

VRS-4

**ANALISIS DE LA VULNERABILIDAD
SISMICA DE LOS CONJUNTOS
HIDRAULICOS.**

SANTIAGO DE CUBA
1995.

ANALISIS DE LA VULNERABILIDAD SISMICA DE LOS CONJUNTOS HIDRAULICOS

INTRODUCCION

La importancia de las obras hidráulicas para el desarrollo de cualquier país es tan grande y palpable, que pudiera parecer banal y superficial referirse a ello. En efecto, es imposible planificar el desarrollo de inversiones sin conocer primero la fuente de abasto de agua, lo que genera la construcción de presas y pequeños embalses para garantizar los volúmenes requeridos. No puede concebirse una agricultura eficiente y próspera sin riego, lo que significa la construcción de estaciones de bombeo, derivadoras y canales magistrales. La ampliación de ciudades y la construcción de repartos residenciales, implica obligatoriamente la ejecución de sistemas de acueducto y alcantarillado, sin los cuales sería imposible garantizar las más elementales normas higiénico sanitarias. En fin, que el desarrollo de la humanidad está indisolublemente ligado al desarrollo de las obras hidráulicas en sentido general.

Por la importancia y rol de las obras hidráulicas para la sociedad, estas se diseñan y construyen de forma que sean capaces de soportar cualquier carga eventual relacionada con la ocurrencia de fenómenos naturales como: avenidas o crecidas, vientos huracanados y temblores de tierra o sismos. De estas cargas, la vinculada con el sismo ocupa un lugar preponderante por las incertidumbres que aún hoy en día subsisten con la predicción del momento, lugar y magnitud exacta de las sacudidas.

En el plano del diseño y construcción de obras hidrotécnicas, a la consideración de la carga sísmica se le presta una atención especial, debido que aún en la actualidad los métodos de cálculo existentes se desarrollan y perfeccionan. Algunos de los útiles y nuevos métodos analíticos de vigilancia sísmica dan la impresión de que la ciencia está más desarrollada de lo que realmente está. Todo dato clave para análisis de respuesta sísmica implica incertidumbre. Las magnitudes de los terremotos, la atenuación del movimiento de tierra y la frecuencia y duración de las vibraciones pueden ser asumidos, usualmente, desde el limitado conocimiento de la máxima actividad sísmica potencial en el sitio de la obra. Realmente si las crecidas o avenidas se evacúan organizadamente a través del aliviadero de la presa y en raras ocasiones una "manga" de viento ocasiona daños significativos, la acción de sismos prácticamente siempre ocasiona daños, a veces perceptibles y otras no, cuya magnitud depende de la seriedad y profundidad con que se haya considerado el fenómeno durante el diseño y construcción de la obra.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE OBRAS HIDRAULICAS EN ZONAS ACTIVAS SISMICAMENTE

Al evaluar una obra hidráulica desde el punto de vista de su comportamiento y resistencia a la carga sísmica, en dependencia del tipo de obra y su categoría (importancia y envergadura) los enfoques varían. A continuación se describirán los pasos elementales a seguir en la concepción de una obra hidráulica sismoresistente, en dependencia de su tipo.

- Presas

A partir de plantearse la necesidad de construcción de una presa; importantísima obra hidráulica que garantiza agua embalsada para satisfacer necesidades, sobre todo en épocas de sequía; se comienza por localizar el cierre (lugar de construcción) partiendo, en la mayoría de los casos, de premisas económicas y facilidades constructivas. En este sentido tiene primera prioridad la ubicación con respecto al usuario, de forma que siempre se trata de hacer las entregas por gravedad, es decir sin necesidad de estaciones de bombeo. Definiéndose la posibilidad o no de las entregas por gravedad, el cierre se escoge tratando de que sea el que menor recursos requiera (cierre más estrecho) y que a su vez permita la mejor ubicación de los objetos de obra que conforman la presa (aliviadero, obra de toma, hidroeléctrica, etc).

