

MODELACIÓN 3-D PARA ANÁLISIS E INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DE LA REPRESA LA PLATA, PUERTO RICO

Fabián A. Consuegra Gómez¹ y José A. Martínez Cruzado²

Resumen: El presente trabajo propone una manera analítica de identificar la localización más adecuada para localizar la instrumentación de Movimiento Fuerte en la represa La Plata en Toa Alta, Puerto Rico. Un modelo tridimensional de elementos finitos fue desarrollado considerando la estructura (represa), el efecto estático y dinámico del agua y el suelo bajo su fundación. Pruebas sencillas para obtener las propiedades dinámicas del concreto y la roca fueron implementadas en el sitio. Tres modelos fueron definidos a través de relaciones de módulos entre el hormigón y la roca de 1, 3.7 y 12.4. Los análisis de los modelos fueron desarrollados en el dominio del tiempo usando un registro artificial de aceleraciones diseñado para la región y diferentes valores de amortiguamiento. Los criterios para localizar la instrumentación fueron: la ubicación de los desplazamientos máximos, la ubicación de las aceleraciones máximas, la captura de los tres primeros modos de vibración de la represa y la aparición del efecto de balanceo (*rocking*). Dichos puntos estuvieron en general hacia la cresta de la represa en la cercanía del edificio de oficinas. El análisis permitió ubicar la instrumentación de una manera racional y observar la variación de los esfuerzos de tensión en el concreto y aparición de fisuras para las diferentes relaciones de módulos usadas. También se llevo a cabo el trabajo de campo para la instalación de los acelerómetros.

Palabras Claves: análisis modal numérico, instrumentación sísmica, modelación con elementos finitos, represas en hormigón de gravedad.

3-D MODEL OF LA PLATA DAM FOR ITS ANALYSIS AND ITS SEISMIC INSTRUMENTATION, TOA ALTA, PUERTO RICO

Abstract: The present study proposes an analytical method to identify the most suitable location for locate the Strong Motion Instrumentation of La Plata Dam, in Toa Alta, Puerto Rico. A three-dimensional finite element model of the concrete dam was developed considering the hydrodynamic effect of water and the soil foundation. Simple tests to obtain dynamic properties of the concrete and rock foundation were undertaken. Three models were defined using the modulus of elasticity ratios between the concrete and the soil foundation of 1, 3.7, and 12.4. A dynamic analysis of the combined structure was carried out in the time domain by using an artificial earthquake specifically designed for the region, and different damping values. The criteria to locate the strong motion instrumentation were to locate the maximum displacements and maximum accelerations, to obtain the first three mode shapes and to measure the rocking of the dam. The maximum response points were located, in general, at the top of the dam and near the office building. The analysis helped to locate in a rational way the Strong Motion Instrumentation and to compute the tensile stresses on concrete and detect cracking for each of the moduli ratios used. The field work required to install the accelerometers was also carried out.

Keywords: concrete gravity dam, finite element modeling, numerical modal analysis, seismic instrumentation.

INTRODUCCIÓN

Es una buena medida de poca práctica en la Ingeniería Civil, una vez se culmina la etapa final de construcción de una estructura, el observar su desempeño y comportamiento con alguna frecuencia. Esta conciencia de reevaluar y

¹ Ingeniero Civil M.Sc., Asistente de Investigación, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez. facg23@hotmail.com

² Catedrático y Director del Programa de Movimiento Fuerte de Puerto Rico, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, PR 00681.

monitorear toma mayor sentido si consideramos en primera instancia las diferencias que puedan existir, por diversos factores, entre el diseño y la obra finalizada. Estos mecanismos de control implementados durante la vida útil de la estructura pueden ser más o menos intensivos en función del interés particular de la obra. De entre muchas obras civiles se encuentra el caso de las represas que por su condición particular, concentran la atención de muchos sectores de importancia dentro del desarrollo de una comunidad. Daños considerables en una represa podría generar grandes pérdidas materiales e incluso gran número de pérdidas de vidas humanas en zonas ubicadas aguas abajo. En muchos años de experiencia los daños más importantes presentados en represas se han debido a la acción sísmica por lo que el mecanismo adoptado para control y monitoreo deberá tener en cuenta de primera mano la consideración de este efecto.

Diversos estudios han demostrado que la actividad sísmica en una zona podría incrementarse con la presencia de una represa. En 1870 el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (identificado como USCE por sus siglas en inglés) rechazó la propuesta de aumentar la capacidad de almacenamiento en la represa *The Salton Sea* en el sur de California, debido a que dicha acción podría causar terremotos. Otro ejemplo conocido es la represa de Koyna (con altura máxima de 103m) en la India, donde después de su construcción en 1963 en una zona conocida como de baja sismicidad, comenzaron a presentarse frecuentes registros sísmicos en la cercanía a la represa. En 1967 se registró un sismo de magnitud $M = 6.5$ que averió significativamente la represa. Un estudio hecho por W.H. Freeman and Company estableció que la sismicidad en la zona aumentaba después de unos pocos meses que terminaba la temporada de lluvia, justo cuando la represa se encontraba con los máximos niveles de almacenamiento. El “*United States Committee on Large Dams*” (USCOLD, Comité Estadounidense para Grandes Represas) recomienda que toda represa ubicada en zona sísmica 3 y 4 (de acuerdo a la clasificación del Uniform Building Code 1997) sea instrumentada debido al alto potencial de daño que implica el colapso de éstas (USCOLD, 1992). Por las anteriores razones la represa La Plata en Toa Alta identifica una zona de vulnerabilidad sísmica en Puerto Rico donde la instalación de Instrumentación de Movimiento Fuerte es de especial interés.

La Instrumentación de Movimiento Fuerte conforma una fuente exclusiva de obtención de datos experimentales para monitorear una estructura, ayuda a entender el fenómeno sísmico de una mejor manera así como a analizar el comportamiento de una estructura durante un terremoto, evaluar daños posteriores, e incluso predecir su comportamiento ante un evento sísmico determinado. En adición a lo anterior, debe considerarse el beneficio de su pequeño costo comparado con la inversión total que conlleva la construcción y mantenimiento de una represa. La Instrumentación de Movimiento Fuerte implica determinar la cantidad y ubicación de los instrumentos, lo cual ha sido hecho tradicionalmente con base en la experiencia y el criterio ingenieril.

El objetivo principal de este trabajo es recomendar la localización de la Instrumentación de Movimiento Fuerte en la represa La Plata (Figura 1), mediante el uso de un modelo computacional que permita identificar los puntos de mayores efectos en términos de aceleraciones, desplazamientos y balanceo (*rocking*) en la represa, frente al evento sísmico máximo creíble para la zona. Dentro del modelo se ha considerado el agua de almacenamiento en el nivel de la cresta y la roca de fundación. El proceso de instalación de los acelerómetros también es ilustrado así como un análisis de variación de esfuerzos máximos de tensión en el concreto de la represa.

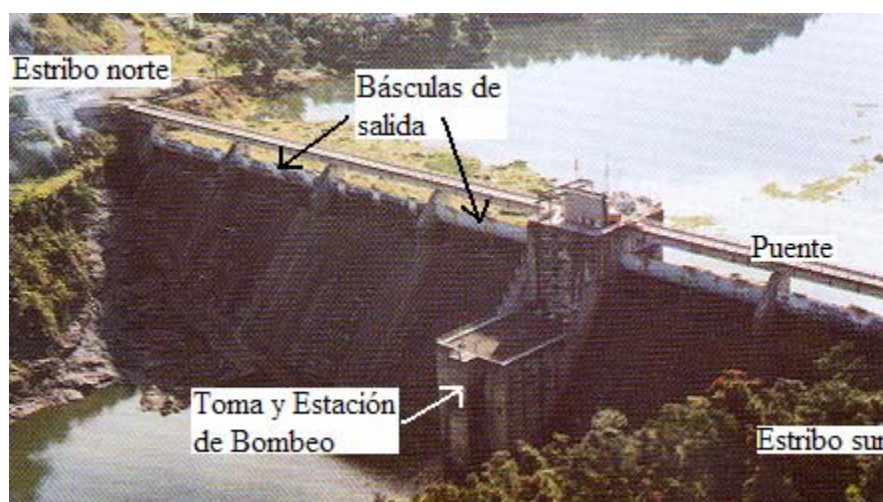


Figura 1: Represa La Plata, Toa Alta, Puerto Rico.

