

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

LAS GUÍAS TÉCNICAS Y EL CONTROL DE AVENIDAS EN EL RÍO LA LECHE (LAMBAYEQUE, PERÚ)

Francisco Javier Sánchez Caro¹

RESUMEN: El organismo norteamericano de cooperación USTDA (United States Trade and Development Agency) promueve una licitación internacional para la realización de un “Estudio de Factibilidad del Control de Avenidas en el Río La Leche” (Lambayeque, Perú), asociadas al fenómeno climático de “El Niño” (Oscilación Sur). Este concurso es adjudicado a la empresa californiana “D’Leon Consulting Engineers”, con su correspondiente equipo de profesionales y colaboradores, tanto norteamericanos (San Diego State University, por ejemplo) como extranjeros (de hecho, quien suscribe, concurre como uno de ellos).

A su vez, el citado USTDA impone la presencia y supervisión de miembros del USACE (United States Army Corps of Engineers), teniendo todo el trabajo una cierta dependencia funcional de la “Dirección Ejecutiva del Proyecto Olmos-Tinajones” (PEOT, Organismo Autónomo dependiente del Gobierno Regional de Lambayeque en Perú). Para terminar de facilitar el asunto, existían algunos trabajos precedentes, tanto de finales de los años 70 (desarrollados por los rusos de GUIPROVODJOS-ГИПРОВОДХОЗ) como por el consorcio alemán-peruano de SALTZGITTER-LAGESA a principios de los 90.

En esta especie de “Torre de Babel” ingenieril, algunos aspectos de la “Guías Técnicas”, han servido como punto de encuentro para establecer criterios razonables para desarrollar el trabajo.

¹ Dr Ingeniero de Caminos (Geotecnia de Proyectos y Obras).

1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo hace referencia a los trabajos sobre el Control de Avenidas en el Río La Leche (Lambayeque, Perú), asociado al fenómeno denominado “El Niño”, que da lugar a precipitaciones de carácter extraordinario en el Norte de Perú (y Sur de Ecuador), que tienen lugar fundamentalmente en el período Enero-Abril. Este tipo de precipitaciones extremas (en ocasiones, también combinadas con el otro fenómeno propio de la zona: “La Niña”) ha producido daños cuantiosos en el pasado.

Los indios Lambayeques (también llamados Sicán) se desarrollaron en los valles de Motupe-La Leche por el norte y Jetequepeque por el sur, entre el 700 y 1350 d.c. De hecho, Lambayeque nació de las cenizas de Mochica, cuando esta cultura cayó eclipsada, posiblemente, por un devastador fenómeno de "El Niño". Fue por ello heredera privilegiada de esa gran cultura norteña (con influencias adicionales Huari, Tiahuanaco y Chimú, entre otras).

El origen legendario de Lambayeque se basa en que un gran rey o señor (Naylamp o Naymlap), junto con su compañera (la reina Ceterni) llegó por mar a las costas del Norte de Perú (al parecer, arribó a las playas de la actual caleta San José), en medio de una gran flota de balsas y acompañado de una lujosa corte de funcionarios, versados en diferentes artes y oficios. El rey trajo un ídolo de piedra verde llamado "Yampallec" (del que deriva el nombre de Lambayeque y que se traduciría por “estatua de Naylamp” que bien pudo ser su propia efigie o la de su progenitor), inaugurando un largo período de paz y prosperidad en la región.



Figura N° 1.- Cuchillo Ceremonial (“Tumi”) con la imagen de Naylamp

Naylamp fundó una dinastía de varios soberanos (12 jerarcas), siendo el último de sus descendientes (el rey Fempellec) quien cometió el error de trasladar el ídolo Yampallec a otro lugar (contraviniendo un precepto). Un demonio en forma de mujer se le apareció y lo tentó. Sobrevinieron desgracias, siendo castigado con prolongadas y devastadoras tempestades (treinta días de fuertes lluvias que podrían estar relacionadas con el fenómeno de “El Niño”), sequías, pérdidas de cosechas, hambruna, etc. El castigo se completó cuando poste-

riormente llegó de los reinos del sur un tirano poderoso, el Chimo Cápac o Chimú Cápac, que se adueñó de las ricas tierras de Lambayeque.

