

Localización Optimizada De Instrumentación Sísmica En Una Represa

Fabián A. Consuegra Gómez, M.Sc.

Asist. Investigación, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico, fabian.consuegra@gmail.com

José A. Martínez Cruzado, PhD

Profesor, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico, jmartinez@uprm.edu

Resumen

El presente trabajo propone una manera racional de localizar la instrumentación sísmica de Movimiento Fuerte en la represa La Plata en Toa Alta, Puerto Rico. Los puntos seleccionados para tal fin corresponden a aquellos en que se esperan los máximos efectos ante el evento sísmico máximo creíble para la zona, los cuales fueron determinados con la ayuda de un modelo computacional tridimensional de elementos finitos. En el modelo se consideró la represa, el suelo y el agua. Del análisis de las dimensiones laterales de la malla de suelo requerida, se concluyó que asignar densidad nula al suelo permite establecer convergencia en los resultados, pese a suprimir el efecto de propagación de onda del mismo. Los criterios para seleccionar los puntos a instrumentar fueron: desplazamientos máximos en la represa, aceleraciones máximas en su base (representativas del suelo de fundación), la captura de sus tres primeros modos de vibración y la medición de su efecto de balanceo ("rocking"). El estudio fue desarrollado mediante un análisis dinámico, que permitió conocer la respuesta de la estructura compuesta usando diferentes valores de amortiguamiento. Finalmente, se ilustra el trabajo de campo requerido para la instalación, configuración e interconexión de la red de sensores.

Palabras Claves

Análisis modal numérico, instrumentación sísmica, modelación con elementos finitos, represas en hormigón de gravedad.

1. Introducción

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, en el caso particular de una represa, debe considerarse el beneficio de su pequeño costo comparado con la inversión total de la primera. El "*United States Committee on Large Dams*" (Comité Estadounidense para Represas Grandes) recomienda que toda represa ubicada en zona sísmica 3 y 4 (de acuerdo a la clasificación del Código de Edificación Uniforme, UBC 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 para las agencias gubernamentales de Puerto Rico.

La Plata es una represa de gravedad de concreto que atraviesa el Río La Plata en la Población de Toa Alta. Tiene una longitud total de 236 m y una altura máxima de 40 m sobre el lecho del río. El desagüe de la represa es provisto por seis básculas de salida. La cresta de salida tiene una longitud libre total de 210 m y una elevación de 47.12 m sobre el nivel del mar. Las estaciones de la toma y de bombeo se encuentran sobre una estructura que forman parte integral de la represa, y está localizada cerca del centro de la corriente. Las poblaciones de Toa Alta, Toa Baja y Dorado se localizan aguas abajo de la represa. Toa Baja y la porción este de Dorado están localizados en el área de inundación del Río La Plata. Fallas en la represa podrían causar serias pérdidas materiales y humanas en esos pueblos (J. L. Garland y J. W. E. Adams, 1979).

La Instrumentación sísmica de Movimiento Fuerte requiere determinar la cantidad y ubicación de los instrumentos, lo cual ha sido hecho tradicionalmente con base en la experiencia y el criterio ingenieril. En una mejor aproximación al problema este trabajo recomienda la localización de la Instrumentación sísmica 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 la red de sensores también es ilustrado.

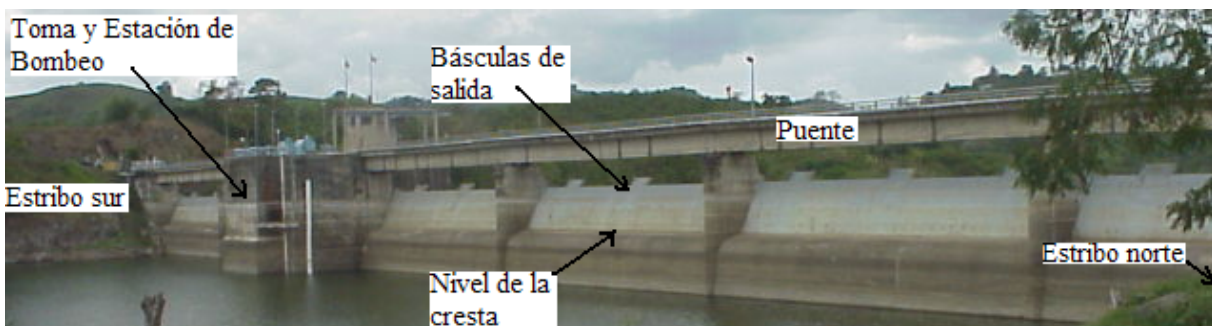


Figura 1: Descripción De La Represa La Plata. Vista hacia aguas abajo

2. Modelo De Elementos Finitos

El modelo computacional en tres dimensiones (3D) de la Represa La Plata se desarrolló en el programa de elementos finitos *SAP 2000* Versión 8. De los tres componentes del sistema: *estructura (represa)*, *suelo y agua*, los dos primeros se han definido mediante la creación de una malla de elementos finitos haciendo uso del elemento isoparamétrico sólido de ocho nodos SAP (Computers & Structures, 2000). El agua fue incorporada por consideración de sus presiones estáticas y dinámicas sobre la pared vertical de la represa.

2.1 La Estructura

El modelo geométrico de la represa fue generado concibiendo las características más importantes en cuanto a la forma. Se hicieron aproximaciones geométricas de las formas globales, de manera que se pudiera reducir el esfuerzo en la construcción del modelo sin afectar significativamente la precisión de los resultados. Los perfiles variantes de la estructura fueron reemplazados por líneas rectas conservando las formas globales de la estructura. La variación de la topografía del lugar también fue considerada. Una comparación entre el sistema real y el modelo aproximado para la estructura puede verse en la Figura 2.

