

Criterios de diseño y experiencias de construcción en presas de enrocado y/o grava con cara de concreto y/o geo membranas

Rafael E. Guevara Briceño¹
reguevarab@gmail.com

¹GLG Ingenieros Consultores S.C., Caracas, Venezuela
Historia del Artículo

Recibido: 24 de Septiembre de 2018

Aceptado: 8 de Noviembre de 2018

Disponible online: 30 de Noviembre de 2018

Resumen: El diseño de presas de enrocado o grava con cara de concreto (CFRD y CFGD), sin menoscabo de aplicaciones científicas tales como el análisis por elementos finitos, ha sido esencialmente empírico, basado en el comportamiento y precedencia de presas construidas; 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 ocho presas tipo CFRD, la más alta Yacambú de 162 m; en otros países de Sur América existen unas 40 de estas presas, algunas tan altas como Campos Novos en Brasil de 200m y Sogamoso en Colombia de 195 m. 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 geo membranas de PVC o PEAD como elemento impermeable tanto en rehabilitación de presas existentes como en la construcción de presas nuevas. Otro componente es la pantalla de concreto elastoplástico como elemento de control de filtraciones en fundación aluvional. En este artículo se presenta un resumen sobre avances en criterios de diseño y prácticas de construcción en los últimos años en presas de grava con elementos impermeables de concreto o de geo membranas y fundadas en material aluvional con pantallas elastoplásticas.

Palabras clave: CFRD (Concrete Face Rockfill Dams); CFGD (Concrete Face Gravel Dams); Cara de Concreto; Geo Membrana; Pantalla Elastoplástica.

Design criteria and construction experiences in rockfill dams and / or gravel with concrete face and / or geo membranes

Abstract: Design of dams of rock or gravel with concrete face (CFRD and CFGD), without prejudice to scientific applications such as finite element analysis, has been essentially empirical, based on behavior and precedence of constructed dams; for this reason, it is of particular importance disseminate and share information and experiences in the design, construction and operation of dams. In Venezuela have been built eight dams type CFRD, the highest Yacambú 162 m; elsewhere in South America, there are about 40 of these dams, some as high as Campos Novos in Brazil of 200m and Sogamoso in Colombia of 195 m. On the other hand, in this type of CFRD dam as in concrete high-rise dams (RCC, Arc Dome, Concrete Gravity), there are using geo membranes of PVC or HDPE as a waterproof element both in rehabilitation of existing dams and construction of new dams. Another component is the elastoplastic concrete screen as alluvial foundation seepage control element. This article is a summary on advances in design criteria and construction practices in recent years in

dams of gravel with impermeable elements on concrete or geo membranes and with foundations on alluvial material with elastoplastic screens.

Keywords: CFRD (Concrete Face Rockfill Dams); CFGD (Concrete Face Gravel Dams); Face of Concrete; Geo Membrane; Elastoplastic Screen.

I. INTRODUCCIÓN

Las presas de enrocado y de grava con cara de concreto (CFRD y CFGD) se han desarrollado en los últimos 40 años y en la actualidad hay presas de este tipo en más 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 el comportamiento y seguimiento de presas construidas; 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 este artículo se presenta un apretado resumen de criterios de diseño y prácticas de construcción mejoradas en los últimos 20 años en este tipo de presas, haciendo particular referencia a experiencias y lecciones aprendidas tanto para CFRD como para presas donde se han usado geo membranas de PVC y PEAD y donde se han usado pantallas elastoplásticas para el control de flujo en fundación aluvional. Se han seleccionado componentes y detalles resaltantes de estas presas, con el apoyo de ilustraciones y con ejemplos como: Yacambú y Dos Bocas (Venezuela), Limón/Olmos (Perú), Santa Juana y Puclaro (Chile) y Bovilla (Albania).

II. 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.



Figura 1: Barry Cooke, escalando la cara de la presa Yacambú a los 90 años de edad

III. SECCIÓN TÍPICA CFRD

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

- Zona 1: suelos impermeables que pueden actuar como sello de juntas y grietas y como contrapeso antes del llenado; compactado con paso de equipo.
- Zona 2: material granular de transición con material menor a 7,5 cm, compactado con vibro compactador en capas de 40 cm de 3 a 5 m de ancho.
- Zona 3A: material granular de transición con material menor a 40 cm, compactado con vibro compactador en capas de 40 cm de 3 a 5 m de ancho.
- Zona 3B: enrocado, rocas con tamaño menor a 80 cm, compactado con vibro compactador en capas de 80 cm.
- Zona 3C: enrocado, rocas con tamaño menor a 1,6 m, compactado con vibro compactador en capas de 1,6 m. Los bloques de gran sobre tamaños (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 más 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 cara de concreto, se destacan las siguientes características.

- La permeabilidad de la presa aumenta hacia aguas abajo.
- Taludes pronunciados y menor volumen de material.
- La carga del agua sobre la cara de concreto tiene su resultante aguas arriba del eje de la presa.
- No intervienen sub presiones y presiones de poro.
- Alta resistencia a la fricción del enrocado y de la grava.

- Alta resistencia a movimientos sísmicos.
- Estabilidad del enrocado ante grandes flujos de agua. (Turimiquire $5 \text{ m}^3/\text{s}$, Bailey $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Ventajas en el desvío del río al soportar grandes flujos a través del enrocado (Cethana $70 \text{ m}^3/\text{s}$, Piedras $50 \text{ m}^3/\text{s}$) y en la construcción parcial del terraplén tanto transversal como longitudinal (Olmos Figura 3).
- Vulnerabilidad de la cara de concreto a filtraciones, que puede ser disminuida con geomembranas.

