

24 de mayo de 2007

Ing. Yamil Gautier  
**CSA Group**  
*Via correo electrónico*

Re: Revisión del comportamiento sísmico  
Represa Quebrada Beatriz, Caguas

Estimado ingeniero Gautier:

Queremos adelantar los resultados al momento de nuestro análisis del potencial sísmico en la zona de la represa que se propone hacer en la Quebrada Beatriz. La represa recibirá la inmensa mayoría de su volumen de una toma en el Río Turabo, en un sitio que está a una distancia de tres kilómetros del sitio de la represa. La represa será construida usando relleno compactado, con un núcleo de material menos permeable y espaldones de tierra compactada. Señalamos que los materiales encontrados disponibles para la construcción de toda la presa son muy parecidos a los materiales que se usaron en la represa de Río Blanco. Dichos materiales son prácticamente impermeables y muy resistentes al compactarse correctamente. Los materiales de construcción en Quebrada Beatriz son abundantes y se ha concluido que el sitio es excelente para la construcción que se propone.

### **Descripción del sitio y resultados al momento**

El reconocimiento de ingeniería y la investigación del subsuelo demuestran que el sitio es sumamente competente. Existe una falla INACTIVA que cruza un borde de la zona del embalse (el lago creado por el cerramiento de la quebrada Beatriz). Dicha falla no atraviesa la estructura en tierra propuesta (represa). Los materiales de construcción son abundantes. Existen algunas zonas de poca extensión de material superficial blando, típicamente a lo largo del lecho de la quebrada Beatriz. Estos materiales son de 1.5 a 2 metros de espesor y deberán ser removidos al inicio de la construcción para asegurar la estabilidad de la represa.

Debajo de los depósitos superficiales, el subsuelo consiste en 8 a 12 metros de suelos residuales competentes, seguido por unos 6 metros de roca fragmentada, luego la base de roca prácticamente íntegra. Se anticipa un tratamiento muy común de inyección de lechada en la roca fragmentada para disminuir el potencial de filtraciones.

A lo largo de toda el área de cimentación de la presa no existen materiales granulares ni limos que pudieran ser propensos a licuación durante un terremoto. La resistencia de los materiales a colocarse (confirmada por numerosas pruebas de laboratorio ya realizadas y que se someterán con el informe del 30% del diseño), y la resistencia del material natural debajo de la huella de la represa, indican que la presa podrá mantener su estabilidad aún durante eventos sísmicos tan extremos como aquellos que se anticiparían con un período de recurrencia de 2,475 años (2% de probabilidad en 50 años).

### **Sismicidad de la zona**

Para esta represa proponemos un diseño muy conservador, basado en resultados de un análisis determinístico combinado con un análisis probabilístico que considerarán terremotos con períodos de recurrencia de 2,475 años.

Para el análisis determinístico se consideran eventos reales de los cuales se tienen datos históricos. Para esto se considera que Puerto Rico se encuentra dentro de una zona de sismicidad moderada al borde nordeste de la Placa del Caribe, la cual se caracteriza por una mediana frecuencia de terremotos producidos de escasas a medianas profundidades. Las zonas de actividad sísmica se enumeran a continuación:

- al este de la Fosa de Anegada, a 40 kilómetros al sureste de Puerto Rico y al sur de la isla de Vieques, en dirección hacia Anegada;
- al oeste del Canal de La Mona, específicamente en la fosa de Mona, a 35 kilómetros de la cara nororiental de Puerto Rico, desde la isla de Desecheo en dirección hacia el norte;
- en la trinchera de Puerto Rico, a 100 kilómetros de la costa norte de la isla.

- existe también otra zona de menor importancia conocida como la Fosa de Muertos, a 80 kilómetros de la punta sureste de la isla, la cual no ha mostrado mucha actividad sísmica.

