



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ACATLÁN

DISEÑO DEL PLINTO Y COLOCACIÓN DE LOS SELLOS
IMPERMEABLES EN LA JUNTA PERIMETRAL, PARA LA
CORTINA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA,
MÉXICO.

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA

CARLOS ELIU BÁEZ GARCÍA

ASESOR: ING. JORGE FLORES NÚÑEZ

MARZO, 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Si logro ver más lejos es porque he conseguido auparme a hombros de gigantes.

Isaac Newton.

Lo que Dios nos dio en este mundo para no estar solos es la familia; sabiendo que no existe forma de agradecer una vida llena de esfuerzo y sacrificio, sientan que el objetivo logrado también es de ustedes.

Carmen, Lety, Anaid y Montse... mi familia.

Cuando estuve contigo aprendí muchas cosas; en tu ausencia las llevé a la práctica.

Con respeto y cariño, gracias padre.

El arte más importante del maestro es provocar la alegría en la acción creadora y el conocimiento.

Albert Einstein.

Un sincero agradecimiento a mis profesores, especialmente a mi mentor en este trabajo.

Ing. Jorge Flores Núñez.

A la memoria de Conchita y Bernardo.

Índice

Introducción.	1
Generalidades.....	2
Capítulo 1. Las presas y su clasificación.	4
1.1. Definición de presa.	4
1.2. Clasificación general de las presas.	4
1.3. Componentes de una presa	10
Capítulo 2. Consideraciones generales para el diseño de presas de tierra-enrocamiento.....	13
2.1. Selección del tipo de cortina.	13
2.2. Presas de tierra-enrocamiento.....	13
2.2.1. Núcleo.	14
2.2.2. Respaldos.	15
2.2.3. Zona de transición o filtros.....	15
2.2.4. Control y manejo de filtraciones.....	15
2.2.5. Estabilidad en la cimentación.	17
2.2.6. Bordo libre.....	18
2.2.7. Alineación del eje de la presa.	18
2.2.8. Construcción de los terraplenes.	19
2.2.9. Zonificación de la cortina.	19
2.2.10. Ancho de corona.....	19
Capítulo 3. Presas de Enrocamiento con Cara de Concreto (PECC).....	20
3.1. Descripción.	20
3.2. Sección típica de las Presas de Enrocamiento con Cara de Concreto.	22
3.3. Ventajas de la utilización de las PECC.....	24
3.4. Comportamiento estructural de las losas que forman la cara de concreto.	24
3.4.1. Esfuerzos durante la construcción.....	24
3.4.2. Esfuerzos durante el primer llenado.	25

3.5. Consideraciones para el diseño del plinto.	29
3.5.1. Trazo del plinto.	30
3.5.2. Excavación para desplante del plinto.	32
3.5.3. Tratamientos a través del plinto.	33
3.5.4. Dimensiones del plinto.	34
3.5.5. Diseño estructural.	35
3.6. Diseño de los sellos impermeables para la junta perimetral.	38
3.6.1. Ubicación de los sellos.	38
3.6.2. Sellos en zona inferior.	39
3.6.3. Sellos en zona superior.	40
3.6.4. Contenedor de ceniza.	41
Capítulo 4. Proyecto Hidroeléctrico La Yesca.	42
4.1. Descripción.	42
4.2. Hidrología.	43
4.3. Geología de la zona.	43
4.4. Características del vaso.	44
4.5. Diseño del plinto.	45
4.5.1. Geometría del plinto.	47
4.5.2. Revisión del ancho del plinto.	51
4.5.3. Cálculo del acero de refuerzo.	54
4.5.4. Armados de la losa del plinto.	54
Capítulo 5. Análisis estructural del plinto.	56
5.1. Idealización del elemento.	56
5.2. Revisión por Flexión.	59
5.3. Determinación de las cargas actuantes sobre el plinto.	60
5.4. Verificación del cortante por fricción en el cabezal.	62
5.4.1. Fuerza máxima resistente en el cabezal.	63

5.5. Estabilidad del plinto ante deslizamiento.....	65
5.6. Factor de Seguridad ante volcamiento:.....	68
Capítulo 6. Sellos impermeables de cobre para la junta perimetral.	69
6.1. Descripción.	69
6.2. Material de los sellos superior e inferior.....	69
6.3. Dimensiones de los sellos.	69
6.3.1. Sello inferior.	69
6.3.2. Sello superior.....	72
6.4. Unión de los elementos de cobre.	72
6.5. Transiciones en los sellos.....	73
6.6. Colocación del sello inferior.....	74
6.7. Colocación del sello superior.	76
6.8. Material de relleno en las juntas perimetrales.	79
6.8.1. Colocación del material de relleno.....	79
6.9. Contenedor de ceniza.....	80
6.9.1. Ensamble de contenedores y geotextil.....	81
6.9.2. Llenado de contenedores con ceniza volante.....	83
Capítulo 7. Proceso de Soldadura de los sellos de cobre.....	84
7.1. Descripción.	84
7.2. Pruebas a la soldadura.....	91
7.2.1. Inspecciones a la soldadura (pruebas no destructivas).....	91
7.2.2. Ensayes a probetas.	92
7.2.3. Pruebas de estanqueidad.....	97

Conclusiones.....	99
Recomendaciones.....	100
Anexo 1	101
Referencias.....	102

Introducción.