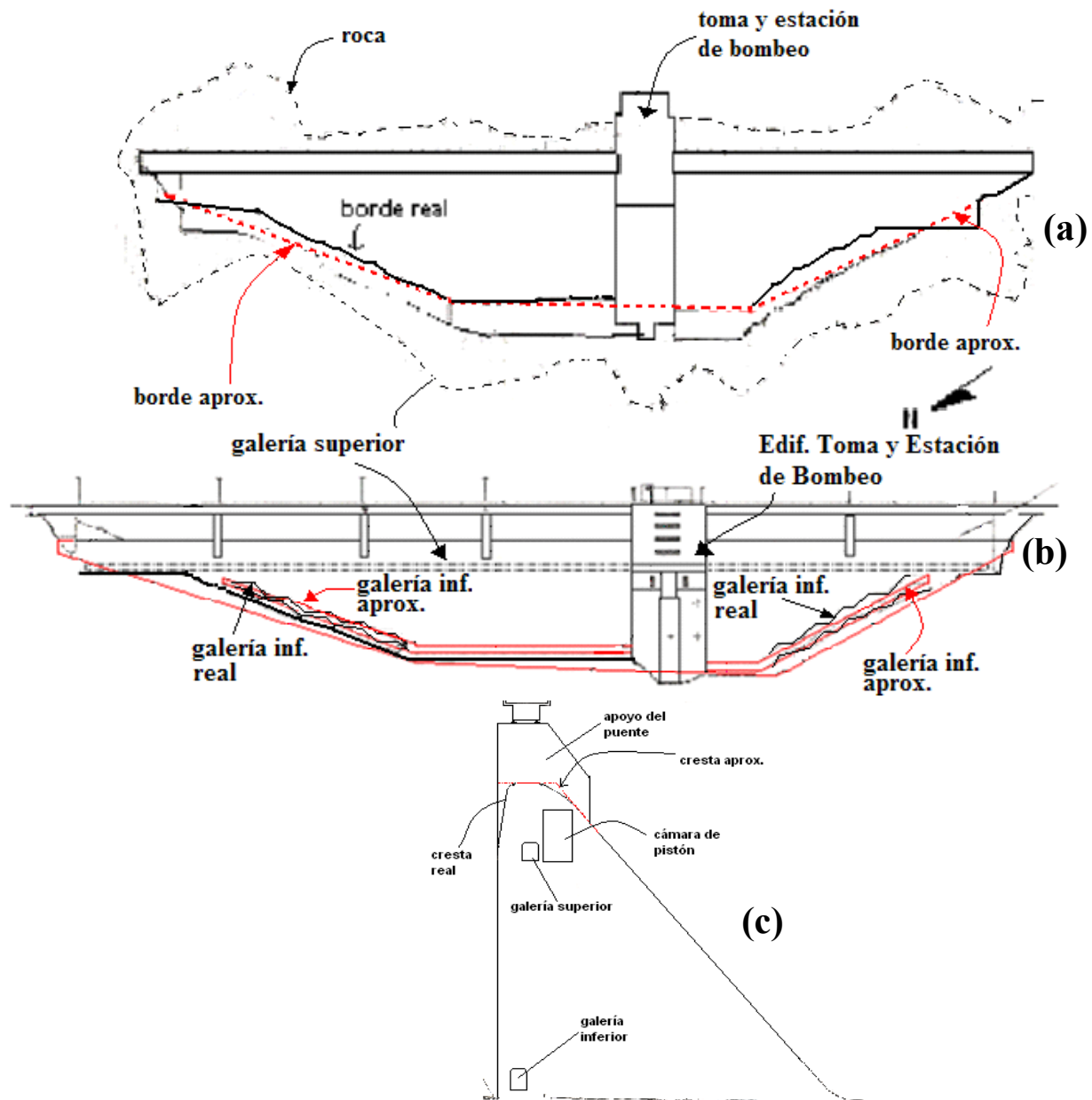


Figura 2: Aproximación Geométrica de La Estructura (Represa): (a) vista en planta; (b) vista en elevación aguas arriba; (c) sección transversal

2.2 El Suelo

La inclusión del suelo dentro del modelo de Elementos Finitos de SAP 2000 se hizo considerando la existencia de 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 la creación de una malla de elementos finitos de sólidos y el *campo lejano* fue representado con las condiciones de borde de desplazamiento (ver Figura 7(b)) supuestas en el borde común con el *campo cercano*.

Las dimensiones del campo cercano aguas arriba, aguas abajo y en profundidad fueron asignadas con base en la relación de módulos de elasticidad entre el concreto (E_c) y la roca (E_r), según recomendaciones del USCE (Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos) formuladas para modelos bidimensionales (2003), esto es: para una fundación competente ($E_c/E_r < 1$), es adecuada una malla de suelo igual a la altura de la represa, y para fundaciones más flexibles (E_c/E_r entre 2 y 4), el doble de la altura en todas las direcciones es aceptable. Lo anterior sugería tres mallas de suelo distintas ya que en el análisis se consideraron tres distintas relaciones de módulos E_c/E_r , por lo cual se propuso unificar las dimensiones de la malla del suelo dentro del modelo. Esta unificación se hizo comparando las formas modales de la represa para cada una de las tres mallas requeridas según la recomendación anterior. La Figura 3 muestra una comparación de la primera forma modal de la dirección X (ver Figura 7) de la cresta de la represa, usando la malla intermedia y la mayor de las mallas, según las tres relaciones E_c/E_r . En general puede observarse que las formas modales permanecen intactas y que las amplitudes de los modos de vibración no varían significativamente, lo cual a la luz del análisis modal realizado garantizaba la confiabilidad de los resultados.