En la zona de ubicación de la obra, conjuntamente con las investigaciones ingeniero-geológicas para fundamentar la construcción, se inician los estudios de las características sismotectónicas del área, que apoyándose en las primeras investigaciones señaladas definen y esclarecen el cuadro de fallas tectónicas y su posible influencia sobre la obra, es decir si existen fallas activas y magnitud probable de los movimientos diferenciales. En base a estos estudios y la sismicidad histórica del lugar, el CENAI (Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas) brinda los parámetros del sismo de diseño (aceleración del terreno, período de oscilaciones, etc) para el cálculo y proyección de los objetos de obra que conforman la presa. Si la obra no es de envergadura (micropresas, etc) y donde las condiciones de cimentación sean favorables, las aceleraciones se toman del mapa de zonificación sísmica.

Sobre el enfoque que se sigue para escoger el lugar de construcción de la presa, cabría la siguiente pregunta, ¿no sería más lógico primero realizar los estudios sismotectónicos y subordinar luego el emplazamiento de la obra a los resultados?. Aunque parezca lógico y en realidad estos estudios tienen una incidencia notable en los análisis de las alternativas de ubicación de la obra; tiene que haber una fundamentación muy profunda para descartar un cierre con buenas condiciones para la construcción de una presa, por algún problema relacionado con fallas tectónicas o riesgo sísmico del área. Esto tiene que ver directamente con el desarrollo alcanzado a nivel mundial por la HIDROTECNIA (especialidad dedicada a la investigación, proyección

y construcción de obras hidráulicas), que permite en estos momentos conocer, para cualquier problema, un conjunto de medidas ingenieriles probadas en la práctica, que de antemano minimizan los daños por la acción de cualquier fenómeno de esta naturaleza. Es ilustrativo en este sentido el ejemplo de una presa de hormigón en NUEVA ZELANDIA, que construida directamente sobre una falla activa cuenta con una junta vertical, especialmente diseñada, que permite el movimiento por separado de las partes de hormigón al unísono con los bloques de la falla y sin que esto traiga consigo pérdidas de agua por fisuras, etc.

El proceso de proyección de presas, consta de dos fases o etapas fundamentales. La fase de Estudio Técnico-Económico, donde se evalúan las posibles alternativas de emplazamiento de la obra y el conjunto de medidas ingenieriles a adoptar para que las afectaciones por fallas tectónicas activas y sismos sean mínimas. Escogiendo la variante de emplazamiento que permita el sistema más económico de conducción del agua al usuario y garantice la seguridad e integridad de la obra con el mínimo de recursos, se pasa a la fase de Proyecto Técnico Ejecutivo. En esta etapa se definen con exactitud los volúmenes de trabajo y se elabora la documentación gráfica para la construcción.

El cálculo de la obra y sus partes a la acción de la carga sísmica, se hace primero con una aceleración máxima del terreno debido a un sismo de moderada intensidad y que puede ocurrir dentro del período de explotación de la presa (entre 50 y 75 años), llamado Sismo de Diseño, y el cual la obra debe soportar sin colapsar y sin desperfectos de consideración (leves grietas, etc). Debido a que puede tener lugar un sismo de mayor envergadura, llamado Sismo Máximo de Cálculo o de Verificación, y a pesar de su baja probabilidad de ocurrencia durante la vida útil de la presa; las obras se chequean y se definen aproximadamente los daños que pueden tener lugar. Es importante destacar, que ante lo antieconómico que resultaría concebir las obras para que resistan sin ningún tipo de daño este sismo, en este caso se permiten daños de mayor consideración con respecto a los anteriores (deslizamientos superficiales de taludes, etc), pero que no conlleven a la destrucción total de la obra y sean reparables con un mínimo de recursos. El diseño de las obras que mejor cumpla con estos requisitos se considera el óptimo desde el punto de vista sismoresistente y se incluye en el proyecto definitivo.

Existen diferentes procedimientos para estimar la estabilidad dinámica de los objetos de obra que conforman la presa. Para el caso concreto de la cortina o terraplen (objeto de obra principal), algunos métodos se refieren al cálculo de la seguridad frente a un deslizamiento o colapso, total o parcial, de los taludes del terraplen y con otros se pretende anticipar las posibles deformaciones o asentamientos de la obra consecuentes al terremoto. Dentro de estos métodos existen los llamados pseudo-estáticos, que presuponen que la aceleración debido al sismo es uniforme en toda la altura de la obra, traduciéndose esta aceleración como una fuerza estática en

dirección horizontal, proporcional al peso de la masa deslizante (fuerza sísmica=masa*aceleración) .

