

## **ALGUNAS EXPERIENCIAS EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PRESAS DE GRAVA CON PANTALLA DE CONCRETO Y/O GEOMEMBRANAS.**

Rafael E. Guevara Briceño

GLG Ingenieros Consultores S.C.  
Caracas - Estado Miranda  
e-mail: reguevarab@gmail.com

### **RESUMEN:**

El diseño de presas de enrocado o grava con pantallas de concreto (CFRD), sin menoscabo de aplicaciones científicas tales como el análisis por elementos finitos, ha sido esencialmente empírico, basado en la experiencia y precedencia; por ello, resulta de particular importancia divulgar y compartir la información y experiencias en el diseño, construcción y operación de este tipo de presas. En Venezuela se han construido hasta ahora unas ocho presas tipo CFRD, tan altas como la de Yacambú de 162 m y en otros países de Sur América unas 30 de estas presas, algunas tan altas como Antamina en Perú con 230 m y Campos Novos en Brasil de 200m. Por otra parte tanto en este tipo de presas CFRD, como en otras de concreto de gran altura (RCC, arco bóveda, concreto gravedad), se están usando geomembranas de PVC como elemento impermeable tanto en rehabilitación de presas existentes como en la construcción de presas nuevas y se están usando pantallas elastoplásticas como elemento de control de infiltración en fundación aluvional. En este artículo se presenta un resumen sobre avances en criterios de diseño y prácticas de construcción mejoradas en los últimos años en presas de grava con elementos impermeables de concreto o de geomembranas y con membranas elastoplásticas para el control de flujo en fundación aluvional.

### **INTRODUCCIÓN**

Las presas de enrocado con pantalla (CFRD) y grava con pantalla (CFGD) se han desarrollado en los últimos 40 años y hay presas de este tipo en mas de 50 países. Ciertamente en el diseño de las mismas se han aplicado métodos científicos, tales como los análisis por elementos finitos, pero su desarrollo ha sido esencialmente empírico, basado en la experiencia y precedencia; por ello, resulta de particular importancia divulgar y compartir la información y experiencias en el diseño, construcción y operación de este tipo de presas (CFRD). En este artículo se presenta un apretado resumen de criterios de diseño y prácticas de construcción mejoradas en los últimos 20 años en las presas de grava o enrocado con pantallas, haciendo también particular referencia a experiencias y lecciones aprendidas en casos de presas donde se han usado geomembranas de PVC y sobre casos donde se han usado pantallas elastoplásticas para el control de flujo en fundación aluvional. Se hace referencia a ejemplos tales como: Yacambú y Dos Bocas (Venezuela), Limón/Olmos (Perú), Santa Juana y Puclaro (Chile), Bovilla (Albania).

**RECONOCIMIENTO:** Al Dr. James Barry Cooke, físicamente desaparecido en el año 2006 a los 91 años de edad, a quien puede considerarse el mayor impulsor y consultor de las CFRD. Trabajó hasta el último día de su vida en el mejoramiento de detalles de diseño y construcción de las CFRD y fue famoso por su generosidad en compartir conocimientos mediante sus memos y a través de publicaciones. Fue un ingeniero de conocimientos profundos con gran sentido práctico y de búsqueda de lo sencillo y con un excelente sentido del humor. Honor a quien honor merece.



**Foto 1:** Barry Cooke, escalando la losa de Yacambú a los 90 años de edad.

## SECCIÓN TÍPICA

En la Fig. 1 se muestra una sección típica de una presa CFRD con enrocado de buena calidad sobre fundación de roca de buena calidad, indicando la nomenclatura generalmente utilizada.

**Zona 1:** suelos impermeables que pueden actuar como sello de juntas y grietas y como contrapeso antes del llenado. Compactada con paso de equipo.

**Zona 2A:** de transición con material menor a 7.5 cm compactado con vibrocompactador en capas de 40 cm de 3 a 5 m de ancho.

**Zona 3A:** de transición con material menor a 40 cm, compactado con vibrocompactador en capas de 40 cm de 3 a 5 m de ancho.