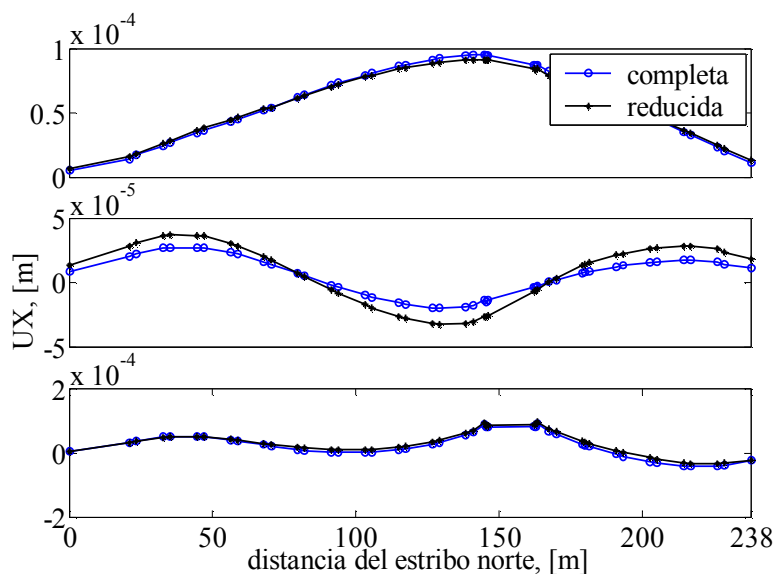


Figura 3: Comparación de las Formas Modales de La Represa Usando La Malla Mayor y La Malla Intermedia Recomendada Por El USCE, para unificar la malla de elementos finitos aguas arriba y aguas abajo.

En adición a lo anterior, las dimensiones de la malla a cada lado de los estribos de la represa fueron definidas garantizando la convergencia en las formas modales de la misma. Para ello se observó la variación de las formas modales de la represa en el modelo, en función del tamaño de la malla del suelo a cada lado del estribo. El USCE (2003) recomienda definir como cero la densidad de la roca de fundación, para permitir que el efecto sísmico se traslade directamente a la superficie de interacción suelo-estructura. Este artificio de convertir los grados de libertad asociados al suelo en estáticos permite alcanzar la convergencia en las formas modales con mallas de suelo menores, pero suprime el efecto de amplificación de onda del suelo. Por dicha razón fue evaluada la convergencia del modelo en función del tamaño de la malla del suelo, considerando el suelo con masa no nula y con masa nula. La Figura 4 muestra la comparación de la primera forma modal de la dirección X según la Figura 7, a nivel de la cresta de la represa para distintas dimensiones de la malla de suelo a cada lado y considerando las dos condiciones de masa del suelo mencionadas. Puede notarse que para una malla de suelo de 240 m a cada lado de los estribos el modelo de masa no nula no permite establecer convergencia, mientras que el modelo de masa nula converge para una malla de 60 m.

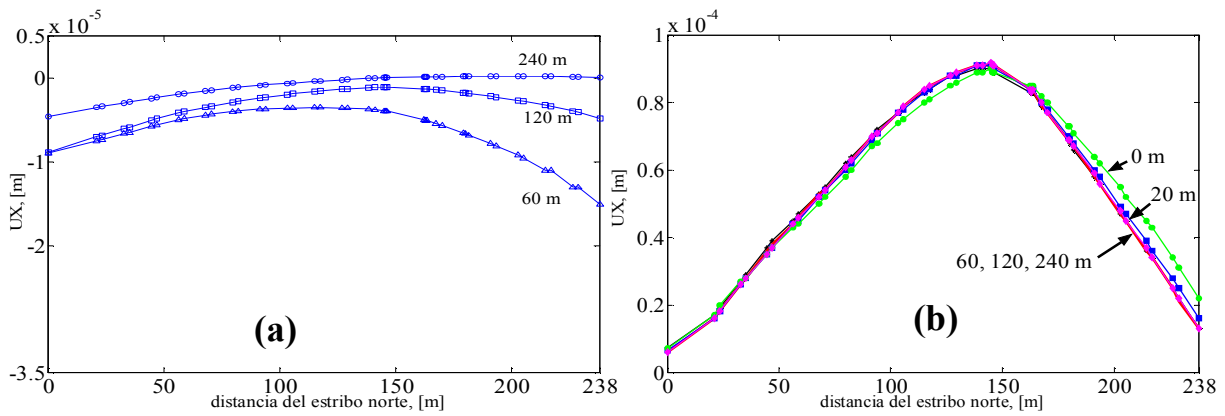


Figura 4: Convergencia de La Forma Modal de La Represa Para Diferentes Mallas de Suelo a Cada Lado del Estribo: (a) suelo con masa; (b) suelo sin masa.

2.3 El Agua

2.3.1 Presiones hidrostáticas

El efecto hidrostático del agua fue incluido en el modelo, mediante la aplicación de una línea de presiones sobre la pared vertical de la represa expuesta al agua de almacenamiento como muestra la Figura 5.