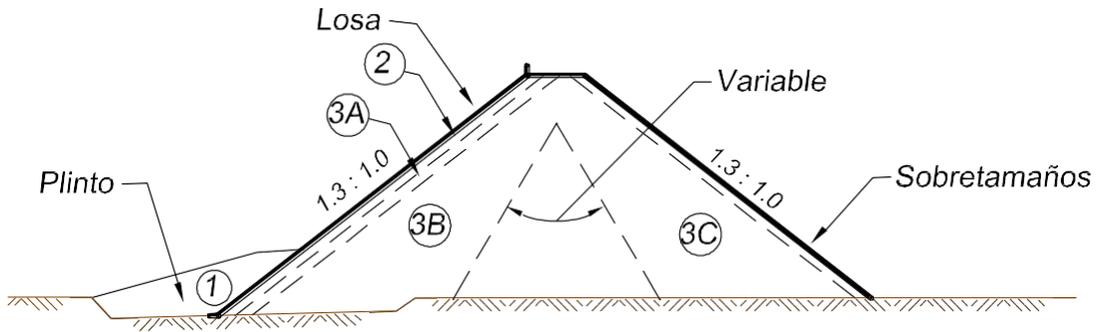


Figura 2: CFRD. Sección típica. Fundación y terraplén con roca de buena calidad [5]

Para roca 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 cara.
- Drenaje.
- Vulnerabilidad al sobre borde. Aliviadero.
- Mejor utilización de los materiales disponibles.



Figura 3: Presa Limón/Olmos. Construcción parcial y desvío Oct 2007 [11]

Un aspecto muy importante al usar terraplenes de grava es que se puede dejar el aluvión del fondo del valle, cuando está compuesto 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 más 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 la cara de concreto. En las Figuras 2 y 3 se muestran respectivamente secciones típicas de Aguamilpa en México y de Yacambú en Venezuela. La sección de la presa Yacambú tiene la particularidad de apoyar el espaldón aguas arriba y la cara sobre una presa de concreto gravedad de 60 m de alto y unos 30 m de ancho promedio.

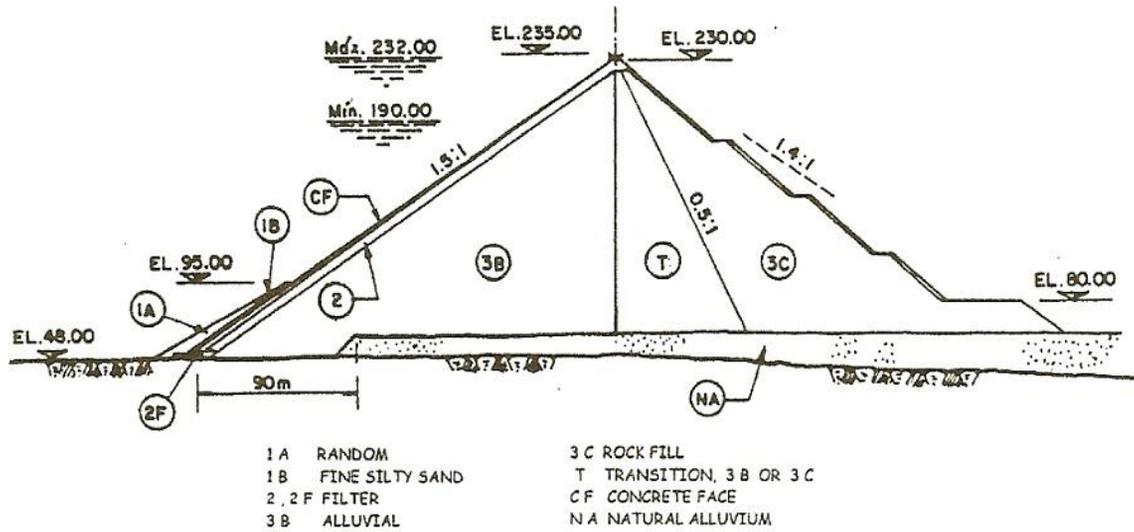


Figura 4: Presa Aguamilpa, México. Sección típica [6]

