

## Presas de Concreto Trapecial. Evolución Diseño y Construcción

### 1. Introducción

Las presas de Concreto Trapecial, o de relleno-cementado con cara de concreto (i.e. Hardfill) se construyen agregando un aglutinante y agua a los materiales encontrados en el lecho del río o sus alrededores (Raphael, 1976 [52]). Estas presas se construyen generalmente con secciones simétricas, a las que se les habilita con una cara impermeable en el talud aguas arriba.

Presentan alturas que varían entre 3 y 107 m (eg. Cai et al., 2012 [53a]; Mason et al., 2008 [54]; Fujisawa et al. 2012 [55a]; Guillemot et al., 2012 [56]; Xiao et al., 2008) [57], tradicionalmente se les ha catalogado dentro de las presas pequeñas a medianas (eg. Cai et al. [53a], 2012; Guillemot et al., 2012, [56]).

En particular, la presa más alta de relleno-cementado construida hasta el momento, reportada en la literatura técnica internacional, es la presa Cindere de 107 m de altura y 84,300,000 m<sup>3</sup> de capacidad en Turquía, diseñada como una presa de relleno-cementado (eg. Batmaz 2003 [58], Guillemot et. al 2012 [56]). Por lo general la sección de estas presas es trapecial, dicha geometría minimiza los esfuerzos dentro del cuerpo de la presa y reduce sus oscilaciones durante un evento sísmico (eg. Xiong et al., 2012, [59a]).

Las principales ventajas de una presa de este tipo son: construcción simple y rápida ya que la demanda de resistencia sobre el terreno de cimentación es relativamente menor a la requerida en otros tipos de presas (eg. Xiong et al., 2012, [59a]), tales como las de gravedad de sección típica.

Asimismo, las especificaciones de los agregados y del cementante son menos rigurosas, lo cual se traduce en una reducción del costo de producción del relleno-cementado. Debido a que su diseño involucra la optimización de su geometría, por lo general exhiben un buen comportamiento ante carga sostenida y sísmica (eg. Cai et al., 2011, [53b]; Fujisawa et al., 2012, [55a]).

El comportamiento mecánico del relleno-cementado está gobernado principalmente por dos variables: 1) la fricción entre las partículas de agregados, y 2) la conexión entre las partículas debida al cementante.

### 2. Características de las presas de relleno-cementado

Los agregados de la presa de relleno-cementado son la grava y arena obtenidas del cauce del río o de excavaciones cercanas al sitio de la presa, unidas con un aglutinante, como el cemento (Cai et al., 2012, [53a]). El perfil típico de este tipo de presas se muestra en la Figura 4.1 donde se puede observar su geometría simétrica trapecial.

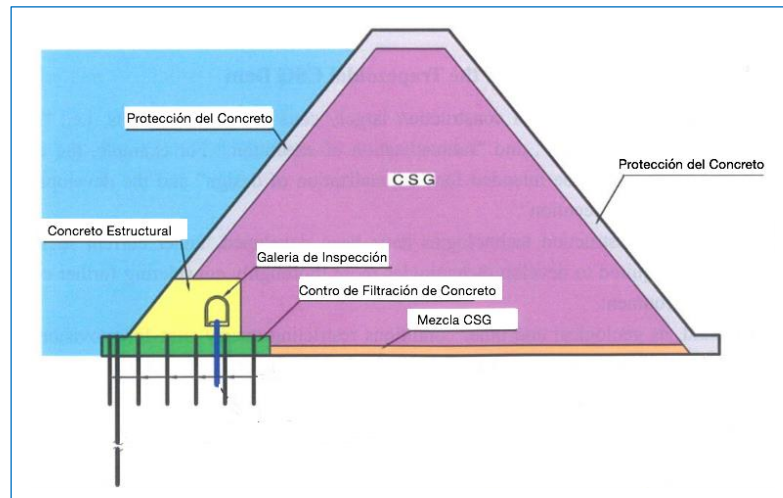


Figura 4.1. Perfil típico de una presa de relleno-cementado.

Por lo general la forma del cuerpo de la presa es intermedia entre la presa de gravedad y la presa de enrocamiento con cara de concreto como se aprecia en la Figura 4.2.



Figura 4.2. Comparación de la forma del cuerpo de las presas.

La determinación de la pendiente de los taludes de la presa se obtiene tomando en cuenta variables como las condiciones de cimentación, la altura de la presa, el rendimiento del material de relleno, el peso volumétrico de los agregados, entre otros. La utilización de los materiales locales permite minimizar la destrucción de la vegetación de los sitios aledaños al proyecto. Por este motivo, la presa se ha denominado como “cero emisiones” (eg. Cai et. al.,

2012, [53a]), y ha sido reconocida como un tipo de estructura hidráulica amigable con el ambiente.

#### a. Variantes de presas de relleno-cementado

De acuerdo con la información disponible en la literatura técnica internacional, existen cinco variantes principales de presas de relleno-cementado: 1) CSG (cement-sand-gravel) cemento, arena y grava; 2) FSHD (faced symmetrical hardfill dam) presa de relleno-cementado con caras simétricas; 3) Trapezoidal CSG dam (presa en forma de trapecio de cemento, arena y grava); 4) Presa de Relleno-cementado; 5) RCHD (Roller Compacted Hardfill Dam) presa de relleno-cementado compactado con rodillo (eg. Xiong et al., 2008 [59b]; Guillemot et al., 2012, [56]; boletines ICOLD 117, [60] y 126, [61], Mason et al., 2008, [54]; Omran et al., 2010, [62]).

Las características de la presa CSG trapezoidal se pueden resumir desde el punto de vista "constructibilidad" en presas racionales desde el punto de vista ingenieril, ya que se logra:

1. "Racionalización de materiales"

Permiten ampliar el rango de elección del material utilizando materiales de menor calidad debido a que la presa trapezoidal de CSG requiere menos resistencia y menos resistencia del material.

2. "Racionalización del diseño"

Permiten que la selección de sitios de presas sea más flexible debido a que la presa trapezoidal de CSG puede reducir los requisitos de resistencia de los materiales para los cuerpos de las presas, y también para la base de la roca.

3. "Racionalización de la ejecución"

La presa trapezoidal de CSG requiere instalaciones de fabricación de materiales extremadamente simples. También permite una construcción más rápida de las obras mediante el empleo de instalaciones de mezcla continua.

La presa trapezoidal de CSG, que se desarrolló principalmente con el objetivo de la "Racionalización de materiales", también contribuirá a la "Racionalización del Diseño" y la "Racionalización de la Ejecución".

Además, las estructuras tales como los vertedores se pueden instalar sobre y dentro del cuerpo de la presa, como en el caso de las presas de concreto, ya que la presa trapezoidal de CSG está diseñada como un cuerpo elástico. Esta es una diferencia significativa de la presa de enrocamiento.