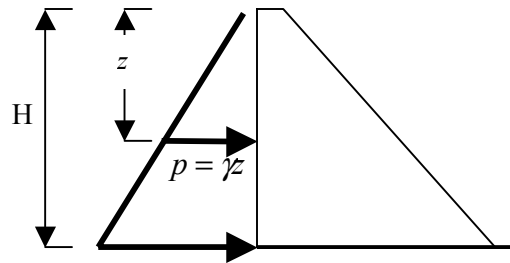


Figura 5: Presiones Hidrostáticas Sobre La Represa

2.3.2 Presiones hidrodinámicas

Las presiones hidrodinámicas en el modelo de la represa La Plata fueron consideradas por medio del concepto de masa agregada. La Figura 6 muestra el modelo plano usado para considerar el agua. Suponiendo que el agua es incompresible e irrotacional, para pequeñas amplitudes del movimiento del agua, las presiones están regidas por la ecuación:

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

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 (u_x), (la aceleración vertical, u_z , en el fondo del lago no fue considerada). La ecuación (1) fue resuelta mediante una solución de elementos finitos haciendo uso del elemento triangular de tres nodos con tensión (esfuerzo) constante. (Prato, 2003). Esta solución tiene la siguiente forma:

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

en 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 6 (b). Para un elemento triangular como el de la Figura 6 (b) se tiene:

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

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

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

$$b_i = \rho [u_1^i l / 3 + u_1^j l / 6] \quad (5)$$

donde A es el área del triángulo ($\Delta_1 \Delta_2 / 2$) y a_1^i corresponde a la proyección del lado opuesto al nodo i en la dirección 1 ($a_1^i = \Delta_1$), ρ es la densidad del agua, u_n^i es la aceleración normal en el borde sobre el nodo i (dirección 1), u_n^j es la aceleración normal en el borde sobre el nodo j adyacente al nodo i y $l = \Delta_2$, (ver Figura 6 (b)).

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 ($u_n^i = u_x = 1$) por lo que el resultado de $\{p\}$ según la ecuación (3) es directamente la masa agregada por unidad de superficie. Un ejemplo del contorno de presiones hidrodinámicas (masa agregada) obtenida para la sección de máxima profundidad de la represa puede verse en la Figura 6 (c).

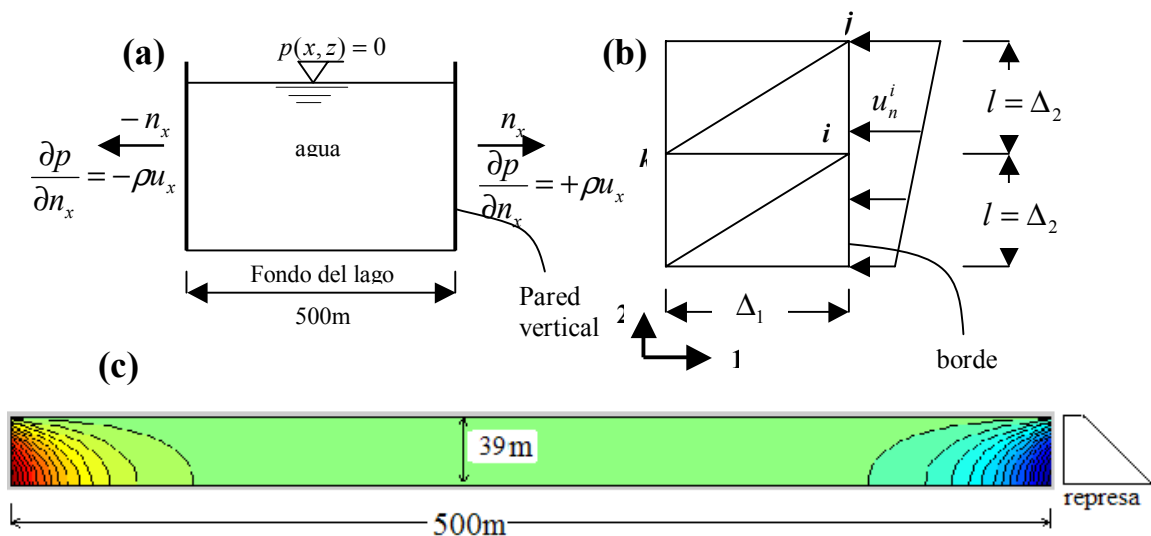


Figura 6: Presiones Hidrodinámicas Sobre La Represa: (a) dominio plano del fluido y condiciones de borde; (b) elementos triangulares en el borde; (c) contorno de presiones hidrodinámicas en una sección plana de fluido.

2.4 Modelo Geométrico Final

La Figura 7 muestra una ilustración del modelo geométrico final de la represa La Plata. 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.