MODELO COMPUTACIONAL

El modelo computacional en tres dimensiones (3-D) de la represa La Plata se desarrolló en el programa de elementos finitos SAP 2000 Versión 8. De los tres componentes del sistema: *estructura*, *suelo* y *agua*, los dos primeros se han definido mediante la creación de una malla de elementos finitos haciendo uso del elemento de sólido de SAP en sus presentaciones de bloque y prisma ('block' y 'prims1') los que se muestran en la Figura 2 (Computers and Structures, 2000). Las cargas muertas debidas al peso de la represa y el suelo fueron consideradas en el análisis.

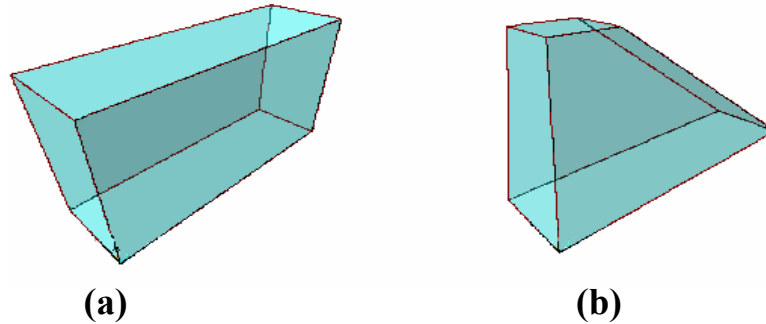


Figura 2: Elementos de Sólido de SAP 2000 usados: (a) block; (b) prims1.

EL SUELO

La inclusión del suelo dentro del modelo computacional se hizo considerando dos zonas: El campo cercano y el campo lejano. La primera de ellas corresponde a la región de suelo del dominio adyacente a la *estructura* y la segunda se extiende desde el borde lejano del campo cercano hacia el semiespacio. El campo cercano fue representado mediante una malla de elementos finitos de sólidos y el campo lejano fue representado con las condiciones de borde de desplazamiento supuestas en el borde común con el campo cercano. Las dimensiones de la malla del suelo fueron adoptadas con base en recomendaciones del USCE para modelos de represas en dos dimensiones (2D) (USCE, 2003) y verificando la convergencia de las formas modales de la represa. Esto es: Para una fundación competente ($E_c / E_r < 1$), es adecuada una malla de suelo igual a la altura de la represa en dirección aguas arriba, aguas abajo y en profundidad. E_c y E_r son, respectivamente, los módulos de elasticidad del hormigón y de la roca. Para fundaciones más flexibles (E_c / E_r entre 2 y 4), el doble de la altura en todas las direcciones es aceptable. De igual manera, las condiciones de borde en la frontera entre el campo cercano y lejano fueron los siguientes: Los nodos en la base de la fundación se restringieron en sus tres grados de libertad (traslación); los nodos en las paredes verticales tienen restringido el movimiento vertical y libres sus otros grados de libertad.

EL AGUA: PRESIONES HIDROSTÁTICAS

El empuje horizontal debido a las presiones hidrostáticas se incluyó en el modelo aplicando fuerzas de superficie sobre los sólidos en la pared vertical de la estructura. Para ello se definió una función que representara la variación de las presiones hidrostáticas sobre la pared vertical de la represa expuesta al agua, tal como muestra la Figura 3.

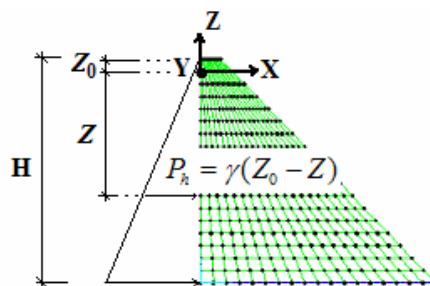


Figura 3: Variación de las presiones hidrostáticas en la pared vertical de la represa.

EL AGUA: PRESIONES HIDRODINÁMICAS

Las presiones hidrodinámicas en el modelo de la represa La Plata fueron consideradas a través del concepto de masa agregada. Esto significa que el empuje hidrodinámico del agua se representa adicionando cierta cantidad de masa a

la masa de la represa. Suponiendo que el agua es incompresible e irrotacional, para pequeñas amplitudes del movimiento del agua, las presiones están regidas por la ecuación:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

en donde $p(x, z)$ es la presión hidrodinámica en adición a la presión hidrostática, generada por la aceleración de la superficie de contacto entre la estructura y el agua en la dirección horizontal (a_x), y la aceleración del fondo del lago en la dirección vertical (a_z), en el dominio de una sección vertical del fluido mostrada en la Figura 4. En esta investigación se consideró únicamente la imposición del sismo en dirección horizontal por lo que la aceleración vertical a_z es cero. El dominio del fluido en dirección horizontal se acotó hasta una distancia de 500m aguas arriba de la cara vertical de la represa donde se supone aproximadamente uniforme la topografía del lago. Las condiciones de borde en el dominio plano para resolver la ecuación (1) pueden verse también en la Figura 4 y son: El efecto de oleaje en la superficie del lago es despreciado (Newmark y Rosenblueth, 1971) por lo que las presiones hidrodinámicas ahí son cero ($p(x, z) = 0$) y la variación de las presiones hidrodinámicas en la dirección de la normal en las paredes verticales del dominio $\frac{\partial p}{\partial n} = \pm \rho a_x$.

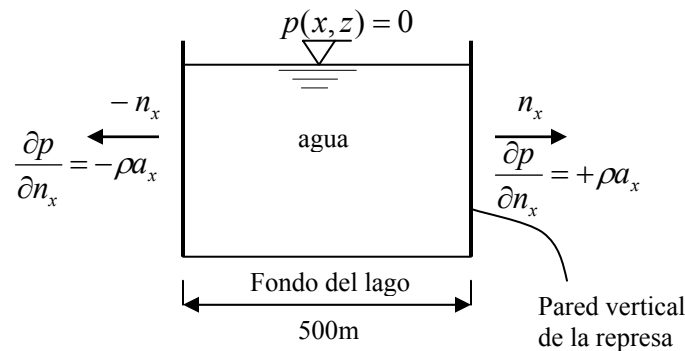


Figura 4: Modelo plano del dominio del agua para calcular las presiones hidrodinámicas en la pared vertical de la represa.

La ecuación (1) fue resuelta mediante una solución de elementos finitos haciendo uso del elemento triangular de tres nodos con tensión (esfuerzo) constante. La solución es equivalente a una solución matricial de la forma $\{f\} = [K]\{u\}$ (fuerza = rigidez*desplazamiento), pero que tiene ahora la forma (Prato, 2003):

$$\{b\} = [D]\{p\} \quad (2)$$

donde $\{p\}$ son las presiones hidrodinámicas en el dominio del fluido, $[D]$ es la matriz equivalente de "rigidez" consistente formada con los elementos triangulares, y el vector de "fuerzas" $\{b\}$ tiene términos no nulos en el contorno a través de las condiciones de borde en las paredes verticales mostradas en la Figura 4. Para un elemento triangular como el de la Figura 5 se tiene:

$$\{b\} = \begin{Bmatrix} b_i \\ b_j \\ b_k \end{Bmatrix} \quad [D] = \begin{bmatrix} d_{ii} & d_{ij} & d_{ik} \\ d_{ji} & d_{jj} & d_{jk} \\ d_{ki} & d_{kj} & d_{kk} \end{bmatrix} \quad \{p\} = \begin{Bmatrix} p_i \\ p_j \\ p_k \end{Bmatrix} \quad (3)$$

En función de la formulación del elemento triangular, los términos de la matriz de "rigidez" $[D]$ y del vector de términos independientes $\{b\}$ son:

$$d_{ij} = \frac{1}{4A} [a_1^i a_1^j + a_2^i a_2^j] \quad (4)$$

$$b_i = \rho [a_n^i l / 3 + a_n^j l / 6] \quad (5)$$

En la ecuación (4), A es el área del triángulo y a_1^i corresponde a la proyección del lado opuesto al nodo i en la dirección 1 como muestra la Figura 5. Esto es: $A = \Delta_1 \Delta_2 / 2$; $a_1^i = \Delta_1$. En la ecuación (5), ρ es la densidad del agua,

a_n^i es la aceleración normal en el borde sobre el nodo i , a_n^j es la aceleración normal en el borde sobre el nodo j adyacente al nodo i y $l = \Delta_2$, tal como lo muestra la Figura 5.