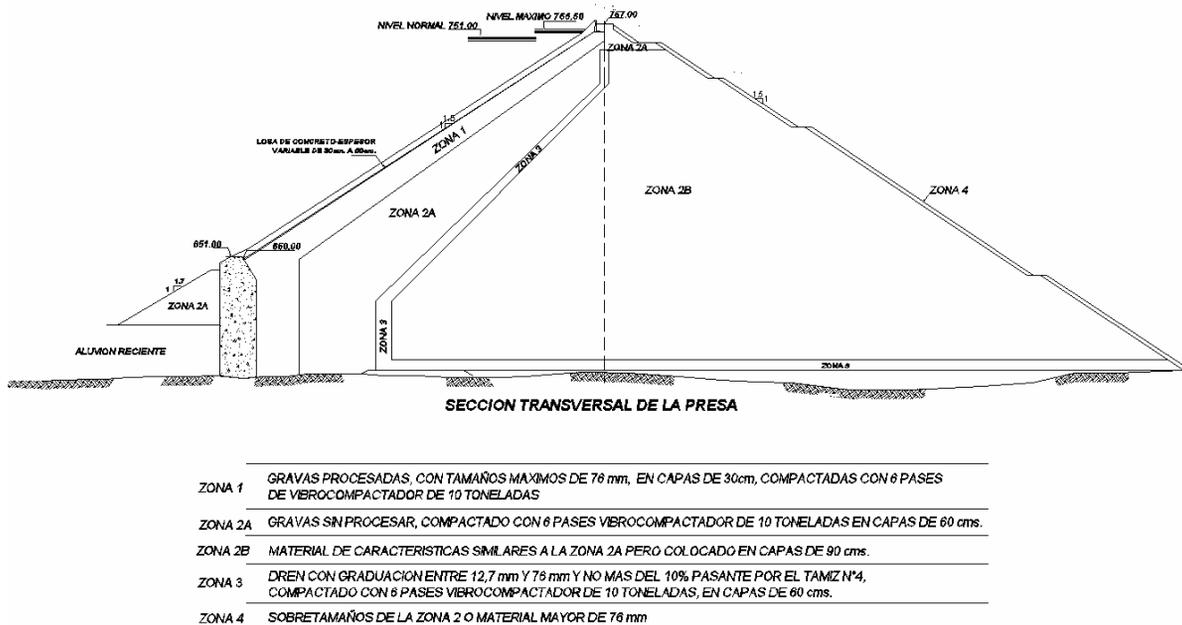


Figura 5: Presa Yacambú, Venezuela. Sección típica [2]

En varios casos de aluviones muy profundos, donde resultaría muy costoso fundar la cara y el plinto en la roca al del fondo del aluvión, se ha recurrido a fundar la cara y plinto sobre el aluvión del valle y buscar la

impermeabilización del material granular natural de fundación con diafragmas de concreto elastoplástico, tal como en las presas Santa Juana y Puclaro en Chile [7], Kekeya y Tangjiezi en China [7], Limón en Perú [8] y

una de las alternativas propuestas para Dos Bocas en Venezuela [4]. En las Figuras 6, 7 y 8 se presentan las secciones típicas de Santa Juana, Limón y Dos Bocas. Cabe señalar que la 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 más tendidos y su diseño se puede hacer con los factores de seguridad que se requieran.

Las CFRD y CFGD con las secciones típicas usadas han demostrado su estabilidad y seguridad. En casi 50 años que tienen estas presas, una sola presa ha fallado en el mundo (Gouhou en China, 1993. Nivel de aguas

máximas mantenido por varios días y defecto en la junta losa-parapeto).

Para las presas con terraplén de gravas, es importante garantizar que cualquier filtración a través de la cara 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 Figura 5 y 8; además, el material del espaldón aguas abajo, se coloca procurando que el material grueso quede bajo el material más fino [7], lo cual además de facilitar el drenaje, favorece el trabajo del equipo de colocación y compactación.

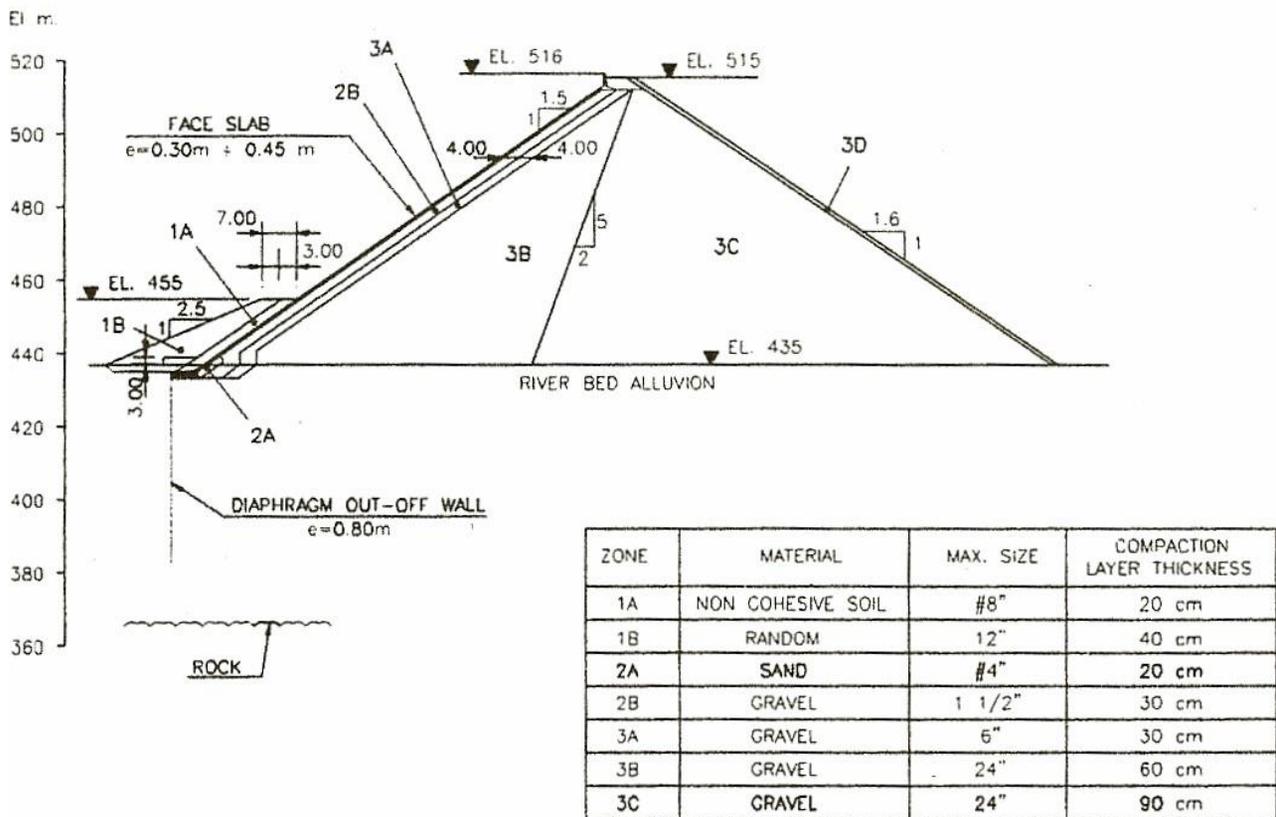


Figura 6: Presa Santa Juana, Chile. Sección típica [7]