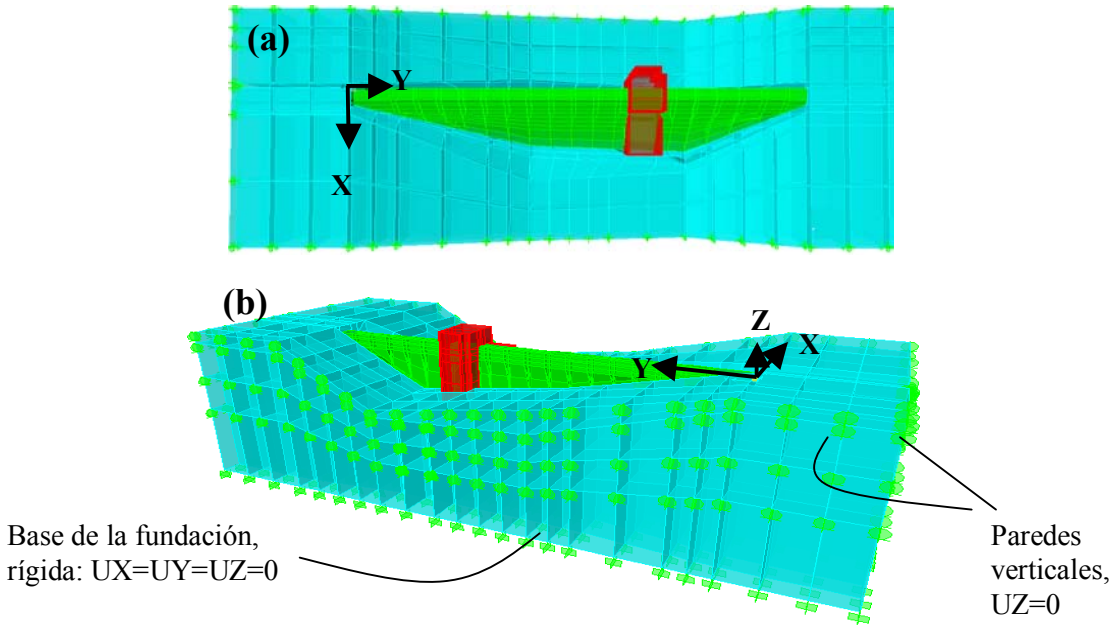


Figura 7: Modelo Geométrico Final: (a) vista en planta; (b) vista tridimensional y condiciones de borde.

3. 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.

4. 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, y fue impuesto al modelo en la dirección X según la Figura 7. En la Tabla 2 se muestran los modos de vibración del Modelo 1 de la Tabla 1 con sus respectivos factores de participación modal en cada una de las direcciones X, Y, y Z de la Figura 7. Dado que cada modo tiene componentes en cada dirección, para determinar los principales modos en una dirección particular los modos deben ser reorganizados en función del factor de participación modal en la dirección de interés. Las columnas sexta y séptima de la Tabla 2 muestran los modos organizados por orden de importancia en la dirección X, observando que los modos 1, 5 y 10 marcados en negrilla son los primeros tres modos de esta dirección. En la Figura 8 puede apreciarse las formas de estos tres modos.

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 |

Tabla 2: Modos De Vibración Del Modelo 1

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

* 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.

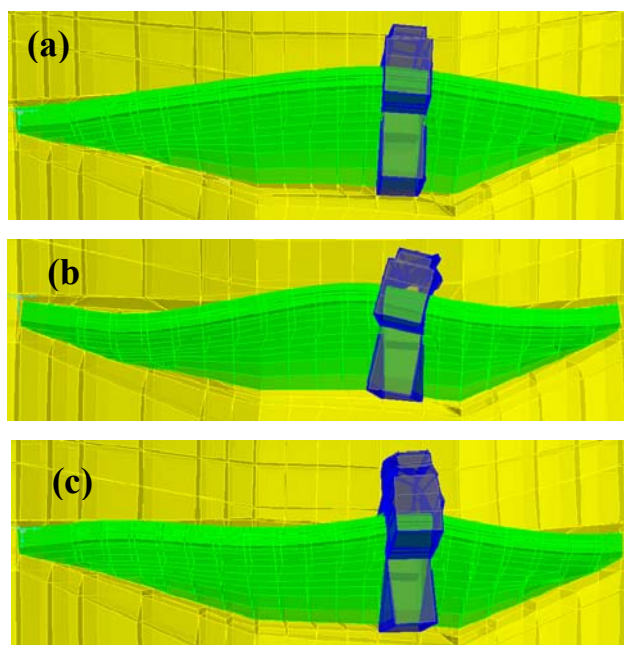


Figura 8: Deformada de los Tres Primeros Modos de la Dirección X, Modelo 1, Vista En Planta. Las deformaciones han sido exageradas para su apreciación: (a) Modo 1; (b) Modo 2; (c) Modo 3.

5. Análisis Para Localizar La Instrumentación Sísmica

El análisis de la represa La Plata para localizar la instrumentación sísmica se hizo comparando los resultados arrojados por los tres modelos presentados en la Tabla 1. Los criterios usados para recomendar la ubicación de los instrumentos fueron desplazamientos máximos, balanceo, aceleraciones máximas en la galería inferior y la captura de los modos de vibración. Aunque en general los valores obtenidos de éstos en cada modelo son distintos, la ubicación de los puntos guarda suficiente semejanza como para poder definir una ubicación aceptable.

5.1 Desplazamientos En La Dirección Transversal (X)

En la Figura 9 se muestra la localización y magnitud de los desplazamientos máximos de la dirección X (ver Figura 7) de cada modelo de la Tabla 1, ante el evento máximo creíble de la zona. En general 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. La envolvente de desplazamientos máximos en la dirección X (Figura 9 (b)) es similar a la primera forma modal de la dirección X (Figura 8 (a)), lo que evidencia que la represa responde principalmente en su modo fundamental ante el evento sísmico.

5.2 Efecto De Balanceo

La Figura 10 presenta la variación del efecto de balanceo 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 están contaminados por las deformaciones ocasionadas por la flexión y el cortante distribuida en la altura de la represa.