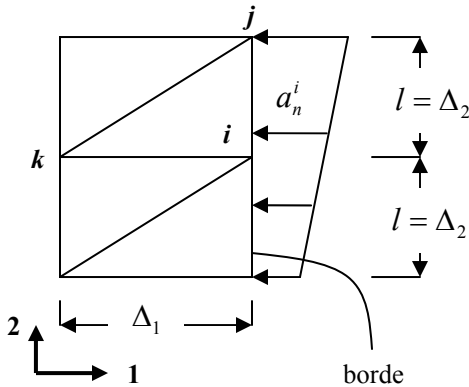


Figura 5: Elemento triangular usado para el cálculo de las presiones hidrodinámicas.

Los coeficientes en las ecuaciones (4) y (5) se evalúan en los tres nodos de cada elemento para luego ensamblar las matrices de todo el sistema según la ecuación (3). Las presiones $\{p\}$ hidrodinámicas sobre la represa fueron calculadas resolviendo la ecuación (1) para sucesivas secciones verticales a lo largo de la represa. La aceleración de todo el sistema fue tomada igual a la unidad ($a_n^i = a_x = 1$) por lo que el resultado de $\{p\}$ según la ecuación (3) es directamente la masa agregada por unidad de superficie. La Figura 6 muestra el contorno de presiones hidrodinámicas (masa agregada) obtenida para la sección de máxima profundidad de la represa.

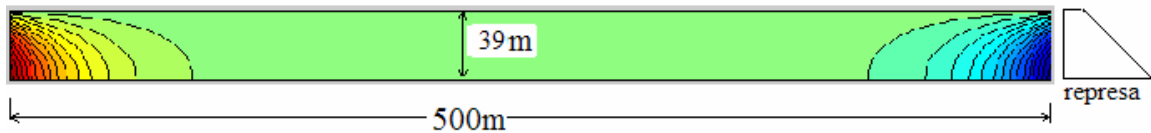


Figura 6: Contorno de presiones hidrodinámicas generada para una sección de fluido.

MODELO FINAL DE ELEMENTOS FINITOS

Una ilustración final del modelo computacional de la represa La Plata puede verse en la Figura 7. El modelo tiene 3,300 nodos y 2,358 elementos sólidos. La estructura de la represa fue modelada mediante 1,712 nodos y 1,260 elementos, la Toma y Estación de Bombeo (edificio) con 205 nodos y 105 elementos, y el suelo con 1,383 nodos y 993 elementos. La densidad de la malla usada para la estructura y el suelo próximo a ésta es, en promedio, de un elemento sólido cada 5m, mientras que para el suelo más distanciado de la represa es de cerca de un sólido cada 15m. Las galerías superior e inferior que atraviesan la represa en la dirección longitudinal de la misma (dirección Y) fueron consideradas dentro del modelo.

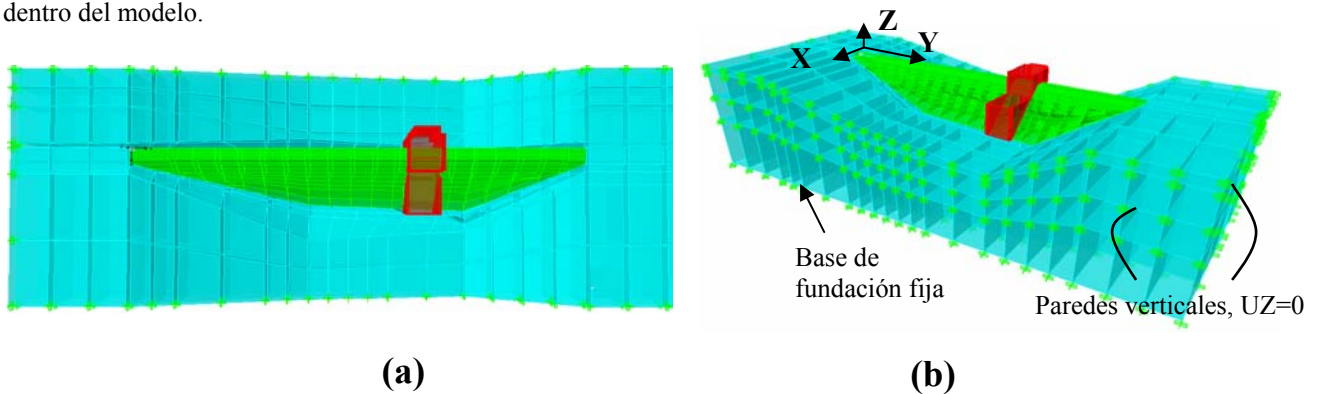


Figura 7: Modelo de elementos finitos final de la represa La Plata: (a) Vista en planta; (b) Sistema de coordenadas y condiciones de borde.

EVALUACIÓN DE LA CONVERGENCIA DEL MODELO

La convergencia del modelo computacional de la represa La Plata está directamente relacionada con la malla adoptada y las propiedades de densidad usadas para la roca de fundación. El USCE recomienda usar densidad de la roca de fundación cero para permitir que el efecto sísmico se traslade directamente a la zona de interacción suelo-estructura (USCE, 2003). Por otro lado, considerar una roca de fundación con densidad diferente de cero permite tener en cuenta el efecto de amplificación de onda debido al suelo. En esta investigación se evaluaron los dos modelos de la represa, es decir considerando el suelo de fundación con y sin masa. La Figura 8 muestra la variación de los periodos de vibración del modelo computacional que se muestra en la Figura 7. Puede observarse que los periodos de vibración del modelo de roca con masa son más susceptibles a la rigidez relativa del conjunto, lo cual luce correcto. Por otro lado, los periodos de vibración del modelo de roca sin masa permanecen casi invariables para un amplio rango de relaciones de módulos de elasticidad entre el concreto y la roca, incluyendo una roca infinitamente rígida. Con base en lo anterior se seleccionó el modelo de roca con masa como adecuado en un primer acercamiento al problema, y se evaluó la convergencia del modelo.