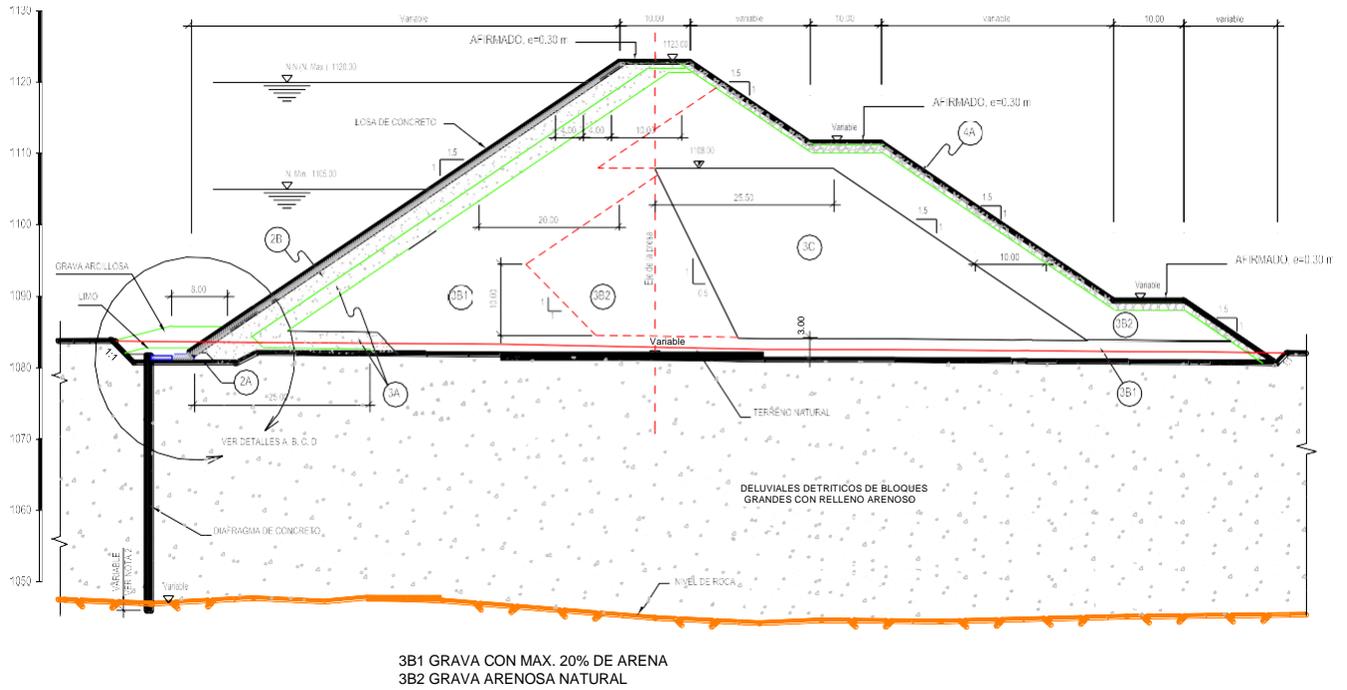


Figura 7: Presa Limón, Perú. Sección típica [8]

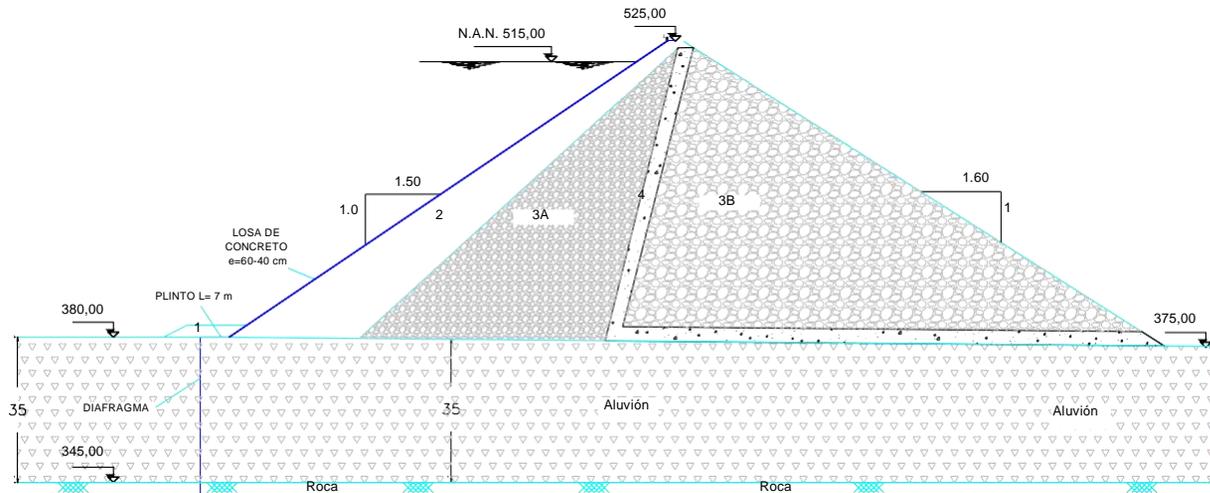


Figura 8: Presa Dos Bocas, Venezuela. Alternativa de CFGD [4]