Por ello, tras este desastre sobrevendría la conquista Chimú (se tiene constancia de la ocurrencia de estos desastres en esta zona, previos a la ocupación y sometimiento de ese territorio por los chimú), que tras breve periodo de dominación pasaría a ser dominada por los Incas. Habría sido el fenómeno después denominado “Chimu flood” (“El Niño de Chimú”) que dio origen a una “enorme inundación ocurrida alrededor del año 1100 dC” en Trujillo. Aún no está del todo claro si este último es el mismo evento que fue bautizado como “El Niño de Naylamp” (“Naylamp flood”), que inundó también Batán Grande (a 30 kilómetros de Lambayeque); o si “El Niño de Naylamp” fue el que ocurrió alrededor de 1330 dC. “El Niño de Naylamp”, aunque de fecha pues imprecisa, fue, en todo caso, el primer evento del que hay referencias escritas: las del cronista español Cabello Valboa.

Hoy Naylamp es un Proyecto de observación del océano (desarrollado por la Marina de Guerra del Perú a través de la Dirección de Hidrografía y Navegación), en el marco del Programa: Mejoramiento de la Capacidad de Pronóstico y Evaluación del Fenómeno "El Niño" para la Prevención y Mitigación de Desastres en el Perú.

El fértil valle del río La Leche fue, de hecho, la cuna de esta cultura Lambayeque, donde descansan los vestigios de la cultura Sicán, enraizada (como se ha dicho) con la denominada cultura Mochica (después Chimú). Tuvo su desarrollo entre los siglos VIII - XIV d.C. (ocupó el territorio que hoy le corresponde al departamento de Lambayeque, llegando a extenderse por casi toda la costa peruana en su periodo de mayor apogeo, en la denominada Fase Intermedia, entre el 900 -1100 d.C).

Destacaron en arquitectura, orfebrería (asombraron con la belleza de sus joyas, sus aleaciones y sus finos acabados) y especialmente por su ingeniería hidráulica (enormes sistemas de irrigación). También llegarían a ser grandes navegantes.

Su obra arquitectónica por excelencia era la “pirámide truncada”, con rampas en zigzag, plataformas superpuestas y cubiertas con arena y relleno, además de suelos de barro cocido (refractarios) hasta en cinco oportunidades (que indican un alto tráfico de personas en la zona). La zona con mayor densidad de este tipo de edificaciones se localiza en este Santuario del Bosque de Pomac y hacia la localidad de Túcume, que constituyó un importante centro administrativo también en el Valle de La Leche. La funcionalidad de estas pirámides, que alojaban verdaderas ciudades, resulta hoy controvertida (es indudable su carácter de lugar sagrado) y recientemente se relaciona con estructuras de protección contra las propias riadas del río de La Leche (fenómeno de “El Niño”). El valle del Río La Leche presenta la mayor concentración de pirámides del mundo (sólo en Túcume hay un total de 26 pirámides, algunas de hasta 100 metros de anchura y 33 de altura).

En definitiva, el río La Leche presenta una vinculación milenaria con el fenómeno de “El Niño”, que provoca avenidas extraordinarias que parecen sucederse, en la actualidad, con una frecuencia más elevada, probablemente como consecuencia del cambio climático. Especialmente catastróficas han sido las avenidas de 1983, 1998 y 2008.

2. ASPECTOS HIDROLÓGICOS DE DISEÑO

El estudio precedente, realizado (como se ha dicho) por el Consorcio SALZGITTER-LAGESA (1984) contiene una estimación de las potenciales avenidas utilizando el método de las isocronas. Para ello, se utilizaron series de precipitaciones diarias de 25 y 50 años, y los caudales máximos se expresaron en términos de las avenidas de 50 y 100 años de período de retorno.