Existen además los métodos pseudo-estáticos mejorados, que introducen el incremento de la aceleración que experimenta la presa en la base hacia la corona o parte superior de la cortina. La utilización de este último enfoque presupone una mejora, desde el punto de vista de la realidad física del fenómeno sobre el procedimiento simplificado de los primeros. Y por último están los métodos, que utilizando programas especiales de computación y los avances de las matemáticas modernas, pueden definir el cuadro de distribución de aceleraciones y deformaciones dentro de la cortina durante todo el tiempo de duración del sismo. Estos se utilizan en obras de elevada importancia y envergadura, ejemplo en presas de más de 100 m de altura y con condiciones ingeniero-geológicas complejas y alta sismicidad del área de construcción.

En Cuba, hasta el momento, para el cálculo de la carga sísmica en cortinas y objetos de obra importantes de las presas (torres de captación, etc) se utilizan los métodos pseudo-estáticos mejorados, que aunque en desventaja con respecto a los más sofisticados, dan como resultado una carga sísmica algo incrementada, es decir con cierta reserva, que tiende a suplir las limitantes planteadas .

Una parte importantísima en la concepción de una presa sismoresistente es el diseño, fase durante la cual se incluyen un conjunto de soluciones ingenieriles , que partiendo de la naturaleza del sismo se contraponen a los efectos desestabilizadores de este, minimizando así los daños .

Para una mayor comprensión de las medidas ingenieriles y sus objetivos, veamos a groso modo las fallas o partes de una presa que pueden ser afectadas por los efectos de un terremoto :

- En cortinas

1. Deslizamientos en los taludes, especialmente en las partes más altas donde la aceleración es mayor;
2. Asentamientos por deformaciones de consideración de los materiales (suelos) que conforman el cuerpo de la cortina;
3. Desbordamiento de la presa por oleaje excesivo debido a deslizamientos de las laderas del embalse;

- En obras de toma y aliviaderos

4. Agrietamiento y/o rotura de la torre de captación;
5. Agrietamiento y/o rotura de la galería de suministro del agua;
6. Agrietamiento y/o rotura de las partes de hormigón del aliviadero.

En base a los posibles daños mencionados, en el diseño de las presas ubicadas en zonas de peligrosidad sísmica, se tienen en cuenta las siguientes medidas ingenieriles :

- En cortinas

1. Proveer la máxima compactación de los suelos;
2. Recarga de los taludes utilizando materiales pesados (rocas);
3. El ancho de la corona deberá ser tal que soporte los movimientos con un mínimo de daños;
4. Estabilizar los taludes que bordean el embalse para evitar deslizamientos que puedan afectar la presa;
5. Evitar en la cimentación y laderas la existencia de materiales blandos o flojos;

- En galerías

6. Cimentar toda la galería sobre una base uniforme preferiblemente en roca;
7. Considerar el correcto armado de la estructura;
8. La conductora a instalar dentro de la galería deberá estar diseñada para efectuar el vaciado rápido del embalse en caso de roturas en la obra debido a la acción de sismos;

- En torres de captación

9. Se cimentará sobre un mismo material preferiblemente en roca;
10. Deberá contar con los hidromecanismos necesarios para realizar el vaciado del embalse;
11. Para su explotación se hará un puente de servicio cimentado sobre el terreno natural y como ultima alternativa sobre la cortina;
12. Considerar el correcto armado de la estructura.

La etapa de construcción se considera determinante en la materialización de una presa realmente preparada para enfrentar un sismo. En efecto, si las medidas antes mencionadas no se ejecutan con la calidad requerida, simplemente pierden su vigencia y no cumplen las funciones para las cuales se incluyeron en el proyecto. Es importante destacar, que el rigor y nivel de exigencia durante la construcción de una presa ubicada en zona de riesgo sísmico, tiene que ser muy superior al requerido en las presas en sentido general, por los daños que implica su rotura y las dificultades objetivas que significan la reparación.