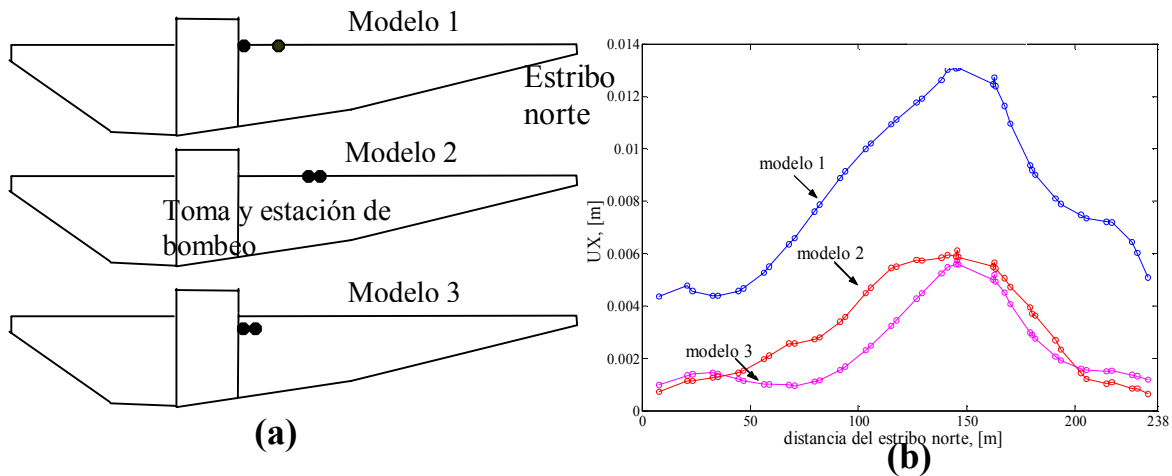


Figura 9: Ubicación y Magnitud de los Desplazamientos Máximos, Dirección X, En La Represa La Plata: (a) vista hacia aguas abajo; (b) envoltorio de desplazamientos a nivel de la cresta.

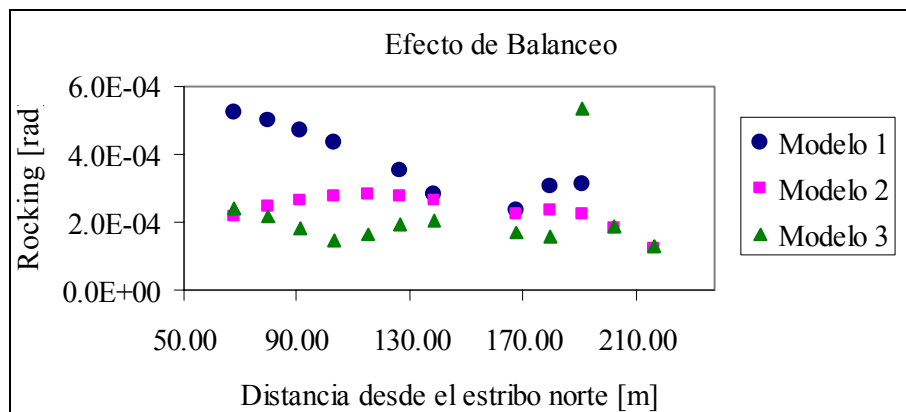


Figura 10: Variación del Balanceo a lo Largo de La Represa en los Tres Modelos

5.3 Aceleraciones Máximas En La Galería Inferior

Dado que la masa del suelo fue definida cero, todo el efecto de amplificación de onda registrado en un punto cualquiera de la galería inferior es debido a la presencia del concreto de la represa. Basado en lo anterior, se observó la variación de las aceleraciones máximas debido al evento sísmico, en siete puntos ubicados en la galería inferior (ver Figura 11). En este análisis sólo fueron considerados los modelos 1 y 2 que tienen las mismas propiedades del concreto, de manera que las aceleraciones obtenidas fueran comparables.

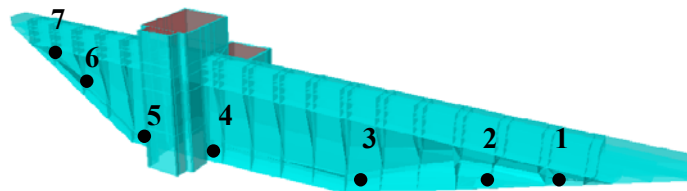


Figura 11: Puntos Sobre la Galería Inferior para Comparar las Aceleraciones Máximas

La Tabla 3 muestra dichos valores de aceleración para cada uno de los siete puntos mencionados, así como los valores promedio de aceleración y desviación estándar. Puede verse que en el punto 5 (la fila sombreada en la tabla), ofrece mayor uniformidad frente a los valores máximos de aceleración por lo que es de esperar que los registros captados ahí, sean menos susceptibles de afectarse por la presencia del concreto de la represa, y en consecuencia sean los más representativos de la roca de fundación.

Tabla 3: Aceleraciones Máximas en la Galería Inferior, Modelos 1 Y 2

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

5.4 Modos De Vibración En La Dirección X

La captura de los modos de vibración de la represa en la dirección X de la Figura 7, consistió en determinar aquellos puntos sobre los cuales el evento sísmico pudiera excitar las frecuencias fundamentales de los modos de interés. Esto es, seleccionar puntos que definieran apropiadamente la forma modal en cuestión, para verificar posteriormente que bajo vibraciones libres se observara la aparición de un pico en la transformada de fourier de su señal, correspondiente a la frecuencia de dicho modo (Suárez, 2003 ; Chopra, 1995). La Figura 12 (a) muestra la respuesta bajo vibraciones libres del nodo 668 (ilustrado en la Figura 12 (b)) en el cual se espera registrar el segundo modo de vibración de la dirección X. Esta respuesta es ilustrada en el dominio del tiempo y de la frecuencia y para los dos valores de amortiguamiento usados. Puede notarse la aparición de un pico en la frecuencia fundamental del segundo modo de vibración (w_{2x} , el mayor de los picos), lo que asegura su captura. Además se nota la aparición de otras dos frecuencias fundamentales (w_{1x} y w_{3x}), particularidad de muchos de los puntos analizados bajo vibraciones libres, que demuestra que no se espera capturar más de los tres primeros modos de vibración de la represa.