Las cuencas de los ríos La Leche y Chancay están entre las más grandes de Perú, en relación a la superficie de sus llanuras y a la extensión y profundidad de sus depósitos aluviales. A través de los años, esta realidad geomorfológica ha contribuido a la fortaleza económica de la región y a su fuerte dependencia de la agricultura de regadío, reflejando así los tiempos ancestrales. Esta presencia tan notable de depósitos aluviales en la costa de Lambayeque sólo puede ser explicada por la ocurrencia de grandes inundaciones regionales.

El principal tema de discusión fue, obviamente, cuál es el período de retorno que debe ser tenido en cuenta en el diseño de una presa. Por ejemplo, en los Estados Unidos, la “Norma del Servicio de Conservación de Recursos Naturales” (USDA NRCS, 1960) establece las disposiciones mínimas de diseño para los aliviaderos principales y de emergencia. Esto incluye criterios basados en la frecuencia de precipitaciones P100 (período de retorno de 100 años) y la PMP (Precipitación Máxima Probable), dependiendo del caso.

También en este sentido se orienta la Guía Técnica española (“Guía Técnica de Seguridad de Presas” N° 4 (titulada “Avenida de Proyecto”). Así, para una presa de Categoría A como sería una futura presa en el río La Leche (presa cuya rotura puede afectar a núcleos urbanos o servicios esenciales, así como producir daños materiales o medioambientales muy importantes), la Avenida de Proyecto debería corresponderse con un período de retorno mucho mayor, tal como se establece en la Tabla adjunta.

| DETERMINACIÓN DE LAS AVENIDAS DE PROYECTO | | |
|---|---------------------|-----------------|
| PERÍODOS DE RETORNO EN AÑOS | | |
| CATEGORÍA DE LA PRESA | AVENIDA DE PROYECTO | AVENIDA EXTREMA |
| A | 1000 | 5000 - 10000 |
| B | 500 | 1000 - 5000 |
| C | 100 | 100 - 500 |

El acuerdo fue fácil de alcanzar y se postuló seguir las indicaciones de la “Guía española” para este trabajo, cuya parte hidrológica es responsabilidad del Departamento de Hidrología de Universidad Estatal de San Diego (California), bajo la dirección de V. M. Ponce. Por ello, se optó por la modelación determinista/conceptual del proceso de precipitación-escorrentía como herramienta de análisis apta para el cálculo de los hidrogramas de avenidas en la cuenca del río La Leche. Así, una primera estimación (para una de las alterna-

tivas que se vienen barajando) indica, para la avenida extrema, un caudal punta de unos 4800 m³/s y un volumen de avenida de 115 Hm³.

En cuanto al tipo de aliviadero, se manifiesta la disconformidad con la tipología prevista en estudios precedentes ("Morning Glory"). Este tipo de aliviaderos existe en todo el mundo, aunque en los Estados Unidos no proliferan demasiado (el USACE ha construido sólo dos, mientras que el U.S. Bureau of Reclamation ha llevado a cabo el de la presa de Monticello, al oeste de Sacramento, California, que presenta una capacidad de 1.370 m³/s, lo que lo hace el más grande del mundo). Los aliviaderos tipo "Morning Glory" tienen un riesgo elevado de quedar obstruidos (por acumulación de troncos y vegetación), tal como ocurrió, por ejemplo, en la ataguía de la represa Norte sobre el río Itajaí (Santa Catarina, Brasil), en diciembre de 1982.

No se descartan los aliviaderos en túnel (siempre en lámina libre), aunque se muestra preferencia por los aliviaderos de superficie. La rotura por cavitación del aliviadero (en túnel) de la presa de Glen Canyon (río Colorado, Arizona, USA) en Junio de 1983, llevó al U.S. Bureau of Reclamation a disponer dispositivos de aireación en los aliviaderos (tanto nuevos como ya existentes).