Durante la ejecución de los trabajos se presta especial atención a la compactación de los suelos, a la correcta colocación de la armadura (acero), al vibrado y la observancia de la calidad del hormigón que plantea el proyecto .

Ya en la etapa de explotación, las presas son constantemente observadas y revisadas por el personal especializado que las atiende y sobre todo después de percibirse la acción de sismos, en aras de detectar las zonas afectadas y dirigir los trabajos posteriores de reparación y liquidación de desperfectos. Se hace hincapié durante la revisión a la posibilidad de grietas en el terraplen y los elementos de hormigón, deslizamiento de taludes, etc.

En caso de presas que por su altura e importancia lo requieran, directamente sobre la obra y sus contornos se ubicará una red de equipos de monitoreo para la medición de las aceleraciones, desplazamientos, etc durante terremotos.

Esta misma red de equipos de medición y control se utiliza para determinar la posibilidad de que tenga lugar la sismicidad inducida, es decir incremento de la actividad sísmica en la zona a partir de la construcción del embalse. Aunque en nuestro país hasta el momento este fenómeno no se ha monitoreado, es de destacar que a nivel mundial hay muchos ejemplos de presas que luego de construidas alteraron el régimen de ocurrencia de sismos en la zona, a tal punto que en varios casos los sismos de mayor envergadura tuvieron lugar después de construido el embalse. No obstante esto no debe hacerse extensivo a toda zona donde exista una presa, pues son muchos los fenómenos ingeniero-geológicos, la sismicidad histórica anterior, etc; que inciden directamente en su aparición, pero recalcando que la envergadura de la obra (capacidad de embalse y altura) es el factor determinante. Ejemplos de embalses que han provocado sismicidad inducida : Presa KREMASTA (GRECIA), altura - 165 m , volumen de embalse - 4 750 millones de m³; Presa KARIBA (RODHESIA), altura - 128 m , volumen de embalse - 160 368 millones de m³.

Los embalses de consideración construidos en las provincias orientales, de una forma u otra durante la fase de proyección fueron chequeados a la acción de la carga sísmica. A continuación se describen algunos de los criterios técnicos más importantes observados durante la proyección y construcción de algunos embalses de la provincia Santiago de Cuba:

- Presa GOTA BLANCA

Se ubica en el municipio Palma Soriano, forma parte del sistema oeste de abasto a la ciudad de Santiago de Cuba y se terminó de construir en Julio de 1993. La intensidad sísmica del área de construcción es VIII grados. El proyecto hecho a inicios de la década de los años 80 , concebía la cortina del tipo homogénea de materiales arcillosos lo que se modificó durante la etapa de construcción. La modificación consistió en la sustitución de la arcilla en el talud seco (aguas abajo) por un material rocoso más

resistente a las deformaciones. De esta forma con 75 000 m³ menos de terraplen se incrementó la resistencia, lo que se corroboró en los cálculos hechos para la acción de un sismo de la intensidad antes mencionada. El procesamiento de los resultados de la compactación del terraplen mostró la alta calidad con que esta actividad se realizó; lo que por sí solo es una garantía de un comportamiento adecuado de la cortina durante la acción de terremotos.

- Presa BACONAO

Esta importantísima obra cuya construcción se detuvo al agudizarse el déficit de recursos en el período especial, tenía como objetivo el abasto de agua a la ciudad de Santiago de Cuba. Por su ubicación a unos 50 km de la ciudad y a 6 km de la costa, podría recibir sacudidas debido a un sismo de intensidad IX. Teniendo en cuenta los 100 m de altura de la cortina, durante la proyección se incluyó en los taludes de la cortina materiales producto de la explotación de macizos de roca, lo que permitiría alcanzar un material rocoso con la granulometría (dimensiones de los granos) adecuada para resistir aceleraciones con un mínimo de deformaciones. La obra se diseñó para resistir, sin desperfectos un sismo de la intensidad mencionada.