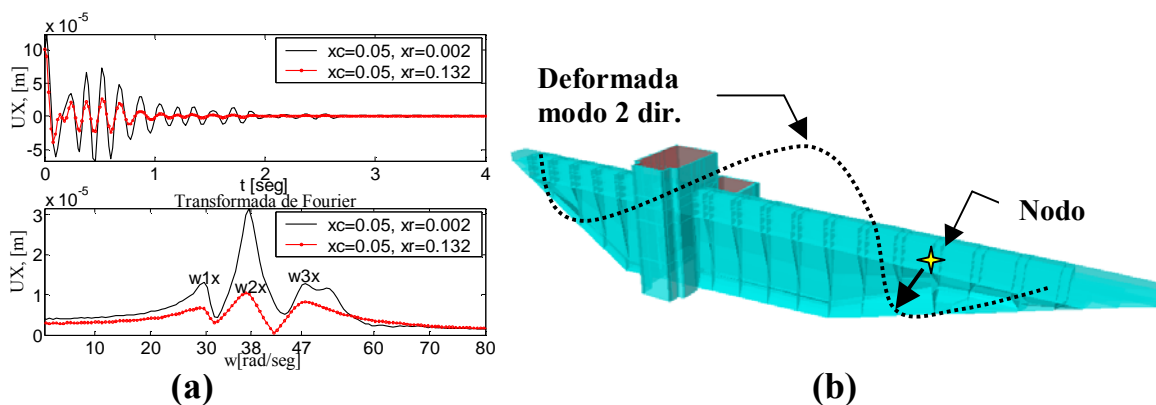


Figura 12: Captura del Segundo Modo de Vibración de La Represa en el Nodo 668, Modelo 2: (a) respuesta bajo vibraciones libres; (b) ubicación del nodo 668 e ilustración de la deformada modal

El anterior procedimiento fue desarrollado para los tres primeros modos de vibración de la dirección X de la Figura 7, en todos los modelos y seleccionando puntos a nivel de la cresta. Los puntos necesarios en cada modelo guardaron suficiente cercanía por lo que su ubicación definitiva fue aproximada.

6. Instrumentación Sísmica De La Represa

El análisis expuesto en la sección anterior permitió recomendar la localización de la instrumentación de movimiento fuerte en la represa La Plata, en función de desplazamientos máximos, balanceo, aceleraciones máximas y captura de los modos de vibración.

6.1 Localización De La Instrumentación

La ubicación final de los instrumentos en el campo fue reajustada para facilitar la instalación de los instrumentos y para garantizar su seguridad, (el riesgo de filtración en las básculas de salida podría causar un mal funcionamiento de los acelerómetros). La Figura 13 y la Figura 14 muestran respectivamente la localización de la instrumentación recomendada del análisis y la localización definitiva. 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 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.

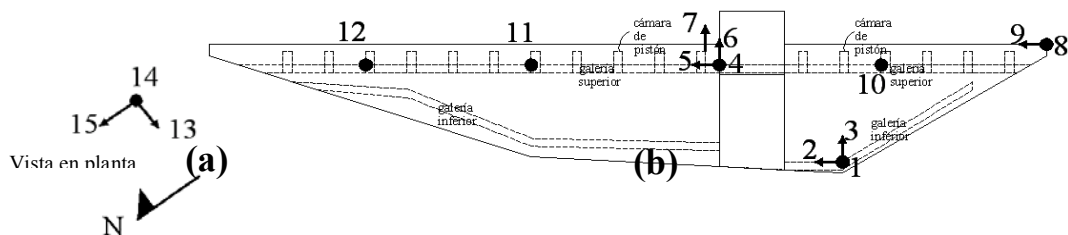


Figura 13: Localización Recomendada para la Instrumentación de Movimiento Fuerte: (a) campo libre; (b) vista hacia aguas arriba

Los sensores 1 al 12 de la Figura 13 y la Figura 14 que se encuentran sobre el cuerpo de la represa se conectan a un instrumento K2 en grupos de tres sensores. El K2 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 las mismas figuras) graba directamente sus registros y se conecta con el resto del sistema a través de su antena de Sistema de Posicionamiento Global (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.

6.2 Trabajo De Campo

Toda la instrumentación de movimiento fuerte en la represa La Plata fue comprada a *Kinematic*. La Figura 15 a, b y c ilustra el tipo de acelerómetros usados: *triaxial*, *uniaxial* y *Etna*, respectivamente. Los primeros dos se usaron en el cuerpo de la represa, mientras que el último fue colocado sobre el terreno (campo libre, sensores 13, al 15 de la Figura 13).

