto bajo la presa	SAP2000	Elementos de viga	Elementos de deformación plana
5	Modelo 3D considerando la torre y el conducto bajo la presa	SAP2000	Elementos de viga	Elementos sólidos 3D
6	Modelo 3D considerando la torre y el conducto bajo la presa	ABAQUS	Elementos sólidos 3D	Elementos sólidos 3D

Tabla 1: Modelos de elementos finitos elaborados para analizar la presa

Los modelos de la Tabla 1 se desarrollan con el objeto de estudiar la bondad de los resultados que arroja un modelo que combina elementos de viga con elementos de deformación plana (Modelos 1 y 4) y con elementos sólidos 3D (Modelos 2 y 5) ya que estos elementos no presentan los mismos grados de libertad nodales, utilizando un caso de aplicación estudiado anteriormente. El uso de modelos que combinan estos elementos es común en muchas aplicaciones prácticas de la ingeniería estructural en nuestro medio.

Con el objeto de poder comparar los resultados previos con los que se obtuvieron en este estudio se utilizaron las mismas acciones externas en el modelo. Estas acciones están constituidas por un acelerograma del terremoto de Imperial Valley 1979 (estación El Centro), el espectro de respuesta de este mismo terremoto, y el espectro de respuesta utilizado en la evaluación sísmica de la presa suministrado por U.S. Army Corps of Engineers (USACE, Sacramento District 2004).

Dado que la torre de toma no satisface los requisitos para ser considerado como un cuerpo en estado de deformación plana, la evaluación sísmica original de la presa se desarrolló con un modelo plano equivalente de la torre tridimensional para poder incluirla en el modelo plano de la presa. Este modelo equivalente se obtuvo de igualar las frecuencias naturales de vibración de un modelo tridimensional completo de la torre con las frecuencias naturales de un modelo de deformación plana de la misma torre. El modelo bidimensional equivalente no incluye un conducto de toma horizontal que pasa por debajo de la presa (tal como se describe en el próximo apartado), por lo que sólo se compararán los resultados de estos modelos, mientras que los modelos con el conducto inferior se utilizan para analizar su incidencia en el comportamiento del sistema en su conjunto. El procedimiento para lograr el ajuste de las frecuencias del modelo equivalente con las del modelo tridimensional consistió en modificar

las propiedades del material de la torre en el modelo plano, manteniendo su geometría constante, hasta lograr correspondencia entre las frecuencias del modelo tridimensional y las del modelo plano equivalente. En el estudio original de la presa se adoptó un espesor total del modelo plano igual a 30 ft (que se corresponde con el ancho menor de la torre, medido en el sentido del desarrollo longitudinal de la presa). Este mismo criterio se sigue en este trabajo para obtener resultados comparables.

### 3 GEOMETRÍA DE LA PRESA Y DE LOS MODELOS DESARROLLADOS

#### 3.1 Geometría y descripción de la presa y conductos de toma

La presa Success es una presa zonificada de material suelto fundada parcialmente en roca meteorizada, gravas y aluvión moderno, bajo el cual existe un depósito de aluvión antiguo. La presa tiene una altura aproximada de unos 44 m (144 ft) y un desarrollo de 1065 m (3490 ft) y un ancho de cresta de 7 m (22.5 ft). Las estructuras de descarga de la presa están constituidas por una torre de control, un conducto transversal al desarrollo de la presa que se encuentra dentro de la roca madre y otras estructuras de toma y descarga entre las que se destaca un conducto de descarga sin revestimiento excavado directamente en la roca de fundación.

La presa está formada por cuatro zonas, que incluyen un núcleo central impermeable arcilloso, luego una zona de transición entre el núcleo y una capa permeable de roca compactada que se encuentra protegida contra la erosión por la cuarta zona, constituida por colchonetas de roca arrojada, aguas arriba y aguas abajo de la presa. El núcleo impermeable atraviesa el manto aluvional moderno y penetra en la roca madre (USACE, Sacramento District 2004).

En la Figura 1 se ilustra la geometría de la presa y su torre de toma. En esta figura se muestra la discretización de estratos adoptada para los análisis, determinada a partir de las velocidades de propagación de ondas de corte medidas en el cuerpo de la presa.

La discretización de estratos adoptada para la presa se presenta en la Tabla 2, donde  $V_s$  es la velocidad de onda de corte de cada estrato,  $N_{1,60}$  es el número de golpes corregido del ensayo de penetración estándar,  $\gamma$  es el peso específico del estrato y  $\phi$  el ángulo de fricción interna de cada estrato. Esta información se extrajo del reporte preparado por Pando y Cataño, (2004).

Estrato	Elevación [ft]	Espesor [ft]	$V_s$ [ft]	$N_{1,60}$	$\gamma$ [pcf]	$\phi$ [°]
1	630	44	825	26	130	37
	610					
2	610	44	800	35	130	37
	590					
3	590	56	725	38	130	37
	570					
4	570	25	800	52	130	37
	550					
5	Roca	N/A	2000	70	140	36