En las presas de enrocamiento con cara de concreto (Concrete Face Rockfill Dams), la barrera que impide el flujo del agua a través de la cortina está constituida por una serie de losas de concreto reforzado, las cuales se colocan en la cara aguas arriba de la estructura y se apoyan sobre el material de la cortina.

El enrocamiento proporciona el cuerpo de la cortina y da la estabilidad a la presa, debido a sus propiedades impermeables la cara de concreto genera el plano de estanqueidad que origina el embalse; actualmente son las presas que más se construyen debido a las ventajas constructivas que éstas ofrecen, situación que ha permitido la construcción de presas de grandes alturas capaces de almacenar de manera segura una mayor cantidad de agua para su uso posterior.

Una consecuencia directa del incremento en la altura de la cortina es el mayor empuje hidrostático que debe soportar dicho elemento, situación que se soluciona robusteciendo los respaldos y manejando la granulometría de manera adecuada; sin embargo la cara de concreto es una zona vulnerable ante esta situación, debido a que el enrocamiento sufrirá deformaciones que originarán esfuerzos en las losas de concreto, afectando su integridad y comprometiendo la estanqueidad de la presa.

Por otro lado, el proceso constructivo de las losas que forman la cara de concreto tenderá a dejar juntas entre los diferentes paneles colados, estas juntas son zonas potenciales de filtración y deben ser tratadas para evitar que dichas filtraciones sean excesivas. Para unir las losas de concreto con la roca de cimentación en este tipo de presas se diseña un elemento estructural llamado plinto, el cual también tendrá juntas constructivas entre las losas de concreto y el propio elemento.

Dada la importancia que tiene el plinto como cimiento de la cara de concreto, este elemento debe ser diseñado estructuralmente para garantizar que resistirá los esfuerzos a los cuales estará sometido, de igual manera se debe llevar a cabo la colocación de materiales que sirvan de “sellos” en las juntas entre el plinto y las losas de concreto, con el propósito mantener el plano de estanqueidad que requiere la presa. El presente trabajo está orientado a establecer el conocimiento necesario para el diseño del plinto; así como para la elaboración y correcta colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del proyecto Hidroeléctrico La Yesca, ubicado en los estados de Jalisco y Nayarit, México.

Generalidades.

Desde las primeras civilizaciones con afán de sobrevivir y mejorar su calidad de vida, el hombre ha mantenido un vínculo estrecho con el manejo y la utilización del agua, en este sentido, el control de avenidas y la utilización del recurso en época de estiaje resultaron cruciales en el desarrollo de las comunidades antiguas.

Hoy en día el agua sigue siendo un líquido vital para el desarrollo y la subsistencia de la especie humana, la utilización del recurso se mantiene orientada a satisfacer las necesidades de consumo de la población, misma que sigue creciendo y demandando mayor cantidad y calidad en los productos, en los cuales la utilización del agua juega un papel muy importante.

La desigual distribución espacial de este recurso y las variaciones significativas que existen en los tiempos de precipitaciones, originan la necesidad de almacenar y controlar la mayor cantidad de agua posible, sin que esto conlleve un riesgo para las poblaciones cercanas a las presas destinadas a este fin.

Actualmente una razón que ha sido el detonante para la planeación, diseño y construcción de presas de grandes dimensiones, es la utilización de la energía potencial que posee el agua almacenada para ser transformada en energía eléctrica. En México se tienen contemplados por parte del Gobierno Federal una serie de proyectos hidráulicos e hidroeléctricos, por citar un ejemplo en la región de Jalisco y Nayarit, la Presa de Arcediano¹, la cuarta presa que se pretende construir sobre el río Santiago se sumará a las presas El Cajón, Aguamilpa y La Yesca (en construcción). En la misma región se encuentra proyectada la Presa El Zapotillo², sobre el río Verde, así como la de Las Cruces³ sobre el río San Pedro en Nayarit.