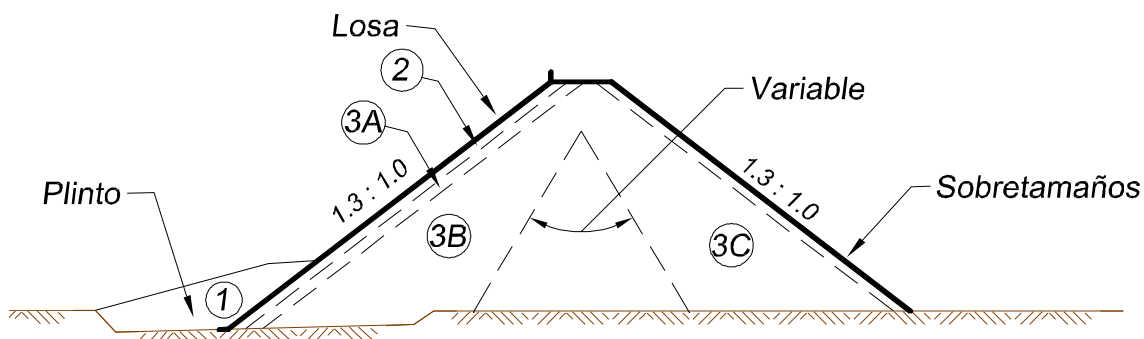
**Zona 3B:** enrocado con tamaño menor a 80 cm, compactado con vibrocompactador en capas de 80 cm.

**Zona 3C:** enrocado con tamaño menor a 1.6 m, compactado con vibrocompactador en capas de 1.6 m. Los sobretamaños se arriman a la cara externa. Cabe destacar que, para la colocación del material en la zona 3C, se promueve la segregación del material, empujando el material de tal manera que los gruesos queden en el fondo de la capa y los mas finos en la parte superior. Con ello

se logra una mayor permeabilidad del espaldón aguas abajo y se conserva mejor el equipo de compactación.

Con esta zonificación de materiales y considerando la impermeabilidad impuesta por la pantalla de concreto, se destacan las siguientes características:

- La permeabilidad de la presa aumenta hacia aguas abajo.
- La carga del agua sobre la cara de concreto tiene su resultante aguas arriba del eje de la presa.
- No intervienen subpresiones y presiones de poro.
- Alta resistencia a la fricción del enrocado y de la grava.
- Taludes pronunciados y menor volumen de material.
- Alta resistencia al sismo.
- Estabilidad del enrocado ante grandes flujos de agua. (Turimiquire 5 m<sup>3</sup>/s, Bailey 7.5 m<sup>3</sup>/s).
- Ventajas en el desvío del río al soportar grandes flujos a través del enrocado (Cethana 70 m<sup>3</sup>/s, Piedras 50 m<sup>3</sup>/s) y en la construcción parcial del terraplén tanto transversal como longitudinal ( Olmos Foto 2).
- Vulnerabilidad de la pantalla de concreto a filtraciones, que puede ser disminuida con las geomembranas.



**ZONA 1: Suelos impermeables**

**ZONA 2: Transición con material menor a 7.5 cm. Capas 40 cm**

**ZONA 3A: Transición con material menor a 40 cm. Capas 40 cm**

**ZONA 3B: Enrocado con material menor a 80 cm. Capas 80 cm**

**ZONA 3C: Enrocado con material menor a 160 cm. Capas 160 cm**

Fig. 1: CFRD Sección típica. Fundación y terraplén con rocas de buena calidad

Para rocas y fundaciones de menor calidad y para terraplenes de grava se modifica la geometría de las zonas según el caso y se usan taludes menos pronunciados, considerando los siguientes criterios:

- Estabilidad.
- Mínima deflexión de la losa.
- Drenaje.
- Vulnerabilidad al sobreborde. Aliviadero.
- Mejor utilización de los tipos de roca disponibles.



Foto 2: Presa Limón/Olmos. Construcción parcial y desvío Oct 2007.

Un aspecto muy importante al usar terraplenes de grava es que se puede dejar el aluvión del fondo del valle cuando se compone mayormente de materiales gravosos. Yacambú en Venezuela, Salvajina y Sogamoso en Colombia y Aguamilpa en México, son, entre otros, ejemplos de presas sobre aluvión pero con la pantalla y plinto llevados hasta la roca. En estos casos los taludes son mas tendidos, se provee de una zona de filtro, el espesor de las capas de las zonas 3b y 3C es menor y se toman consideraciones adicionales en el diseño de las juntas. En las Figuras 2 y 3 se muestran respectivamente secciones típicas de Aguamilpa en México y de Yacambú en Venezuela.