Tabla 2. Propiedades del suelo para el modelo de la torre de control

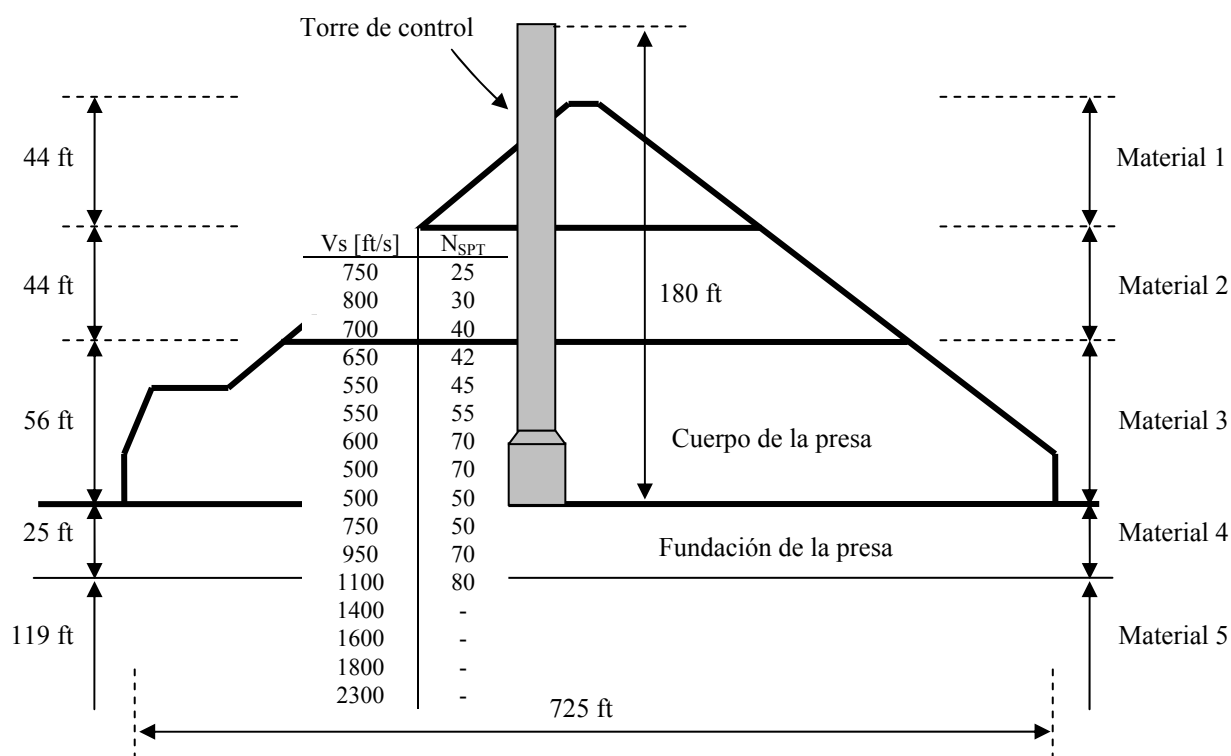


Figura 1: Geometría de la torre y la presa objeto de este artículo

Las estructuras de toma principales de la presa están constituidas por la torre de toma y el conducto transversal que pasa debajo de la presa. Estas estructuras son de hormigón armado colado in-situ. La torre de toma presenta una sección transversal rectangular hueca, de canto variable, mientras que el conducto de toma horizontal presenta una sección transversal rectangular con esquinas redondeas, que se ilustra en la Figura 2 (USACE, Sacramento District 2004). Este conducto presenta distintas secciones a lo largo de su desarrollo, aunque se adopta la sección de la Figura 2 para su modelación debido a que es la más representativa de la estructura. Por último, en la Figura 3 se ilustra la sección transversal de la presa en coincidencia con el conducto horizontal y torre de toma.

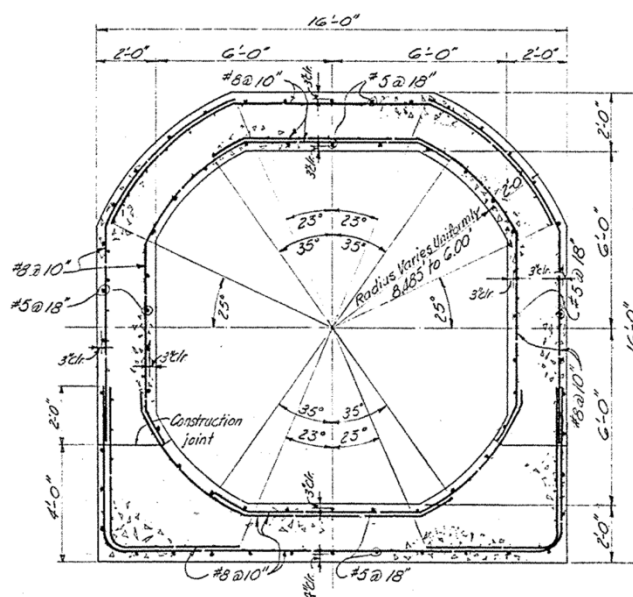


Figura 2: Sección transversal del conducto de toma horizontal de la presa

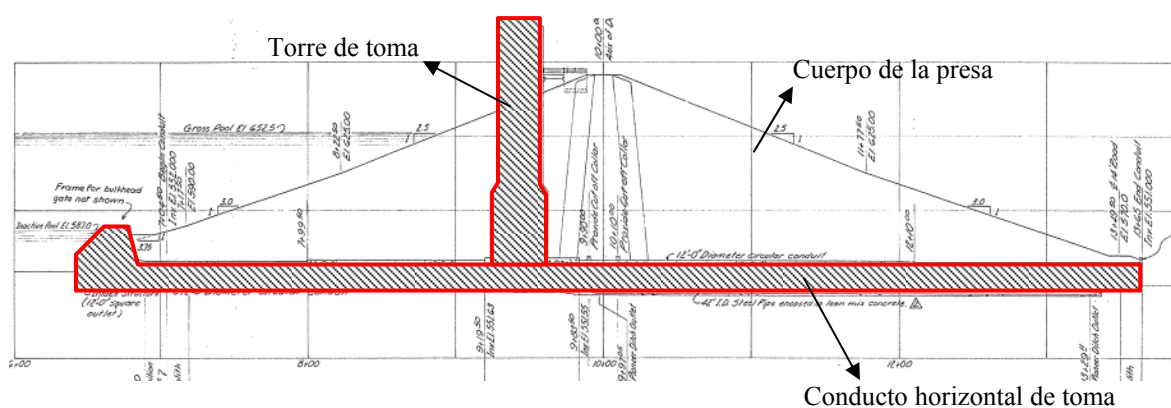


Figura 3: Sección transversal de la presa en la ubicación del conducto y torre de toma

### 3.2 Descripción de los modelos numéricos elaborados

Para determinar la extensión horizontal adecuada de los modelos de EF se llevaron a cabo análisis preliminares en donde se calculó la frecuencia natural de vibración del sistema. La extensión se modifica hasta que la frecuencia calculada no se modifica. De esta manera se adoptó una extensión horizontal (transversal a la presa) igual a 335 m (1100 ft) y en dirección longitudinal igual a 490 m (1600 ft). A partir de la geometría definida se discretizaron los modelos que se citaron en la Tabla 1. Las alturas del problema (torre de toma y presa) son las indicadas anteriormente. En la Figura 4 se ilustra el sistema 3D objeto de este estudio y la sección específica de análisis que contiene las estructuras de toma. Además, en la Figura 5 se ilustran las dimensiones de los modelos, tal como se señalara anteriormente.