De hecho, al ser presas "amigables" con el medio ambiente, se puede decir que este tipo de presas siguen un proceso "racional" para su diseño, construcción y uso de materiales como se señala en el cuadro lógico de la Figura 4.3.

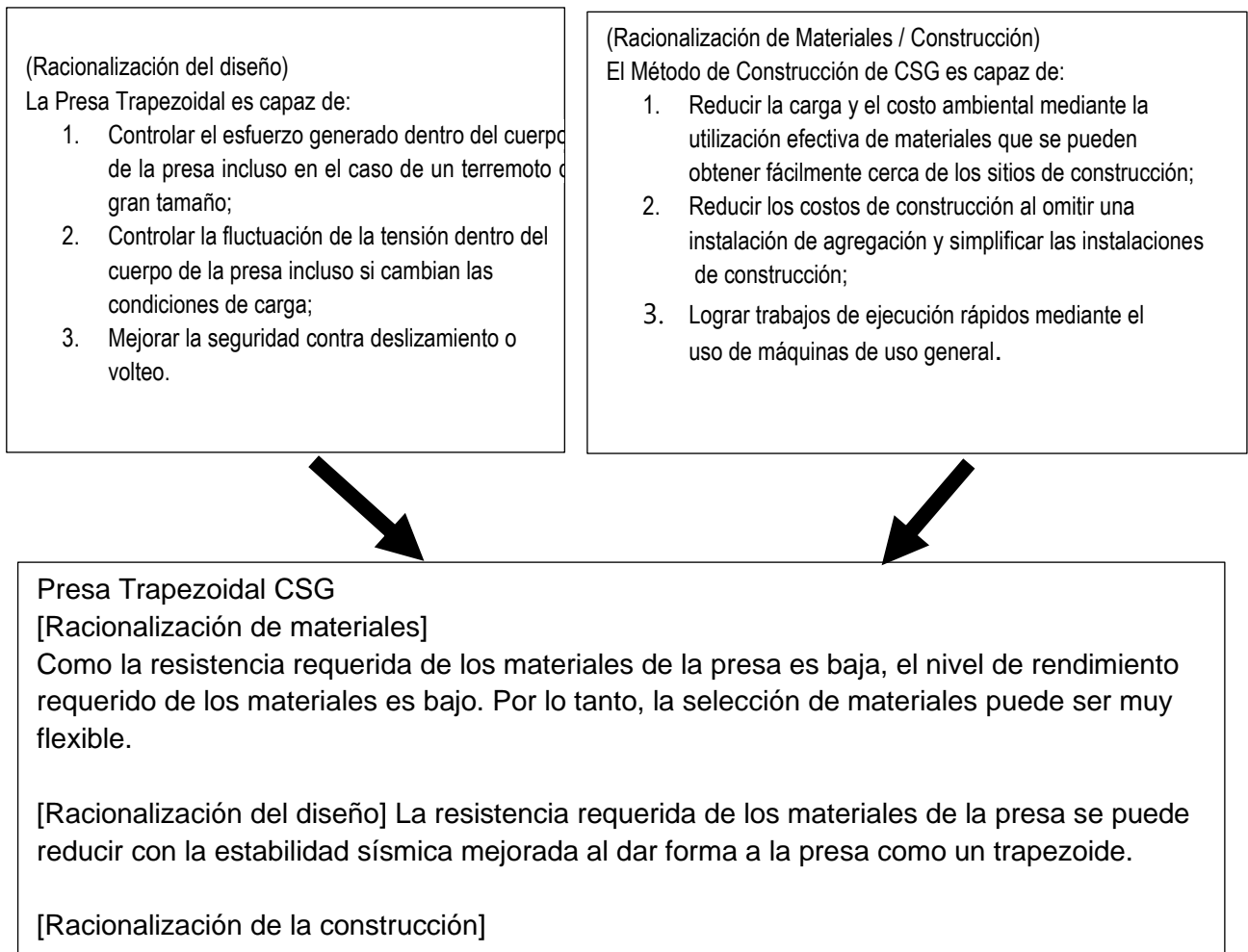


Figura 4.3. Metodología Racional de las presas Trapezoiales

## b. Diseño de la Presa Trapezoidal

La presa trapezoidal es un cuerpo de presa con forma de trapecio; las pendientes aguas arriba y aguas abajo se eligen para mantener siempre comprimida la fuerza de reacción en la base durante un sismo y en condiciones normales.

Las características de la presa trapezoidal se describen en las siguientes secciones.

Cualquier estructura está diseñada considerando tanto la estabilidad externa como la estabilidad interna.

La estabilidad externa tiene que ver con la seguridad contra el deslizamiento o el volteo de una estructura, mientras que la estabilidad interna es asegurar la fuerza requerida de los materiales usados contra el esfuerzo generado internamente. Por lo tanto, en esta sección se discuten con un ejemplo sencillo las características de las presas trapezoidales desde los puntos de vista de la estabilidad interna y externa.

**c. Esfuerzo y Resistencia Requerida (Estabilidad Interna)**

**i. Esfuerzos**

La figura 4.4 muestra, en la columna de la izquierda, la distribución máxima de esfuerzos de una presa convencional con forma de triángulo rectángulo con un talud descendente de 0.8:1 y, en la columna de la derecha, la de una con forma de presa como un trapecio con pendientes de 1:1.0 hacia arriba y hacia abajo, ambas con una altura de presa de 50 m, considerando el peso muerto, la presión hidrostática y la carga sísmica de la presa. La carga del sismo se evaluó mediante análisis dinámico con los datos de aceleración en la dirección de la corriente recodificada en una Presa hipotética ajustando a la aceleración máxima de 250 gal. La Figura 4.4 muestra que el esfuerzo máximo de tensión de la cortina tipo triangular es de 1.08 N/mm<sup>2</sup> y su esfuerzo de compresión máximo de 1.97 N/mm<sup>2</sup>. Se muestra que el esfuerzo de tensión máximo de la presa trapezoidal es de 0,15 N/mm<sup>2</sup> y su esfuerzo de compresión máximo es de 1,13 N/mm<sup>2</sup>.

La razón por la cual se distribuye el esfuerzo de esta manera es que mientras el esfuerzo en la presa del triángulo rectángulo se produce principalmente por la deformación de la curvatura, los esfuerzos en la presa trapezoidal son causadas principalmente por una deformación a cortante como se muestra en la figura 4.4.