¹ <http://www.jornada.unam.mx/2009/10/30/index.php?section=estados&article=037n2est>

² <http://www.lajornadajalisco.com.mx/2009/06/25/index.php?section=politica&article=003n2pol>

³ <http://www.jornada.unam.mx/2009/03/12/index.php?section=economia&article=028n1eco>

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

Capacidad de almacenamiento y uso de las principales presas de México, 2007

Nombre Oficial	Nombre Común	Capacidad útil de diseño (hm ³)	Altura de la cortina (m)	Año de culminación	Entidades Federativas	Corriente en la que se ubica la presa
Solidaridad	Aguamilpa	3,890.00	185.50	1993	Nayarit	Río Santiago
Gustavo Díaz Ordaz	Bacurato	1,779.43	116.00	1981	Sinaloa	Río Sinaloa
Plutarco Elías Calles	Calles	348.90	67.00	1931	Aguascalientes	Río Blanco
Miguel de la Madrid	Cerro de Oro	700.00	70.00	1988	Oaxaca	Río Santo Domingo
José López Portillo	Cerro Prieto	280.00	50.00	1984	Nuevo León	Río Pabillo y Camac
Manuel Moreno Torres	Chicoasén	598.20	261.00	1980	Chiapas	Río Grijalva
Constitución de Apatzingán	Chilatán	451.19	105.00	1989	Jalisco	Río Tepalcates
Venustiano Carranza	Don Martín	1,312.86	35.00	1930	Coahuila	Río Salado
Marte R. Gómez	El Azúcar	815.44	49.00	1946	Tamaulipas	Río San Juan
Leonardo Rodríguez Alcaine	El Cajón	1,446.29	186.00	2006	Nayarit	Río Santiago
Carlos Ramírez Ulloa	El Caracol	834.00	126.00	1986	Guerrero	Río Balsas
José López Portillo	El Comedero	2,174.00	134.00	1983	Sinaloa	Río San Lorenzo
Cuchillo-Solidaridad	El Cuchillo	1,023.04	44.00	1994	Nuevo León	Río San Juan
El Gallo	El Gallo	221.44	30.00	1991	Guerrero	Río Cutzamala
Luis L. León	El Granero	316.00	62.00	1968	Chihuahua	Río Conchos
Adolfo López Mateos	El Humaya	3,056.92	105.50	1964	Sinaloa	Río Humaya
Miguel Hidalgo y Costilla	El Mahone	2,828.44	81.00	1956	Sinaloa	Río Fuerte
Benito Juárez	El Marqués	927.40	85.50	1961	Oaxaca	Río Tehuantepec
Plutarco Elías Calles	El Novillo	2,509.00	138.50	1964	Sonora	Río Yaqui
Álvaro Obregón	El Oviachic	2,934.00	90.00	1952	Sonora	Río Yaqui
Lázaro Cardenas	El Palmito	2,778.00	104.70	1946	Durango	Río Nazas
Ing. Guillermo Blake Aguilar	El Sabinal	270.10	81.20	1985	Sinaloa	Arroyo Ocoroni
Josefa Ortiz de Domínguez	El Sabino	489.54	44.00	1967	Sinaloa	Río Alamos
Ing. Aurelio Benassini Viscalno	El Salto	375.00	73.00	1986	Sinaloa	Río Elota
Internacional Falcón	Falcón	3,238.42	50.00	1953	Tamaulipas - Texas	Río Bravo
Luis Donald Colosio	Huites	2,408.00	164.75	1995	Sinaloa	Río Fuerte
Infiernillo	Infiernillo	8,844.10	148.50	1963	Guerrero - Michoacán	Río Balsas
Internacional La Amistad	La Amistad	3,803.09	77.00	1969	Coahuila - Texas	Río Bravo
Dr. Belisario Domínguez	La Angostura	8,727.00	143.00	1974	Chiapas	Río Grijalva
Lázaro Cardenas	La Angostura	703.39	73.20	1942	Sonora	Río Yaqui
José María Morelos	La Villita	210.80	73.00	1968	Michoacán - Guerrero	Río Balsas
La Boquilla	Lago Toronto	2,773.62	80.00	1916	Chihuahua	Río Conchos
General Vicente Guerrero Consumador de la I	Las Adjuntas	3,833.00	60.00	1971	Tamaulipas	Río Soto la Marina
Estudiante Ramiro Caballero	Las Ánimas	508.17	31.20	1976	Tamaulipas	Arroyo Las Ánimas
Francisco Zarco	Las Tórtolas	335.10	39.50	1968	Durango	Río Nazas
Francisco I. Madero	Las Vírgenes	342.70	57.00	1949	Chihuahua	Río Conchos
Netzahualcóyotl	Malpaso	8,485.00	138.00	1964	Chiapas	Río Grijalva
Adolfo Ruiz Cortines	Mocúzari	942.18	62.00	1955	Sonora	Río Mayo
Vicente Guerrero	Palos Altos	250.00	66.50	1968	Guerrero	Río Pollutla
Chicayán	Paso de Piedras	337.02	30.00	1976	Veracruz	Río Chicayán
Angel Albino Corzo	Peñitas	949.40	58.00	1986	Chiapas	Río Grijalva
Federalismo Mexicano	San Gabriel	240.00	43.60	1981	Durango	Río Florido
Sanalona	Sanalona	669.00	81.00	1948	Sinaloa	Río Tamazula
Manuel M. Diéguez	Santa Rosa	336.00	114.00	1964	Jalisco	Río Santiago
Solis	Solis	726.58	51.70	1980	Guanajuato	Río Lerma
Presidente Miguel Alemán	Temascal	8,000.00	75.75	1955	Oaxaca	Río Tonto
Tepuxtepec	Tepuxtepec	425.00	43.00	1972	Michoacán	Río Lerma
Cajón de Peña	Tomatlán	411.69	68.00	1976	Jalisco	Río Tomatlán
General Ramón Corona Madrigal	Trigomil	225.00	107.00	1993	Jalisco	Río Ayuquila
Valle de Bravo	Valle de Bravo	418.25	56.00	1944	México	Río Valle de Bravo
Manuel Ávila Camacho	Valsequillo	281.70	85.00	1946	Puebla	Río Atoyac
Ing. Fernando Hiriat	Zimapan	680.00	297.00	1996	Hidalgo - Querétaro	Río Moctezuma
SUBTOTALES	52	91 463.40				