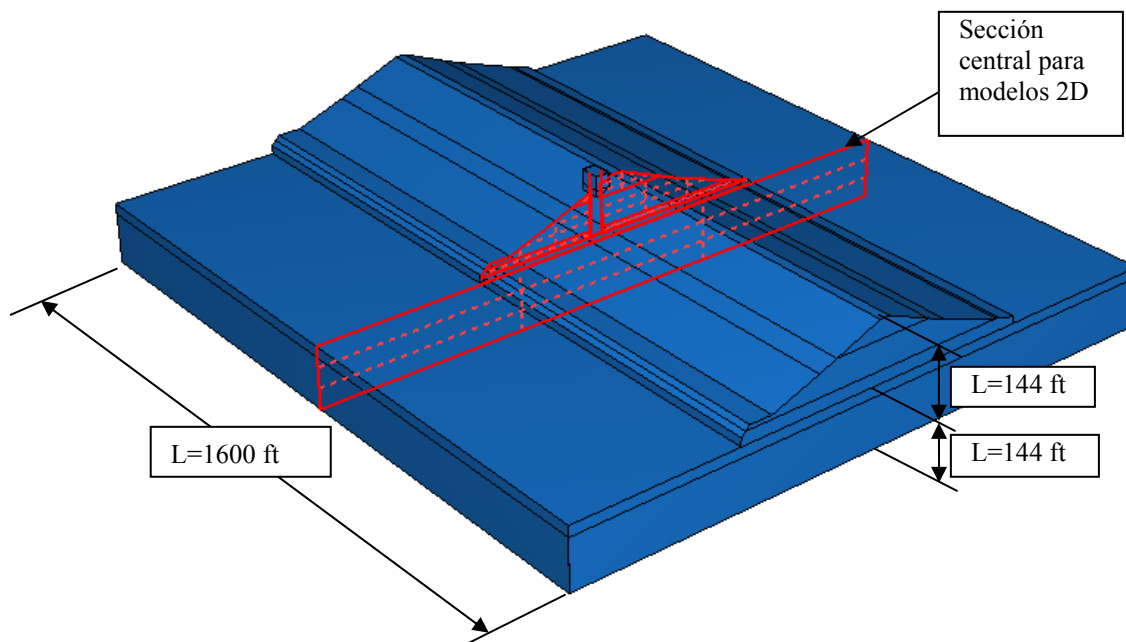


Figura 4 Esquema del modelo tridimensional de la presa Success

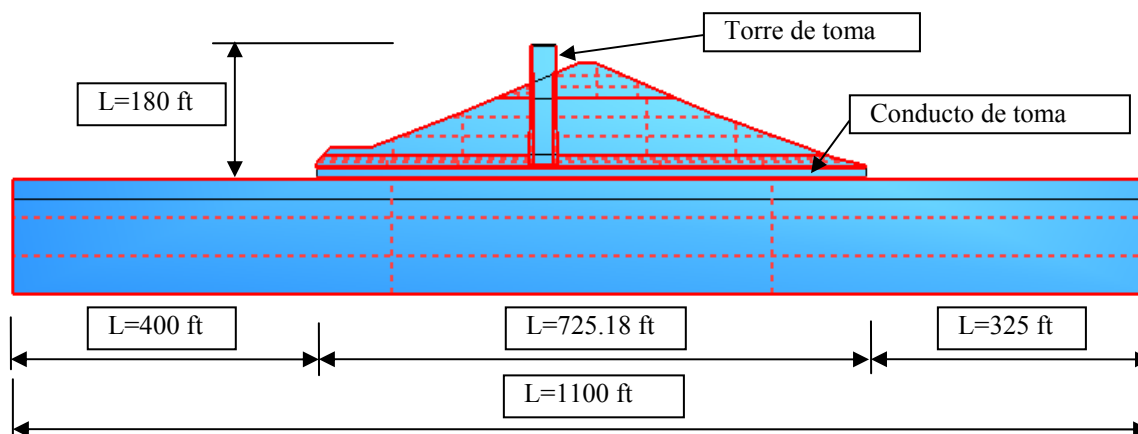


Figura 5 Esquema del modelo bidimensional de la presa Success

Los análisis que aquí se presentan se estudiarán y compararán con estudios anteriores a partir de dos variables que se identifican en la Figura 6: (a) Desplazamiento del extremo superior de la torre de toma, relativo a su base, y (b) cortante basal, medido en el arranque de la torre.

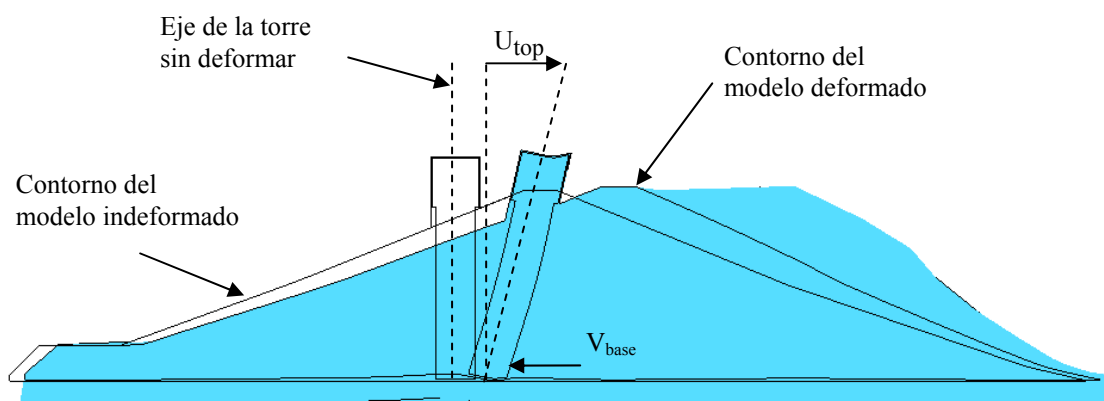


Figura 6 Definición de las variables que se utilizarán para resumir los resultados de los análisis numéricos

A partir de la geometría descrita anteriormente se elaboran los modelos citados en la Tabla 1. El Modelo 1 es una representación bidimensional del problema utilizando el programa SAP2000. El Modelo 2 es la extensión tridimensional del Modelo 1 y el Modelo 3 es similar al Modelo 2, pero en donde la torre y la presa se discretizan íntegramente con elementos sólidos 3D y se ha elaborado en el programa ABAQUS. En la Figura 7, Figura 8, y Figura 9 se ilustran los modelos planos y tridimensionales para estudiar el sistema con la torre de toma y sin tener en cuenta el conducto horizontal que atraviesa la presa. Los modelos planos que aquí se presentan tienen un espesor igual a 30 ft, que se corresponde con el menor ancho de la torre de toma, medido en el sentido del desarrollo de la cresta de la presa.

Debido a que el objeto principal de este estudio es analizar la bondad de una representación plana de la sección de la presa que contiene las estructuras de toma, los análisis de EF son lineales, por lo que no se considera la incidencia de las fisuras en la rigidez de los elementos de hormigón o la no-linealidad del suelo de la presa y se considera que el suelo de la presa siempre está en contacto con las estructuras de hormigón (no se modela la interfase suelo – estructura).

