

## I. PRESAS EN EL MUNDO

Este capítulo tendrá el objetivo de presentar la evolución por la que han pasado las presas de enrocamiento con cara de concreto, desde sus inicios hasta llegar a la última década. Se hará mención de las partes fundamentales de la cortina, viendo de manera general como están compuestas y cuál es su finalidad. Se dará de forma muy burda una explicación del proceso que se lleva a cabo para la construcción de la cortina. Se describirá la tendencia que ha seguido las presas de enrocamiento con cara de concreto, tanto en el diseño como en el proceso constructivo, para llegar a lo que son hoy en día.

### I.1 Antecedentes

Una presa de enrocamiento con cara de concreto (ECC) es aquella formada por un cuerpo principal de enrocamiento, grava o arena; una losa de concreto impermeable en el talud aguas arriba; un plinto o zapa de desplante sobre roca sana o sobre aluvión y un parapeto en la corona de la presa.

La diferencia fundamental de este tipo de presa con las de materiales graduados de núcleo impermeable es que la cara de concreto evita la saturación del cuerpo principal de la presa, lo que se traduce en un mejor comportamiento de la estabilidad, permitiendo colocar taludes menos tendidos, menor volumen y en general menores tiempos de colocación.

### Orígenes del concepto ECC

La idea de un relleno de roca impermeabilizado aguas arriba del mismo es muy remota, se tiene referencia de que en siglo XVII se construyeron en Europa pequeñas estructuras de ladrillo con cal en el talud aguas arriba y con escolleras aguas abajo.

Durante finales del siglo XIX y principios del XX en el período de 1840 a 1940 los mineros del sur de California desarrollaron estructuras en forma intuitiva impermeabilizando enrocamientos lanzados y por lo tanto no compactados con placas de madera. Estas primeras estructuras evolucionaron a las presas de enrocamiento con cara de concreto que conocemos en la actualidad.

Después de estos primeros atisbos de los mineros californianos fueron pocos los intentos de construir presas de enrocamiento lanzado, tal es el caso de la presa Paradela en Portugal (1955), que con sus 110 m de altura, enrocamiento suelto y juntas verticales y horizontales presentó serios problemas de filtraciones, o la presa New Exchequer en Estados Unidos (1966) de 149 m. Ambas presas fueron las más altas de su tipo en su momento, pero demostraron que existía una incompatibilidad entre la deformación del enrocamiento suelto con las losas de la cara de concreto al alcanzarse alturas importantes.

Fue hasta los años 70, con el desarrollo de los compactadores vibratorios y los procedimientos constructivos de la losa y sus juntas en el talud aguas arriba se abrió paso a una nueva generación de presas cada vez más altas. La primera de ellas fue Cethana en Australia (1971) de 110 m de

altura, después Alto Achincaya de 140 m en Colombia (1974), ambas presas demostraron que era técnica y económicamente factible construir presas CFRD en el mundo.

Posteriormente en 1980 se construye en Brasil Foz Do Areia que con 160 metros de altura mantuvo el título de la presa de ECC más alta del mundo hasta 1993, año en el que Comisión Federal de Electricidad construye la presa Aguamilpa de 187 m arrebatando a la presa brasileña el título de la más alta en su tipo. La evolución de la altura de este tipo de presas puede observarse en la figura 1.

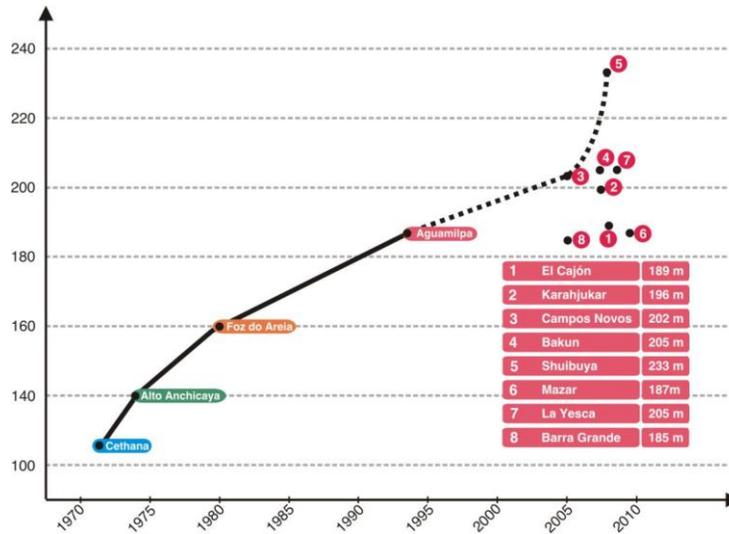


Figura 1.1 Tendencia en el incremento de la altura en presas de ECC.