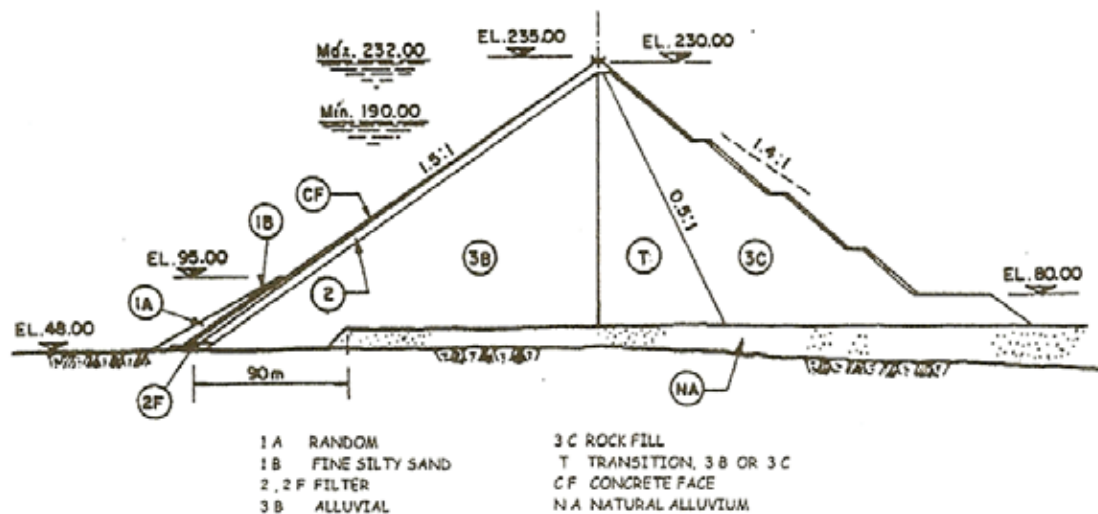


Fig.2: Presa Aguamilpa, México. Sección típica.

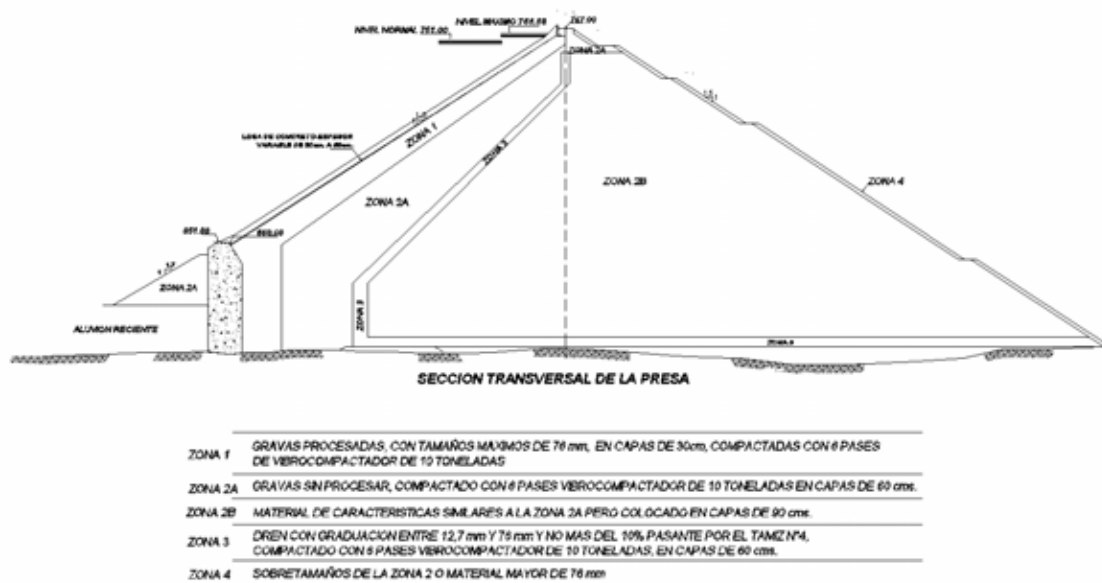


Fig. 3: Presa Yacambú, Venezuela. Sección típica.

La sección de la presa Yacambú tiene la particularidad de apoyar el espaldón aguas arriba y la losa sobre una presa de concreto gravedad con apoyo lateral de 60 m de alto y unos 30 m de ancho promedio.

En varios casos de aluviones muy profundos, donde resultaría muy costoso fundar la losa y el plinto en la roca del fondo del aluvión, se ha recurrido a fundar la losa y plinto sobre el aluvión del valle y buscar la impermeabilización del aluvión con diafragmas en base a concreto elastoplástico, tal como en las presas Santa Juana y Puclaro en Chile, Kekeya y Tangjiezi en China, Limón en Perú y una de las alternativas propuestas para Dos Bocas en Venezuela. En las Figuras 4, 5 y 6 se presentan las secciones típicas de las presas Santa Juana en Chile, Limón en Perú y una alternativa propuesta para Dos Bocas en Venezuela. Cabe señalar que esta alternativa

de CFGD para Dos Bocas cuesta un 30% menos que la alternativa de presa de grava con núcleo y dentellón de arcilla que llega al fondo del aluvión y con taludes mas tendidos y su diseño se puede hacer con los factores de seguridad que se requieran. Debe destacarse que en lo casi 50 años que tienen estas presas, una sola presa ha fallado en el mundo (presa Gouhou en China, 1993).