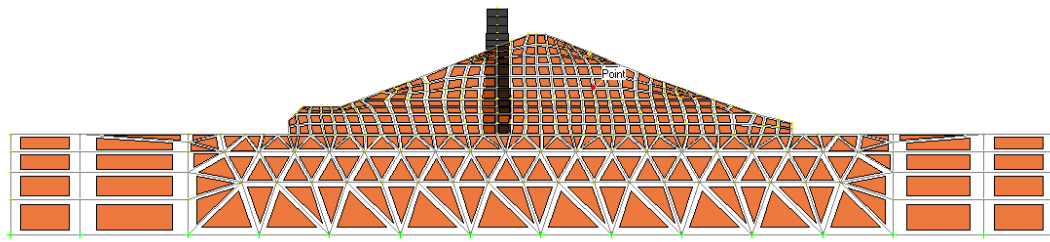


Figura 7: Modelo 1: Modelo 2D en SAP2000 con torre de toma

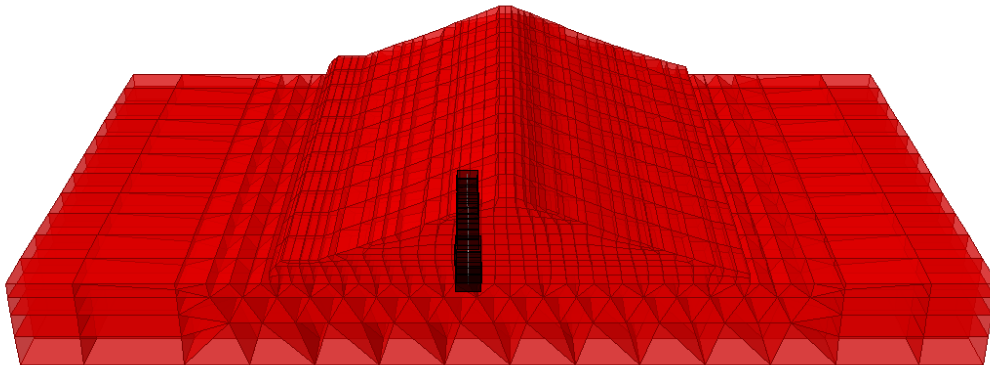


Figura 8: Modelo 2: Modelo 3D en SAP2000 con torre de toma

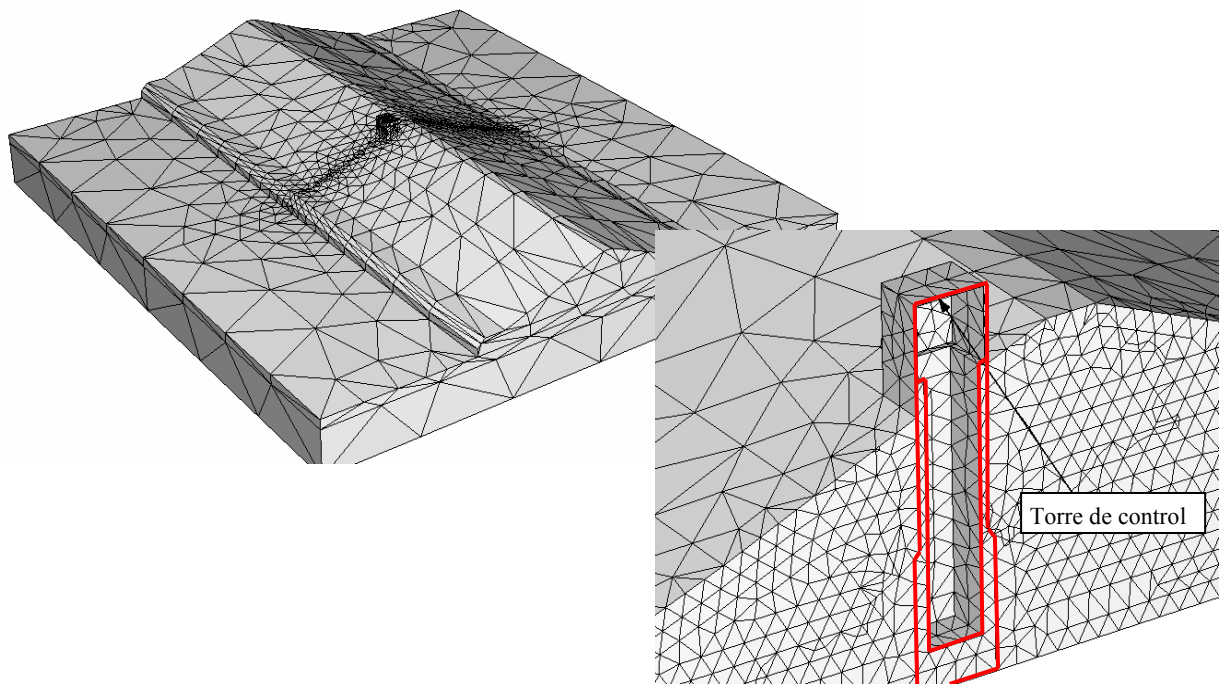


Figura 9: Modelo 3: Modelo 3D en ABAQUS con torre de toma

Los tres modelos anteriores se completan con el conducto de toma de agua horizontal, y respetando el orden en que se han presentado los Modelos 1, 2 y 3 se obtienen los modelos 4, 5 y 6. De este modo, el Modelo 4 es un modelo plano, elaborado en SAP2000, que considera la torre de toma y el conducto horizontal. El Modelo 5 es un modelo 3D elaborado en SAP2000 y también considera las dos estructuras de toma. Finalmente, el Modelo 6 es un



modelo de ABAQUS en donde se incluye la torre de toma y conducto horizontal, discretizados con elementos sólidos al igual que el cuerpo de la presa. En la Figura 10, Figura 11, y Figura 12 se ilustran los Modelos 4, 5 y 6, respectivamente.