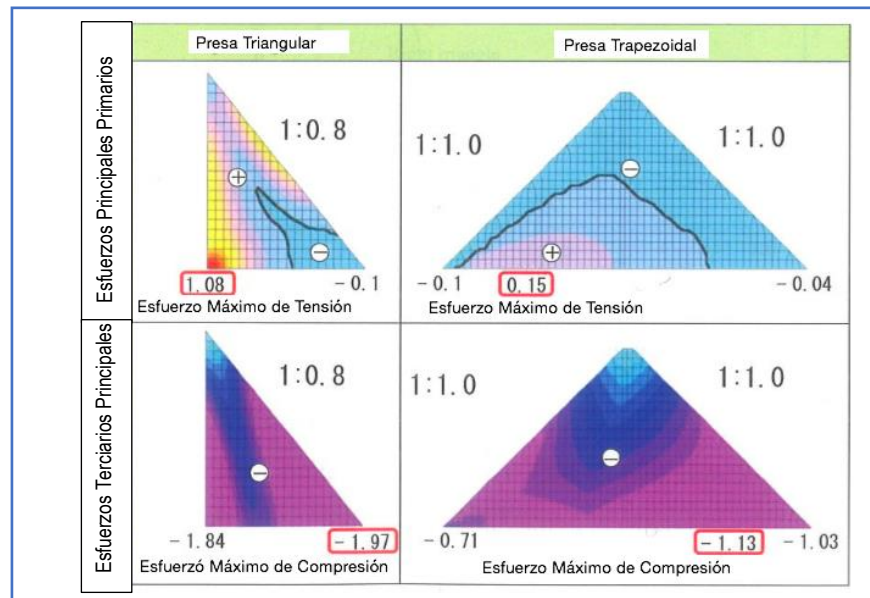


Figura 4.4. Distribución de esfuerzos en presas Triangulares y Trapezales

**Condiciones de Cálculo**

- Altura de la presa: 50m, profundidad del agua del embalse: 45 m.
- Módulo elástico del cuerpo de la presa ( $E_c$ ) / módulo elástico de la roca de cimentación ( $E_r$ ) = 2.
- Peso Muerto + Presión Hidrostática + Fuerza de Inercia Sísmica / Presión de Agua Dinámica

(La carga del sismo se evaluó mediante análisis pseudo-dinámico con los datos de aceleración ajustado a la aceleración máxima de 250 gales).

Las deformaciones de las presas se muestran en la Figura 4.5.

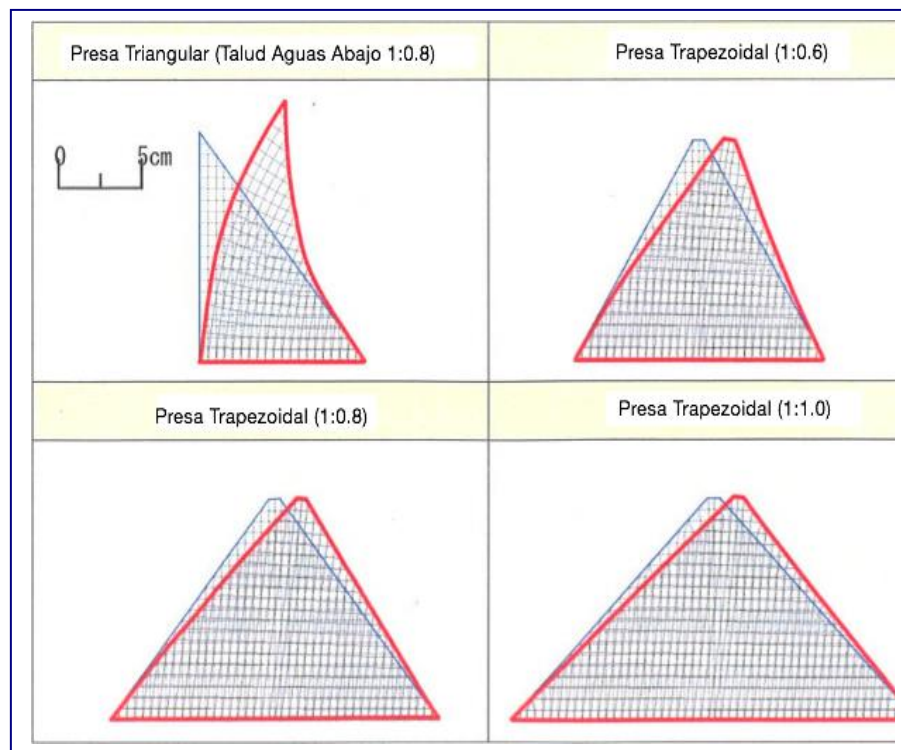


Fig. 4.5 Deformaciones tipo en los cuerpos de las presas

## ii. Resistencia Requerida

Los materiales que componen una estructura necesitan tener la resistencia suficiente para soportar los esfuerzos generados dentro de ella. Por ejemplo, en el caso de la Figura 4.4, la presa triangular derecha necesita una resistencia a la compresión de  $1,97 \text{ N/mm}^2$  y la presa trapezoidal necesita una resistencia a la compresión de  $1,13 \text{ N/mm}^2$  para resistir el esfuerzo a la tensión. Por lo tanto, para simplificar, se considera que el factor de seguridad requerido es 1. La resistencia a la compresión requerida de la presa trapezoidal es de aproximadamente el 60% de la presa de triángulo rectángulo.

Por otra parte, el esfuerzo de tensión causado en la presa del triángulo rectángulo es de  $1.08 \text{ N/mm}^2$  y el de la presa trapezoidal  $0.15 \text{ N/mm}^2$  y las presas deben estar compuestas por materiales con suficiente resistencia a la tensión y compresión para resistirlos. A propósito, la resistencia a la tensión del concreto utilizado para una presa de gravedad de concreto es aproximadamente el 10% de la resistencia a la compresión. De esta relación, se determina que la resistencia a la compresión requerida por el dique de triángulo correcto para asegurar la resistencia a la tensión de  $1.08 \text{ N/mm}^2$  es 10 veces la resistencia a la compresión, es decir,  $10.8 \text{ N/mm}^2$ . La resistencia a la compresión requerida por la presa trapezoidal es solo aproximadamente el 14% de esa cantidad por la presa del triángulo rectángulo. Esta relación

se muestra en la figura 4.6. Esta figura indica que la resistencia a la compresión requerida por una presa trapezoidal es mucho menor que la de una presa de triangulo rectángulo. Además, también se entiende que cuanto más suave es la pendiente, menor es la fuerza requerida para una presa trapezoidal.