A raíz de éxito de este tipo de presas Barry Cooke quién fuera padre de las presas de ECC, en el congreso del Internacional Commission of Large Dams (ICOLD) en Beijing China en el año 2000 concluyó:

*“La presa de ECC resulta apropiada en el futuro de las presas de gran altura. Se puede predecir un comportamiento adecuado para una presa de ECC de 300 m de altura de casi todos los tipos de roca basados en la extrapolación razonable de mediciones de las presas existentes”.*

A continuación se presenta una tabla con las principales presas de ECC

Presa	País	Año en que se terminó	Altura (m)
Shibuya	China	2009	232
La Yesca	México	2007(*)	210
Bacón	Malasia	2008	205
Campos Novos	Brasil	2006	202
El Cajón	México	2007	188
Aguamilpa	México	1993	187
Barra Grande	Brasil	2005	183
Tianshengqiao	China	1999	178
Foz do Areia	Brasil	1980	160
Slvajina	Colombia	1983	148
Segredo	Brasil	1992	145
Xingo	Brasil	1994	140
Alto Achincaya	Colombia	1974	140
Chuza	Colombia	1978	135
Messochora	Grecia	1994	135
Koman	Albania	1986	133
Shanxi	China	2000	131
New Exchequer	EUA	1966	130
Golillas	Colombia	1978	130
Khao Laem	Tailandia	1984	130
Shiroro	Nigeria	1984	130
Cirata	Indonesia	1987	125
Machadinho	Brasil	2002	124
Baixi	China	1999	123.5
Itá	Brasil	2000	123
Quinshan	China	1999	122
Reece	Australia	1986	122
Neveri	Venezuela	1981	115
Gaotang	China	1997	110.7
Paradela	Portugal	1958	110
Rama	Yugoslavia	1967	110
Cethana	Australia	1971	110
Santa Juana	Chile	1995	110
Uluai	Malasia	1989	110
Batang Ai, Sarawak	Malasia	1985	110
Itapebi	Brasil	2002	106
Fortuna	Panamá	1994	105
Salt Springs	EUA	1931	100

(\*) Año en que comienza su construcción

*Tabla 1.1 Principales presas de ECC por su altura*

## I.2 Partes de la cortina

En diseño básico de las presas de ECC es similar para todas ellas, consta de tres elementos principales: el plinto, la zona de enrocamiento de la cortina y la cara de concreto; además es importante mencionar las juntas entre las losas y de éstas con el plinto, los tratamientos que se le dan a la roca de cimentación y de las laderas para extender el plano estanco y finalmente el parapeto.

### Plinto

El plinto es la zapata de desplante que liga a la losa de concreto con la roca de cimentación, es una losa sobre la roca de un ancho de 5 a 8 m y un espesor de 40 a 80 cm, a través de la cual se realizan las inyecciones de consolidación e impermeabilización de la roca.

El plinto se construye perimetralmente, después se coloca el material del cuerpo principal de cortina y finalmente se cuela la losa, el contacto entre ésta y el plinto se denomina junta perimetral y es de especial cuidado para evitar cualquier tipo de filtración de agua una vez que la presa esté llena.

Es importante desplantar el plinto sobre roca sana para garantizar su continuidad con la losa de concreto, en el caso de encontrar irregularidades importantes que puedan afectar la estabilidad de la presa deberán ser tratadas con concreto dental. Se debe garantizar una correcta limpieza de las laderas antes de la construcción del plinto. Sin embargo, existen casos, como son las presas de Santa Juana y Puclaro en Chile, en dónde se ha adoptado un diseño exitoso basado en desplantar el plinto sobre aluvión en el fondo del cauce, lo cual resulta sumamente exitoso en casos en que el espesor del aluvión es tal que la excavación para encontrar roca sana resulta económica o técnicamente inviable.



*Figura 1.2 Plinto en una etapa de construcción temprana del cuerpo principal de la cortina P.H. La Yesca*

Una forma de determinar el ancho del plinto de manera empírica ha sido adoptar  $0.05H$ , en dónde  $H$  es la altura del embalse, en roca fragmentada o de pobre calidad es común adoptar  $0.1H$ , el valor mínimo adoptado para el ancho del plinto es de 3 m.

La geometría y el trazo del plinto están definidos por las condiciones topográficas y geológicas del sitio del proyecto.

## Enrocamiento, cuerpo principal de la cortina

Es la masa de roca que da estabilidad a la presa y sirve de apoyo a la cara de concreto. Generalmente se busca a provechar los productos de excavación de otras estructuras como puede ser el vertedor o casa de máquinas, con el fin de disminuir costos en el transporte desde bancos de material lejanos a la obra. La sección de enrocamiento es el elemento estructural, está zonificada a fin de recibir la carga hidráulica del embalse con mínimos asentamientos y dar seguridad a la estructura ante la posibilidad de flujo en caso de filtraciones por la cara de concreto.

En general está conformado por 4 materiales, clasificados por su función y ubicación en el cuerpo de la presa:

- Material 2: Sirve de respaldo a la losa de concreto. Su granulometría permite mejor compactación y baja permeabilidad.
- Material 2F: Ocupa una franja pequeña a todo lo largo de la junta perimetral, entre el plinto y la losa de concreto en el sitio de mayor potencial de filtraciones.
- Material 3B: Es el cuerpo principal de la presa, puede subdividirse colocando el material menos compresible y de mejor permeabilidad en el tramo aguas arriba y el material de menor calidad aguas abajo y en la zona muerta.
- Material 4: Está constituido por enrocamiento grueso y provee protección al talud de aguas abajo.