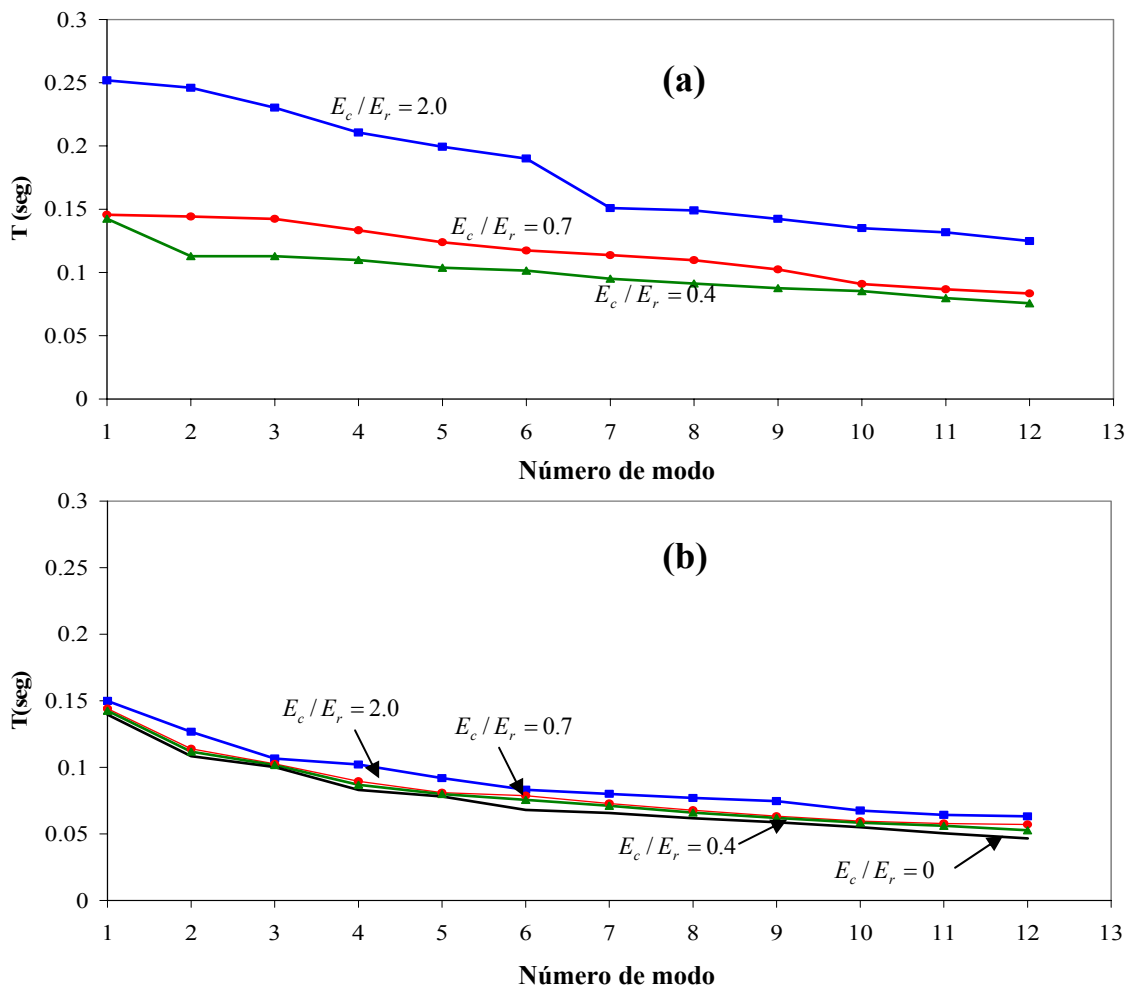


Figura 8: Variación de los periodos de vibración del modelo para diferentes relaciones de módulos entre el concreto y la roca: (a) Roca con masa; (b) Roca sin masa.

Aunque las dimensiones de la malla del suelo aguas arriba, aguas abajo y en profundidad fueron adoptadas con base en las recomendaciones del USCE, en la literatura no se encontraron recomendaciones para la malla del suelo hacia cada lado del estribo (estribos norte y sur según la Figura 7 (a)). Por lo tanto se evaluó la convergencia de las formas modales de la represa con el aumento de la malla de suelo a cada lado del estribo de la represa. La Figura 9 muestra la forma modal del primer modo de la dirección longitudinal al río para diferentes mallas de suelo. Pese a que en la Figura 9 (a)

se observa cierta tendencia en esta forma modal, la Figura 9 (b) muestra que la forma modal cambia súbitamente para una malla de suelo más grande (240m), lo cual no implica que no se logró establecer convergencia.

En vista de lo anterior se evaluó el modelo de roca sin masa obteniéndose mejores resultados. La Figura 10 muestra que el modelo de roca sin masa permite lograr convergencia en las formas modales de la represa con el aumento de la malla de suelo. Para el caso particular de la represa La Plata, una malla de 60 m a cada lado del estribo es suficiente para obtener resultados aceptables en términos de los modos de vibración de la represa.

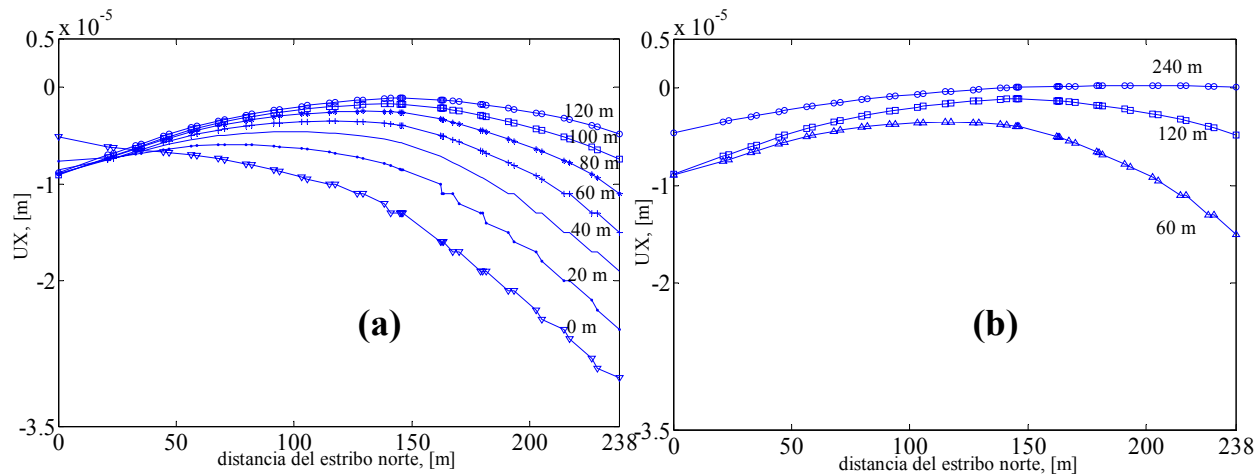


Figura 9: Variación del primer modo de vibración de la dirección longitudinal al río para un eje a lo largo de la cresta, usando un modelo de roca con masa: (a) Hasta 120 de malla de suelo a cada lado; (b) Hasta 240 m de malla.

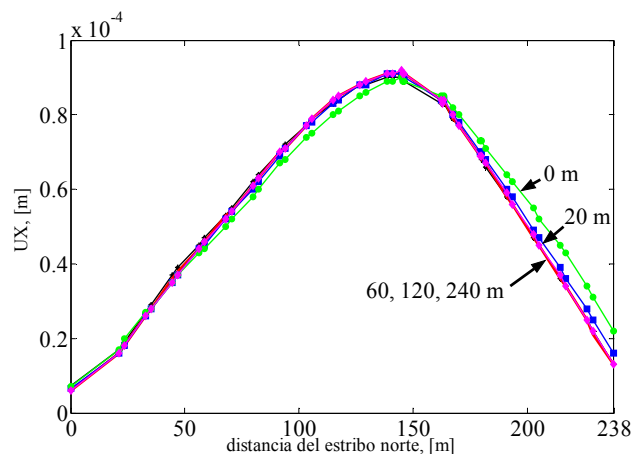


Figura 10: Variación del primer modo de vibración de la dirección longitudinal al río para un eje a lo largo de la cresta, usando un modelo de roca sin masa.

MODELOS DEFINITIVOS

En el análisis paramétrico hecho para la represa La Plata se usaron propiedades de los materiales obtenidos de las mediciones de las propiedades dinámicas de éstos en el sitio, así como otros valores supuestos para considerar una amplia gama de relación de módulos de elasticidad entre el concreto y la roca (E_c / E_r). La medición de las propiedades dinámicas de los materiales en el sitio se hizo con un medidor de pulso ultrasónico que mide el tiempo que tarda la onda P en viajar a través del material, entre dos puntos separados una distancia conocida. La Tabla 1 muestra los tres modelos definitivos usados en el análisis. El Modelo 1 corresponde a los valores medidos en el sitio, mientras que los otros modelos corresponden a valores de módulo adoptados para los materiales.

Tabla 1: Propiedades de los materiales para los modelos definitivos.

MODELO	E_c / E_r *	E [MPa], Cuerpo de la represa	E [MPa], Toma y Estación	E [MPa], Roca
1	12.4	45,438	42,374	3,542
2	3.7	45,438	42,374	11,733
3	1.0	13,800	13,800	13,800

ANÁLISIS DINÁMICO

El análisis dinámico de la represa La Plata fue desarrollado usando el método del análisis modal mediante la consideración de suficientes modos obtenidos por la solución del problema de autovalores. Para el análisis modal de cada uno de los tres modelos de la Tabla 1 se obtuvo una cantidad de modos de vibración para proveer al menos el 90% de participación modal en cada una de las direcciones horizontales. Además, éstos debían cubrir adecuadamente el contenido de frecuencias predominantes del registro de aceleraciones introducido al modelo. El registro de aceleraciones usado como el máximo evento sísmico esperado para la represa La Plata fue un registro artificial para el área de San Juan propuesto por Irizarry (1999). Este registro tiene una aceleración máxima del suelo (PGA) de 0.19g, y una duración total de aproximadamente 10 s. La Tabla 2 muestra los modos de vibración obtenidos según los criterios anteriores ordenados por periodo de vibración con su factor de participación para las direcciones principales del modelo que se muestra en la Figura 7 (b). Con el fin de obtener los principales modos de vibración en cada dirección, es necesario reorganizar los modos en función del factor de participación modal respectivo. La Tabla 3 muestra los modos de vibración en cada dirección en orden de importancia según la dirección.