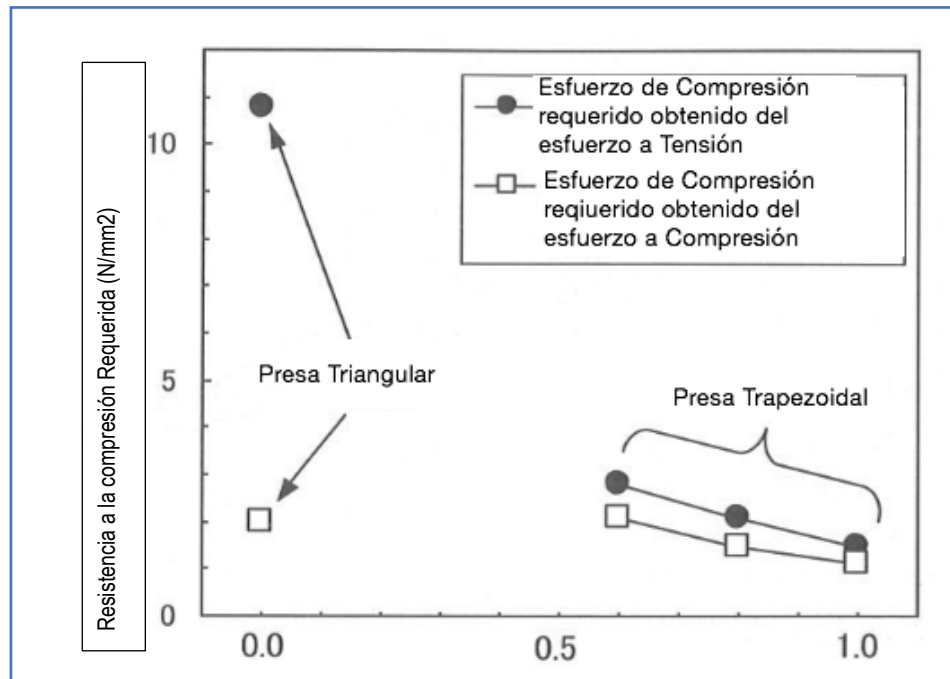


Figura 4.6 Resistencia a la compresión Requerida en Presas Triangulares y Trapeciales

#### d. Volteo (Estabilidad Externa)

Vista desde su forma geométrica, sería imposible que una presa trapezoidal sufriera un vuelco. Sin embargo, una presa trapezoidal está diseñada para mantener la tensión vertical sobre toda la superficie inferior básicamente comprimida, no solo en condiciones normales, sino también durante un sismo. Esta condición es un requisito para una presa trapezoidal.

Por cierto, esta condición es básicamente diferente en una presa de triangular. En una presa de triángulo rectángulo, la tensión vertical puede estar en estado de tensión en la vecindad hasta el talón y el pie de la presa durante un sismo. Se diseña una presa de triangular para que pueda resistir los esfuerzos de tensión unificando el cuerpo de la presa y la base de la roca. Para una presa trapezoidal, no es necesario unir el cuerpo de la presa y el lecho de roca porque la presa trapezoidal se diseña para mantener la tensión vertical sobre toda la superficie

inferior que siempre está comprimida de forma casuística como condición para el volteo previo. Esta es una gran diferencia entre una presa triangular y una presa trapezoidal (ver figura 4.4). Una presa con taludes muy pronunciados aguas arriba y aguas abajo puede no cumplir con la condición de que la tensión vertical en toda la superficie inferior siempre debe estar básicamente comprimida, incluso si tiene la forma de un trapecoide. La presa con tal forma no está incluida en la categoría de presa trapezoidal como se describe en este documento.

**e. Deslizamiento (Estabilidad Externa)**

Ya que una presa trapezoidal está diseñada con una mayor longitud de la superficie inferior de la presa que una presa triangular y tiene una forma bilateralmente simétrica, el esfuerzo cortante cambia poco (véase la figura 4.7). El esfuerzo vertical siempre se mantiene comprimido sobre toda la superficie inferior del cuerpo de la presa debido a las condiciones básicas de una presa trapezoidal (véase la figura 4.7), y, en consecuencia, debido a que se espera la fuerza de fricción sobre toda la superficie, la presa puede soportar el deslizamiento solo con la fuerza de fricción entre el cuerpo de la presa y la cimentación de la roca.

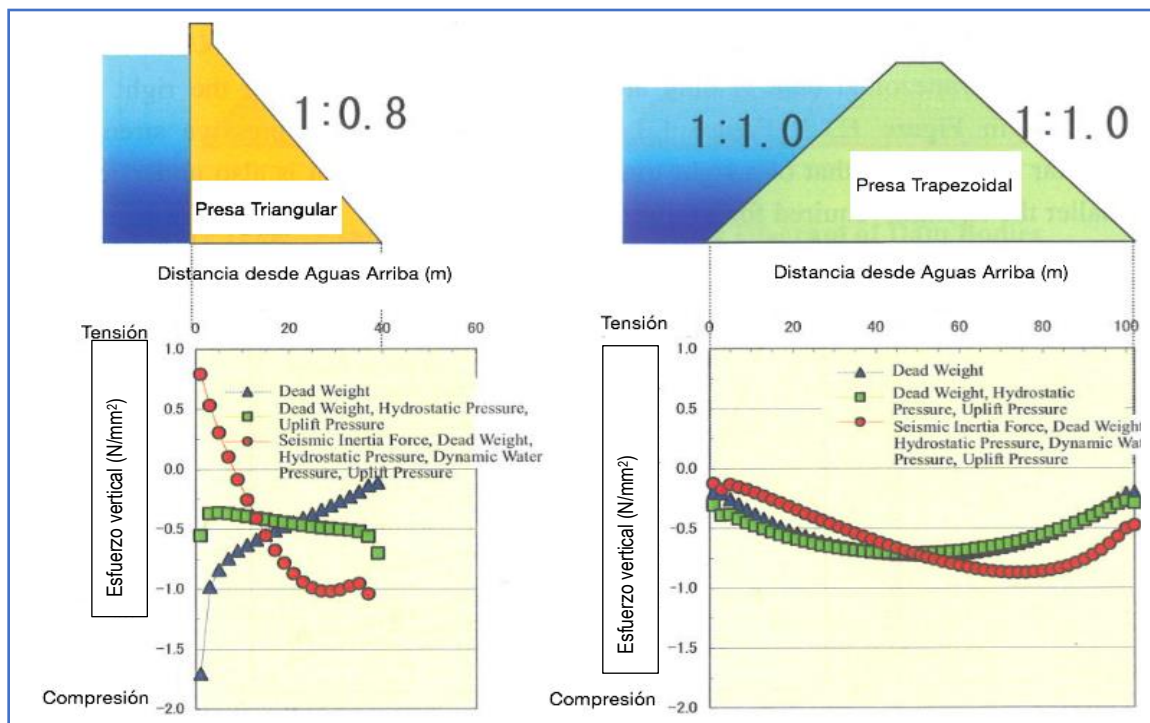


FIGURA 4.7 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN LA CIMENTACIÓN

Por otro lado, en una presa triangular, se generan esfuerzos de tensión en el lado aguas arriba, y se genera una gran tensión en el lado aguas abajo (ver figura 4.4 y figura 4.5). En consecuencia, se debe construir una presa triangular unificando el cuerpo de la presa y la base de la roca para que la presa pueda resistir el deslizamiento al esperar la resistencia al esfuerzo cortante del lecho de roca. La distribución de esfuerzos cortantes se muestra en la Figura 4.8.