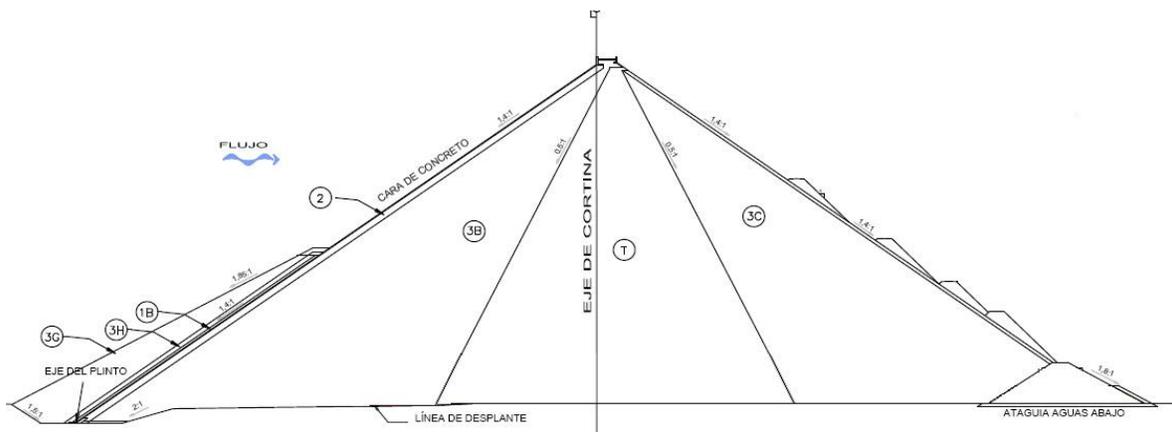


Figura 1.3 Sección máxima de la presa ECC del P.H. La Yesca



Figura 1.4 Colocación del enrocamiento, vista general del P.H. La Yesca

## Cara de concreto

Es de vital importancia en el diseño de las presas de ECC, pues es la que da la impermeabilización a la presa, la losa debe ser proyectada para adaptarse a las deformaciones del enrocamiento, no se diseña para soportar el empuje del agua, sino como una membrana deformable e impermeable que no debe romperse.

Debido a que el concreto no puede aceptar ciertas deformaciones sin fracturarse, se debe diseñar la losa con juntas que absorban los movimientos, dichas juntas deberán estar provistas de sellos que eviten el paso del agua.

Aunque las filtraciones sensiblemente deben ser evitadas, hay ocasiones en que resultan ineludibles y pueden ser admitidas, pues en general se ha visto que no comprometen la seguridad de la estructura.

El procedimiento de colado es en franjas verticales de 15 m de ancho en colados continuos con cimbra deslizante para reducir el número de juntas horizontales. El diseño de la losa de concreto está íntimamente ligada a la forma deformada del enrocamiento, en teoría aplicando la deformación a la losa se pueden obtener los elementos mecánicos (momento flexionante, cortante y carga axial) y de esta manera proponer el espesor de la losa y los armados, sin embargo esto no siempre resulta sencillo y muchas veces no es posible hacerlo y lo más común es basarse en la fórmula empírica que establece:

$$\text{espesor de la losa} = 0.30 + k \times H$$

En dónde k es un factor que varía entre 0.002 y 0.003.

En Beijing, Cooke mencionó que esta fórmula para el espesor de la cara de concreto ha resultado satisfactoria y lo seguirá siendo.

Para el refuerzo de la losa se sigue el criterio de agrietamiento por cambios de temperatura y por restricción de la deformación de la presa. La colocación del refuerzo de acero es en la parte central de la losa y corresponde al 0.4% en el sentido longitudinal y 0.3% en el sentido paralelo al eje.



*Figura 1.5 Refuerzo de la losa de concreto. P.H. La Yesca*

## Juntas

Entre las losas y el plinto se forman las siguientes juntas:

- Junta perimetral: Es el contacto de la losa y el plinto
- Juntas verticales de expansión: Entre franjas verticales, cercanas a las laderas son las que seguramente tendrán un movimiento de apertura debido a la forma en que se deformará el terraplén.
- Juntas verticales de compresión: Entre franjas verticales, en la parte central de la presa son las que probablemente tendrán un movimiento de cierre.
- Juntas horizontales: son juntas constructivas entre etapas de colado de la losa.
- Junta entre la losa de concreto y el parapeto: Se coloca para independizar los movimientos de cada una de estas estructuras.

Los materiales y los diseños de las juntas han evolucionado de proyecto en proyecto de una manera empírica. Tradicionalmente las presas construidas con enrocamiento sin compactar utilizaron sellos de cobre en todas las juntas, sin embargo éstas fallaron por la magnitud de los movimientos de las juntas.

Al paso del tiempo se utilizó un sistema de doble sello en el que se colocaba la lámina de cobre al fondo de la junta y en la parte central una banda de PVC. Este sistema ha funcionado bien.

En Alto Achincaya, Colombia, aunque el proyecto especificaba el doble sistema se eliminó la lámina de cobre durante la construcción, lo que dio como resultados graves filtraciones, que pudieron ser controladas colocando un material tipo mastique encima de la junta y material impermeable adicional.

En la presa Khao Laem en Tailandia, en dónde también se presentaron problemas de filtraciones en las juntas, la recomendación fue lanzar material fino sobre las juntas para que las partículas sellaran las aberturas.

A raíz de estas experiencias se estableció un sistema triple de sellado, principalmente en las juntas perimetrales y en las verticales de abertura. Este sistema fue adoptado en Aguamilpa, México, dando muy buenos resultados. En Aguamilpa, lo que se hizo finalmente fue colocar una lámina de cobre al fondo de la junta, en el centro la banda de PVC y en la parte exterior un recipiente que contenía ceniza volante producto de la quema de carbón.

En experimentos de laboratorio se demostró que la ceniza tiene la capacidad de introducirse por las grietas de filtración y detenerse en el material de respaldo de la losa de concreto. Este modelo de sellos fue usado con éxito en Aguamilpa, el Cajón y ahora en La Yesca con algunas modificaciones y mejoras.