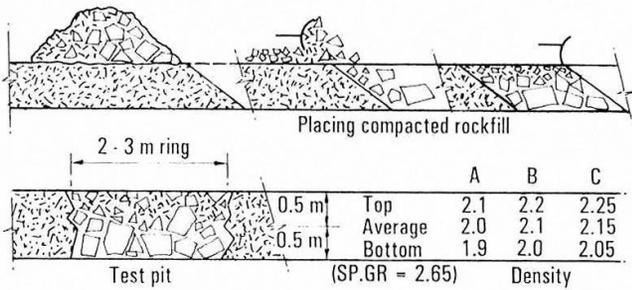


Figura 9: Colocación de capas en espaldón aguas abajo [1]

IV. MÓDULO DE COMPRESIBILIDAD O MÓDULO DE DEFORMACIÓN

El módulo de compresibilidad se viene usando para comparar el comportamiento de los terraplenes en relación con sus asentamientos; expresado en MPa se puede estimar mediante la expresión:

$$ER = (\gamma \cdot h \cdot d) \cdot 9.81 / (s \cdot 1000) \quad [5] \quad (1)$$

Donde γ es el peso unitario del material en Ton/m^3 , h es la altura en metros de terraplén sobre un nivel dado de la presa, 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 están en el orden de 30 a 90 MPa. En el diseño de la sección de la presa los materiales colocados deben ser razonablemente similares, con módulos de deformación que no difieran sustancialmente.

V. CARA (LOSA) DE CONCRETO

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

La losa se apoya sobre la Zona 2 de la presa, hoy día el procedimiento más usado, 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 o bordillo tal como se puede observar en las Figuras 10, 11 y 12.

El espesor (t) de la losa (cara) debe ser 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 cara más usado es de 30 cm en la cresta, variando hacia abajo según la fórmula $t(m) = 0.30 m + 0.001h(m)$ [5], siendo h la altura de la presa.

El concreto típicamente especificado tiene una resistencia a la compresión (28 días) 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 cara en cada dirección. Se usan juntas verticales entre paños de caras y juntas perimetrales entre el plinto y la cara, no se usan juntas horizontales. En la Figura 13 se puede observar las juntas perimetrales y verticales utilizadas en la presa de Yacambú, las mismas son relativamente sencillas. Puede apreciarse, por ejemplo, la ausencia de sello de cobre y de sello de goma, debido al alto módulo de compresibilidad de la grava y al efecto confinante del cañón estrecho, lo que conlleva a asentamientos bajos. En las Figuras 12 y 14, se presentan las juntas usadas en la presa Limón/Olmos: juntas verticales de compresión, juntas verticales de tracción y juntas perimetrales, con sellos de cobre, banda de polivinilo y masilla. En la Figura 15, se muestra un detalle de la construcción de una junta vertical.



Figura 10: Presa Limón/Olmos. Brocales Zona 2, paño armado y paños vaciados [11]

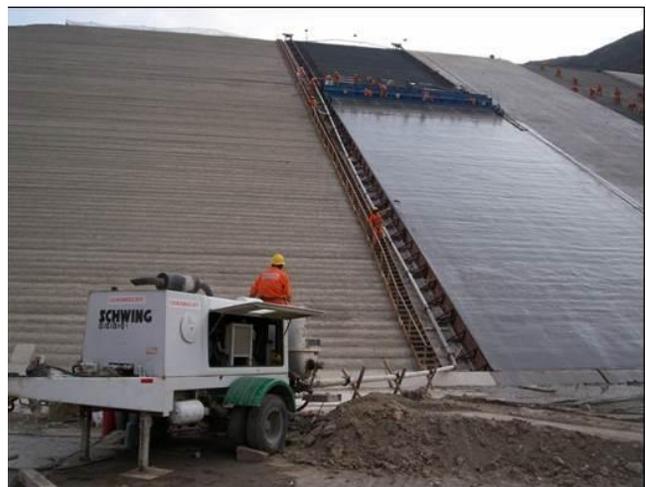


Figura 11: Presa Limón/Olmos. Vaciado de paño de cara y curado con agua [11]