Tabla 2: Modos de vibración para el Modelo 1

MODO	PERIODO (s)	Participación modal UX (unitario)	Participación modal UY (unitario)	Participación modal UZ (unitario)
1	0.233	0.820000	0.000038	0.016940
2	0.172	0.000024	0.028010	0.000000
3	0.166	0.003624	0.280000	0.000208
4	0.158	0.002897	0.650000	0.000282
5	0.133	0.069410	0.000075	0.710000
6	0.128	0.024570	0.001227	0.076140
7	0.118	0.000498	0.009042	0.050750
8	0.114	0.000408	0.005975	0.000141
9	0.108	0.002041	0.001775	0.011510
10	0.099	0.034890	0.001109	0.004243
11	0.093	0.003009	0.001387	0.059450
12	0.090	0.006454	0.001028	0.000012
TOTAL:		96.78%	97.97%	

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Se realizó un análisis de la represa La Plata comparando los resultados arrojados por los tres modelos presentados en la Tabla 1. Dicha comparación fue basada en los efectos de desplazamientos máximos, balanceo, aceleraciones máximas en la galería inferior, la captura de los modos de vibración y el análisis de esfuerzos de tensión en el concreto. Con base en dicha comparación también fue definida la instrumentación de la represa La Plata. Aunque en general los valores obtenidos para cada efecto analizado no son muy precisos, pues persiste un grado de incertidumbre en el módulo de

* La relación de módulos fue calculada promediando los valores del Cuerpo de la represa y la Toma y Estación, en el caso de los modelos 1 y 2.

elasticidad de la roca, se pueden establecer patrones de comportamiento de la represa que hacen confiables el análisis y la ubicación de la instrumentación.

Tabla 3: Modos principales de cada dirección para el Modelo 1

MODO	UX	UX (acum.)	MODO	UY	UY (acum.)	MODO	UZ	UZ (acum.)
1	0.820000	0.820000	4	0.650000	0.650000	5	0.710000	0.710000
5	0.069410	0.889410	3	0.280000	0.930000	6	0.076140	0.786140
10	0.034890	0.924300	2	0.028010	0.958010	11	0.059450	0.845590
6	0.024570	0.948870	7	0.009042	0.967052	7	0.050750	0.896340
12	0.006454	0.955324	8	0.005975	0.973027	1	0.016940	0.913280
3	0.003624	0.958948	9	0.001775	0.974802	9	0.011510	0.924790
11	0.003009	0.961957	11	0.001387	0.976189	10	0.004243	0.929033
4	0.002897	0.964854	6	0.001227	0.977416	4	0.000282	0.929315
9	0.002041	0.966895	10	0.001109	0.978525	3	0.000208	0.929522
7	0.000498	0.967393	12	0.001028	0.979553	8	0.000141	0.929663
8	0.000408	0.967801	5	0.000075	0.979628	12	0.000012	0.929675
2	0.000024	0.967824	1	0.000038	0.979666	2	0.000000	0.929675

DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS DE LA DIRECCIÓN TRANSVERSAL DE LA REPRESA (X)

En la Figura 11 (a) se muestra la localización y en la Figura 11 (b) la magnitud de los desplazamientos máximos de la dirección X de cada modelo de la Tabla 1, ante el evento máximo creíble de la zona. Puede verse que en general, pese al extenso rango de relaciones de módulos de elasticidad (E_c/E_r) usados para los modelos, los puntos de máximos desplazamientos de la represa en la dirección X se encuentran en la cercanía de la cresta en el lado norte de La Toma y Estación de Bombeo.

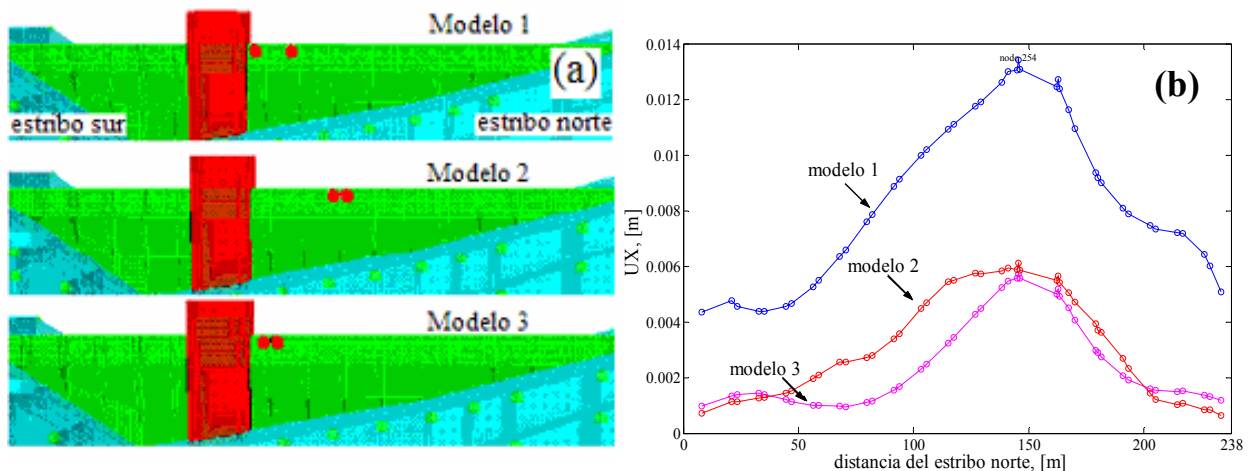


Figura 11: Desplazamientos máximos en la dirección X ante el evento máximo creíble: (a) Vista hacia aguas abajo; (b) Envoltorio de desplazamientos a nivel de la cresta.

EFFECTO DE BALANCEO

La Figura 12 presenta la variación del efecto de balanceo (conocido como “rocking” en inglés) en todos los modelos, a lo largo de la represa (dirección Y de la Figura 7) y a nivel de la galería superior. Aunque en el modelo 1 el efecto tiende a disminuir en secciones más distantes de los estribos, los otros modelos muestran que los valores máximos están en las secciones ubicadas entre 130 y 145m del estribo. Es de notar que el balanceo de la represa La Plata se hizo suponiendo movimiento de cuerpo rígido, por lo que los valores de balanceo calculados a nivel de la cresta pueden no

ser exactos y están contaminados por las deformaciones ocasionadas por la flexión y el cortante distribuida en la altura de la represa.

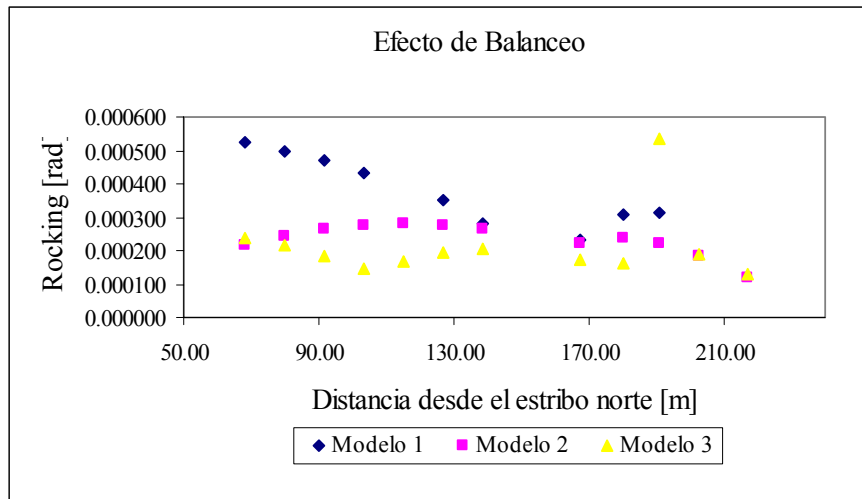


Figura 12: Variación del efecto de balanceo a lo largo de la represa.