Para las presas con terraplén de gravas, es importante garantizar que cualquier infiltración a través de la losa o estribos no llegue a saturar el espaldón aguas abajo, para ello, y según la composición de las gravas que conforman la sección, se coloca una Zona de dren, tal como se observa en las Fig. 3 y 8 y además el material del espaldón aguas abajo, se coloca procurando en la colocación de capas que el material grueso quede bajo el material mas fino (Fig. 7), lo cual además de facilitar el drenaje, beneficia el trabajo del equipo de colocación y compactación.

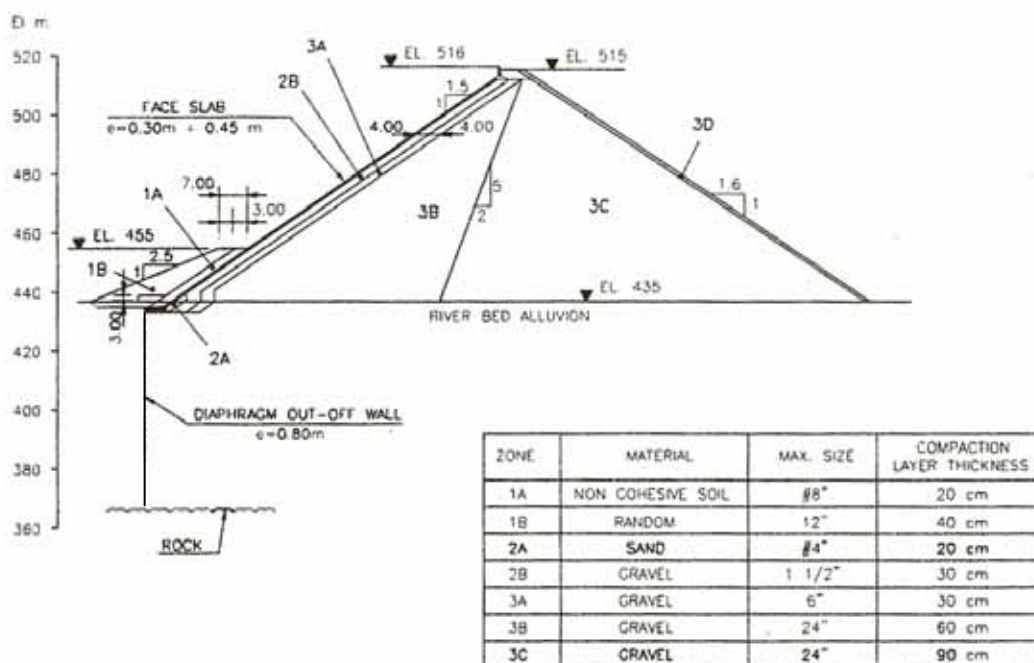


Fig. 4: Presa Santa Juana, Chile. Sección típica





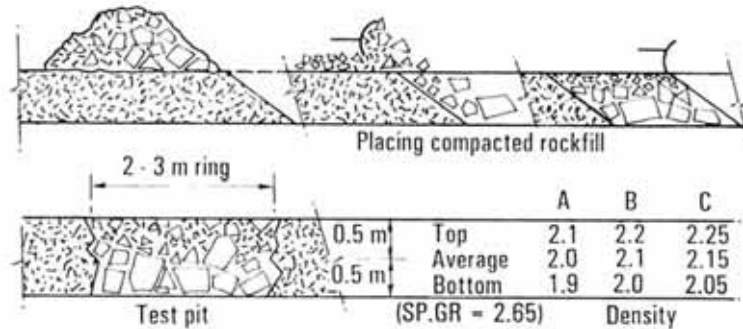


Fig. 7: Colocación de capas en espaldón aguas abajo.

**Módulo de Compresibilidad o módulo de deformación:** es un parámetro que se viene usando para comparar el comportamiento de los terraplenes en relación con sus asentamientos. Este módulo de compresibilidad expresado en Mpa se puede estimar mediante la siguiente expresión:

$$E_R = (\gamma \cdot h \cdot d) \cdot 9.81 / (s \cdot 1000)$$

Donde  $\gamma$  es el peso unitario del material en Ton/m<sup>3</sup>,  $h$  es la altura en metros de terraplén sobre un nivel dado del terraplén,  $d$  la profundidad en metros de terraplén bajo ese nivel y  $s$  el asentamiento medido en metros. En los terraplenes de grava los módulos de deformación medios están en el orden de 200 a 300 MPa, en los enrocados los módulos de deformación medios están en el orden de 30 a 90 MPa. La idea es que en el diseño de la sección de la presa los materiales colocados deben ser razonablemente similares, con módulos de deformación que no difieran sustancialmente.