Se considera que deben evitarse los aliviaderos con compuertas (salvo en casos de aliviaderos de doble umbral, en los que se podría disponer de una compuerta estacional) debido a la posibilidad de fallos en los equipos mecánicos de accionamiento y maniobra (esto es particularmente importante en el caso de la cuenca de La Leche, en la que el tiempo de concentración en casos inusuales puede ser tan corto como 3-4 horas).

La evaluación preliminar de sedimentación en embalses, indica que la vida útil de un futuro embalse asociado a una presa (de las alternativas más viables analizadas) puede verse notablemente afectada por estos aterramientos (la experiencia indica que la turbidez puede ser de 1 a 5 kg/m³). Este problema es una de las prioridades del trabajo que se viene desarrollando.

3. CONSIDERACIONES SÍSMICAS

Además de las avenidas, los terremotos constituyen uno de los fenómenos naturales más destructivos y suponen una amenaza permanente para la integridad de personas e infraestructuras. De hecho, a nivel mundial, el Perú es uno de los países con mayor potencial sísmico (forma parte del denominado "Cinturón de Fuego del Pacífico"). Su actividad sísmica está asociada al proceso de subducción de la placa Nazca bajo la Sudamericana. La costa del Perú desde Tumbes a Tacna es la zona de mayor actividad sísmica.

En España, las recomendaciones relativas al cálculo de la acción sísmica en presas, quedan recogidas en la Guía Técnica N° 3 ("Estudios Geológico-Geotécnicos y de Prospección de Materiales"), en el que adopta el "mapa de peligrosidad sísmica" de la Normativa española sismorresistente vigente, donde se representan las curvas de isoaceleración del terreno (aceleración sísmica básica, que es, en realidad, el valor característico de la aceleración horizontal en superficie, en un campo libre correspondiente a un período de retorno de 500 años). Lógicamente, también en Perú se recoge un mapa similar (Figura N° 2).