## Parapeto

El parapeto es el muro de contención en la corona y que determina la altura máxima de la presa. En general se diseña para colocar un camino vehicular en la corona de la presa, por lo que es importante determinar el ancho óptimo de corona pues esto influirá en el volumen total de la presa. Si el parapeto es pequeño, prácticamente no influye, sin embargo a medida que es más alto, permite un ahorro importante de material. A pesar de ello, la altura del parapeto no debe exagerarse, en particular en zonas de alta sismicidad, pues en esa zona las aceleraciones telúricas se magnifican notablemente.

Los parapetos se diseñan como muros de contención en cantiliver sujetos a empujes horizontales del relleno, en zonas sísmicas deben considerarse efectos de vibración e imposición de cargas horizontales.

## Tratamientos

Una vez construido el plinto se efectúan las inyecciones, los tratamientos son de tres tipos:

- Tratamiento superficial: Se efectúa sobre la roca, bajo el plinto y en su vecindad, consiste en rellenar de concreto dental en las oquedades que se localicen en la excavación debido a fallas locales. Cuando se tiene material excesivamente alterado o fracturado se utiliza concreto lanzado que puede ser complementado con malla electrosoldada.
- Inyecciones de consolidación: Son superficiales (hasta 5 m de profundidad) y se diseñan de acuerdo a las condiciones de la roca expuesta.

- Inyecciones profundas: Se realizan en los estratos profundos, entre 1/3 y 2/3 de la altura del embalse, dependiendo de la calidad de la roca.

### I.3 Proceso cronológico constructivo

Hoy en día en la construcción de presas, se tiene por objetivo el reducir los tiempos de ejecución con la implementación de nuevos procesos constructivos y de modernos equipos, obteniendo como resultado la puesta en marcha de la central en un lapso cada vez menor obedeciendo a cuestiones de costos, políticas y sociales.

Con las mejoras en los métodos constructivos que se han puesto en operación se ha permitido que no únicamente se reduzcan los tiempos de trabajo, sino además la fuerza de trabajo, como se puede observar en la siguiente tabla.

C.H.	Fuerza de trabajo (empleos directos)	Tiempo de ejecución (años)
<b>Chicoasén</b>	19 000	7
<b>Aguamilpa</b>	10 000	5
<b>El Cajón</b>	5 000	4.5

*Tabla 1.2 Empleos generados y tiempo de ejecución*

Cabe mencionar que este incremento en la velocidad de ejecución no afecta cuestiones de calidad y seguridad de la obra, ya que se llevan a cabo estrictos procesos de supervisión que permiten llevar un control adecuado de las actividades que se están realizando, aunque dependiendo del país los niveles de supervisión varían debido a que en algunas partes se considera un gasto innecesario, pudiendo traer consigo numerosos problemas.

El proceso general llevado a cabo para la construcción de la obra de contención es:

El desvío del río es una de las primeras actividades que se llevan a cabo, la cual se puede dividir a su vez en túneles de desvío y ataguía. Debido a la magnitud de estas obras, el tiempo de ejecución es considerable, por lo cual se ha visto como una práctica común que en paralelo con ellas se puedan llevar a cabo actividades como la limpieza y excavación de los taludes y cama de la cortina, colocación de material aguas abajo. Esta práctica se ha podido ver con éxito en obras como Campos Novos y Xingo.

Una vez que se logra desviar el río de su cauce, y mientras todavía se coloca el material de las ataguías, se debe comenzar con la excavación para el arranque de las obras del plinto debido a que esta actividad se lleva un tiempo considerable. La razón fundamental es que el plinto se debe desplantar en una roca sana, se deben rellenar oquedades y cualquier otra irregularidad que pueda poner en riesgo la cimentación. También se han encontrado casos en donde la calidad de la roca no mejora a pesar de la profundidad de la excavación, por lo que se ha optado por desplantarla a poca profundidad aunque eso implique hacerlo sobre material de aluvión. Durante este proceso se puede seguir con la colocación del cuerpo de la cortina aguas abajo.

La ventaja que tiene este proceso en la construcción de la cortina es que se puede colocar material en diferentes partes del cuerpo, según los tipos de material, sin que posteriormente exista algún problema de asentamientos. De esta forma, se puede colocar el material del cuerpo de la cortina durante la construcción del plinto, un ejemplo de este proceso fue la construcción de la presa de Campos Novos, en donde se estaba terminando de colocar el material de la ataguía y al mismo tiempo se colocaba el cuerpo de la cortina a excepción de una sección de 30m de ancho antes de llegar a la zona del plinto. Conforme se avanza en la colocación del cuerpo no se debe descuidar la construcción del plinto, porque aunque existe cierta libertad entre los trabajos de colocación de material y la de construcción del plinto llegará el momento en que se tendrá que detener el avance de la cortina para emparejarlo con la colocación del plinto.

Una vez terminado el plinto y conforme el avance de la cortina continúa, se debe construir las losas de arranque, que servirán como guía para las cimbras deslizantes, pero su objetivo principal es cuidar la junta perimetral y sus sellos durante la colocación del concreto para la cara de la presa.