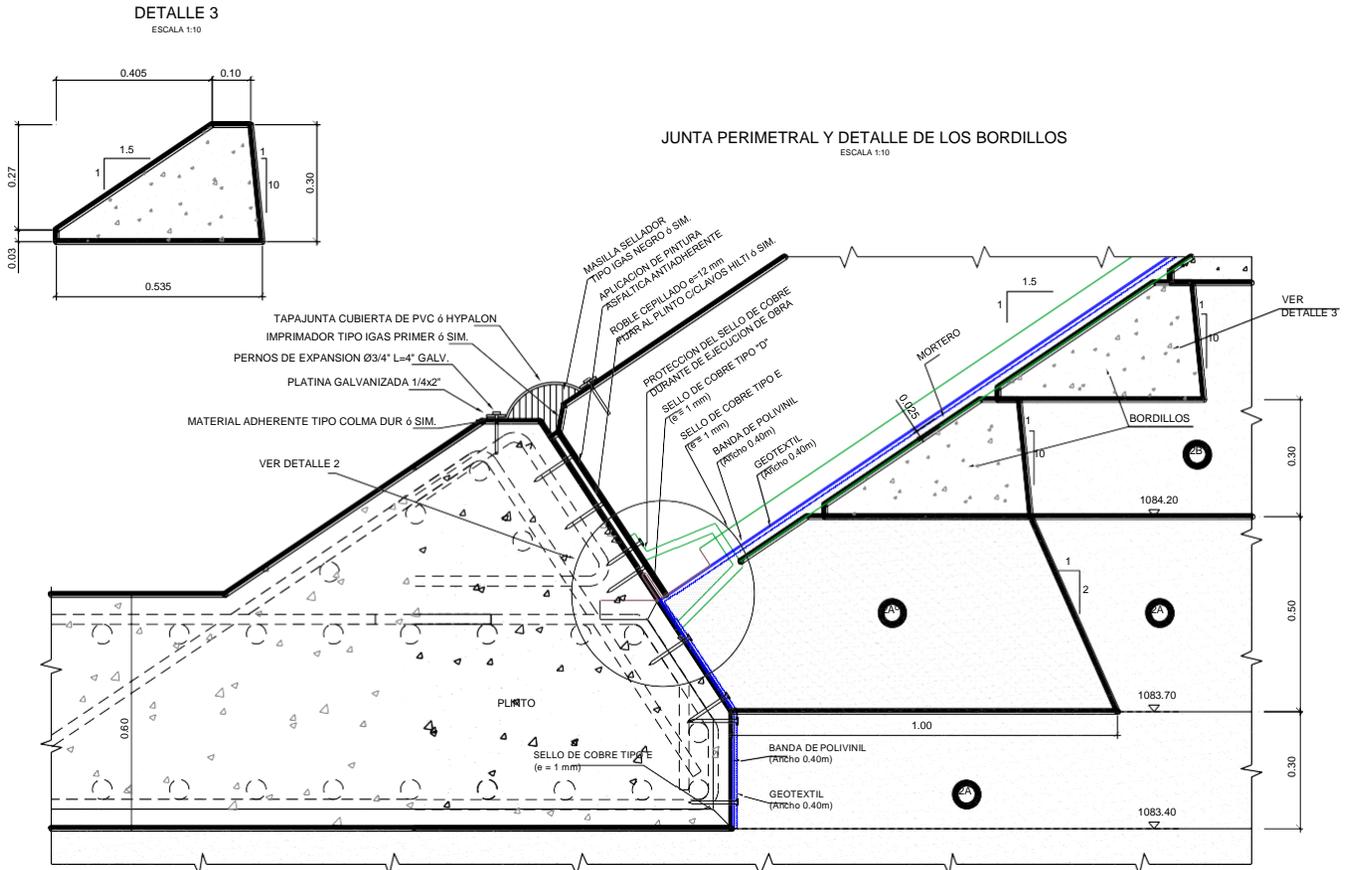


Figura 12: Presa Limón/Olmos. Junta perimetral y brocal para Zona [8]

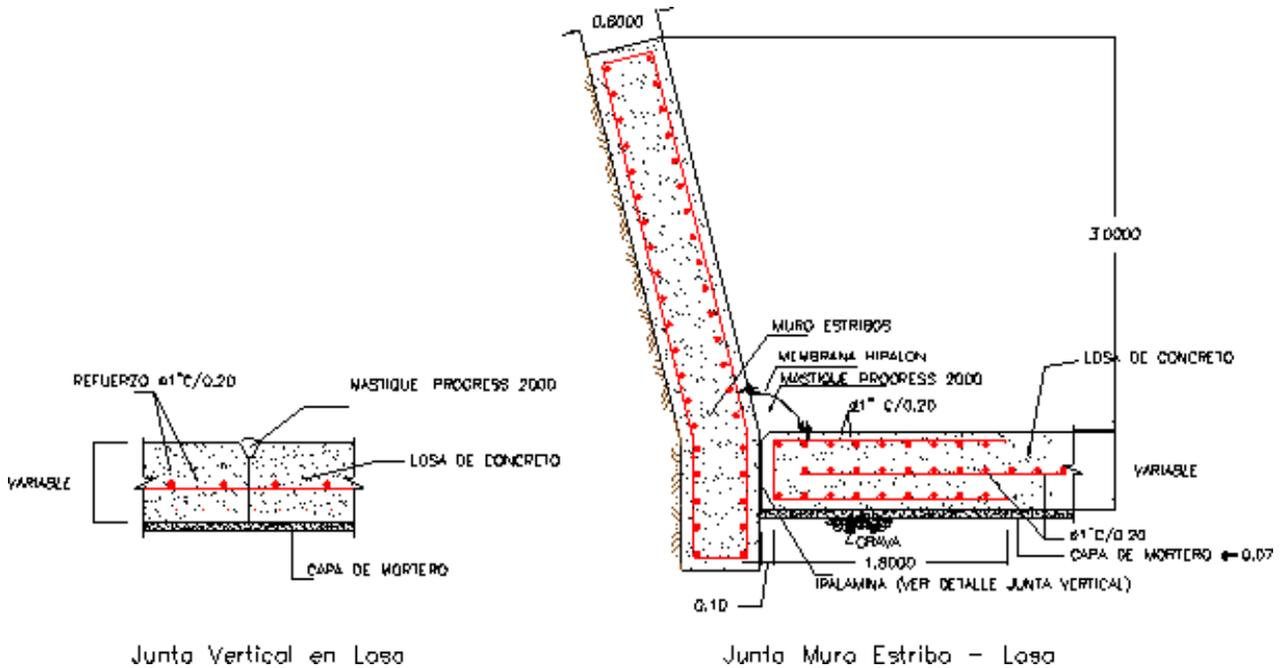


Figura 13: Presa Yacambú. Juntas [2]