### PANTALLA DE CONCRETO

La función de la pantalla en una CFRD es de servir de elemento impermeabilizante duradero y no removible. Al estar uniformemente soportada por la Zona 2 del terraplén, la losa no debe estar sometida a momentos de flexión; aunque si a esfuerzos de tensión y compresión causados por cambios de temperatura en el concreto y algunas deformaciones del terraplén, los cuales resultan independientes del espesor de la losa.

La losa se apoya sobre la Zona 2 de la presa, hoy día el procedimiento mas usado, que se considera apropiado para la preparación de la superficie de apoyo de la losa y la compactación apropiada del material en el borde es la utilización de un brocal-guía tal como se puede observar en las Fotos 3 y 4 y en la Fig. 10.

El espesor de la losa será el suficiente para lograr un elemento impermeable y durable que permita acomodar el acero de refuerzo y las juntas de goma, cobre u otras. El espesor de la losa mas usado es de 30 cm en la cresta, variando hacia abajo según la fórmula  $t \text{ (m)} = 0.30 \text{ m} + 0.001h \text{ (m)}$ . El concreto típicamente especificado es de 20 a 25 Mpa con agregado máximo de 38 mm. El acero de refuerzo es del 0.3 a 0.4% de la sección de diseño de la losa en cada dirección.

Se usan juntas verticales entre paños de losas y juntas perimetrales entre el plinto y la losa, no se usan juntas horizontales. En la Figura 8 se puede observar las juntas perimetrales y verticales utilizadas en la presa de Yacambú, las mismas son relativamente sencillas, por ejemplo no se usa sello de cobre ni junta de goma, en razón de que por el alto módulo de compresibilidad de la grava y el efecto del cañón estrecho se esperan asentamientos bajos. En la Figura 9, se presentan las juntas de la presa Limón/Olmos, donde se usan juntas verticales de compresión, juntas verticales de tensión y juntas perimetrales, con sellos de cobre, banda de polivinilo y masilla tipo IGAS. En la Foto 5, se muestra un detalle de la construcción de una junta vertical.





Foto 3: Presa Limón/Olmos. Brocales Zona 2, paño armado y paños vaciados.



Foto 4: Presa Limón/Olmos. Vaciado de paño de losa y curado con agua.





Foto 5: Presa Limón/Olmos. Detalle de junta vertical

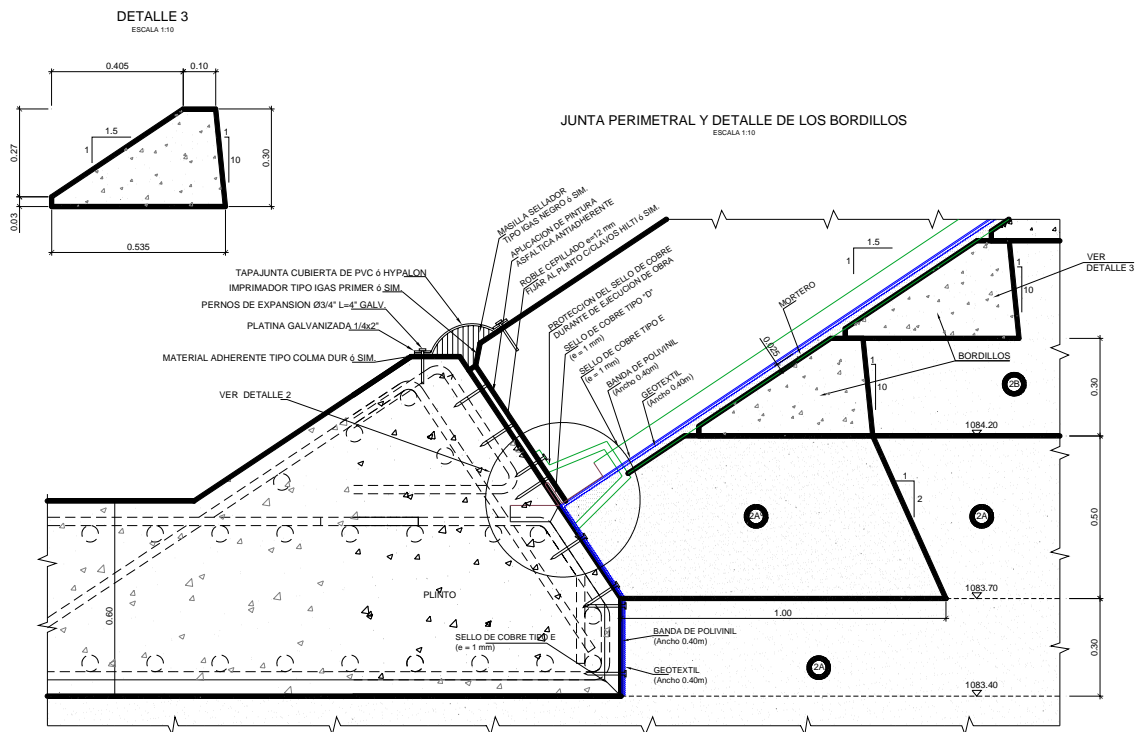


Fig. 10: Presa Limón/Olmos. Junta perimetral y brocal para Zona 2.