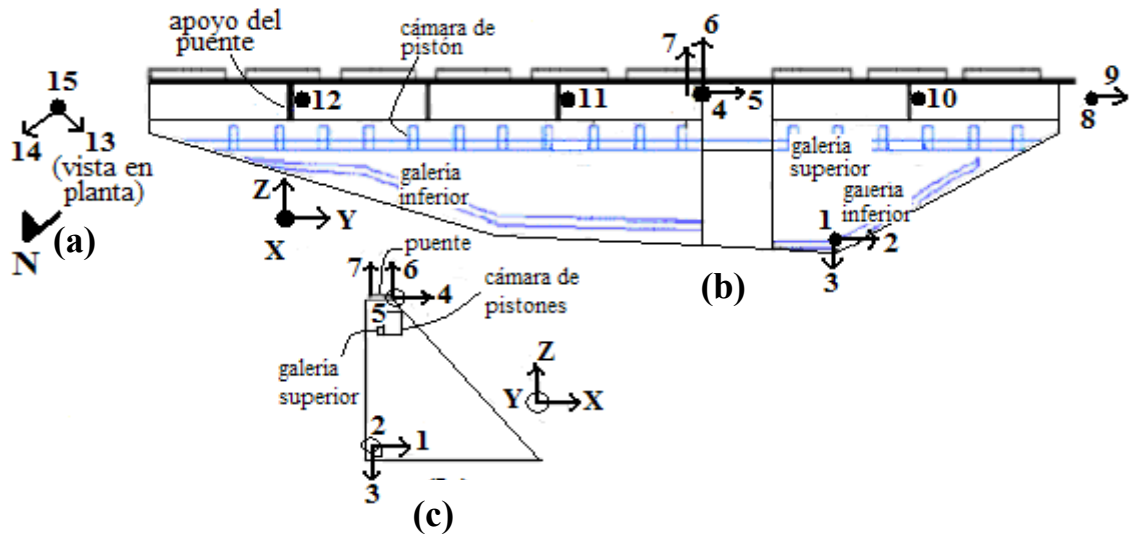


Figura 14: Localización Definitiva de la Instrumentación de Movimiento Fuerte: (a) campo libre; (b) vista hacia aguas arriba; (c) elevación de la sección de máxima profundidad

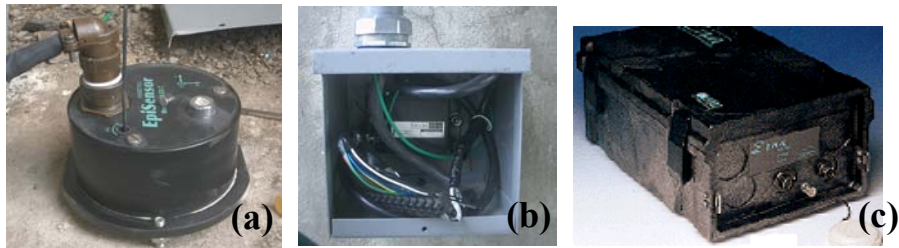


Figura 15: Tipo de Instrumentación Usada, Kinematics Inc.: (a) acelerómetro triaxial; (b) acelerómetro uniaxial; (c) triaxial Etna, campo libre

El cableado necesario para conectar el K2 con cada uno de los acelerómetros en la represa fue protegido por tubería de PVC. La Figura 16 (a) muestra el trazado del cableado desde el K2 hasta el sensor triaxial ubicado en la galería inferior. Dentro del proceso de instalación física de los acelerómetros fue usado un camión con un brazo mecánico, *snooper*, para poder llegar a los lugares de más difícil acceso de la represa (ver Figura 16 (b)).



Figura 16: Proceso de Instalación Física de los Acelerómetros en La Represa La Plata: (a) trazado del cableado del K2 al *triaxial* colocado en la galería inferior; (b) Utilización del *snooper* para instalación de los instrumentos

7. Resumen Y Conclusiones

El objetivo del trabajo anterior fue localizar la instrumentación de movimiento fuerte en la represa La Plata mediante un método analítico. Para ello fue creado un modelo computacional tridimensional de elementos finitos en SAP 2000, para simular la respuesta de la represa ante el evento máximo creíble para la zona. Dentro del modelo fueron considerados los tres componentes principales: la represa, el agua y el suelo y se usaron tres relaciones de módulos de elasticidad entre el concreto y el suelo de 12.4, 3.7 y 1. La necesidad de estas tres relaciones de módulos se debió a la dispersión en los resultados de las pruebas experimentales, para medir las propiedades del suelo en el sitio. El análisis hecho con este modelo permitió identificar los puntos con mayores efectos en cuanto al interés de la instrumentación, que fueron: desplazamientos máximos, aceleraciones máximas (representativas de la roca), balanceo y la captura de los primeros tres modos de vibración de la represa.

En general los puntos sugeridos para la instrumentación según las tres relaciones de módulos de elasticidad entre el concreto y la roca, guardaron suficiente similitud como para recomendar de manera aceptable la localización de los acelerómetros. Un ajuste a dicha localización debió ser hecho en el campo, para garantizar su seguridad y su correcto funcionamiento. La densidad del suelo de fundación fue definida cero para garantizar convergencia en las formas modales de la represa, por lo cual la topografía en la vecindad de la represa considerada dentro del modelo no aportó mayor precisión a la solución. Los acelerómetros designados para medir el balanceo de la represa fueron instalados al nivel de la cresta y no sobre su base, por no disponer de una zona segura para hacerlo sobre su esta última.

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), *SAP 2000 Analysis Reference Manual*, C&S, 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 de Ingeniería Civil, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.
- 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, USCE, (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, Massachussets.

Biografía

El Dr. José A. MARTÍNEZ CRUZADO es Catedrático del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, y es el Director del Programa de Movimiento Fuerte de Puerto Rico (PRSMF).

El Ingeniero Fabián A. CONSUEGRA GÓMEZ es Maestro en Ciencias del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez y es Asistente de Investigación del Programa de Movimiento Fuerte de Puerto Rico (PRSMF).

Autorización

Los autores del presente trabajo autorizan a LACCEI a publicarlo en el resumen de la conferencia en CD o en la página Web. Ni LACCEI ni los editores serán responsables por el contenido o las implicaciones de lo que es expresado en este artículo.