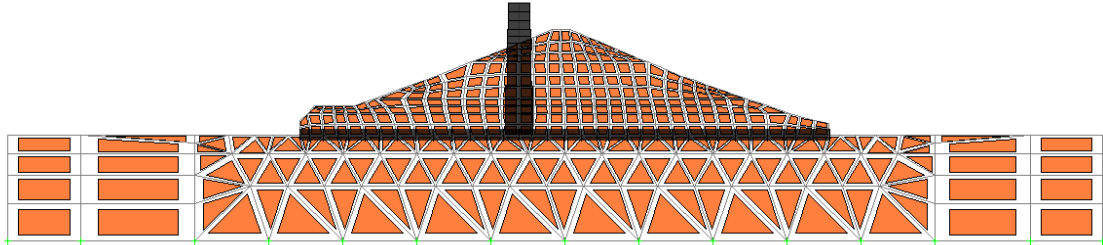


Figura 10: Modelo 4: Modelo 2D en SAP con torre de toma y conducto horizontal

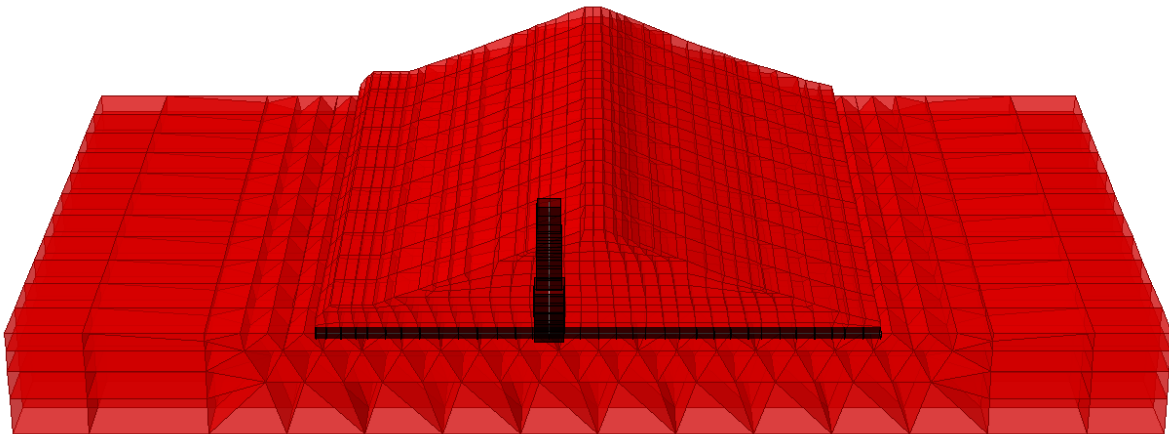


Figura 11: Modelo 5: Modelo 3D en SAP con torre de toma y conducto horizontal

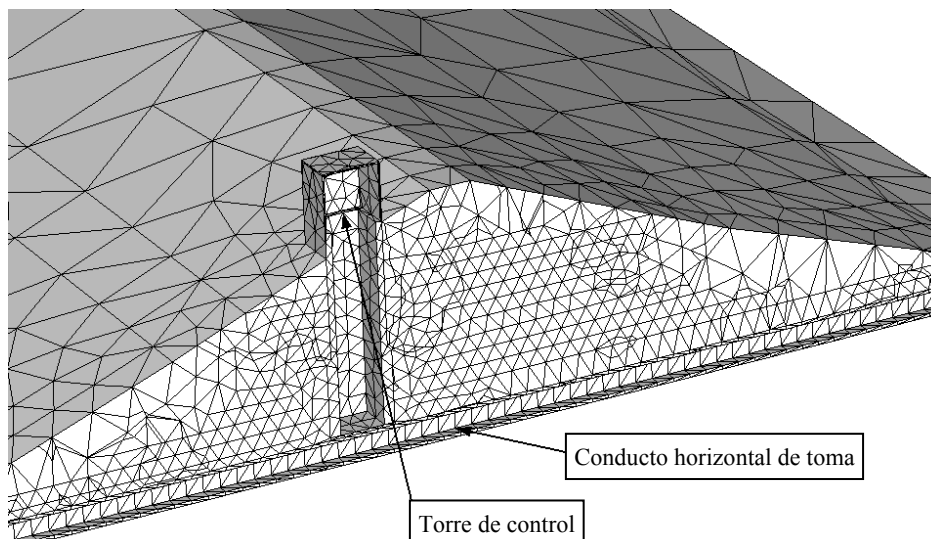


Figura 12: Modelo 6: Modelo 3D en ABAQUS con torre de toma y conducto horizontal

### 3.3 Solicitaciones adoptadas para los análisis

Para estudiar el comportamiento de la presa se llevaron a cabo tres análisis de Elementos Finitos (EF) para cada uno de los modelos desarrollados: Un análisis en el tiempo, utilizando el acelerograma del terremoto de Imperial Valley 1979 (registrado en El Centro) y dos análisis utilizando espectro de respuesta. El primero de los análisis con espectro de respuesta se hizo utilizando el espectro de diseño de la torre y se seleccionó para este trabajo, para poder comparar los resultados del presente estudio con aquellos obtenidos en la evaluación original de la presa de 1981. El segundo análisis con espectro de respuesta se hizo utilizando el espectro del registro de El Centro utilizado para el análisis en el tiempo. Los espectros de respuesta y acelerogramas utilizados se ilustran en la Figura 13, Figura 14, y Figura 15.