FUENTE: CONAGUA.

1 millón de metros cúbicos equivale a 1 hm³

Tabla 1. Algunas presas representativas de México.

Capítulo 1. Las presas y su clasificación.

1.1. Definición de presa.

El concepto de presa en ingeniería se concibe como una obra hidráulica desplantada en una cañada o desfiladero sobre algún río, con la intención de acumular agua y encausarla para su posterior aprovechamiento. Está constituida por un muro formado de materiales térreos, rocas, concreto o una combinación de estos; la colocación de un muro que restringe el flujo de agua es útil para proteger zonas en las que grandes avenidas generarían afectaciones; otro de los usos que se desprenden de la creación de embalses es la distribución de agua por medio de canales a distritos de riego para ser aprovechada finalmente por los agricultores en el cultivo de sus productos.

Actualmente la explotación del embalse como un sitio turístico a través de programas de acuicultura, pesca y recreación, ha generado un beneficio importante que permite a los pobladores de la zona emplearse en actividades productivas.

1.2. Clasificación general de las presas.

Para poder realizar una clasificación de este tipo de estructuras es necesario unificar criterios que permitan establecer características similares, mismas que servirán de parámetro para la correcta identificación; estos criterios son: el volumen de agua almacenada, el uso que se le dará a la presa, las características de los materiales que las constituyen e incluso una clasificación en función de su riesgo potencial.

La Comisión Internacional de Grandes Presas (International Commission on Large Dams ICOLD), clasifica las presas en función de las dimensiones de la estructura y el volumen de agua almacenada. Según la ICOLD se tiene la siguiente clasificación:

- Grandes presas.
 - Con altura superior a 15 metros medidos desde la superficie de la cimentación hasta la coronación.
 - Capacidad de embalse mayor a 1, 000,000 m³.
- Presas pequeñas
 - Serán las estructuras que no cumplan con las condiciones necesarias para ser consideradas como grandes presas.

Clasificando las presas en cuanto a su funcionalidad se tienen los siguientes tipos:

- Presas de almacenamiento: Almacenan los escurrimientos superficiales de una determinada sub-cuenca hidrográfica para su aprovechamiento económico.
- Presas para regularización de avenidas: Retienen temporalmente escurrimientos superficiales torrenciales y los descargan de manera controlada. Protegen contra inundaciones a zonas urbanas, industriales y agrícolas. Salvan vidas y evitan grandes pérdidas económicas.
- Presas derivadoras: Elevan el tirante normal de una corriente para desviar caudal hacia las márgenes y conducirlo a un aprovechamiento de tipo económico.
- Presas de propósito múltiple: Combinan las anteriores funciones.

Tomando como referencia su tipología las presas se dividen en:

- Presas de concreto: El material que constituye la cortina es concreto reforzado y contempla los siguientes casos:
 - Presas de gravedad: Es el tipo de muro más sencillo y fundamenta su resistencia en el peso propio, las fuerzas debidas al embalse se transmiten directamente al suelo, por lo que debe conocerse la capacidad de carga del mismo.

Su forma es trapezoidal haciéndose más robusta en la parte baja, debido a la mayor carga hidráulica que se genera en la base; en ocasiones tiene cierta inclinación aguas arriba con la intención de hacerla más estable contra los empujes hidráulicos, constituyen las presas de mayor durabilidad y que requieren menor mantenimiento.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



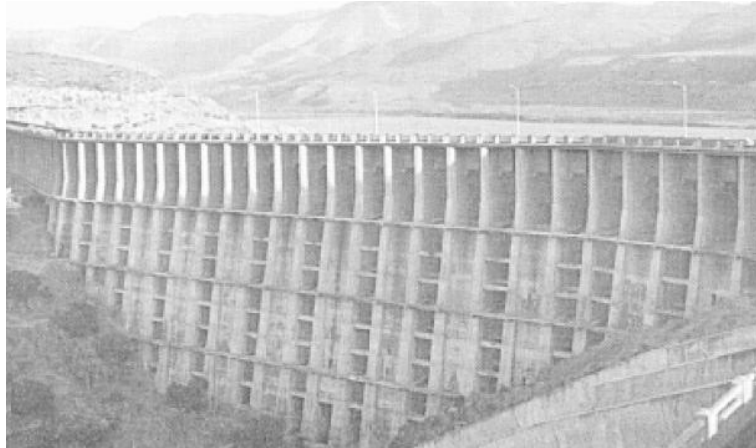
Fotografía 1.2-1. Central Hidroeléctrica Tuxpango (Veracruz, México) cortina tipo gravedad. Cortesía C.F.E.