Los terremotos con hipocentros bajo la isla son de poca magnitud y tienden a tener su foco a profundidades mayores de 30 kilómetros, siendo esta profundidad similar al espesor de la corteza. Se desconoce con exactitud la naturaleza de los mecanismos focales o desplazamientos que producen estos terremotos. Desde la década de los setenta, la Red Sísmica de Puerto Rico ha estado en operaciones y se ha obtenido un gran número de registros.

Desde 1717 han ocurrido alrededor de 50 terremotos en esta zona, con intensidades desde importantes a moderadas, casi todos de intensidad Clase V: sentida por casi todos, algunos platos rotos y ventanas partidas, movimiento o desplazamiento de objetos altos. Dos terremotos muy destructivos y bien documentados han afectado la isla dentro de los últimos 130 años, en 1867 y 1918. Ambos terremotos produjeron maremotos (*tsunamis*) que causaron estragos. El terremoto de 1867 ( $M \sim 7.5$ ) ocurrió al este de Puerto Rico en las Islas Vírgenes entre Santa Cruz y San Tomas, supuestamente en la Fosa de Anegada, hacia el lado sur de San Tomas y Vieques. Le siguieron numerosos terremotos secundarios, el último de los cuales ocurrió cuatro meses después y fue casi tan violento como el primer terremoto.

En 1918 se produjo un terremoto ( $M \sim 7.5$ ) que se originó en el Canal de La Mona, al oeste de Puerto Rico. Indiscutiblemente, este es el terremoto más importante y más severo que ha afectado a la isla. Las intensidades fueron del orden de Mercalli IX en Aguadilla y en Mayagüez, y Mercalli V en Fajardo, según Rafael Picó. Durante el siguiente mes, sucedieron varios terremotos secundarios.

Según el ingeniero José Luis Capacete, el máximo terremoto posible que pudiera afectar a San Juan sería producto de un sismo  $M=8.3$  originando en la trinchera de Puerto Rico a 80 kilómetros y con un período de retorno mayor de 200 años. Adicionalmente, deben considerarse otros dos posibles terremotos: uno con  $M=7.5$  originando en la Trinchera de Anegada a 90 kilómetros de distancia, y otro con  $M=7.5$  en el canal de La Mona a 130 kilómetros. Sin embargo, es necesario considerar el terremoto máximo probable para el período de retorno

que sea necesario considerar. Debido a que el registro histórico cubre alrededor de 400 años, y considerando que solamente se ha reportado un evento que pudiera haber sido un terremoto con  $M \sim 8$  (el terremoto de 1787), se estima que es conservador el seleccionar para el diseño de Quebrada Beatríz un terremoto con  $M \sim 8.0$  al lado sur de la Trinchera de Puerto Rico como el terremoto de diseño, a distancias de 80 a 100 kilómetros al norte de San Juan. Para la Fosa de Anegada, hay aún menos datos y por tanto utilizamos el terremoto de 1867 ( $M \sim 7.5$ ) como el terremoto de diseño para eventos que se originen en la Fosa de Anegada, a 105 kilómetros del sitio.

El análisis probabilístico considera todas las posibles fuentes generadoras de terremotos a diferentes distancias del punto de interés. El método consiste en llevar cabo un análisis estadístico con un criterio establecido por el tipo de estructura o situación siendo considerada. Dicho criterio es la probabilidad de que un evento sísmico ocurra dentro de un período de tiempo determinado. Como se mencionó anteriormente, en el análisis probabilístico para la presa en estudio se considera una probabilidad de ocurrencia de 2% en 50 años, lo cual significa un período de retorno del evento de 2,475 años. En otras palabras, el evento escogido se dará, según el análisis estadístico, cada 2,475 años. La presa deberá ser diseñada para soportar dicho evento.