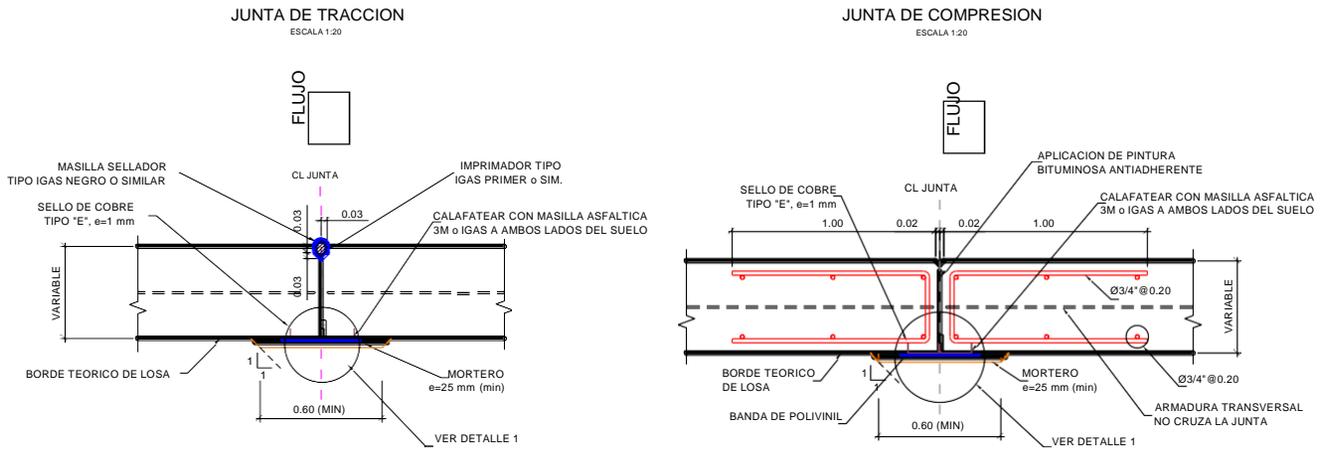


Figura 14: Presa Limón/Olmos. Juntas verticales [8]



Figura 15: Presa Limón/Olmos. Detalle de junta vertical [11]

En la fabricación de la cara, además del diseño cuidadoso de las mezclas de concreto, debe lograrse un curado efectivo que contribuya a evitar las grietas por retracción, en la Figura 11 se muestra un proceso de vaciado y con curado con agua. Ha sido poco el porcentaje de grietas significativas en las pantallas de concreto, pero si se han reportado casos de filtraciones debido a fisuras y agrietamientos en las losas de concreto 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, que falla por nivel de aguas máximas mantenido por varios días, defecto en la junta losa-parapeto y filtraciones con arrastre de material.

En Venezuela está el caso de la presa Turimiquire, con filtraciones medias desde 1994, del orden de los $5 \text{ m}^3/\text{s}$, a través de roturas en la cara de concreto. En esta presa se han ejecutado distintas acciones para disminuir las filtraciones, desde colocación bajo carga

hidráulica de mezclas de grava, arena y limo para tapar las grietas, hasta la colocación de membranas sintéticas. En la Figura 16, se muestra la colocación de la membrana impermeable SEAMAN CORPORATION con fibras de poliéster-dacrón de DuPont, XR-5 (high performance composite geomembrane), colocada sin bajar el embalse. Al no concluirse el trabajo, las filtraciones disminuyeron recién colocada la membrana pero luego recuperaron su magnitud inicial. Para el año 2008 las filtraciones llegaron a unos $7 \text{ m}^3/\text{s}$ y se entiende que después de unos 21 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 a la misma cara. Se tiene información de que el propietario de la obra tiene programado la colocación, sobre la totalidad de la cara, de una geo membrana de PVC, tipo Sibelon de CARPI. En todos los intentos de reparación anteriores se ha trabajado con niveles de agua en el embalse sobre las áreas dañadas, se considera que para garantizar el éxito de la reparación debe bajarse el nivel del embalse y trabajar las reparaciones en seco.



Figura 16: Presa Turimiquire. Colocación de membrana (cortesía Ing. C. Pimentel)

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

VI. GEO MEMBRANAS

La utilización de geo membranas 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 casos con esta solución. El Boletín 78, año 1991 de ICOLD, trata del estado del arte del uso de geo membranas y reporta 70 presas con geo membranas. La base de datos de ICOLD del 2003, reporta 232 presas con geo membranas de las cuales 91 y 74 son presas de tierra y de enrocado respectivamente. En las presas de tierra el uso de geo membranas ha sido en un 60% para nuevas

construcciones y 40% para rehabilitación de presas construidas. Como ejemplo de presa de grava y de nueva construcción, se tiene la presa Bovilla en Albania, año 1996 (Figura 17), 91 m de altura, localizada en un cañón estrecho en zona sísmica, concebida originalmente como presa de grava con cara de concreto reforzado de 50 cm de espesor, con vigas adicionales y con sellos hidráulicos de PVC y cobre; posteriormente, se sustituyó la cara de concreto por un geo compuesto conformado por una geo membrana de PVC de 3 mm de espesor soldada a un geotextil de 700 g/m². El geo compuesto se colocó sobre una capa de transición de 40 cm de espesor hecha de grava estabilizada con muy baja cantidad de cemento y luego sobre la misma se colocó una capa de concreto sin reforzar de 30 cm de espesor. El costo de esta solución resultó en un 50% menor al de la cara de concreto reforzada.



Figura 17: Presa Bovilla, Albania. Geo membrana 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 geo membrana similar, la cual, sumada al uso de la pantalla elastoplástica en el aluvión, contribuiría a lograr una solución segura a un costo de 30 a 40% menos al de la alternativa de presa de grava con núcleo de arcilla.

VII. PLINTO

El plinto es el elemento impermeable de conexión entre la losa de concreto (cara en talud de la presa) y la fundación de la presa. Esencialmente es una losa o un

muro de concreto armado, con una junta perimetral. Adicionalmente sirve de acera para las inyecciones de la roca de fundación. En el caso de presas sobre aluviones profundos con diafragma o pantalla vertical de concreto, el plinto queda conectado al diafragma con una o más juntas (Plinto abisagrado).