ACELERACIONES EN LA GALERÍA INFERIOR REPRESENTATIVAS DE LA ROCA

Las aceleraciones máximas en la represa La Plata fueron observadas en siete puntos ubicados sobre la galería inferior tal como muestra la Figura 13 (a). La variación de las aceleraciones en dichos puntos ante el registro de aceleraciones usado en el análisis, puede verse en la Figura 13 (b) para el caso del modelo 1 de la Tabla 1. Puede notarse que en general las aceleraciones a lo largo de la galería inferior guardan bastante semejanza.

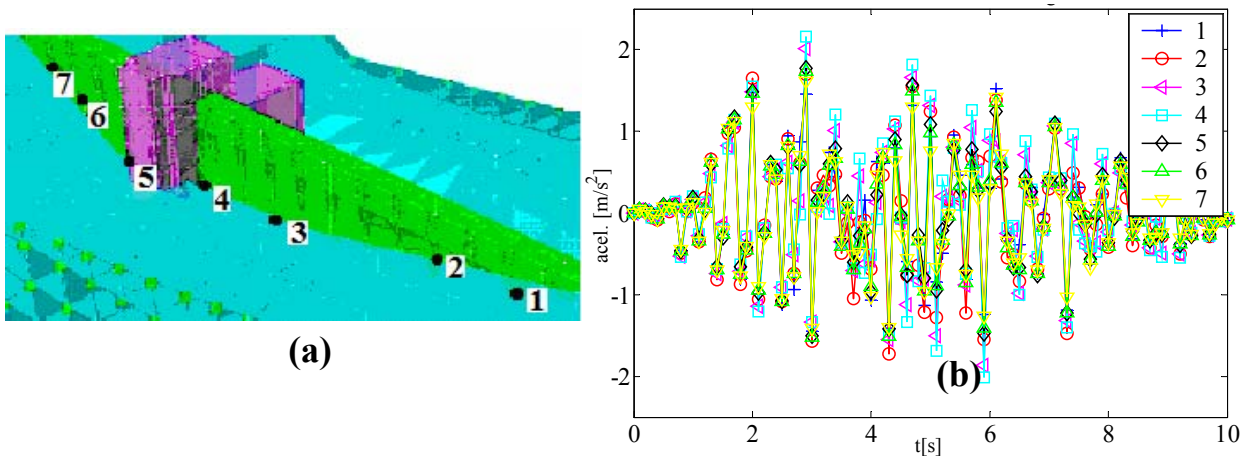


Figura 13: Aceleraciones máximas en la galería inferior del Modelo 1: (a) Puntos sobre la galería inferior; (b) Aceleraciones absolutas durante el evento máximo creíble.

La Tabla 4 muestra los valores de aceleraciones máximas en la galería inferior para cada uno de los modelos de la

Tabla 1. Bajo la premisa de que la roca de fundación con densidad nula no produce efectos de amplificación de onda, el valor máximo de aceleración representativo de la roca se obtiene en aquel punto donde su registro es menos susceptible de ser afectado por el concreto de la represa. Basado en lo anterior, en la Tabla 4 se muestran el promedio y la desviación estándar de las aceleraciones máximas para los modelos 1 y 2 solamente, las cuales son comparables por tener las mismas propiedades para el concreto. La sección ubicada en el punto 5 ofrece más uniformidad en cuanto a la aceleración máxima por lo que es de esperar que este registro sea el más representativo de la roca de fundación.

Tabla 4: Valores de aceleración máxima en los puntos de la galería inferior.

punto	Aceleraciones Máximas [m/s^2]			Modelos 1 y 2	
	modelo 1	modelo 2	modelo 3	Promedio	Desviación estándar
1	1.83	2.19	2.44	2.01	0.033
2	1.89	2.33	2.54	2.11	0.049
3	2.16	1.93	2.77	2.05	0.012
4	2.28	1.93	2.79	2.10	0.031
5	1.81	1.91	2.22	1.86	0.003
6	1.83	2.07	2.10	1.95	0.014
7	1.78	2.05	2.19	1.92	0.018

MODOS PRINCIPALES DE LA DIRECCIÓN X

La Figura 14 resume los tres primeros modos de vibración de la dirección X de la galería superior, obtenida con los modelos de la Tabla 1. Debido a la gran rigidez de la represa, no se espera poder registrar más del tercer modo de vibración de la dirección X bajo vibraciones libres. En la Figura 14 se ha dibujado una forma aproximada de cada modo, tratando de ajustarse a los modos de vibración de los tres modelos. La verificación de que cada modo sea excitable ante el máximo evento creíble para la zona, fue hecha observando la vibración libre amortiguada de los puntos que determinan las formas modales, y determinando si en su transformada de Fourier aparece un pico correspondiente a la frecuencia del modo (Suárez, 2003 ; Chopra, 1995).

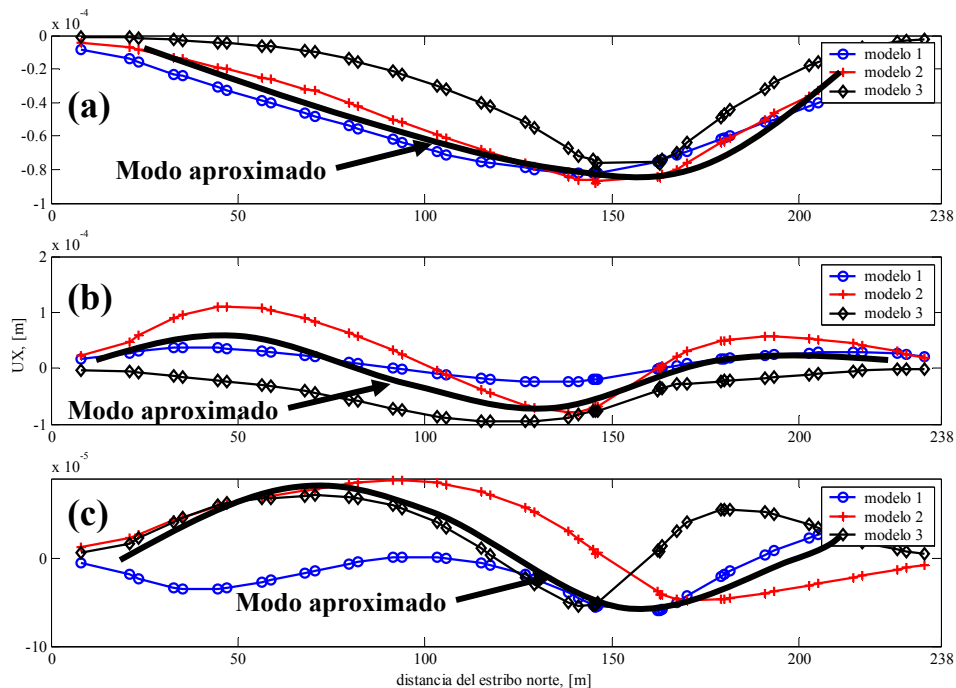


Figura 14: Principales modos de vibración de la galería superior en la dirección X: (a) Modo 1; (b) Modo 2; (c) Modo 3.

ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE TENSIÓN

El análisis de esfuerzos en la represa La Plata fue hecho determinando los máximos esfuerzos de tensión que presentan ante el máximo evento creíble para la zona. La observación de estos esfuerzos se hizo usando un modelo 2D de la máxima profundidad de la represa ubicada a 180m del estribo norte en dirección longitudinal de la represa según la Figura 7. Dicho modelo, así como sus condiciones de borde y las dimensiones de la malla del suelo, se muestra en la Figura 15. La metodología usada para crear este modelo es análoga a la usada en el modelo tridimensional ya descrito.

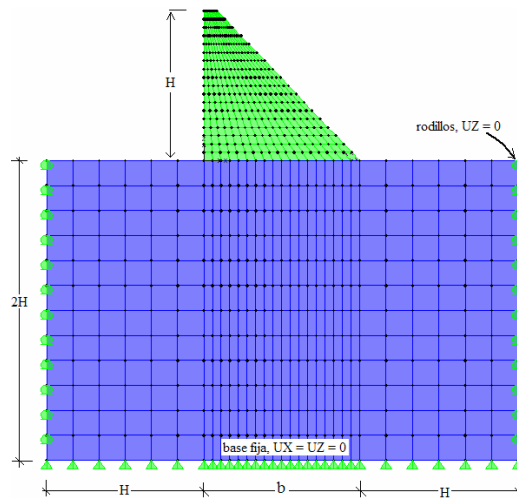


Figura 15: Modelo 2-D para análisis de esfuerzos de tensión.