*Figura 1.6 Losas de arranque P.H. La Yesca*

El colado de la cara de concreto se divide en varias etapas, generalmente de dos a tres, y se encuentra en función del avance en la colocación del material de la cortina. La elaboración de cada etapa se realiza mediante el colado de franjas que varían entre 12 y 18 m de ancho, actualmente se está tomando como medida estándar un ancho de 15 m. Actualmente es común el uso de cimbras deslizantes, siendo los colados continuos hasta llegar al final de cada etapa. Dichas franjas están unidas mediante juntas verticales y horizontales, lo cual permite que la cara de concreto tenga cierta flexibilidad a los asentamientos y deformaciones que sufra el cuerpo de la cortina, así como a contracturas generadas por el mismo proceso de fabricación de las losas.

Finalmente se construye el parapeto ubicado en la cresta de la cortina, el cual se une con la losa de concreto mediante juntas. Últimamente se ha puesto en práctica el uso de paredes prefabricadas cuya finalidad es facilitar el proceso y reducir los tiempos de construcción.

## I.4 Tendencias en el diseño y construcción de presas

Actualmente es indudable la importancia que tiene en nuestro país el desarrollo de la infraestructura hidráulica, ya que sin ella no puede haber un verdadero impulso para la mejora de la calidad de vida de sus habitantes.

Las CFRD han sido la solución a problemas planteados en diversos proyectos, esto debido a sus procedimientos constructivos, los menores tiempos de ejecución, las problemáticas en la cimentación son menos complicadas, menores cantidades de material.

El diseño y desarrollo de las presas de enrocamiento con cara de concreto se han basado en la experiencia obtenida de otros proyectos, obteniendo en la mayoría de los casos resultados satisfactorios, lo cual ha ido marcando el camino en la evolución de las presas de este tipo.

### I.4.1 Diseño de CFRD

Las presas de enrocamiento y los procesos constructivos han cambiado de forma significativa a lo largo del siglo pasado, sobre todo para las presas de ECC que han sido resultado de la observación de las prácticas constructivas y el análisis del desempeño, de teorías y pruebas de laboratorio.

J. Barry Cooke ha dividido la evolución de las presas de enrocamiento contemporáneas en 3 etapas, las cuales son:

- Primer periodo (1850 – 1940): La presa moderna de enrocamiento surgió en la fiebre de oro de California, en donde los mineros hacían presas para almacenar agua. Es ahí donde surgió la idea de presa de enrocamiento volcado con cara de madera, posteriormente se evolucionó al concreto, estas presas eran considerada seguras pero tenía un gran problema como consecuencia de no existir en aquellos tiempos los equipos necesarios de compactación, los asentamientos eran tales que las juntas se movían y la cara de concreto se fracturaba, por lo que la infiltración del agua amenazaba con convertirse en un problema mayor a medida que las presas alcanzaban alturas considerables.
- Periodo de Transición (1940 – 1965): El extenso uso en la construcción de las presas de enrocamiento volcado con cara de concreto empezó a mostrar sus limitaciones y problemas asociados a los métodos usados. Una de éstas es la disponibilidad del adecuado material para el enrocado. Para un buen diseño las especificaciones marcan que la calidad de roca sea sana, dura y durable, características que exige las especificaciones de ASTM para agregados de concreto. En este periodo floreció el surgimiento de las presas con núcleo de arcilla que venía a resolver el problema de las filtraciones. Es posible notar un cambio en la tendencia de construcción de presas a partir de 1940, se optó por dejar a un lado las presas con cara de concreto debido a que se quería lograr cortinas cada vez más altas, siendo en esos casos las filtraciones un tema a considerar. En los años 50's, con los avances de los principios de mecánica de suelos, en especial para su aplicación en el tratamiento de la cimentación de arcilla y en el diseño de los filtros, convirtieron a las

presas de núcleo de arcilla en una opción más segura y viable. A finales de este periodo surgió un gran acontecimiento: el desarrollo del compactador de rodillo vibratorio de tambor liso, el cual nació de la necesidad de poder construir presas de mayor altura y poder explotar al máximo los bancos de material aún cuando la calidad de la roca no fueran los más adecuados. A pesar de este surgimiento, la aceptación de las presas ECC no se dio inmediatamente, tomo tiempo reponerse de los sucesos vividos con las filtraciones, así como obtener experiencia en el manejo de la compactación y desarrollar mejores diseños sobre el plinto y cara de concreto.

- Periodo moderno (1965 – 1982): Antes de este periodo, las presas de enrocamiento eran definidas como “una presa que se basa en roca, ya sea volcada en ascensos o compactada en capas, como un elemento estructural importante”, pero a razón del nuevo hallazgo en el proceso constructivo, una definición más contemporánea sería “una presa que se basa en enrocamiento compactado como un elemento estructural importante”. En este periodo se continuó realizando proyectos tanto de núcleo de arcilla como de cara de concreto, obteniendo cada vez mayor conocimiento en su proceso constructivo y en su comportamiento.

La experiencia que se obtuvo de las grandes presas de enrocamiento con núcleo de arcilla se combinó con el conocimiento de los movimientos de la cara existentes de pequeñas presas con cara de concreto y se obtuvieron las bases para el diseño de grandes presas de ECC. Algunas condiciones que favorecerían a las presas de ECC incluyen los altos requerimientos de resistencia a sismos, condiciones de altas precipitaciones o climas fríos, propiedades desfavorables de algunos materiales que conforman las presas de tierra, así como menor tiempo de ejecución y la reducción de costos.