Fotografía 1.2-2. Presa Tilostóc (Estado de México, México) cortina tipo gravedad. Cortesía C.F.E.

- Presas de gravedad aligeradas o contrafuertes: Es una variante de presa de gravedad, en donde el muro de concreto es aligerado y se colocan como apoyo contrafuertes, los cuales transmiten los esfuerzos de la cara impermeable a la cimentación; se debe tener especial cuidado en su diseño y en la distribución de la masa del concreto, con la intención de obtener la mayor inercia posible que contenga los empujes hidráulicos.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 1.2-3. Presa Abelardo Rodríguez (Baja California, México) cortina aligerada con contrafuertes. Cortesía C.N.A.

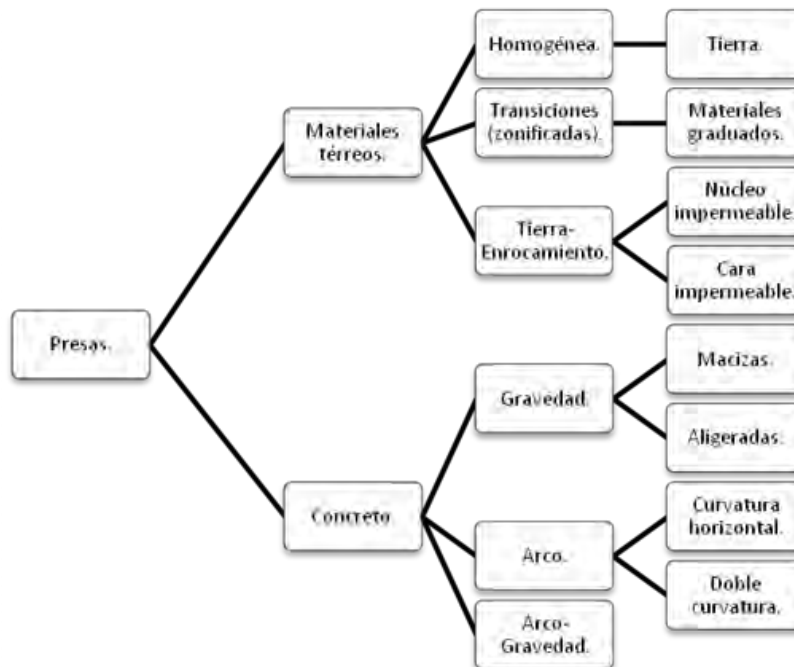
- Presa de muro curvo: Comúnmente llamada de arco, ésta presa se basa en la capacidad que tiene su forma geométrica para distribuir los empujes hidráulicos hacia los estribos de apoyo; esto se debe a la curvatura con la cual se diseña por lo que se requiere cimentar en roca de buena calidad.



Fotografía 1.2-4. Central hidroeléctrica Zimapán (Hidalgo, México) cortina tipo arco-bóveda. Cortesía C.F.E.

- Presas de materiales térreos: Estas presas se pueden agrupar tomando como referencia los materiales que las constituyen: rocas, gravas, arenas, limos, arcillas y suelos en general; estas estructuras tienen componentes muy permeables debido a las características propias de sus elementos, por esta razón, es necesario dar tratamiento a sus componentes con la intención de disminuir la permeabilidad de la estructura. De acuerdo al material que las constituye se clasifican en:

- Tierra: Es cuando mas del 50% del material constituyente es tierra, aunque pueden también utilizarse materiales graduados para dar mayor estabilidad; el conocimiento de la mecánica de suelos actualmente permiten realizar mezclas de tierra adecuadas para la construcción de este tipo de presas.
- Tierra-enrocamiento: En este tipo de estructuras el cuerpo de la cortina lo constituye una combinación de capas de tierra y rocas, las cuales dan la estabilidad necesaria a este tipo de presas que se caracterizan por ser muy robustas; al igual que en las presas de tierra se debe dar un tratamiento adecuado a sus elementos para disminuir la permeabilidad.



Cuadro A. Clasificación de presas en función a su tipología.

Otra clasificación que se ha dado a las presas está en función del riesgo potencial que representa la estructura ante una falla⁴; toma como referencia los daños que pudieran derivarse de una rotura o mal funcionamiento que van desde afectaciones económicamente cuantiosas, daños al medio ambiente hasta pérdida de vidas humanas.

⁴ “Geotecnia en ingeniería de presas” Tema 2.1.4 Clasificación por riesgo potencial, pág. 55; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2001.