Se realizó un análisis de los esfuerzos máximos de tensión en tres modelos 2-D generados con las mismas propiedades de los modelos tridimensionales de la Tabla 1, y que para efectos prácticos, en esta sección de análisis de esfuerzos de tensión son también llamados modelos 1, 2 y 3. El esfuerzo de tensión admisible fue obtenido mediante la expresión $f_t = 1.5(0.324f_c'^{2/3})$, usando $f_c' = 21 \text{ MPa}$ (3,000 *psi*). Es decir, $f_t = 3.7 \text{ MPa}$. La Figura 16 muestra el contorno de esfuerzos máximos de tensión del modelo 1 producido por el evento máximo creíble para la zona, con el menor valor de amortiguamiento usado. Puede notarse que la concentración de esfuerzos de tensión se halla en la máxima profundidad de la represa arriba y a una profundidad menor en la superficie inclinada aguas abajo. Resultados similares se obtuvieron para los otros modelos con cada valor de amortiguamiento. Además se obtuvo que para ninguno de los modelos se superaron los esfuerzos de tensión admisibles y que los valores de esfuerzos de tensión son en general menores para el mayor amortiguamiento usado, esto último como era de esperar. La Tabla 5 muestra la relación demanda-capacidad de los esfuerzos de tensión aguas arriba y aguas abajo de la sección para cada modelo. Se puede ver que dichas relaciones son menores para el mayor valor de amortiguamiento usado (ξ_2) (Fenves y Chopra, 1986) y que en general disminuyen a medida que se aumenta el módulo de rigidez de la roca. En el análisis de la represa La Plata se consideraron relaciones de módulos de elasticidad entre el concreto y la roca (E_c / E_r) desde muy altas (roca muy flexible) hasta $E_c / E_r = 1$, por lo que podría esperarse que si la roca posee un módulo de elasticidad superior a los valores usados, los esfuerzos admisibles de tensión del concreto no sean superados.

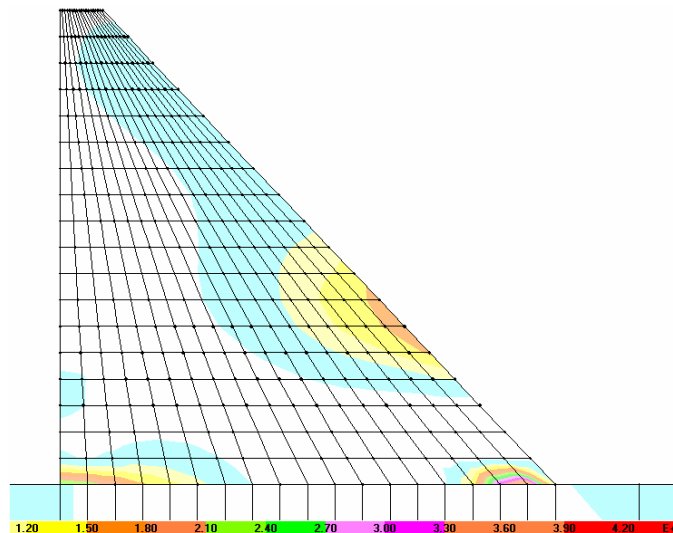


Figura 16: Esfuerzos máximos de tensión [kPa] en el Modelo 1 con el primer valor de amortiguamiento.

Tabla 5: Relación demanda-capacidad de esfuerzos de tensión para cada modelo.

Modelo	E_c / E_r	$f_t / f_{admisible}$	
		Amort. 1	Amort. 2
1	12.3	41.39%	8.95%
2	3.7	32.31%	7.56%
3	1	18.90%	12.14%

INSTRUMENTACIÓN DE MOVIMIENTO FUERTE

La instrumentación de la represa La Plata fue hecha con base en el análisis presentado anteriormente atendiendo los siguientes criterios de interés para determinar los puntos de su localización: 1) Obtener un registro de aceleraciones sobre la roca de fundación a campo libre; 2) Obtener el registro de aceleración representativo de la roca en la base de la represa; 3) Registrar los tres primeros modos de vibración de la dirección X; 4) Medir la posible aparición de balanceo; 5) Obtener un registro de aceleraciones en las direcciones longitudinal y vertical de la represa. En la instalación de la instrumentación de movimiento fuerte fue utilizado un carro con brazo mecánico (*snooper*) para acceder a los lugares de más difícil acceso de la represa, como se obtuvo en la Figura 17.



Figura 17: Instalación de los acelerómetros usando el carro con brazo mecánico.

PUNTOS TEÓRICOS PARA LA INSTRUMENTACIÓN

La Figura 18 ilustra los puntos recomendados para colocar la Instrumentación de Movimiento Fuerte según los criterios presentados en la sección anterior. El sensor triaxial en la base (canales 1, 2 y 3) está diseñado para registrar las aceleraciones máximas representativas de la roca de fundación de la represa. Los sensores 8, 10, 4, 11 y 12 están localizados para captar los modos de vibración de la represa. El sensor 8 se utiliza también para tener suficiente información de lo que sucede en el estribo sur, en la zona de interacción entre la roca y la represa, al igual que el sensor 9. Los sensores 6 y 7 están ubicados para registrar el efecto de balanceo de la represa, el cual será representativo de la base de la represa en la medida de que la suposición de cuerpo rígido sea aceptable. El sensor 5 ofrece suficiente información de los registros en la dirección longitudinal de la represa, y los sensores 13, 14 y 15 toman los registros a campo libre.

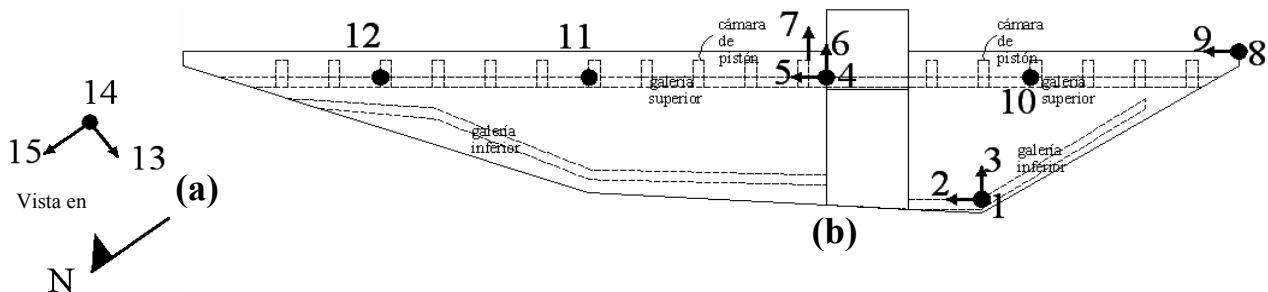


Figura 18: Instrumentación teórica: (a) Instrumento a campo libre, a 50m del estribo norte; (b) Cuerpo de la represa, vista elevación hacia aguas arriba.

UBICACIÓN PRÁCTICA DE LA INSTRUMENTACIÓN

La ubicación teórica de los sensores expuesta anteriormente debió ser replanteada para garantizar la seguridad física de la instrumentación, así como su funcionalidad durante un evento sísmico. Debido a las frecuentes filtraciones en la báscula de salida y para facilitar la instalación de la instrumentación, los sensores 4, 5, 6, 7, 10, 11 y 12 de la Figura 18 fueron desplazados a nivel de la cresta conservando su posición general en las otras direcciones (X y Y de la Figura 7). La Figura 19 ilustra la localización definitiva de la Instrumentación de Movimiento Fuerte en la represa La Plata.