En la fabricación de la losa además del diseño cuidadoso de las mezclas, debe lograrse un curado efectivo que contribuya a evitar las grietas por retracción, en la Foto 4 se muestra un proceso de vaciado con curado con agua.

Ha sido poco el porcentaje de grietas significativas en las pantallas de concreto, pero si se han reportado numerosos casos de filtraciones debido fisuras y agrietamientos en las losas y por desperfectos en las juntas perimetrales. Estos han sido tratados de distintas formas en cada caso, lográndose la disminución de las filtraciones y, hasta ahora solo se tiene noticia de un solo caso de falla de presa CFRD, la presa Gouhou en Agosto de 1993 en China. En Venezuela está el caso de la presa Turimiquire, con filtraciones medias desde 1994, del orden de los 5 m<sup>3</sup>/s, por varias roturas en la losa de concreto. En Turimiquire se han ejecutado distintas acciones para disminuir las filtraciones, desde la colocación bajo carga hidráulica de mezclas de grava-arena y limo para tapar las grietas, a la colocación de membranas sintéticas. En la Foto 6, se muestra la colocación de la membrana impermeable SEAMAN CORPORATION con fibras de poliéster, Dacron de DuPont, XR-5 (high performance composite geomembrane), que se colocó en Turimiquire sin bajar el embalse. Al no concluirse el trabajo en su totalidad, las filtraciones disminuyeron recién colocadas las membranas pero luego recuperaron sus valores. Para el año 2008 las filtraciones están en el orden de 7 m<sup>3</sup>/s y se entiende que después de unos 13 años de filtraciones, se hace cada vez más urgente su reparación, pues el paso de tal cantidad de agua, necesariamente ha ido afectando el enrocado y la misma losa. Se tiene información de que el propietario de la obra tiene programado la colocación en la totalidad de la losa de una geomembrana de PVC, tipo Sibelon de CARPI.



Foto 6: Presa Turimiquire. Colocación de membrana (cortesía Ing. C. Pimentel)



Otros casos de reparación con membranas que pueden mencionarse es el de la presa Rouchain (60 m) en Francia y de la presa Paradela (110) en Portugal; en estos casos se usó membrana Rodimperm de Rodio.

## GEOMEMBRANAS

La utilización de la geomembranas sintéticas como elemento impermeable en presas empezó a finales de los años 50. El Boletín 38, año 1981, de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), trata del uso de membranas en presas y reporta 24 presas donde se han usado geomembranas. El Bolletín 78, año 1991, de ICOLD, trata del estado del arte del uso de geomembranas y reporta 70 presa con geomembranas. La base de datos de ICOLD del 2003, reporta 232 presas con geomembranas de las cuales 91 y 74 son presas de tierra y de enrocado respectivamente. En las presas de tierra el uso de geomembranas ha sido en un 60% para nuevas construcciones y 40% para rehabilitación de presas construidas. Como ejemplo, de nueva construcción, se tiene el caso de la presa Bovilla en Albania, año 1996 (ver Foto 7), 91 m de altura, localizada en un cañón estrecho en una zona sísmica, concebida originalmente como presa de grava con pantalla de concreto reforzado de 50 cm de espesor, con vigas adicionales y con sellos hidráulicos de PVC y cobre; posteriormente se sustituyó la pantalla de concreto por un geocompuesto consistente en una geomembrana de PVC de 3 mm de espesor, soldada a un geotextil de 700 g/m<sup>2</sup>. El geocompuesto se coloca sobre una capa de transición de 40 cm de espesor hecha de grava estabilizada con muy baja cantidad de cemento y luego sobre el se coloca una capa de concreto sin reforzar de 30 cm de espesor. El costo de esta solución resultó en un 50% menos que el de la losa de concreto reforzada.



Foto 7: Presa Bovilla, Albania. Geomembrana como elemento impermeable de una presa de grava.

Para el caso de la presa Dos Bocas, en Venezuela, una de las alternativas analizadas, consiste en la utilización de una geomembrana similar, la cual con el uso de la pantalla elastoplástica en el aluvión, contribuiría a lograr una solución segura a un costo de 30 a 40% menos que la alternativa de presa de grava con núcleo de arcilla.