Para la realización de un proyecto de infraestructura se debe asegurar que sea económicamente factible desde el proceso de diseño, lográndose con mayor facilidad si se considera como una obra multipropósito (generación de energía, control de avenidas, almacenamiento de agua). Por otro lado se debe tener en cuenta la importancia del manejo de la seguridad en el diseño por ser un proyecto que pudiera poner en riesgo la vida de miles de personas. Un análisis de seguridad va a permitir crear estructuras estables sin tener que recurrir a sobredimensionamiento de las mismas, lo que repercutiría en los costos y la haría incosteable, por lo que un correcto estudio hará la obra económicamente factible. Hoy en día se está proponiendo que se cambie los factores de seguridad por criterios probabilísticos, los cuales se adaptan con mayor exactitud a los acontecimientos propios del proyecto.

## Plinto

Con el regreso de las presas de ECC en 1966 en las presas New Exchequer y Cabin Creek, hubo un cambio significativo en el desplante de la losa que anteriormente era una trinchera de cierre (cutoff blasted trench) y pasó a ser a lo que conocemos hoy como plinto. Su diseño ha evolucionado para reducir su ancho compensándolo con la extensión de una losa anclada dentro del cuerpo de la cortina.

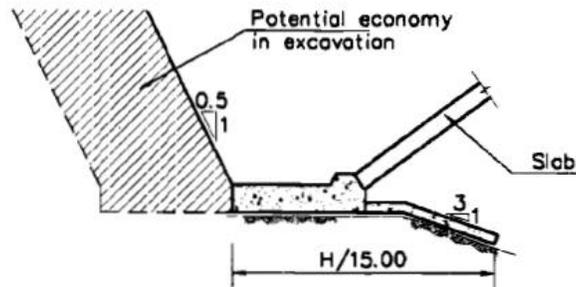


Figura 1.7 Plinto externo y plinto interno.

Este concepto fue propuesto por J.B. Cooke con el propósito de ahorrar en cuestión de excavación de roca. La longitud del plinto externo está definida por la necesidad de espacio para las inyecciones, mientras que el plinto interno satisface los requerimientos para el gradiente de filtración (percolation gradient).

Algunas presas que han usado este diseño han sido la presa de Corrales en Chile, Itá en Brasil y la Yesca en México.

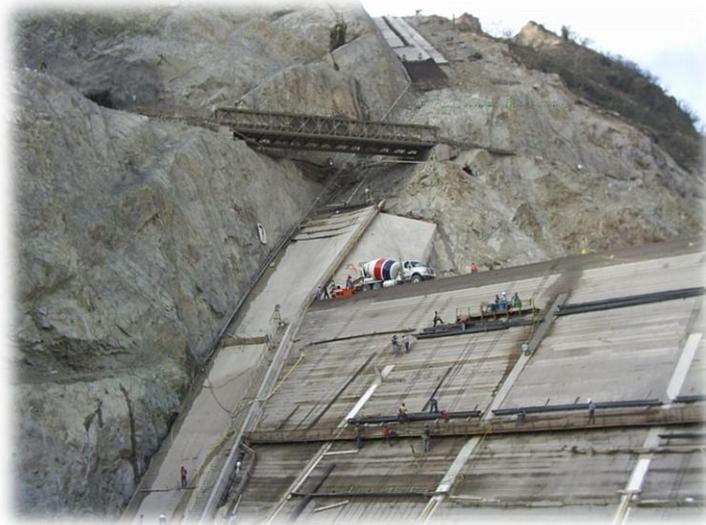


Figura 1.8 Diseño de plinto en la presa La Yesca, México

## Cuerpo de cortina

Hace poco más de una década, se creía que la pendiente de aguas arriba del cuerpo de la cortina no debía tener una inclinación mayor a la relación 1.3H:1V, siendo de igual forma para aguas abajo. En la presa de Alto Achincaya y Foz do Areia se manejó una pendiente aguas arriba de 1.4H:1V, aunque según Barry Cooke no tenía razón de ser. Hubo casos en los que se podía ver presas con pendientes menores aguas abajo, como fue el caso de Cabin Creek (1.75H:1V), Babagon (1.6H:1V) y Chuza (1.6H:1V), pero fueron realizadas como consecuencia a problemáticas

como material usado y necesidades de excavación. Hoy en día podemos observar que la tendencia usada en la construcción de los últimos tres proyectos en México es usar una pendiente de 1.4H:1V.

### **Cara de concreto**

Desde hace ya varias décadas se diseña el espesor de la cara de concreto sin grandes modificaciones. En 1971, para la presa de Cethana, que para ese entonces fue la presa de ECC mas alta del mundo, se usó la formula de  $0.3 + 0.002H$ , en dónde H representa la altura del embalse. También en esos tiempos era muy usada la formula  $0.3 + 0.003H$ , pero debido a que el cambio en el espesor repercute en el ámbito económico, no solo por el concreto que se va emplear, sino también por el acero de refuerzo que se va a usar, se volvió una práctica común el uso de la primera formula. Cabe mencionar que el espesor de la cara de concreto no involucra cuestiones de seguridad, por lo que no afecta que se reduzca.