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

Tabla I: Determinación del ancho del plinto

Tipo de Fundación	Calidad de la roca 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 Figura 13 se muestra el plinto de la presa Yacambú donde los estribos son prácticamente verticales. En la Figura 18, se muestra el plinto de la presa Ita en Brasil, donde se ha prolongado el ancho del plinto hacia el lado aguas abajo bajo el terraplén, para lograr un gradiente hidráulico menor. En las Figuras 19, 20 y 21 se muestran plintos "abisagrados" en las presas con diafragma en la fundación de Santa Juana y Puclaro en Chile y El Limón en Perú.

Debe destacarse la importancia de la junta perimetral plinto – cara, tanto en el diseño de los elementos que la impermeabilizan como en la geometría entre plinto y cara, según los ángulos horizontales y verticales de sus ejes, de manera de garantizar que la cara de la losa y la cara del plinto formen un ángulo de 90°; la cara 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 cara y el plinto aguas abajo, se deje una separación de por lo menos 60 cm en sentido vertical.

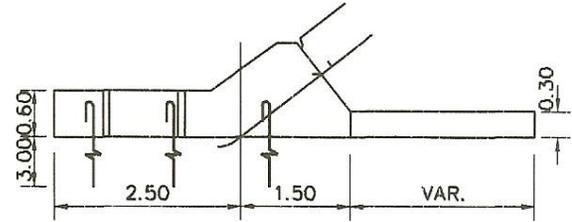


Figura 18: Presa Ita (Brasil), Plinto con prolongación aguas abajo [7] °

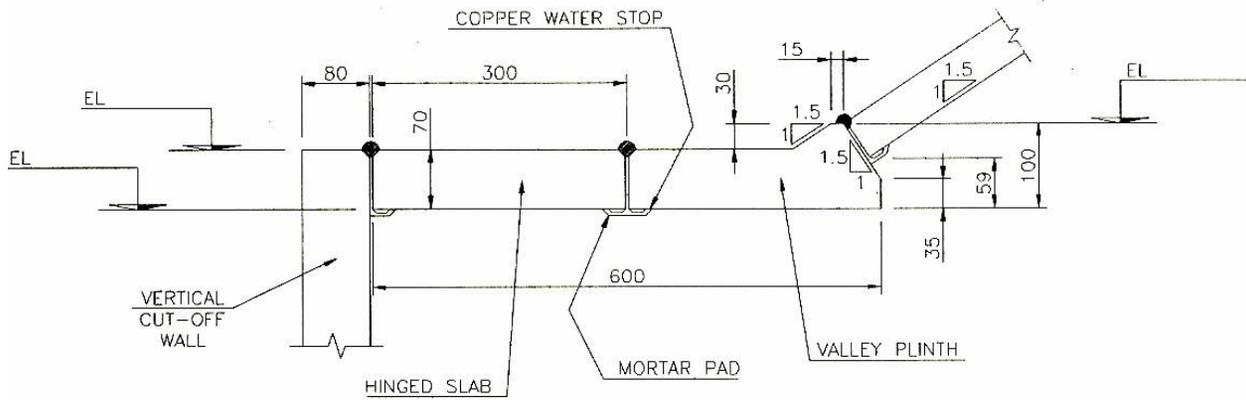


Figura 19: Presa Santa Juana (Chile). Plinto abisagrado en conexión con diafragma [7]

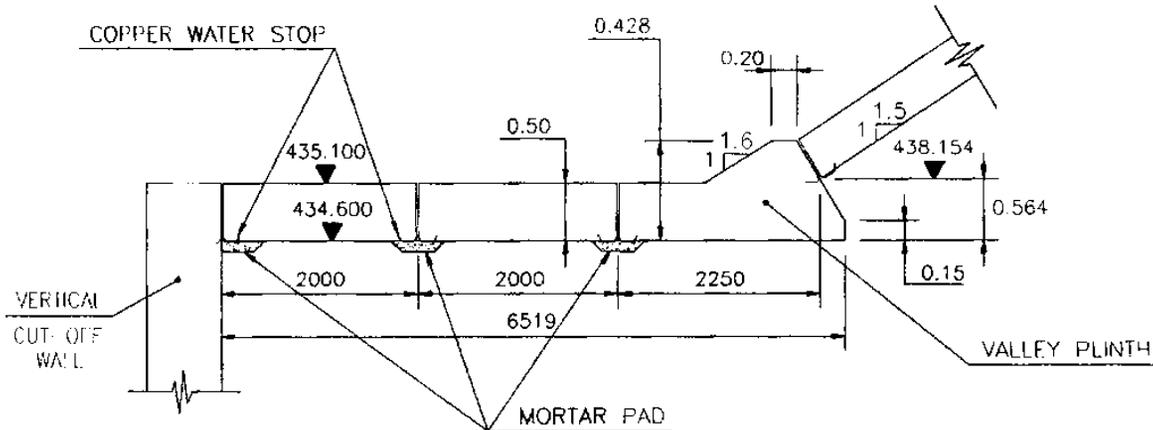


Figura 20: Presa Puclaro (Chile). Plinto abisagrado en conexión con diafragma [7]

VIII. DIAFRAGMA

Tal como se ha expuesto, en aquellos sitios de presa con terraplén de grava, cara de concreto y con aluvión profundo, como elemento impermeable de la fundación se ha usado un diafragma de concreto plástico excavado en el aluvión. En la presa Limón del proyecto Olmos, se construyó un diafragma con las siguientes características generales: concreto plástico obtenido

con mezcla de cemento, agua, bentonita y agregados con una relación agua cemento de 0.36; resistencia a la compresión (28 días) del orden de 90 Kg/cm² y permeabilidad del orden de 10⁻⁷ cm/s.

En las Figuras 21, 22 y 23, se muestran algunos aspectos constructivos de este diafragma.