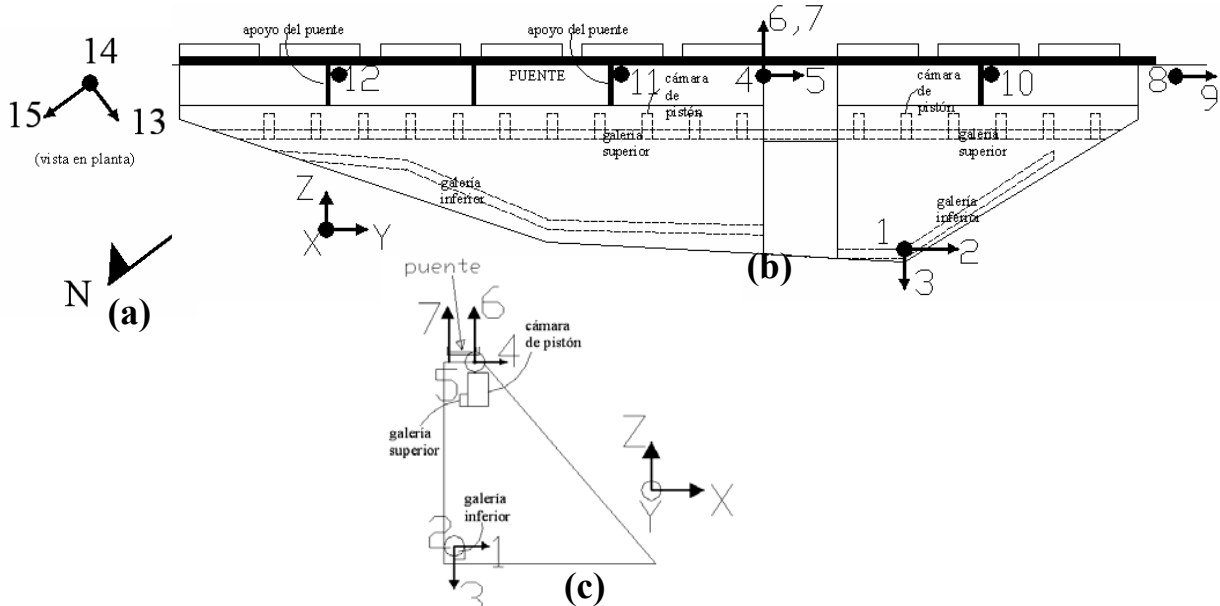


Figura 19: Ubicación definitiva de la instrumentación de movimiento fuerte de la represa La Plata: (a) Instrumento a campo libre, a 50m del estribo norte; (b) Cuerpo de la represa, vista elevación hacia aguas arriba; (c) Elevación sección de máxima profundidad.

La Figura 20 describe la interconexión de todo el sistema de acelerómetros usados en la represa La Plata. Los sensores uniaxiales son conectados primero a una caja de unión (*junction box*) de donde la información de los tres sensores es llevada por un solo cable a la grabadora K2 de *Kinometrics*. Los sensores 1 al 12 de la Figura 19 que se encuentran sobre el cuerpo de la represa se conectan al K2 en grupos de tres sensores, tal como muestra la Figura 20 (b). El K2 es un instrumento que alimenta de electricidad al sistema y graba en memoria los registros de los sensores. El sensor triaxial a campo libre (sensores 13, 14 y 15 de la Figura 19) graba directamente sus registros y se conecta con el resto del sistema a través de su antena de “Global positioning system” (GPS). La memoria pre-evento y post-evento fue configurada a 20 segundos para registrar adecuadamente el arribo de la onda *P* y tener suficiente información de la respuesta de la represa una vez finaliza el sismo. Los niveles de disparo se configuraron a un 1% de la gravedad (0.01g) para la dirección horizontal y un 0.5% de la gravedad (0.005g) para la dirección vertical.

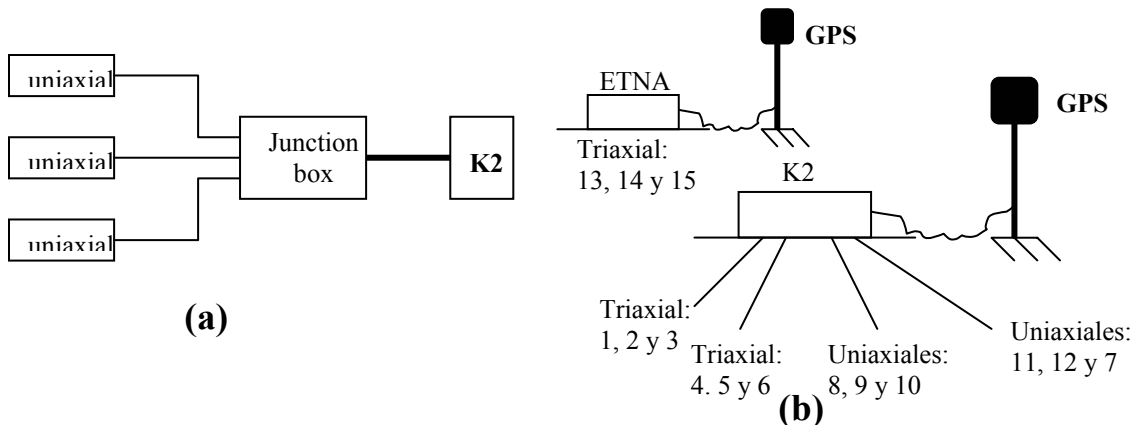


Figura 20: Esquema de interconexión de la instrumentación en la represa La Plata: (a) Conexión de los sensores uniaxiales; (b) Conexión de todo el sistema.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

El trabajo anterior fue realizado con el propósito de implementar un método analítico para determinar la ubicación de la instrumentación de movimiento fuerte de la represa La Plata. En él se tuvo en cuenta las condiciones sísmicas de la zona mediante la consideración de un registro de aceleraciones artificial generado especialmente para la zona de ubicación de la represa. El modelo de elementos finitos creado en SAP2000 tenía en cuenta la geometría de la represa, la interacción suelo-estructura y el efecto hidrodinámico del lago. Las propiedades dinámicas del material fueron obtenidas de observaciones experimentales realizadas con pruebas sencillas, así como de valores típicos esperados para la roca de fundación. Como producto de esto se elaboraron tres modelos distintos con relaciones de módulos del concreto a la roca de 1, 3.7 y 12.4. La comparación de resultados permitió sugerir de manera aceptable la ubicación de la instrumentación, seguido a lo cual se desarrolló todo el proceso de instrumentación en el sitio.

El análisis de la respuesta de la represa La Plata en cuanto a desplazamientos y aceleraciones máximas ante el evento máximo creíble para la zona, se hizo por comparación de los tres distintos modelos obtenidos. Aunque los valores para cada caso no fueron los mismos, se pudo determinar que en general los puntos de máximos efectos permanecían medianamente invariables. Esto permitió ubicar los puntos para la captura de los modos de vibración, los puntos para la medición del balanceo de la estructura, y el punto de aceleraciones máximas representativas de la roca en la base de la represa. El efecto de amplificación de onda por el suelo fue suprimido debido a que se consideró masa nula para la roca, pese a la mejor aproximación que daba al fenómeno de amplificación haber considerado la topografía del lugar en el modelo. El efecto de balanceo de la represa fue medido a nivel de la galería superior suponiendo un movimiento de cuerpo rígido de la represa. Aunque los resultados del análisis de esfuerzo en este trabajo no muestran la aparición de esfuerzos de tensión en el concreto de la represa superiores a los admisibles, estos resultados son presentados a la luz del interés puramente científico y no pretenden evaluar la estabilidad sísmica de la misma.

REFERENCIAS

- Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of structures, theory and applications to earthquake engineering*, 2nd edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Computers and Structures (2000). Inc., *SAP 2000 Analysis Reference Manual*, C&S, Berkeley, California.
- Fenves, G. y Chopra A. K., (1986), "Simplified analysis for earthquake resistant design of concrete dams", *UCB/EERC-85/10*, University of California, Berkeley, California.
- Irizarry, J. (1999). *Design earthquakes and design spectra for Puerto Rico's main cities based on worldwide strong motion records*, Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.
- Newmark, N. M. y Rosenblueth, E. (1971), *Fundamentals of earthquake engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Prato, C. A. (2003). *Notas del Curso INCI 6018, Análisis con Elementos Finitos*, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.
- Suárez, L. E. (2003), *Notas del Curso INCI 6069, DINÁMICA DE SUELOS*, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.
- Us Army Corps of Engineers (2003), *Time history analysis of concrete hydraulic structures*, Technical Report EM 1110-2-6051. Washington, D.C.
- USCOLD, United States Committee on Large Dams, (1992). *Observed performance of dams during earthquakes*, C/O Chas, T Main, Boston, Massachusetts.