Al decidirse su paralización; en 1994 se acometió un estudio de factibilidad económica para la construcción, en el mismo cierre, de una presa de 50 m de altura para la generación de energía eléctrica. La solución propuesta incluyó la cortina formada por materiales rocosos gruesos y pantalla de hormigón contrafiltración en el talud aguas arriba. No obstante a que esta tecnología resultaría novedosa para el país (piensa utilizarse en el Complejo Hidroeléctrico TOA-DUABA), su inclusión fue premeditada, pues este es el tipo de cortina que a nivel mundial mejor se ha comportado durante eventos sísmicos de importancia.

- Presa AVISPERO

Se construía en las cercanías del poblado del Cobre para el abasto de agua a Santiago de Cuba. A pesar de su relativamente no muy alta cortina (33 m de altura), el lugar de emplazamiento, único con buenas condiciones para ello, presentó serios problemas desde el punto de vista sismotectónico, a tal punto de considerarse las condiciones para su ubicación de muy desfavorables. Todo esto debido a la confluencia en el lugar de un grupo de fallas tectónicas activas y ser una zona marcadamente sismogeneradora. Apoyándonos en las investigaciones ingeniero-geológicas y los resultados del polígono geodinámico, se concibió la sección transversal de la cortina, de forma que pudiera asimilar los posibles movimientos diferenciales, sin que esto pudiera afectar su trabajo normal y resistir sismos de intensidad VIII (MSK). La cortina contenía la pantalla de arcilla en el talud aguas arriba y con dos tipos de filtros (suelos de granulometría adecuada) entre la arcilla y el material rocoso del talud aguas abajo, de forma que no se pudieran desarrollar

grietas catastróficas (los filtros sellarían cualquier intento de grieta).

- Estaciones de bombeo

A diferencia de las presas, su ubicación puede precisarse y modificarse con un mayor grado de flexibilidad en base al estudio ingeniero-geológico, tratando siempre que sean cimentadas en roca.

La zona de emplazamiento de la obra en base al mapa de zonificación sísmica del país dicta las aceleraciones de diseño de la obra.

Desde el punto de vista constructivo se hace especial hincapié en el reforzamiento de la cimentación y calidad de los trabajos de hormigonado.

- Sistemas de acueductos y alcantarillado

Por ser obras lineales no siempre en la elección del trazado se tienen en cuenta las condiciones ingeniero-geológicas, es decir priman criterios económicos en aras de disminuir en lo posible la longitud de las conductoras. En caso de sistemas de acueductos a obras de importancia excepcional (centrales electronucleares, etc) la evaluación del mejor trazado se acompaña de un estudio ingeniero-geológico.

Al estar soterradas en la mayor parte del trazado, las conductoras de sistemas de acueductos y alcantarillados no se ven sometidas a grandes cargas sísmicas, no significando esto que no sean vulnerables a sufrir daños y hasta colapsar. En este sentido la rígida observancia de las normas de construcción juega un papel importante en la prevención de posibles daños .

Entre las medidas ingenieriles elementales que de cumplirse garantizan la vida útil de los sistemas, aún en caso de sismos, se pueden nombrar las siguientes: elección correcta del material de rehincho y su debida compactación, detección y eliminación de salideros y en cruces aéreos la construcción de apoyos que garanticen la estabilidad de la conductora .

CONCLUSIONES

En la actualidad se continúan y profundizan los estudios sobre la incidencia de la carga sísmica en obras hidrotécnicas y las formas de prevenir minimizar los daños. Como resultado de estos estudios en 1994 se terminó una nueva norma para el diseño de obras hidráulicas sismoresistentes, que incluye métodos de cálculo que aunque no sofisticados permiten hacer una valoración bastante correcta de la fuerza sísmica. En el mismo material se dan además un grupo de medidas ingenieriles a tener en cuenta durante el diseño de las obras.

Desde ya se trabaja en el perfeccionamiento de la norma, para lo cual se amplían los intercambios de información con instituciones especializadas extranjeras, en aras de actualizar y mejorar los métodos de cálculo, lo que significará incrementar aún más la confiabilidad e integridad de las obras hidráulicas en el futuro.