## PLINTO

Elemento impermeable de conexión entre la losa o pantalla de concreto y la fundación de la presa. Esencialmente es una losa o un muro de concreto armado, con una junta perimetral y/o juntas adicionales. Adicionalmente sirve de acera para las inyecciones. En el caso de presas sobre aluviones profundos con diafragma vertical de concreto el plinto queda conectado al diafragma con una o mas juntas.

El ancho (plinto subhorizontal ) o altura (plinto subvertical) del plinto se define según el gradiente hidráulico que se considere apropiado para una calidad de roca. En la Tabla 1, se da una orientación en este sentido.

TABLA 1: Determinación del ancho del plinto.

Tipo de Fundación	Descripción	Máximo gradiente hidráulico	Ancho (m) en función de la carga hidráulica (h en m)
I	Roca competente	18	$h/18$
II	Roca muy fracturada	9	$h/9$
III	Roca meteorizada	6	$h/6$
IV	Roca muy meteorizada	4	$h/4$

En la Fig. 7 se muestra el plinto de la presa Yacambú donde los estribos son prácticamente verticales. En la Fig. 11, se muestra el plinto de la presa Ita en Brasil, donde se ha prolongado el ancho del plinto, para lograr un gradiente hidráulico mas bajo, del lado aguas abajo del plinto, bajo el terraplén. En las Figuras 12, 13 y 14 se muestran los plintos “abisagrados” en las presa con diafragma de Santa Juana y Puclaro en Chile y El Limón en Perú.

Debe destacarse la importancia de la junta perimetral plinto – losa, tanto en el diseño de los elementos que la impermeabilizan como en la geometría entre la cara del plinto y la losa, según los ángulos horizontales y verticales de sus ejes; dicho de otra forma la losa y la cara del plinto deben mantener siempre un ángulo de 90° y la losa debe tener movimiento libre por asentamientos del terraplén. Otro aspecto que debe cuidarse, cuando se prolonga el plinto hacia aguas abajo es que entre la losa y el plinto aguan abajo, se deje por lo menos 60 cm.

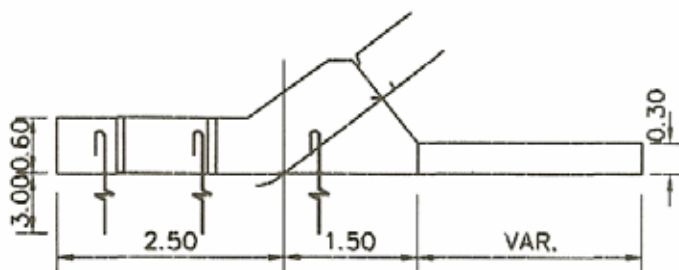


Fig. 11: Presa Ita (Brasil), Plinto con prolongación aguas abajo.

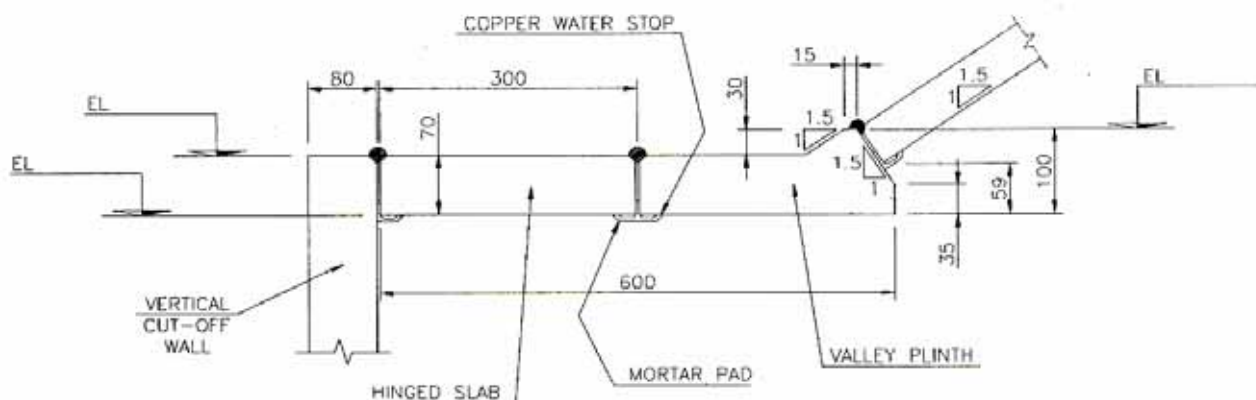


Fig. 12. Presa Santa Juana (Chile). Plinto en conexión con diafragma.