Esta clasificación se presenta de la siguiente manera:

RIESGO	PÉRDIDA DE VIDAS HUMANAS	DAÑOS
Alto	Considerables	Pérdidas económicas altas que corresponden a daños a zonas residenciales, comerciales o industriales, caminos y vías de ferrocarril principales; así como daños importantes a recursos naturales.
Medio	Posibles pero escasas	Medianas pérdidas económicas que corresponden a daños a casas aisladas, caminos y vías de ferrocarril secundarias, interrupción de servicios públicos, así como daños moderados a recursos naturales.
Bajo	Ninguna	Mínimas pérdidas económicas que corresponden a daños moderados a la agricultura, caminos vecinales, así como mínimos recursos naturales.

Cuadro B. Clasificación en función del riesgo potencial.

La elección del tipo de presa depende de múltiples factores que inciden directamente en su concepción, pueden existir una gran variedad de soluciones económicas y funcionalmente atractivas para un mismo proyecto, las cuales deben ser evaluadas por el diseñador quien con base en su experiencia tomará la mejor decisión.

1.3. Componentes de una presa

Una vez que se tiene un panorama acerca del uso y de los diversos tipos de presas existentes, se pueden mencionar los diferentes elementos que constituyen a estas estructuras; algunos de estos componentes son sitios elegidos teniendo en cuenta su condición topográfica, de manera que satisfagan los requerimientos de la presa, el resto son complejas estructuras que por su propia naturaleza, requieren un diseño adecuado para su construcción y correcto funcionamiento.

- Vaso: Es la parte del valle que será inundada y que formará el embalse, debe contar con la extensión territorial suficiente para almacenar el agua proyectada durante su vida útil.



Fotografía 1.3-1. Vaso del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca. Cortesía C.F.E.

- Boquilla: Es la zona en el terreno natural en donde se construirá la cortina de la presa, es deseable una zona estrecha entre ambas márgenes del río que permita la optimización de materiales y que las características geológicas del terreno sean aptas para el desplante de la cortina. Es necesario que la zona del cauce quede en condiciones óptimas para iniciar la construcción de la cortina, por esta razón, se ejecutan obras que permitan llevar a cabo el desvío del río para poder iniciar las labores de limpieza.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 1.3-2. Boquilla Proyecto hidroeléctrico La Yesca (después del desvío del río).

- Cortina: Es el elemento que sirve para contener el agua y crear el embalse, debe garantizar la estabilidad de toda la construcción y soportar el empuje hidrostático del agua almacenada, y en la medida de lo posible, evitar filtraciones aguas abajo que comprometan la estabilidad.
- Obra de toma: Es una estructura diseñada para aprovechar el flujo del agua, de manera que cumpla el cometido para el cual fue diseñada la presa; por ejemplo, distribuirla de manera controlada en zonas donde se requiera utilizar.
- Vertedor: Es la estructura que permite desalojar el volumen de agua que excede el nivel máximo para el cual se diseñó la presa. Es una estructura vital que garantiza niveles de embalse que puedan ser soportados por la cortina.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 1.3-3. Central hidroeléctrica El Cajón, se aprecia la cortina y el vertedor con las compuertas en operación. Cortesía C.F.E.

- Obras asociadas: Comprende todas las obras y estructuras que deben diseñarse y construirse para crear las condiciones necesarias de trabajo, no forman parte del diseño y funcionamiento final de la presa pero son indispensables para que los trabajos de construcción se ejecuten en los tiempos especificados teniendo en cuenta la seguridad del personal en la obra. Por citar algunos ejemplos dentro de este tipo de obras se consideran los caminos de acceso a los diferentes frentes de trabajo, comedores para personal, campamentos, unidades medicas, canchas deportivas, etc.

Cada elemento de la presa está adaptado al proyecto para el cual es diseñado; las estructuras guardan estrecha similitud con otros proyectos y gracias a ello se ha logrado avanzar en la construcción de presas de mayores capacidades y con una mayor certidumbre en cuanto a su seguridad; sin embargo debe tenerse en cuenta que para la utilización de una u otra estructura en obras diferentes, se deben tomar las consideraciones necesarias y especificaciones propias para garantizar la funcionalidad de la obra.

Capítulo 2. Consideraciones generales para el diseño de presas de tierra-enrocamiento.

2.1. Selección del tipo de cortina.

Los factores que influyen en la elección de uno u otro tipo de cortina dependen en gran medida de la zona en donde se pretende desplantar la presa, en síntesis los aspectos que se consideran son:

- Funcionalidad de la obra.
- Tipo, calidad, cantidad y localización de los materiales.
- Características de la boquilla, de la cimentación y del vaso.
- Desviaciones del río.
- Acción probable del oleaje.
- Características climatológicas de la región.
- Características geológicas de la región.
- Importancia general de la obra.