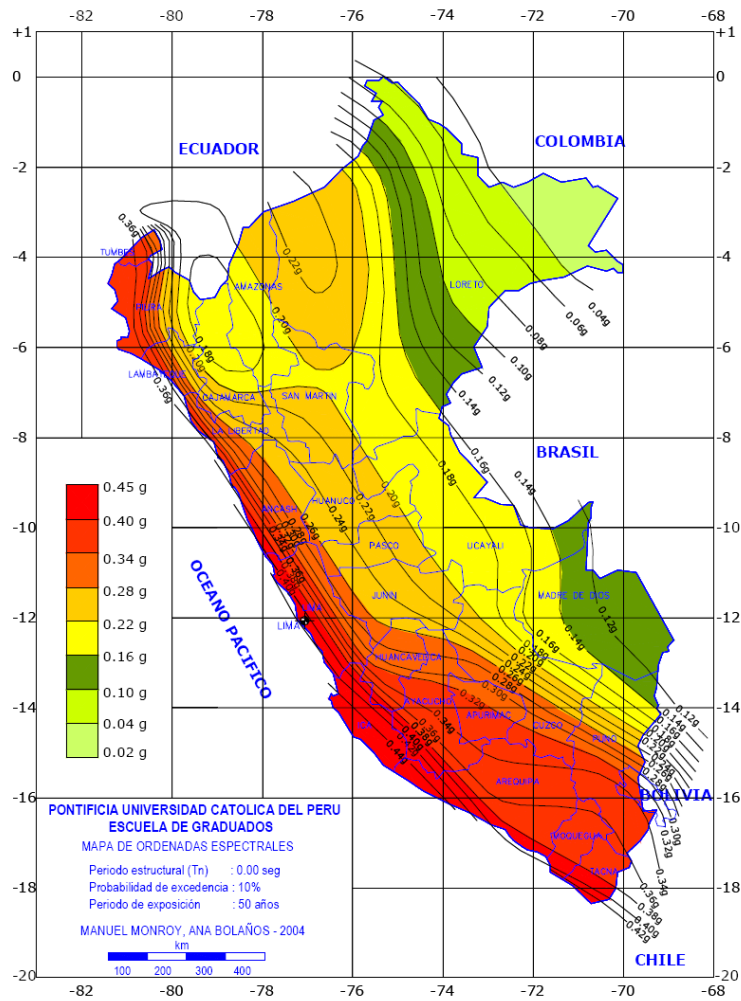


Figura N° 2.- Peligrosidad sísmica en Perú, coincidente con la distribución de ordenadas espectrales (aceleración del terreno), para $T = 0,0$ s y Período de retorno de 475 años.

La normativa sísmica peruana (E.030), como la mayor parte de las normativas mundiales establece un “espectro de diseño”, basado en los espectros reales de los sismos existentes, normalizado (escalado a la unidad), al que ha de aplicarse un coeficiente multiplicador $C = 2,5$ (Figura N° 3). Difiere ligeramente del utilizado en España, únicamente para altas frecuencias.

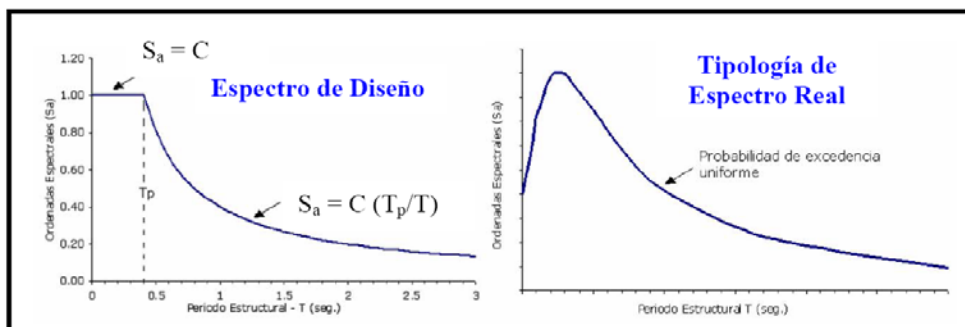


Figura N° 3.- Forma espectral propuesta en la Norma Sísmica Peruana

En la normativa peruana, se incluyen asimismo mapas de distribución de las aceleraciones espectrales en el terreno para un mismo período de retorno (475 años), un determinado amortiguamiento (5% del crítico) y tres frecuencias diferentes (correspondientes a períodos estructurales de $T = 0,0$ s ya comentada y de $T = 0,2$ s y $T = 1,0$ s). También se establecen para otros períodos de retorno (concretamente 975 años).

En España, los períodos de retorno definidos para el “sismo de proyecto” (TP, similar al MDE “Maximum Design Earthquake” de ICOLD) y para el “sismo extremo” (TE, similar al MCE “Maximum Credible Earthquake” de ICOLD), dependen de la sismicidad del emplazamiento y, también, de la categoría de la presa, de acuerdo con la Tabla adjunta.

“SISMO DE PROYECTO” Y “SISMO EXTREMO EN ESPAÑA”

| Categoría de presa | Sismicidad del emplazamiento | | |
|---------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | Baja | Moderada | Alta |
| C | No hay que considerar efecto sísmico | TP = 1000 años | |
| B | | TP = 1000 años | |
| A | | TP=1000 años TE=3000 a 5000 años | TP=1000 años TE=10000 años |
| Sismicidad baja | | $a_b < 0,04$ g | |
| Sismicidad moderada | | $0,04 \text{ g} \leq a_b < 0,13$ g | |
| Sismicidad alta | | $a_b \geq 0,13$ g | |

De acuerdo con ello, parece que siempre que haya que considerar el efecto sísmico (zonas de sismicidad moderada y alta) sería necesario realizar un estudio sismotectónico del emplazamiento. Para evitar esto, la Guía Técnica permite asumir que el sismo de 1000 años se puede deducir a partir del sismo de 500 años y realizar así una simplificación en relación al “sismo extremo” en zonas de sismicidad moderada, de acuerdo con la Tabla siguiente. Ello implica, a falta de mejor estimación, la aplicación de un coeficiente multiplicador del tipo $(TR/500)^{0,4}$.