Tal como se ha expuesto, en aquellos sitios de presa con terraplén de grava y pantalla de concreto y con aluvión profundo, el elemento impermeable de la fundación se ha logrado con un diafragma excavado en el aluvión. En la presa Limón del proyecto Olmos, proyectada y actualmente en construcción por la firma ODEBRECHT de Brasil, se está construyendo un diafragma con las siguientes características generales: concreto plástico a base de cemento, agua, bentonita y agregados con una relación agua cemento de 0.36; para una resistencia a la compresión a los 28 días del orden de 90 Kg/cm<sup>2</sup> y una permeabilidad del orden de 10<sup>-7</sup> cm/s.

The drawing consists of three main parts: two detailed views of the dam crest and one full cross-section view.

- DETALLE A**: A detailed view of the dam crest. It shows a central vertical channel with a diameter of 0.17. The channel is lined with a material labeled "ROBLE GEPILLADO  $\phi=0.25$  m". The channel is surrounded by a "MASILLA SELLADOR TIPO GAS NEGRO O SIMILAR" (sealing compound). The channel is set into a concrete structure with a depth of 0.30. The channel is also surrounded by a "SELO DE COBRE TIPO 'C'" (copper seal). The channel is also surrounded by a "SELO DE COBRE TIPO 'C'" (copper seal).
- DETALLE B**: A detailed view of the dam crest, similar to Detail A, but showing a different cross-section of the channel and the surrounding structure.
- Cross-section view**: A full cross-section of the dam. The dam is shown with a concrete structure and a central channel. The channel is lined with a material labeled "ROBLE GEPILLADO  $\phi=0.25$  m". The channel is surrounded by a "MASILLA SELLADOR TIPO GAS NEGRO O SIMILAR" (sealing compound). The channel is set into a concrete structure with a depth of 0.30. The channel is also surrounded by a "SELO DE COBRE TIPO 'C'" (copper seal). The channel is also surrounded by a "SELO DE COBRE TIPO 'C'" (copper seal). The dam is shown with a concrete structure and a central channel. The channel is lined with a material labeled "ROBLE GEPILLADO  $\phi=0.25$  m". The channel is surrounded by a "MASILLA SELLADOR TIPO GAS NEGRO O SIMILAR" (sealing compound). The channel is set into a concrete structure with a depth of 0.30. The channel is also surrounded by a "SELO DE COBRE TIPO 'C'" (copper seal). The channel is also surrounded by a "SELO DE COBRE TIPO 'C'" (copper seal). The dam is shown with a concrete structure and a central channel. The channel is lined with a material labeled "ROBLE GEPILLADO  $\phi=0.25$  m". The channel is surrounded by a "MASILLA SELLADOR TIPO GAS NEGRO O SIMILAR" (sealing compound). The channel is set into a concrete structure with a depth of 0.30. The channel is also surrounded by a "SELO DE COBRE TIPO 'C'" (copper seal). The channel is also surrounded by a "SELO DE COBRE TIPO 'C'" (copper seal).

- 15 -





Foto 8: Presa Limón/Olmos. Brocales Zona 2, plinto, losa de conexión a diafragma y juntas.



Fig. 15: Presa Limón/Olmos. Proceso de vaciado de diafragma (cortesía ODEBRECHT).

## REFERENCIAS

1. Cooke, J. Barry and Sherad, James, 1985. "*Concrete-Face Rockfill Dams. Design, Construction and Performance*". American Society of Civil Engineers. Proceeding Geotechnical Engineering Division.
2. Guevara, Rafael, 1993. "*Yacambú CFRD, Venezuela*". International Symposium on High Earth-Rockfill Dams. China. ICOLD-CSHEE.
3. Guevara, Rafael, 1996. "*Presa Yacambú. Criterios de Diseño y Experiencias de Construcción*". XIV Seminario Venezolano de Geotecnia. SVG.
4. Hidrolara, 2005. "*Ingeniería Conceptual Embalse Dos Bocas. Estado Portuguesa*" MGA Ingenieros Civiles S.C.
5. ICOLD, 1989. "*Rockfill Dams with Concrete Facing. State of the Art*". Bulletin 70.
6. J. Barry Cooke, 1997. "*Developments in High Concrete FACE Rockfill Dams*". Hydropower and Dams. Issue Four, Volume Four.
7. J. Barry Cooke, 2000. "*Concrete Face Rockfill Dams*". 20<sup>th</sup> ICOLD Conference and Beijing 2000 Symposium on Concrete Face Rockfill Dams.
8. Odebrecht, 2005. "*Obras de Trasvase del Proyecto Olmos. Concesionaria Trasvase Olmos S.A. Expediente Técnico*".
9. Scuero, A.M. and Vaschetti, G.L, 2004 "*Geomembrane systems: 45 years history of effective sealing of dams*". HP&D, Issue 1, 2004.
10. Sherad, James and Cooke, J. Barry, 1987 "*Concrete-Face Rockfill Dam*". American Society of Civil Engineers. Journal of Geotechnical Engineering. Special Memorial Issue.