2.2. Presas de tierra-enrocamiento.

Para fines del presente trabajo se contemplarán las presas clasificadas como de “tierra-enrocamiento”; la construcción de estas estructuras se realiza mediante la sobre posición de capas de material que forman el cuerpo de la cortina, es práctica común la explotación de bancos de préstamo de materiales cercanos a la zona de desplante, los cuales son cuidadosamente seleccionados y tratados con base en los requerimientos del proyecto, en ocasiones los materiales son sometidos a un proceso de trituración para obtener las dimensiones necesarias. Posterior a la colocación del material se mejoran las propiedades mecánicas del conjunto suelo-roca mediante un proceso de compactación.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

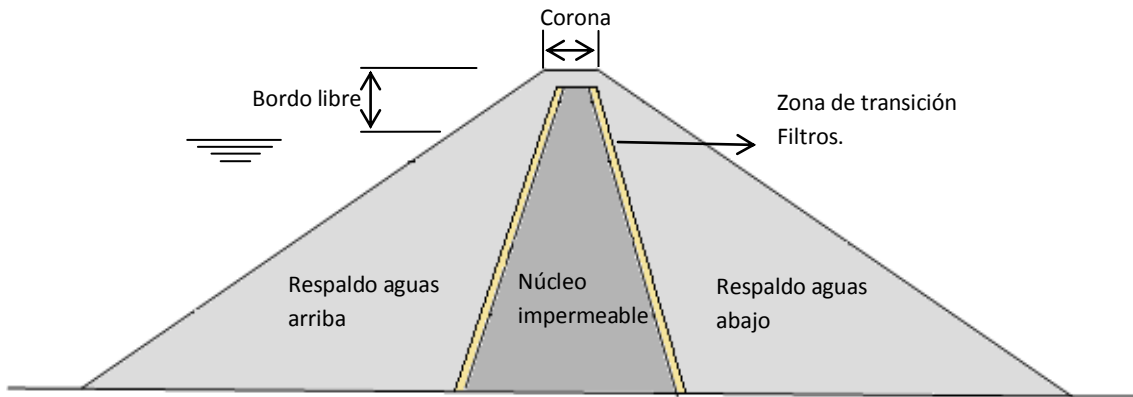


Imagen 2.2-1. Esquema general de una presa de tierra- enrocamiento.

La estabilidad de este tipo de presas se basa en las dimensiones geométricas de sus elementos de apoyo, aprovechando las características de baja permeabilidad de algunos de sus materiales y graduándolos de manera que sus elementos sean auto portantes.

2.2.1. Núcleo.

Se coloca en el centro de la cortina y su función es impedir el flujo natural del agua, el material que lo constituye debe tener una permeabilidad muy baja y comúnmente se utilizan arcillas para su construcción. El espesor del núcleo está regido por las erosiones y filtraciones que pudiera experimentar, generalmente debe ser igual o mayor al 25% de la altura del agua en el sitio.



Fotografía 2.2.1-1. Compactación del material cohesivo para el núcleo.



Fotografía 2.2.1-2. Núcleo de material cohesivo.

2.2.2. Respaldos.

Reciben los empujes directos del agua embalsada, esta característica junto con la calidad de los materiales y los eventos sísmicos probables, rigen las dimensiones del talud para evitar deslizamientos y/o volcaduras de la cortina, su función es dar confinamiento al material del núcleo; constituyen el cuerpo de la cortina y le proporcionan la estabilidad necesaria.

2.2.3. Zona de transición o filtros.

Es la zona de la presa en donde existe un cambio o una transición de materiales, se gradúan de tal manera que al existir un flujo de agua a través de ellos, funcionan como filtros que evitan que el material fino se disperse entre el material grueso de los respaldos, debilitando su capacidad de carga y poniendo en riesgo la funcionalidad de la presa. En ocasiones las filtraciones se canalizan a través de drenajes que se colocan en el interior de la cortina.

2.2.4. Control y manejo de filtraciones.

Todas las presas de materiales térreos están expuestas a filtraciones en sus diferentes estratos, estas filtraciones aumentan a medida que el agua en el embalse adquiere mayor altura; el gradiente hidráulico generado puede provocar subpresiones, sifonamiento y erosión en el respaldo aguas abajo de la presa, lo que pondría en riesgo la estabilidad de la estructura. Esta situación es generalmente controlada mediante la colocación de drenajes

y filtros, los cuales son ubicados de manera estratégica para encaminar los flujos y en la medida de lo posible, evitar daños a la estructura debidos a los fenómenos hidráulicos.