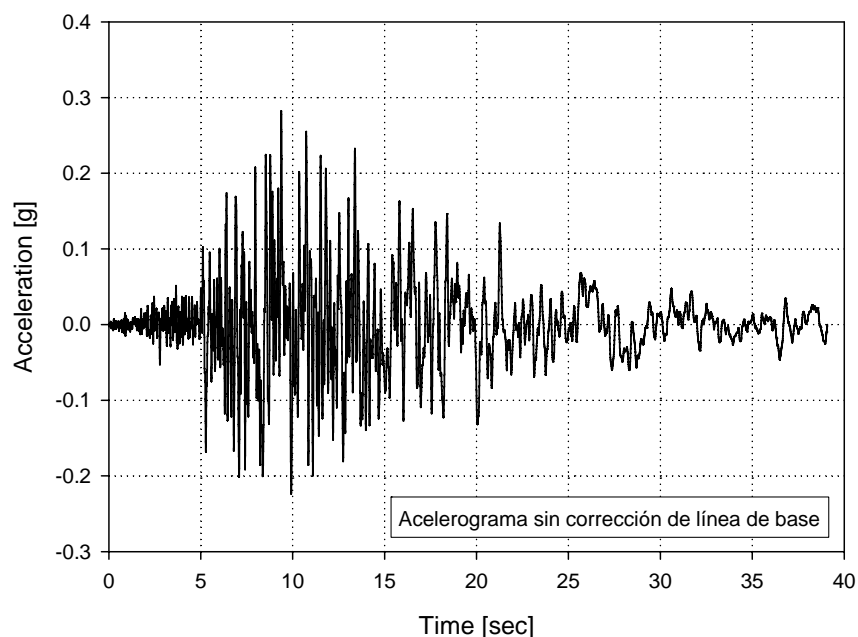


Figura 13: Acelerograma del terremoto Imperial Valley (1979), Estación El Centro

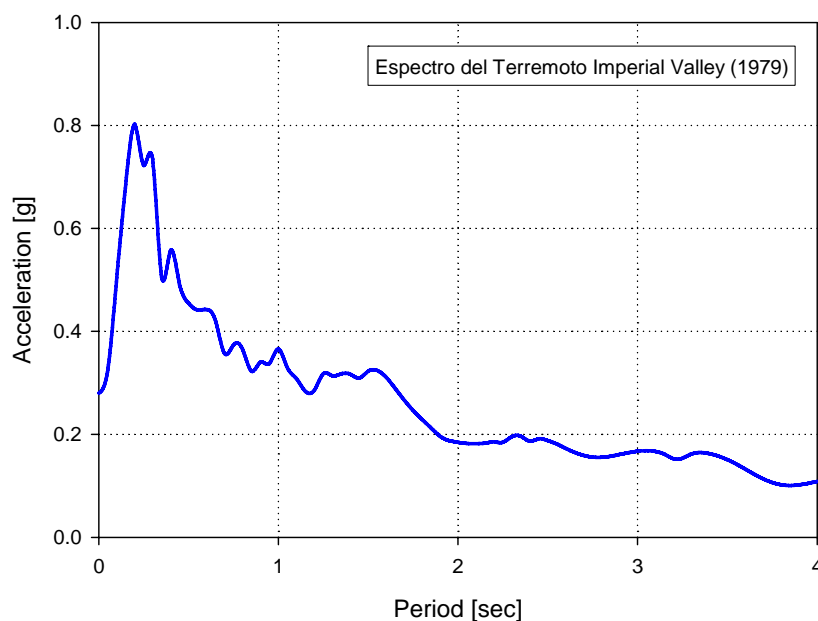


Figura 14: Espectro de respuesta del terremoto Imperial Valley

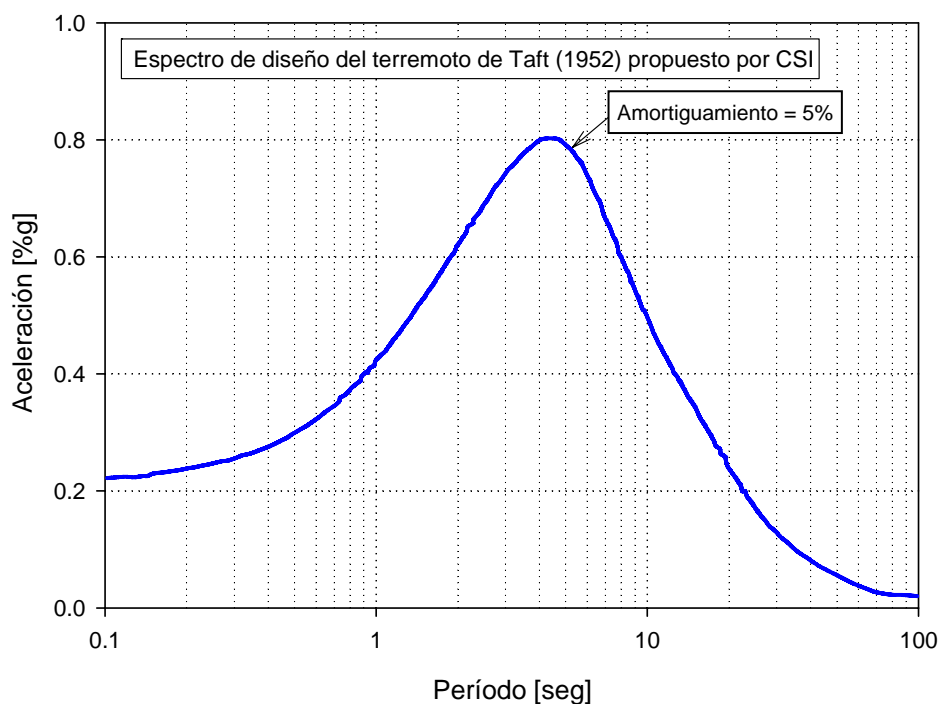


Figura 15: Espectro de respuesta de diseño de la torre de toma

La duración del terremoto de El Centro utilizado para los análisis es de 39.08 segundos; sin embargo se extendió la duración de los análisis a 50 segundos para comprobar que el modelo retorna a la posición de reposo a causa del amortiguamiento y no existieran desplazamientos remanentes. El amortiguamiento en el modelo se adoptó igual al 5% del crítico para todos los modos de la estructura. Cabe aclarar que el registro del terremoto de El Centro disponible no está corregido por línea de base, sin embargo se impuso este mismo registro a todos los modelos que se presentan aquí para poder obtener resultados comparables.

Los valores que se presentarán como resultados de los análisis de espectro de respuesta se calcularon utilizando la regla de combinación SRSS y se fijaron como resultados principales de los análisis el corte basal (calculado en la base de la torre de toma de agua) y el desplazamiento máximo relativo del extremo superior de la torre de toma de agua con respecto a su base.

#### 4 RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los análisis en el tiempo y espectrales de los modelos descritos en el apartado anterior. Se presentan en primer lugar (ver Tabla 3) los resultados de los modelos numéricos obtenidos con los modelos sin el conducto de toma con el objeto de comparar los nuevos modelos elaborados sobre la base del modelo plano equivalente formulado en la evaluación sísmica de la presa del año 1981.

Excitación	Modelo	$U_{\text{superior}} \text{ máximo}$ [cm]	Corte basal ( $V_{\text{base}}$ ) [t]
Acelerograma Figura 13	1	14.4	2683.9
	2	12.6	3344.8
	3	7.6	8360.2
Espectro de Figura 14	1	12.4	2835.4
	2	11.5	3061.7
	3	6.5	16249.9
Espectro de Figura 15	1	13.3	2418.6
	2	11.5	3228.7
	3	11.3	27260.9

Tabla 3. Resultados obtenidos con los modelos numéricos que no incluyen el conducto de toma horizontal

En la Tabla 4 se resumen los resultados obtenidos con los modelos 4 a 6 bajo la acción de los espectros y acelerogramas señalados anteriormente.

Excitación	Modelo	$U_{\text{superior}} \text{ máximo}$ [cm]	Corte basal ( $V_{\text{base}}$ ) [t]
Acelerograma Figura 13	4	10.6	5592.8
	5	12.0	6624.7
	6	7.2	22744.9
Espectro de Figura 14	4	13.6	5131.0
	5	11.4	5914.8
	6	4.7	15262.0
Espectro de Figura 15	4	13.3	4715.1
	5	11.5	6069.5
	6	8.7	29093.9

Tabla 4. Resultados obtenidos con los modelos numéricos que incluyen el conducto de toma horizontal

Los resultados anteriores indican que existe una buena correspondencia entre los resultados que se obtienen con los modelos planos y tridimensionales en donde se representan los conductos de toma con elementos de viga. Sin embargo, los resultados difieren significativamente (especialmente en relación al cortante basal) cuando se observan los modelos 3 y 6 que corresponden a los elaborados en ABAQUS que consideran y que no consideran el conducto horizontal, respectivamente, discretizados con elementos sólidos tridimensionales, al igual que la presa. El cortante basal en estos modelos se obtiene de integrar las tensiones de corte sobre la sección transversal inferior de la torre de toma. A pesar de ello, las frecuencias naturales que se obtienen con todos los modelos son muy similares, lo que permite suponer que las propiedades dinámicas de los sistemas analizados son semejantes (Tabla 5).