RESUMEN DE ACELERACIONES DE CÁLCULO EN ESPAÑA (Componente Horizontal)

| Categoría de presa | Sismicidad | | |
|--|-----------------|--|------------------|
| | Baja | Moderada | Alta |
| C | No es necesario | TP, $a_c = 1.3 a_b$ | |
| B | | TP, $a_c = 1.3 a_b$ | |
| A | | TP, $a_c = 1.3 a_b$ TE, $a_c = 2 a_b$ | Estudio Especial |
| TP = Sismo de proyecto, TE = Sismo extremo | | | |

Ya se ha dicho que el espectro de respuesta contemplado en la normativa española es bastante similar al de la normativa peruana, aunque quebrado en la zona de períodos pequeños. En ambas normativas, la aceleración espectral máxima (sin tener en cuenta el tipo de terreno) es 2,5 veces el valor de la aceleración de cálculo (que es la “Peak ground acceleration” o semiamplitud del acelerograma, para un período de retorno determinado).

Para la componente vertical, la Guía Técnica española recomienda la utilización de un espectro similar, cuyos valores se escalen al 70% de los correspondientes a la componente horizontal. En Perú, la normativa E.030 recomienda que este factor sea igual a 2/3 (esto es, el 66,67%).

Los métodos de análisis para determinar los efectos de las excitaciones sísmicas, son los siguientes: a) **Fuerzas estáticas equivalentes** (Método Pseudo-Estático) y b) **Métodos dinámicos**: Análisis Modal Espectral, Superposición Modal e Integración Directa (“Time History”).

El Análisis **Modal Espectral** es un procedimiento de análisis dinámico aproximado en el que la respuesta de la estructura se obtiene mediante una combinación de las contribuciones modales (máxima respuesta de cada modo afectada por su coeficiente de participación modal, en régimen elástico lineal).

La **Superposición Modal** consiste en integrar a través del tiempo las ecuaciones desacopladas del movimiento de la estructura según los modos naturales de vibración, sumando directamente las contribuciones de cada modo instante a instante, adoptándose como resultado la envolvente de máximas sollicitaciones y deformaciones (elástico lineal).

La **Integración Directa** (“Time History”) consiste en la integración paso a paso de las ecuaciones de movimiento acopladas de todos los grados de libertad dinámica (excitación sísmica definida mediante acelerogramas con planteamientos tanto “lineales” como “no lineales”).

En presas de materiales sueltos, suele admitirse el **“Metodo simplificado de deformaciones inducidas”**. Se basa en el cálculo de deformaciones permanentes, donde la rotura tiene lugar según una superficie de deslizamiento bien definida con comportamiento elástico hasta rotura (y luego perfectamente plástico). Este planteamiento fue propuesto por Newmark y modificado por Makdisi y Seed. En él se determina la aceleración de fluencia (también denominada “aceleración crítica” que da lugar a un factor de seguridad FS = 1.0). Mediante un cálculo dinámico se determinan las aceleraciones producidas por el sismo en la presa (por respuesta “Time History”). Cuando la aceleración inducida excede la calculada como crítica, se producirán movimientos; cuya magnitud se evalúa mediante una doble integración (Figura N° 4).