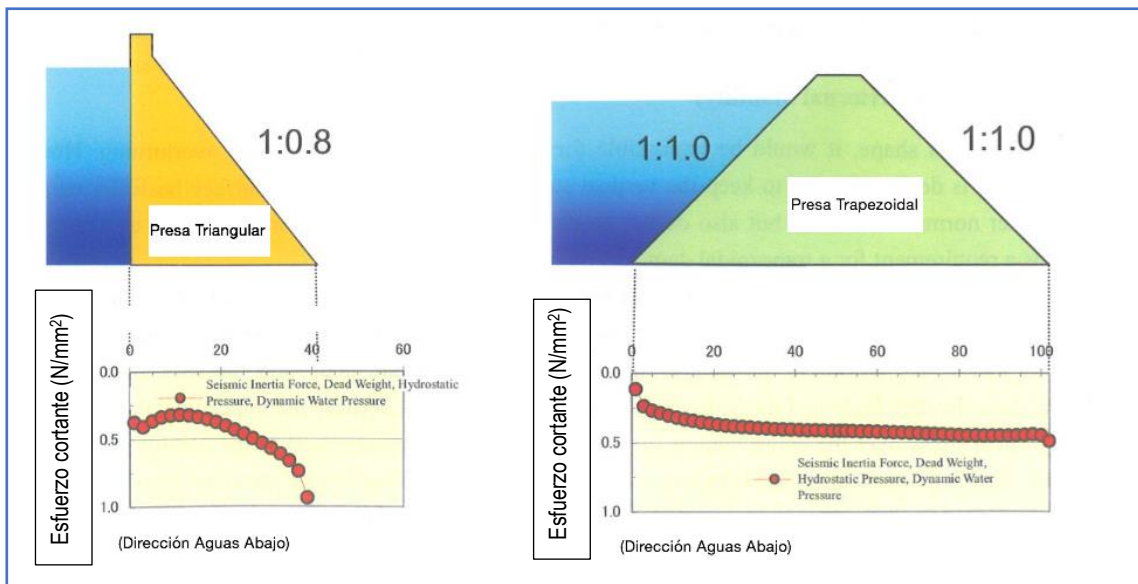


FIGURA 4.8 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZO CORTANTE ENTRE EL CUERPO DE LA PRESA Y LA CIMENTACIÓN

Las anteriores son las características de una presa trapezoidal. Esta es la razón por la cual las condiciones básicas pueden relajarse cuando se construye una presa trapezoidal, de modo que no es necesario que se deforme el cuerpo de la presa y el lecho de roca, o, en otras palabras, incluso si las fuerzas debidas a la tensión y cizallamiento de la cimentación de la roca no son usadas, se produce una estabilidad externa y se resuelve el deslizamiento. Como se mencionó anteriormente, la presa triangular se construirá unificando el cuerpo de la presa y la roca madre. Por lo tanto, la presa triangular se puede diseñar con una sección transversal mínima al unificarse con el lecho de roca y hacer un buen uso de su fuerza.

#### f. Diseño del cuerpo de la presa

Las presas trapezoidales de CSG con su sección transversal trapezoidal y la presa de gravedad de concreto con su sección transversal en forma de triángulo rectángulo son diferentes en términos de su estabilidad externa (deslizamiento y volteo) y su estabilidad interna (esfuerzos). Como diferencias en su estabilidad interna por sus formas, como se explica en el punto 4.5, esta sección redefinirá la estabilidad externa (deslizamiento y volteo).

##### i. Estabilidad a volteo

Para la estabilidad en contra del volteo, la presa en forma de trapecio debe ser diseñada para que básicamente mantenga los esfuerzos verticales a lo largo de toda la parte que está a compresión, incluso durante un sismo, tomando en cuenta la carga del sismo para que los esfuerzos verticales se presenten siempre como compresión, sin importar las condiciones de la carga. En otras palabras, toda la superficie inferior del cuerpo de la presa siempre estará sobre el lecho rocoso.

Por otro lado, la presa de triángulo tiende a generar esfuerzos de tensión en dirección vertical a lo largo de la superficie inferior de la presa, particularmente cerca del extremo aguas arriba, si se tienen en cuenta el efecto dinámico durante un sismo.

### ***ii. Estabilidad a deslizamiento***

La Figura 4.8 muestra la distribución del esfuerzo cortante a lo largo del de la parte inferior de la presa trapezoidal y del triángulo bajo condiciones de análisis similares a la Figura 4.7.

Se puede dar por entendido que, en la presa trapezoidal, los esfuerzos cortantes están distribuidos uniformemente a lo largo de la parte inferior de la superficie. Además, a partir de la distribución de esfuerzos cortantes y la distribución de esfuerzos verticales que se muestran en estas Figuras, se entiende qué debido a la fricción generada entre el cuerpo de la presa y el lecho de roca, la presa trapezoidal puede soportar el deslizamiento sin problemas.

En la presa triangular, el esfuerzo cortante es generado aguas abajo y la figura 4.4 indica que un esfuerzo vertical es generado aguas arriba. Esto indica que la presa triangular debe satisfacer condiciones más severas que la presa trapezoidal para asegurar la estabilidad contra el deslizamiento. La presa de gravedad de concreto está diseñada para asegurar la estabilidad contra el deslizamiento dependiendo de la resistencia a cortante del lecho rocoso, al unificar el cuerpo de la presa y la base de la roca.

De estas descripciones, la diferencias en el diseño entre la presa trapezoidal de CSG y la de gravedad de concreto son resumidas a continuación:

- ✓ Presa trapezoidal CSG: Es una estructura, que en principio no necesita unión entre el cuerpo de la presa y la base de la roca. El volumen de esta presa es más grande que el de la presa de gravedad de concreto.
- ✓ Presa de gravedad de concreto: Es una estructura que, en principio necesita una unión entre el cuerpo de la cortina y la base de la roca. Se puede minimizar el volumen de la cortina en la medida de lo posible, al unir el cuerpo de la presa y el lecho rocoso.

La presa trapezoidal de CSG y la presa de gravedad de concreto son diferentes tipos con distintas funciones y es difícil decir cuál es más eficiente. Se debe reconocer que el desarrollo de la presa trapezoidal de CSG permite una opción más al momento de seleccionar un tipo de presa.

## **g. Procedimiento para el diseño de una presa trapezoidal de CSG**

### ***i. Bases del diseño***

Según el ICOLD (Boletines ICOLD 117 [60] y 126 [61]) y los Criterios de Diseño Chino y particularmente el Japonés, los fundamentos para el diseño de una presa trapezoidal tipo CSG se sigue lo siguiente:

- (1) El diseño deberá estar conformado por las propiedades de los materiales de CSG
- (2) El diseño deberá estar en un rango de esfuerzos elásticos

- (3) El diseño deberá satisfacer la estabilidad externa (deslizamiento y volteo) e interna (esfuerzos)

El cuerpo de la presa trapezoidal de CSG, se diseña con las propiedades de los materiales (esfuerzos y modulo elástico del CSG). Ésta es una diferencia básica entre este método y el de una presa de gravedad de concreto: después de determinar la forma del cuerpo de la presa, se diseña el concreto con los esfuerzos requeridos de los materiales para la cortina.