Modelo	Período Natural [s]
1	0.818
2	0.783
3	0.780
4	0.791
5	0.782
6	0.781

Tabla 5. Frecuencias naturales para los distintos modelos analizados

El período natural del sistema puede calcularse en forma aproximada mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{4 \cdot H}{V_s}$$

En donde H es la altura total de la presa y  $V_s$  es la velocidad de propagación de ondas de corte promedio del terraplén. Esta expresión arroja el siguiente período fundamental para la presa, que es razonablemente cercana a los períodos naturales obtenidos con los modelos numéricos:

$$T = \frac{4 \cdot H}{V_s} = \frac{4 \times 44\text{m}}{214 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.822\text{s}$$

En donde se adoptó una velocidad de propagación de ondas de corte promedio en la altura de la presa. El valor hallado mediante la fórmula aproximada es razonablemente cercano a los obtenidos con todos los modelos numéricos, por lo que se asume que las principales propiedades dinámicas del sistema se encuentran bien modelados.

## 5 EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Con el objeto de estudiar la bondad de los resultados obtenidos en este estudio, se compara la distribución de la fuerza cortante a lo largo de la torre de toma obtenida con los modelos 1 a 3 con los resultados obtenidos con el modelo plano equivalente elaborado en el año 1981 para la evaluación sísmica de la presa (la excitación externa corresponde con el espectro de la Figura 15). Esta comparación se ilustra gráficamente en la Figura 16 y corresponde a los modelos que no incluyen el conducto de toma horizontal, debido a que la evaluación sísmica existente no lo considera en el análisis.

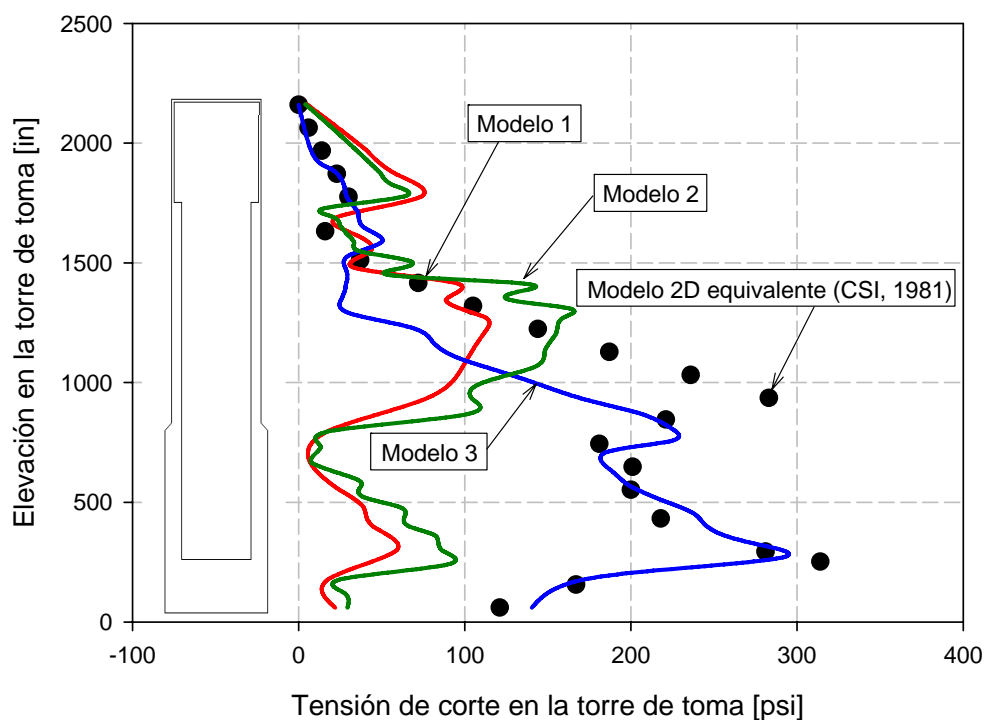


Figura 16: Comparación de cortantes a lo largo de la torre de toma utilizando los modelos planos, tridimensionales y planos equivalentes

Tal como puede observarse en la Figura 16 el modelo que arroja resultados más parecidos a los reportados en la evaluación sísmica de la presa en el año 1981 son los del modelo tridimensional de ABAQUS en donde se ha discretizado la presa y la torre de toma con elementos sólidos. Se destaca que la distribución de los cortantes presenta una similitud marcada, aunque el modelo de ABAQUS predice esfuerzos cortantes menores a los del modelo plano equivalente en el tercio central de la estructura. Los modelos 1 y 2 (modelos que mezclan elementos de viga con elementos de deformación plana y con elementos sólidos, respectivamente) predicen cortantes significativamente menores a los calculados con el modelo 3 y con el modelo plano equivalente, para las zonas de mayor sollicitación. En el extremo superior de la torre estos modelos presentan valores de corte mayores a los que se obtienen con los modelos más rigurosos.

Para analizar la incidencia que tiene el conducto de toma horizontal que atraviesa la presa en el comportamiento dinámico global del conjunto, se presenta la Figura 17, en donde se representan los resultados de los modelos 4, 5, y 6. En esta misma figura se incluyen las distribuciones de fuerzas de corte del modelo 3 y modelo plano equivalente para estimar la incidencia en los esfuerzos que ocasiona el conducto horizontal.

Tal como se observa en la Figura 17, la distribución de las fuerzas de corte es similar a la presentada para los modelos sin el conducto de toma. Además, se observa que el modelo tridimensional de ABAQUS en donde las estructuras de hormigón y el cuerpo de la presa se discretizan con elementos sólidos presenta esfuerzos cortantes mayores a los que se obtuvieron sin considerar el conducto horizontal, en el tramo central e inferior de la estructura. Sin embargo, el aumento del cortante no es significativo, tal como se desprende de la Figura 17.