Se ha observado que en la mayoría de las cortinas de ECC se pueden encontrar grietas a consecuencia del encogimiento del concreto. Estas grietas han hecho que exista un gran interés en el estudio para la mejora de la cara de concreto y se ha podido observar algunas particularidades, por ejemplo, las grietas son más pequeñas y estrechas cuando el embalse contiene agua fría. Generalmente estas fallas son principalmente horizontales de 0.1 a 0.2 mm de ancho, aunque hay casos en los que se llega a los 0.3 mm. Anteriormente, cuando el cuerpo de la cortina no se compactaba, el porcentaje de acero era del 0.5%, debido a que la presa podía tener una mayor deformación por consecuencia de la fuerza ejercida del embalse sobre la cara, pero a raíz de la compactación del cuerpo se propuso el 0.4% de refuerzo para cada sentido. La tendencia adoptada por algunas presas se muestra en la siguiente tabla.

Presa	Refuerzo		
	Horizontal	Vertical	Extremos
<b>Alto Achincaya, Colombia</b>	0.5	0.5	-
<b>Foz do Areia, Brasil</b>	0.4	0.4	-
<b>Aguamilpa, México</b>	Varía de 0.3 a 0.5		
<b>Tianshengqiao, China</b>	0.3	0.4	-
<b>Campos Novos, Brasil</b>	0.3	0.4	0.5
<b>Mohale, Lesotho</b>	0.35	0.35	0.4
<b>El Cajón, México</b>			

*Tabla 1.3 Tendencia en el acero de refuerzo de la cara de concreto*

Por lo que se puede observar en la tabla y como consecuencia de saber que las grietas no representan un peligro, la aplicación del acero de refuerzo en la losa de concreto tiende a disminuir.

## Construcción de CFRD

Con el paso del tiempo, las presas de enrocamiento con cara de concreto han ido evolucionando hasta llegar a lo son hoy, una alternativa segura que ha venido a reducir los costos y los tiempos de ejecución. También se ha podido ver que este tipo de presas no son inmunes a fallas, observando que a consecuencia de la extrapolación de las experiencias obtenidas se han dado casos totalmente inesperados.

J. Barry Cooke en el simposio de Beijing (ICOLD, 2000) mencionó:

"La seguridad inherente de las presas de enrocamiento con cara de concreto depende del adecuado juicio de ingenieril, cuidado en la construcción y el correcto monitoreo, así como para otro tipo de presas."

Como consecuencia de estos aprendizajes y del buen juicio de la ingeniería, actualmente se realizan nuevas hazañas, como el hecho de poder realizar una cimentación sobre material de aluvión.

## Plinto

Debido a las condiciones topográficas de cada lugar, la construcción del plinto presentará diversas problemáticas que tendrán que ser resueltas. Lo más común y recomendable es que la cimentación del plinto se encuentre desplantada en roca sana no erosionable. En este caso se tiene la facilidad que al excavar la base para el plinto se pueden colocar directamente las anclas, lo que permite que la estructura sea monolítica con la cimentación, pudiendo ver casos como Aguamilpa, México y Santa Juana, Chile. Otro método sería colocar sobre la superficie limpia concreto dental, lo que facilitaría el acceso para la colocación del acero de refuerzo y la colocación de las anclas. Este método fue aplicado en Brasil, en especial en la presa de Xingó.

Desde hace ya varios años se ha podido desplantar el plinto sobre material de aluvión mediante la compactación de la grava protegido debidamente por filtros. La característica de este plinto es que es articulado y se encuentra conectado a un muro pantalla, como se ve en la fig. 1.9

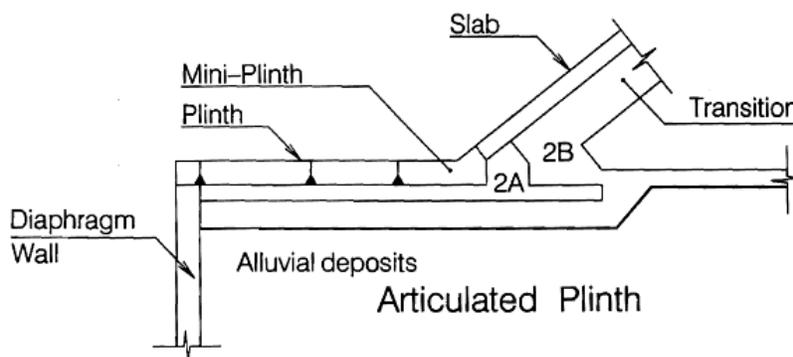


Figura 1.9 Plinto articulado usado en presa Santa Juana y Plucaro

En el plinto se llevan a cabo las inyecciones de consolidación y de impermeabilización, las cuales varían en cantidad y longitud según las características propias del proyecto. Actualmente se llevan a cabo las inyecciones mediante el uso del método GIN (Grout Intensity Number) y con el uso de sistemas electrónicos, los cuales solamente hay que alimentar con la información de cada barreno y tramo a inyectar y el dispositivo controlará automáticamente la presión y volumen necesario para sellar el tramo, con base a las especificaciones de cada proyecto.

### Cuerpo de cortina

Anteriormente, para brindarle un adecuado soporte a la cara de concreto, se optaba por compactar la cara mediante el uso de emulsión de asfalto y de pequeños rodillos lisos vibratorios (6 ton), como en el caso de las presas Foz do Areia y Segredo. A través de la experiencia de varias presas se pudo observar que al estabilizar la cara de la presa mediante este método se seguían presentando problemas de segregación y erosión del material 2B durante la construcción, en especial en lugares donde existían grandes precipitaciones, como en la presa Alto Anchicayá y Salvajina entre otras. Por otro lado, para la protección del material 2B que quedaba expuesta en la cara aguas arriba de la presa se debían de tener diversos cuidados como:

- La zona 2B estaba ligeramente inclinada hacia el centro de la cortina para prevenir que el agua fluyera cuesta abajo sobre la cara de aguas arriba.
- Construir barreras temporales entre el material 2B y el plinto espaciadas a cada 10 o 15 m de altura, para coleccionar el agua y que fluya por el plinto, evitando la erosión de la cara.
- Reducir la altura de las capas tratadas con asfalto a 5 o 6 m.
- Aplicar un tratamiento de concreto lanzado pero quedaba limitado por el alcance del brazo entre 5 y 6 m.
- En presas construidas en valles anchos desarrollar un tratamiento continuo de la cara aguas arriba para que la protección de asfalto fuera casi continuo.