El diseño se realiza con el siguiente procedimiento:

- 1) Se determinan las propiedades de los materiales del CSG (esfuerzos y módulo elástico del CSG), así como las propiedades del suelo (módulo elástico).
- 2) Se examina la estabilidad interna y externa especificada (volteo y deslizamiento).
- 3) Se determina la forma de la cortina.

Para comenzar el diseño, los taludes aguas arriba y aguas abajo de la cortina se proponen de 1:0.8 para ambos lados. En caso de que la estabilidad interna o externa no se cumplan se podrá aumentar el talud en alguno ambos lados para obtener la forma adecuada de la cortina, o se pueden disminuir en caso de estar sobrados.

El CSG es un material elasto-plástico que presenta un esfuerzo de tensión, pero el diseño de la presa se hace en un rango en donde se permita manejar los materiales de la presa como cuerpos elásticos.

Generalmente, la estabilidad estructural de las presas es verificada bajo condiciones externas de estabilidad considerando el deslizamiento y el volteo y, en el caso de estabilidad interna, se evalúan los esfuerzos de trabajo. En otras palabras, se debe diseñar la cortina de tal manera que no se deslice ni se voltee y que sea capaz de soportar los esfuerzos producidos por las combinaciones de carga externas que conforman el análisis.

### ***ii. Análisis de esfuerzos de la cortina***

Los esfuerzos de la cortina de una presa trapezoidal de CSG se hace utilizando el método del elemento finito (MEF) bajo condiciones de cargas estáticas y dinámicas.

La presa trapezoidal de CSG es considerada un nuevo tipo de presa distinto al de cualquier otra presa de materiales sueltos o de concreto. En consecuencia, una presa trapezoidal de CSG no será diseñada con un método convencional, sino con uno apropiado para este tipo de presas nuevas como es el método de elemento finito.

El análisis en tiempo ordinario (no cuando sucede un sismo) es realizado bajo un análisis estático considerando el peso propio y el empuje y peso del agua. El análisis durante un sismo se realiza basado en un análisis dinámico causado por la acción de las ondas del Sismo Máximo creíble y el Sismo máximo Probable. El estado de esfuerzos durante un sismo es

evaluado combinando los esfuerzos obtenidos del análisis estático en tiempo ordinario con los esfuerzos obtenidos del análisis dinámico.

La razón más importante por la cual se utiliza el método del elemento finito para un análisis estático y dinámico para el diseño es que así se puede evaluar de manera directa y racional la estabilidad interna y externa, en comparación con un método convencional, el cual puede utilizarse para un pre-diseño. A continuación, se presenta una explicación del método:

- (1) Utilizar el método de elemento finito permite un análisis racional al considerar y obtener el estado del lecho de roca de la cimentación (deformabilidad).
- (2) Utilizando un método de análisis dinámico permite una evaluación directa y detallada del impacto de la cortina, y en conjunto con el puto anterior, se evalúan los esfuerzos dentro del cuerpo de la presa y en la parte inferior de la superficie, que se obtendrán de manera racional.
- (3) El *Review Committe Concerning the Earthquake Resistance of Dams*, que fue establecido después del sismo de Hyoyo-ken Nambu en enero de 1995 en Japón, utilizó el mismo método que se utiliza para verificar la resistencia ante un sismo, lo que permite comparar y evaluar la seguridad de una presa trapezoidal de CSG contra una de terraplén o de concreto.

La presa tipo CSG es un cuerpo elasto – plástico, pero debido al diseño se realiza en un rango de esfuerzos elásticos en el lado de las compresiones, el análisis de esfuerzos es realizado con base de dos dimensiones.

Como se explica con anterioridad, en una presa trapezoidal de CSG, la relación entre los módulos elásticos del cuerpo de la presa y el lecho rocoso de la base tiene una gran influencia sobre la tensión dentro del cuerpo de la presa, por lo que se analiza el esfuerzo considerando la deformabilidad de la base de la cimentación. Cuando lo es, para la parte del cuerpo de la presa, se establece el módulo de elasticidad en el rango de esfuerzos debajo de la torsión del CSG en la presa, calculado con base en el conocimiento técnico o los resultados obtenidos de pruebas.

#### **h. Cargas de Diseño**

Las cargas de diseño, se muestran las cargas comúnmente usadas para diseñar las presas trapezoidales como se indica en la Tabla 4.1, y en la Figura 4.9, dónde se muestran las combinaciones de cargas consideradas en el análisis.

En la tabla mencionada, los niveles ordinarios de agua estudiados son: nivel mínimo del agua (NAMINO), nivel normal de agua (NAMO), nivel de agua extraordinaria del agua (NAME) que corresponde al resultante de la avenida correspondiente de diseño ( $T_r=10,000$  años). Se debe considerar la subpresión, ya sea con drenes operantes o inoperantes, según sea el caso.

Las cargas por sismo en la condición de nivel de agua extraordinaria (NAME) son idénticas para aquellos evaluados con el nivel normal de agua (NAMO). De acuerdo al ICOLD, Boletín

Boletines ICOLD 117 [60] y 126 [61], se deben considerar en el análisis el Sismo Máximo Creíble y el Sismo Máximo Probable.

*Tabla 4.1 Condiciones de Carga durante el Análisis*

Estado	Cargas	Nivel del agua
Normal	Peso propio + presión hidrostática + carga por subpresión	Nivel Mínimo (NAMINO), normal (NAMO), máximo (NAME)
Diseño por sismo (Extrema)	Peso propio + presión hidrostática + subpresión (drenes operantes) Acción del sismo (movimiento del sismo y presión hidrodinámica causadas por el Sismo Máximo Creíble)	Nivel Mínimo (NAMINO), normal (NAMO), máximo (NAME)
Verificación Por sismo (Especial)	Peso propio + presión hidrostática + subpresión (drenes inoperantes) Acción del sismo (movimiento del sismo y presión hidrodinámica causadas por el Sismo Máximo Probable)	Nivel Mínimo (NAMINO), normal (NAMO), máximo (NAME)

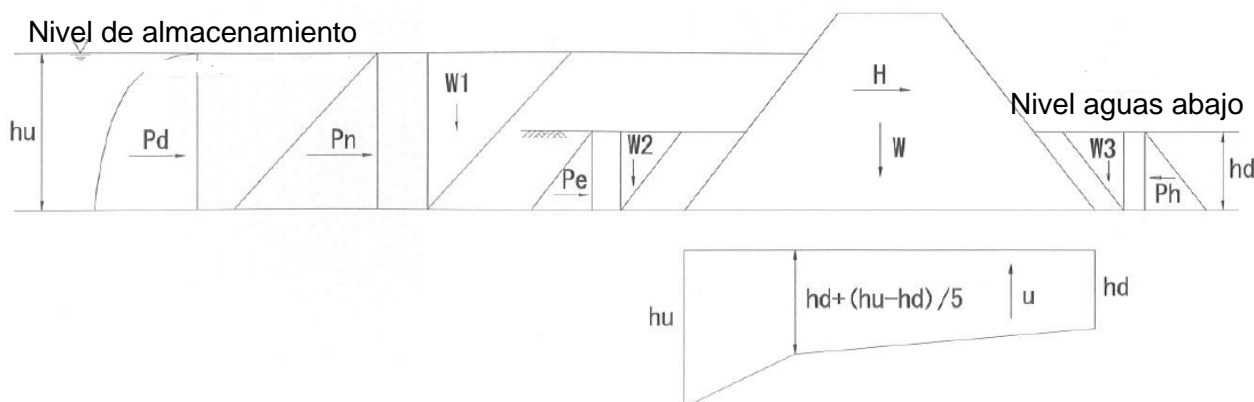


FIGURA 4.9 CONDICIONES DE CARGA DURANTE EL ANÁLISIS

Las literales de la Figura 4.9 corresponden a lo mostrado en la tabla 4.2.