Además, la mencionada Guía Técnica española permite, en determinados casos (todas las presas de categoría C y aquellas presas de superior categoría situadas en zonas de sismicidad moderada), la utilización de métodos pseudoestáticos de cálculo, en los que la acción sísmica se representa por unas fuerzas máxicas, con unos “coeficientes pseudoestáticos de cálculo” (K_h , K_v) de:

$$K_h = \beta \cdot a_c / g \qquad K_v = \delta \cdot K_h$$

El coeficiente “ β ”, en general y salvo análisis más detallado, puede suponerse igual al valor siguiente:

$$\beta = 2/3 \quad (\text{presas de fábrica}) \qquad \beta = 1/2 \quad (\text{presas de materiales sueltos}^*)$$

* Nota: En algunas normativas, se adopta $\beta = 0,4$ para presas de pantalla.

En relación al factor adimensional “ δ ”, según la Guía Técnica española mencionada, suele admitirse igual a: $\delta = 1/2$ (todos los casos)

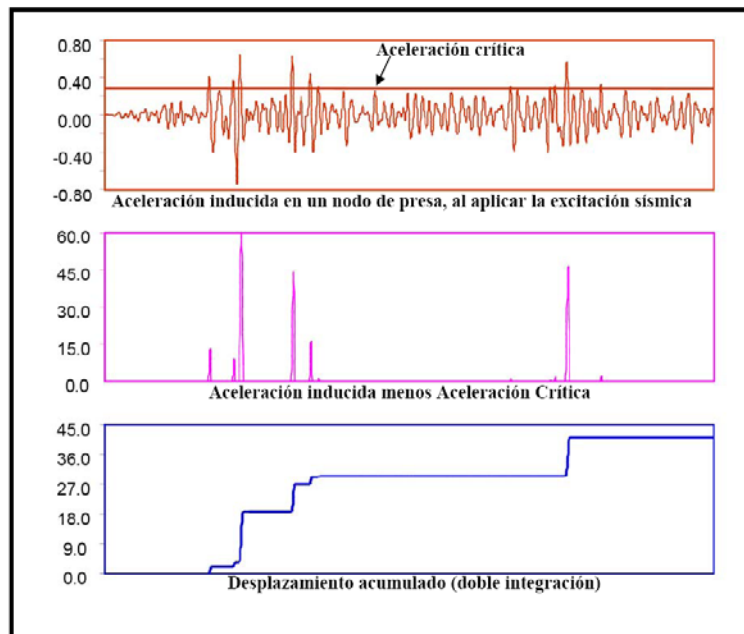


Figura N° 4.- Aplicación del Método de Newmark (Makdisi-Seed) de deformaciones inducidas en Presas de Materiales Suelos.

Además, la fuerza vertical podrá suponerse actuando en sentido ascendente o descendente, de manera que produzca el efecto más desfavorable. En estos casos, al analizar la estabilidad de presas de fábrica, podrá aplicarse el criterio de Westergaard para la determinación del empuje hidrodinámico.

Si aplicáramos la normativa española y admitiéramos la posibilidad de realizar cálculos pseudoestáticos en esta etapa de "Estudio de Factibilidad" (Tipo A), habría que atenerse a los cálculos que se indican en la siguiente Tabla:

ACELERACIONES DE CÁLCULO EN ESTUDIO DE FACTIBILIDAD (Componente Horizontal)

| Presa | Estudio Factibilidad | | | | | |
|--------------------------|----------------------|-------|-------|-----------------|--------------|-----------------|
| | Cálculo | PGA | | Dinámico | | Pseudo-estático |
| | Localización | TP | TE | Modal-Espectral | Time-History | |
| Fábrica | Curso Alto | 0,42g | 0,65g | No | No | 0,28g |
| | Curso Medio | 0,46g | 0,71g | No | No | 0,31g |
| | Curso Bajo | 0,50g | 0,77g | No | No | 0,33g |
| Materiales Suelos Zonada | Curso Alto | 0,42g | 0,65g | No | No | 0,21g |
| | Curso Medio | 0,46g | 0,71g | No | No | 0,23g |
| | Curso Bajo | 0,50g | 0,77g | No | No | 0,25g |
| Escollera con Pantalla | Curso Alto | 0,42g | 0,65g | No | No | 0,17g |
| | Curso Medio | 0,46g | 0,71g | No | No | 0,18g |
| | Curso Bajo | 0,50g | 0,77g | No | No | 0,20g |

Nota: La componente vertical se tomará igual al 50% de la vertical. PGA = Peak Ground Acceleration

Ello parece apropiado, pues está en consonancia con lo señalado por Ruesta et al (1988), para presas de materiales sueltos (Figura N° 5).