El método probabilístico puede ser visto como aquel que incluye todos los eventos determinísticos con una probabilidad finita de ocurrencia. En este contexto, se puede decir que un correcto análisis determinístico que se enfoca en eventos específicos, como el descrito anteriormente, asegura que el evento de diseño es realista. Los eventos determinísticos pueden ser chequeados con los eventos probabilísticos para asegurarse que los eventos son razonablemente probables, y los eventos probabilísticos pueden ser, a su vez, chequeados con eventos determinísticos. Esto permite comprobar que hipótesis racionales y realistas han sido tenidas en cuenta para el análisis de riesgo sísmico de la represa. Ambos métodos se complementan y aseguran un diseño seguro de la estructura.

Además de la determinación del evento de diseño, se debe considerar también la atenuación que las ondas sísmicas sufren en su viaje desde la fuente del sismo hasta el sitio de la estructura, lo cual es proporcional a la distancia entre el proyecto y las fallas tectónicas activas. Esta consideración permite

concluir que las aceleraciones en el tope de roca del sitio de presa, producidas por el sismo de diseño deben ser del orden de 0.20g a 0.30g. Los valores calculados pudieran requerir amplificación, dependiendo de la rigidez y profundidad de los suelos sobre la roca en cada sitio específico. Estos valores comparan favorablemente con los presentados anteriormente por Capacete para San Juan, usando terremotos que se originen en estos dos sitios, considerando la atenuación de estas ondas. Por esto, el terremoto de 1943 (M~7.8) con su epicentro en la Trinchera de Puerto Rico no causó daños dado la atenuación de las ondas sísmicas según llegaban a la isla. McCann, sin embargo, sugiere un valor máximo de aceleración entre 0.15g a 0.20g con un período de recurrencia de 100 años, aunque recomienda valores más altos para los códigos de edificación (0.30g en Puerto Rico y 0.35g en Vieques), basados en la posibilidad de que la atenuación sea menor de lo que calcula Capacete. Dice Capacete que Gutenberg y Richter hacen mención al hecho que a Puerto Rico se le ha otorgado una reputación sísmica inmerecida. No obstante, AASHTO ha colocado a Puerto Rico en su Zona 3, aunque impone una aceleración máxima de 0.2g para puentes.

### **Conclusiones específicas al sitio relacionadas a la sismicidad**

Además de la aceleración pico, se deben considerar los periodos naturales de oscilación de las estructuras. Esto es particularmente importante debido a que los eventos sísmicos presentan un espectro de aceleraciones diferentes para cada frecuencia. Por su geometría se anticipa que el período de la represa será del orden de 0.2 a 0.3 segundos. Dicho período resulta favorable para el comportamiento sísmico de la represa en este sitio pues los terremotos que razonablemente se anticipan están a distancias en que las ondas que producirán en Quebrada Beatriz tendrán períodos mayores, habiéndose filtrado las bajas frecuencias durante el recorrido de las ondas.

Nuestra revisión también indica que NO existen zonas cercanas con fallas activas que puedan ser adversas a la represa. En adición, encontramos que la susceptibilidad de licuación es negativa al no existir material granular suelto en la zona de la represa. Sí existen pequeñas zonas de suelos blandos pero de poco espesor (1.5 a dos metros) que serán removidas durante la construcción. Los resultados al momento indican suelos y rocas con velocidades típicas de onda de corte sísmico de al menos 350 metros por segundo, claramente una zona de gran

competencia. El subsuelo es de gran dureza, y el valle donde se colocará la represa es de poco ancho. Por tanto, no se anticipa amplificación de las ondas sísmicas por suelos blandos o por efectos geométricos.

Concluimos, pues, que el sitio es sumamente deseable para construir una represa y que la estructura puede ser diseñada para resistir cualquier embate sísmico que razonablemente podamos anticipar en este sitio. Nuestro informe final sobre la sismicidad será presentado al someter el informe del 30% del diseño, junto a la información necesaria para fundamentar estas conclusiones.

Agradecemos la oportunidad de colaborar con ustedes en este importante proyecto y quedo,

Atentamente,



Alan R. Crumley  
Ingeniero