*Tabla 4.2 Condiciones de Carga durante el Análisis*

W: Peso propio del cuerpo de la presa	W3: peso del agua (aguas abajo)	Pd: presión hidrodinámica (durante análisis dinámico)
H: Fuerza de inercia del cuerpo de la presa (durante el análisis dinámico)	hu: presión de la subpresión	Pe: presión de sedimentación
W1: peso del agua (aguas arriba)	Pn: presión hidrostática (aguas arriba)	hu: carga aguas arriba
W2: presión de azolves	Ph: presión hidrostática (aguas abajo)	hd: carga aguas abajo
	U: Carga por subpresión	

### i. Procedimiento de revisión

Para analizar una presa trapezoidal de CSG, en primera instancia se revisan las propiedades físicas de los materiales; el diseño de la forma del cuerpo de la presa y el método de construcción deben ser revisados de acuerdo con las propiedades físicas de los materiales. Por lo tanto, la relación entre materiales, diseño y construcción es una característica importante de este tipo de presas.

Por otro lado, para las presas de gravedad de concreto, el primer paso es diseñar la forma del cuerpo de la presa y, la selección de los materiales adecuados que cumplan con la seguridad especificada para esta forma serán el segundo paso. Por lo tanto, el diseño y la investigación de los materiales se han estudiado de forma independiente.

Como ya se mencionó, el procedimiento de revisión para las presas trapezoidales de CSG y de gravedad de concreto es distinto. Esto se resumen en la figura 4.10.

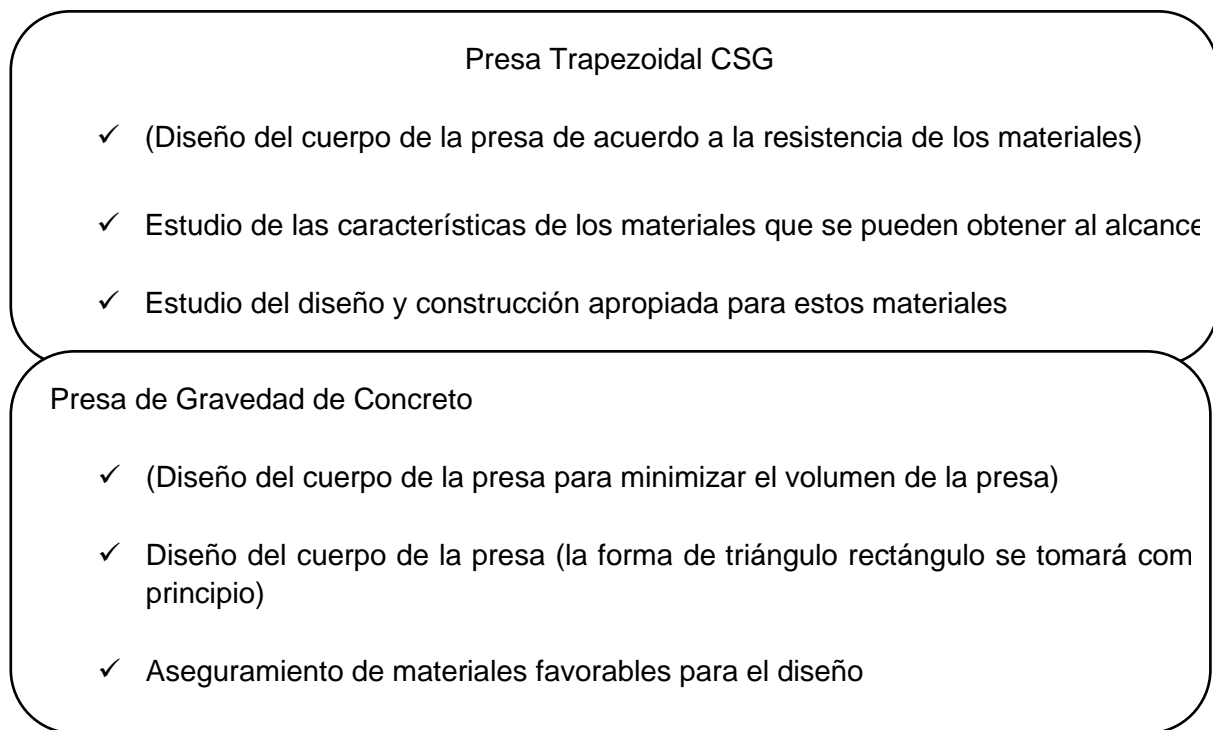


FIGURA 4.10 PROCEDIMIENTO DE REVISIÓN PARA PRESAS TRAPEZOIDALES TIPO CSG Y DE CONCRETO GRAVEDAD

### i. Condiciones del lecho rocoso

La presa de gravedad de concreto se diseña unificando el cuerpo de la presa y el lecho rocoso para soportar el volteo y el deslizamiento. Mientras que la presa trapezoidal de CSG, donde los esfuerzos verticales son básicamente a compresión en la superficie inferior del cuerpo de la presa, está destinada a resistir el deslizamiento por la fricción entre el cuerpo de la presa y la base de la roca. Como el esfuerzo cortante de la base de la roca requerido para una presa de gravedad de concreto sin fallas en  $t/m^2$ , se supone que requiere una resistencia aproximadamente de 2.5 veces la altura (m) de la presa, (el esfuerzo cortante requerido para

una presa de gravedad de concreto con 60 m de altura es calculado como  $60 \times 2.5 = 150 \text{ t/m}^2$  ( $\approx 1.5 \text{ N/mm}^2$ ) de acuerdo con el diseño basado en diversos criterios de diseño actuales (Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE, 2017) [63].

Bajo cualquier condición, el desplante de ambos tipos de presas, deberán ser cuidadosamente revisados, ya que la presencia de fallas o estratos débiles en la cimentación pueden dar lugar a condiciones indeseables a lo largo de la vida útil de las obras.