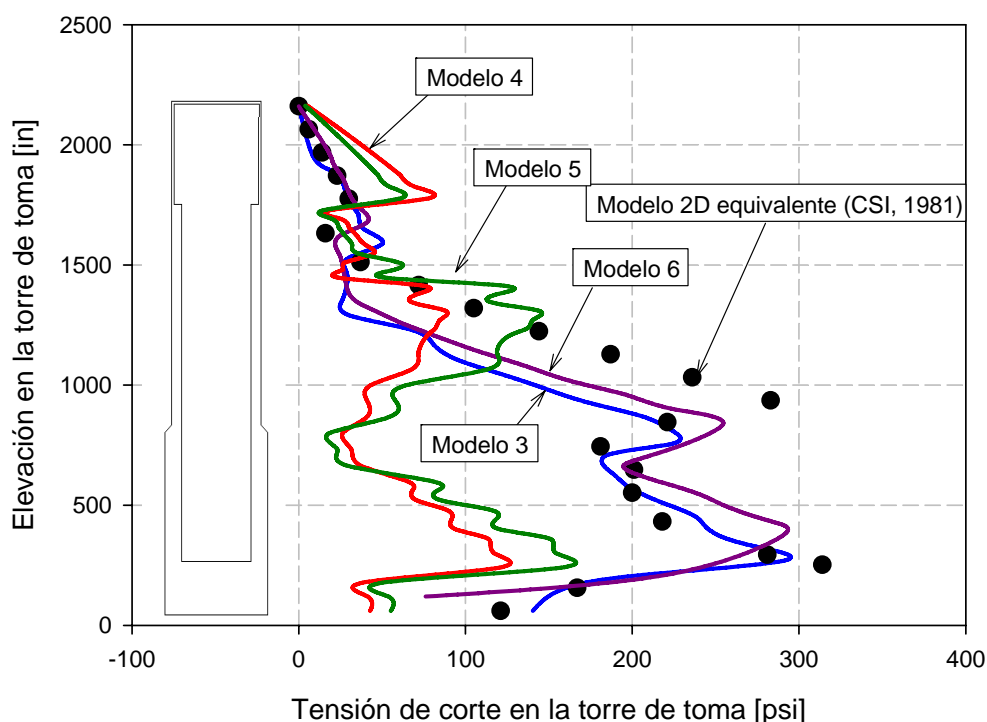


Figura 17: Comparación de cortantes a lo largo de la torre de toma utilizando los modelos planos, tridimensionales y planos equivalentes y considerando el conducto horizontal bajo la presa

De acuerdo a los resultados anteriores puede decirse que los modelos que mejor representaría el comportamiento del sistema son los modelos 3 y 6, ya que los resultados que arrojan son similares a los obtenidos en la evaluación original de la presa. Teniendo en cuenta esto, se destacan las importantes diferencias halladas entre el modelo 3 y los modelos 1 y 2 que mezclan elementos de viga y elementos sólidos. Estos últimos modelos arrojan esfuerzos sensiblemente menores a los del modelo 3. Un razonamiento similar puede hacerse para el modelo 6, en relación a los modelos 4 y 5.

Además de los esfuerzos cortantes en la base de la torre de toma pueden compararse los desplazamientos del extremo superior de la torre, a partir de la Tabla 3 y Tabla 4. Los desplazamientos obtenidos a través de los distintos presentan cierta semejanza, aún entre los modelos que mezclan elementos de viga y elementos sólidos (modelos 1, 2, 4, y 5) y modelos discretizados totalmente con elementos sólidos (modelos 3 y 6). Los resultados de los desplazamientos obtenidos son consistentes con las fuerzas de corte, habida cuenta que los modelos 3 y 6 predicen un comportamiento más rígido (menor desplazamiento) y por lo tanto desarrolla mayores esfuerzos en la base.

Cabe destacar que Cocco et al. (2008) analizaron el mismo problema utilizando el Método de Capacidad Espectral obteniendo resultados significativamente menores a los del presente estudio. Sin embargo, los análisis del estudio mencionado indican que el Método de Capacidad Espectral utilizado para estudiar el comportamiento dinámico de la presa con la torre de toma debería ser modificado para tener en cuenta la masa agregada de la torre debido al material suelto circundante de la presa.

## 6 RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este artículo se presentan los principales resultados de seis modelos de EF elaborados para estudiar la bondad con la que modelos bidimensionales simulan el comportamiento sísmico de una presa de material suelto que contiene en uno de sus faldones una torre de toma

de agua, cuando se discretiza la torre con elementos de viga y el cuerpo de la presa con elementos sólidos. La evaluación de la exactitud de estos modelos se lleva a cabo comparándolos con modelos en donde la presa y las estructuras de toma se discretizan con elementos sólidos tridimensionales. Además, los modelos elaborados se contrastan con los principales resultados de una evaluación sísmica elaborada para la presa Success en el año 1981. Los parámetros utilizados para la comparación de resultados son el período fundamental de vibración del sistema, el desplazamiento relativo del extremo superior de la torre con respecto a su base y la fuerza de corte a lo largo de la torre. Los análisis se llevan a cabo para un acelerograma y dos espectros de respuesta, encontrándose que el patrón de resultados se repite en los tres casos estudiados.

El período fundamental de vibración obtenido para el sistema con los seis modelos elaborados es similar y las diferencias son menores al 5%. Cabe destacar que para los modelos planos se adopta un espesor igual al ancho de la torre, para simular que efectivamente la estructura de hormigón se encuentra dentro del cuerpo de la presa.

El segundo parámetro adoptado para comparar los modelos analizados es la fuerza cortante en la base de la torre de toma de agua. En este punto se observaron notables diferencias entre los cortantes basales predichos por los modelos que mezclan elementos sólidos (presa) y elementos de viga (torre de toma y conducto inferior) y modelos de elementos sólidos. Los modelos mixtos predicen esfuerzos significativamente menores a los modelos homogéneos. Además, se obtuvo una muy buena representación de la distribución de fuerzas de corte a lo largo de la torre obtenida durante la evaluación sísmica de la presa (CSI, 1981) con el modelo tridimensional de ABAQUS (Modelo 3). Esto permite suponer que los modelos mixtos se encontrarían en una predicción insegura, a pesar de que los manuales del programa utilizado indican que la mezcla de elementos de diferente formulación arroja buenos resultados y no se pronuncia en contra de esta práctica (Wilson, 2002). Las diferencias encontradas se podrían atribuir en primer lugar a la falta de continuidad en el campo de desplazamientos entre nudos de elementos de viga y elementos sólidos, lo cual conlleva a la obtención de menores esfuerzos. En segundo lugar los programas utilizados para la modelación del problema, no dejan en claro como sus algoritmos tratan esta combinación de elemento y que aproximaciones se realizan. Esta característica de caja negra de los programas comerciales, sólo permite extraer conclusiones en base a comparaciones de resultados pero no se consigue ahondar en conclusiones conceptuales.

Por último se comparan los desplazamientos en el extremo superior de la torre (relativos a su base). Estos desplazamientos tienen valores similares para todos los modelos analizados, siendo las máximas diferencias del orden del 20 %.

## REFERENCIAS

U.S Corps of Engineers (2004). "Information Packet for the Initial Screening Workshop of Alternative Seismic Remediation Strategies for Success Dam," Sacramento, CA. 26p.

Cocco, L. J., Ruiz, M. E., y Stuardi J. E. (2008). Evaluación de la respuesta no-lineal de torres de control por el método de capacidad espectral". Revista Mecánica Computacional (ISSN 1666-6070), Vol. 27, pp. 1873-1896.

Pando, M. and Cataño, J. (2004). "Success Dam Report," (unpublished) University of Puerto Rico Mayagüez Campus, PR.

Wahler, Mark J. (1981). "Dynamic Analysis of Structures at Success Dam". Reporte



presentado al cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, 175p.

Wilson, E. L. (2002). “Three Dimensional Static and Dynamic Analyses of Structures”. Computers and Structures Inc., 3e<sup>ra</sup> edición, Berkeley, California, USA. 423p.