Es por esto que los constructores de la presa Itá desarrollaron un método para proveer de la adecuada protección al material 2B y evitar así la erosión y la segregación de la cara aguas arriba.

Esta técnica consiste en la colocación de un bordillo extruido compuesto de cemento, arena, agregado de  $\frac{3}{4}$  y agua, el cual se coloca con una máquina que va traslapando los bordillos, creando una barrera para evitar la erosión.



Figura 1.10 Bordillo extruido del P.H. La Yesca

Los beneficios que tiene este método son:

- La segregación es menor.
- Menores pérdidas de material en la cara aguas arriba.
- Protección inmediata en contra de la erosión.
- Reducción de equipo de construcción.
- Un método más seguro evitando que la gente trabaje en la cara aguas arriba.
- Mayor producción, logrando colocar hasta 2 capas al día de 500 m de largo.
- Queda una superficie más limpia para la colocación del acero de refuerzo y la posterior colocación del concreto.

## Cara de concreto

Ya es una práctica común que en la construcción de la losa de concreto se use la denominada cimbra deslizante, de la cual existen algunas variantes que consisten en un sistema de rieles operado por gatos hidráulicos o por cables de acero unidos a unas grúas eléctricas, otra opción son plataformas sin rieles operadas por grúas eléctricas. La velocidad que alcanza es aproximadamente de 3m/hora. El ancho de las plataformas se ha desarrollado para que se pueda adaptar a diferentes anchos que van de los 12 a los 16 m. Un caso especial fue las presas de El Cajón y Shuibuya en donde se hicieron losas de 7.5 m de ancho en las cercanías de las laderas como consecuencia del análisis de las tensiones que se pudieran presentar. El colado de las losas se realiza de forma alternada, para que así ya no se necesite de cimbras laterales para el confinamiento. Para la colocación del concreto se usan canales metálicos en donde es vertido el concreto desde la cresta de la cortina.

Para la junta perimetral se ha seguido la tendencia proveniente desde la presa de Foz do Areia con pequeñas modificaciones. La junta consiste en un concepto de doble defensa, un sello de cobre colocado en parte baja con un sello superior cubierto por arena limosa cuyo objetivo es el de obstruir en el caso de que fallara el sello superior. Para el caso de El Cajón se optó por colocar un segundo sello de cobre cubierto con ceniza volante y una sección rellena de madera.

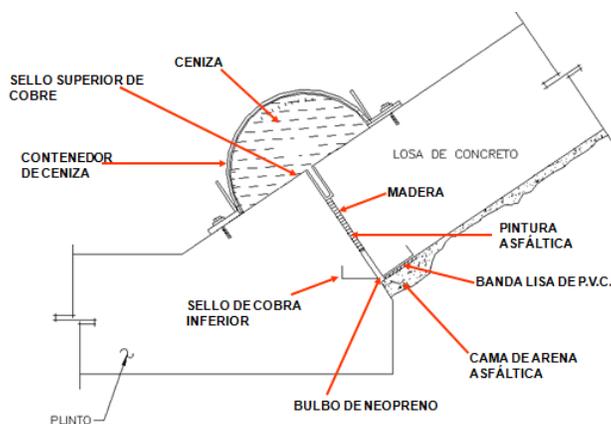


Figura 1.11 Diseño de junta perimetral de C.H. El Cajón

En el caso de la presa Shiubuya, que es la presa de ECC mas alta del mundo, se optaron por dos tipos de sellos, por debajo de la elevación 350 se integró por sellos de cobre en el fondo y en el centro una caña de caucho encima de la junta, así como un caucho corrugado fijado con pernos por debajo de un relleno flexible protegido por una placa metálica; por encima de la elevación 350, se eliminó el sello de cobre intermedio. En otros casos se optaron por algunas modificaciones en los que el sello central de PVC se eliminaba o se le adicionaba al sello de cobre una caña corrugada de caucho.

Existen dos tipos de juntas, las de tensión y de compresión. Las juntas de tensión generalmente se encuentran en las zonas cercanas a las laderas o en los extremos de la cara de concreto. Éstas se encuentran conformadas de forma similar a las juntas perimetrales, con pequeñas variaciones entre los proyectos, pero que de forma general están compuestas por un sello de cobre sobrepuesto en un soporte de mortero combinado con neopreno (o IGAS) en la parte superior o ceniza volante con un geotextil en una placa perforada y galvanizada. Las juntas de compresión se encuentran ubicadas en el centro de la cara de concreto y el arreglo general que suelen tener es un sello de cobre en la base y una capa de neopreno a caucho flexible como sello superior.

Han existido algunos casos en donde las juntas de compresión han tenido problemas, en donde las inspecciones muestran que existió desprendimiento de concreto y el refuerzo de acero horizontal ha sido doblado debido a las fuerzas de compresión.