El tratamiento de estratos débiles en la cimentación se torna entonces fundamental para tener un proyecto exitoso; y sin considerar casos particulares; las presas trapezoidales, son más seguras que las presas convencionales triangulares de gravedad, ya que se consigue una mucho mejor distribución de esfuerzos de trabajo y resistencia que ante distintas combinaciones de carga, presentan condiciones de trabajo más conservadoras a lo largo de la vida útil de las presas.

## REFERENCIAS

- Aydin, R. K. 2007 "The important function of dam instrumentation systems in dam safety." *Proc., National Symp. on Dam Safety, DSI, Ankara, Turkey, 733–739 in Turkish .*
- Batmaz, S. 2003. *Cindere dam – 107 m high Roller Compacted Hardfill Dam (RCHD) in Turkey. Roller Compacted concrete Dams, pp 121-126.*
- Batmaz, S., Koksall, A., Ergeneman, I., and Pekcagliyan, D. 2003. "Design of the 100-m-high Oyuk hardfill dam." *Int. J. Hydropow. Dams, 138–143.*
- Cai, X., Wu, Y., Yi, J., and Ming Y. 2011. *Research on shape optimization of CSG dams. Water Science and Engineering, 2011, 4(4) pp 445-454.*
- Cai, X., Wu, Y., Yi, J., and Ming Y. 2012. *Research review of the cement sand and gravel (CSG) dam. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 19-24.*
- Capote A. Saenz F, Martin V.M. *Contraembalse de Monsion: a hardfill dam constructed in the Dominican Republic. In: Berga L., Buil JM, Jofre C, et al. eds. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Madrid, Spain, 2003. 417-420*
- Chazallon, C., Hicher, P., Y., A., 1998. *Constitutive model coupling elastoplasticity and damage for cohesive-frictional materials, Mech Cohes-Frict Mater, 41-63.*
- Duncan. J. M., Chang, C. Y. 1970. *Nonlinear analysis of stress and strain in soils. J Soils Mech Found Div, ASCE, 653-655.*
- Duncan J.M., Seed R.B., Wong K.S. y Ozawa Y. (1984), "FEADAM 84: A Computer Program for Finite Element Analysis of Dams", Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Esmailnia, O., and Mohammad, H. 2012. *Comparing Faced Symmetrical Hardfill and concrete-Faced Rockfill Dams. Hydro review worldwide, vol. 20, num. 4, pp 22-26.*
- Fujisawa, T., Nakamura, A., Kawasaki, H., Hirayama, Y., Yamaguchi, Y., and Sasaki, T. 2004. *Material properties of CSG for the seismic design of trapezoid-shaped CSG dam. 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, paper 391.*
- Fujisawa, T., and Sasaki, T. 2012. *Development of the trapezoidal CSG dam. International Journal on Hydropower and dams. pp 58-63.*
- Guillemot, T., and Lino, M. 2012. *Design and construction advantages of Hardfill symmetrical dams – case study: Safsaf dam in eastern Algeria. 6<sup>TH</sup> International Symposium on Roller compacted Concrete (RCC) Dams.*
- Herrier, G., Lelong, V., Lesuer D., Puiatti, D., Shoenmakers B. *SOTREDI final Report, Lhoist Eds, Limelette, Belgium 2012*
- Hokkaido Prefecture, Japan. 2012. *Toubetsu dam: an example of the innovative CSG technology. International Journal on Hydropower and dams. pp 64-67.*

- ICOLD. "The gravity dam, a dam for the future", *Bulletin 117, ICOLD, Paris, France, 2000*
- ICOLD. "Roller compacted concrete dams-state of the art and case histories", *Bulletin 126, ICOLD, Paris, France, 2003*
- Jia, J., S., Ma., F., L., Li., X., Y., and Chen., Z., P. 2006. *Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application. Journal of Hydraulic Engineering, 578-582 (in Chinese).*
- Kogan, E. A. 2000. *Construction Organization and procedures. Hydrotechnical Construction, vol. 34. No. 5, pp 243-254.*
- Kondo, M., Sasaki, T., and Kawasaki, H. 2004. *Characteristics of stress distribution in trapezoid-shaped CSG dam during earthquake. 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, paper 3392.*
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall*
- Li. Y. L., Hou K. J. Sun M. Q., et al. *Test and study on mechanical property of super-short cement concrete (in Chinese). Yellow River, 2007. 46-49.*
- Li. Y. X. 2005 *Study on the stress and stability of the cemented sand & gravel dam based on strength reduction method. Master Thesis. Wuhan: Wuhan University.*
- Londe, P., and Lino, M. 1992. *The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC. Water Power and Dam Construction, pp 19-24.*
- Mason, P. J., Hughes, R.A.N., and Molyneux, J. D. 2008. *The design and construction of a faced symmetrical hardfill dam. International Journal on Hydropower and Dams, 15 (3) pp 90-94.*
- Omran, M. E., and Tokmechi, Z. 2010. *Sensitivity Analysis of Symmetrical Hardfill Dam. Middle-East Journal of Scientific Research, pp 251-256.*
- Raphael, J.M., "The soil-cement Dam", *University of California- Berkeley, USA; June 1976.*
- Sun Mingquan. Q., Yang Shifeng, *Research on Mechanical Properties and sectionalform of CGS). Adv Sci Tech Water Resour, 2011. 4602-4607*
- Sun M. Q., Peng, C. S., Li Y L., et. al *Triaxial test of over lean cemented material (in Chinese). Adv Sci Tech Water Resour, 2007. 59-60.*
- Vatsala, A., Nova, R., Murty, B., R., S. 2001. *Elastoplasticity model for cemented soils. J. Geotech Geoenviron., 679-687.*
- Wu. Fu. X., He. Y. L., Li, P. 2009 *The distribution of vertical stress on Hardfill dam foundation. China Rural Water and Hydropower., 72-79.*
- Xin, C. Yingli, W., Xingewen G., Yu, M. 2012. *Research review of the cement sand and gravel (CSG) dam. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.*
- Xiao, W., He, Y., and Zhang, Y. 2008. *Simplified analytical solution for free vibration characteristics of Hardfill dam. Higher Education Press and Springer-Verlag, pp 219-224.*
- Xiong, K., Young H., and Peng, Y. 2008. *Adaptability to geological faulted foundation of Hardfill dam. Higher Education Press and Springer Verlag*
- Xiong, K., Weng, Y., and He. Y. 2012. *Seismic failure modes and seismic safety of Hardfill dam. Water Science and Engineering, 2013, 6(2) pp 199-214.*
- Yang., S., L., 2007. *Characteristics and load carrying capacity of CSG dam construction materials. China Civil Engineering Journal, 97-103 (in Chinese).*
- Yanmaz, A., and Sezgin, O. 2009. *Evaluation Study on the Instrumentation System of Cindere Dam. Journal of performance of constructed facilities, ASCE. pp 415-422.*
- Zou, D., Li, D., Xu B., and Kong, X. 2011. *Experimental Study on Mechanical Characteristics of CSG Materials. Advanced Materials Research, pp. 243-249.*