De cara al Proyecto de Construcción, además de estos planteamientos pseudostáticos, deberán hacerse cálculos dinámicos con ambos sismos (TP y TE), de tal forma que no se produzca la rotura con el primero de ellos y que, al menos, no se produzca un desembalse incontrolado durante el segundo. Se realizarán cálculos Modal-Espectral y Time-History donde el acelerograma y/o espectro vertical se tomará igual a los 2/3 del horizontal, donde se realizara un espectro escalado con factor 2,5 PGA (pseudoaceleración espectral máxima) y se asumirá un acelerograma con escalado a una semiamplitud PGA. Estos valores para el Proyecto de Construcción serán aplicables en ausencia de una mejor estimación, a partir de Nuevos Estudios Sismotectónicos, Neotectónica, etc.

Además, se deberá tener en cuenta un terremoto inferior (TBE, “Terremoto Básico de Explotación” similar al OBE “Operating Basis Earthquake” de ICOLD, con un período de retorno de 150 años), para el que la presa y todas sus estructuras deben mantener intacta su funcionalidad (como aproximación, se puede suponer que la PGA correspondiente al TBE es igual a la correspondiente al TP, afectada por un coeficiente de 0,47, esto es 0,20-0,22-0,23 g’s, para localizaciones de Curso Alto, Medio y Bajo del Río de La Leche).

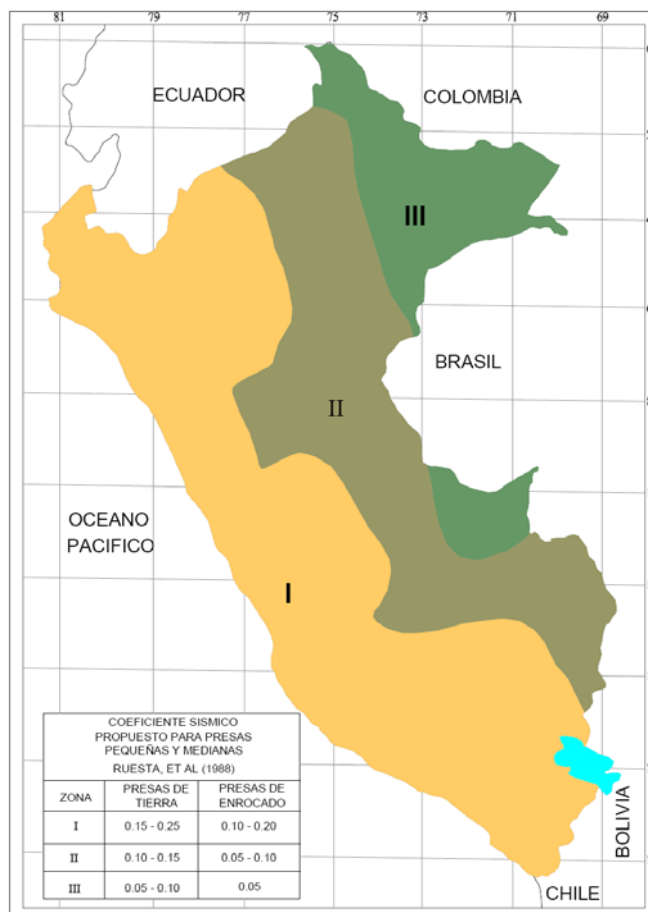


Figura N° 5.- Coeficiente sísmico (aceleración pseudostática horizontal) según Ruesta et al (1988) para presas pequeñas y medianas de Perú.