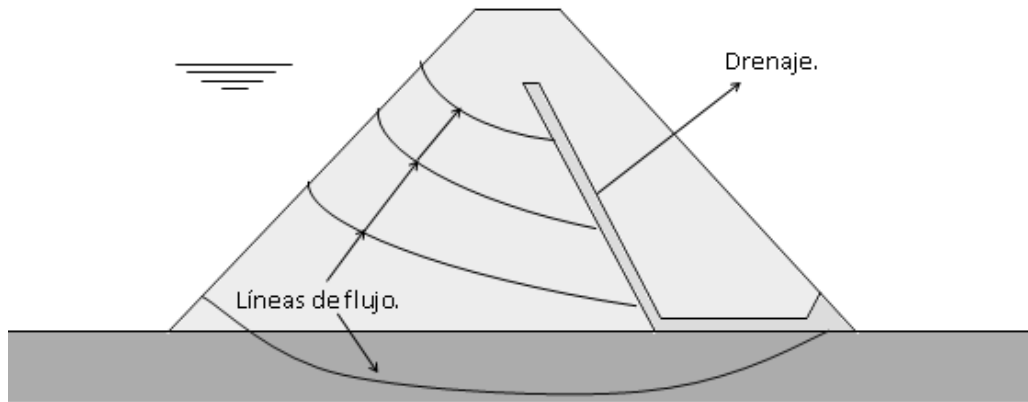


Imagen 2.2.4-1. Colocación de drenaje para interceptar las líneas de flujo y canalizarlas.

Otra forma de disminuir el efecto del gradiente hidráulico que origina el flujo de agua, es mediante la creación de un elemento llamado pantalla impermeable, ésta puede ser de suelo compactado, relleno fluido o concreto y su función es la de impedir el flujo de agua en los estratos superficiales, forzándola a precipitarse y con ello disminuir su gradiente y su potencial destructivo. Esta pantalla puede ser total o parcial, en el primer caso implica su construcción hasta la roca basal y en el segundo, sólo se desplanta hasta la profundidad en donde se encuentra un material menos permeable.

Una herramienta usada para disminuir las filtraciones en terrenos rocosos es la utilización de inyecciones de material impermeabilizante, especialmente efectivo para rellenar juntas o cavernas en roca para estabilizar el terreno y disminuye las afectaciones originadas por el gradiente hidráulico; este tipo de tratamiento también se utiliza en las paredes y los estribos de la cortina.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

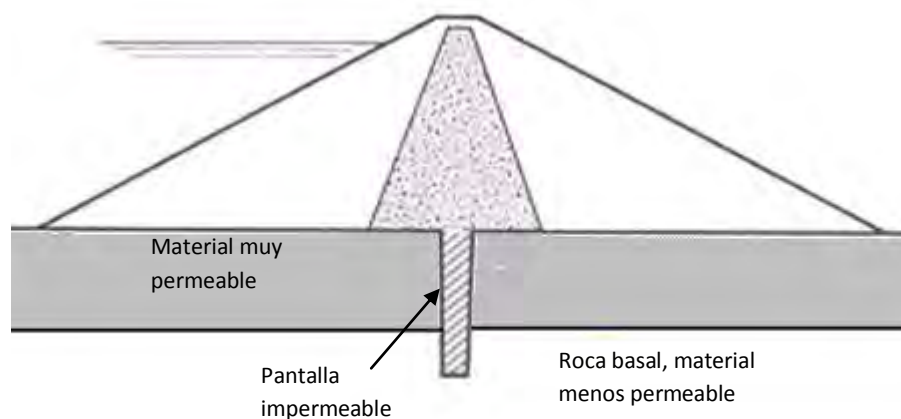


Imagen 2.2.4-3. Pantalla impermeable construida hasta la roca basal.



Fotografía 2.2.4-4. Construcción de una pantalla impermeable.

2.2.5. Estabilidad en la cimentación.

El cimiento es parte fundamental en el diseño de la presa, debe proporcionar el soporte necesario y dar la estabilidad que el proyecto requiere. El terreno sobre el cual se cimentará la presa debe ser apto para resistir las grandes cargas a las que estará sometido.

Si las características en la zona de desplante no son las adecuadas, se tendrán que llevar a cabo procesos de mejoramiento de la calidad del suelo, algunas de estas actividades están orientadas al mejoramiento de las propiedades mecánicas; por citar un ejemplo se tienen las inyecciones de consolidación, proceso mediante el cual a través de barrenos perforados en el suelo se inyecta una mezcla agua-cemento a profundidades entre 15 y 20 metros usualmente, esto mejora la capacidad de carga del terreno ya que los asentamientos que pudiera sufrir la cimentación, repercutirán ampliamente en las estructuras superiores, por ello dichos asentamientos son considerados para determinar la altura máxima de la cortina.

2.2.6. Bordo libre.

El bordo libre corresponde a la altura medida desde la corona de la presa hasta el espejo de agua en el nivel máximo de diseño del vertedor; su función es que el agua no rebose por la parte superior de la cortina en eventos sísmicos o en oleajes generados por viento, también se debe considerar la posibilidad de asentamientos diferenciales en la cortina que pudieran reducir la efectividad del bordo. Comúnmente se utiliza un factor del orden de 3% la altura total de la altura de la presa.

2.2.7. Alineación del eje de la presa.

En lo referente a la alineación que debe tener la cortina de la presa, se recomienda que ésta sea lo más recta posible, sin curvas en las que se puedan generar esfuerzos concentrados debidos al cambio de dirección; los taludes de la boquilla donde se desplante la cortina deben ser lo más uniformes posibles para evitar también el efecto de concentración de esfuerzos.

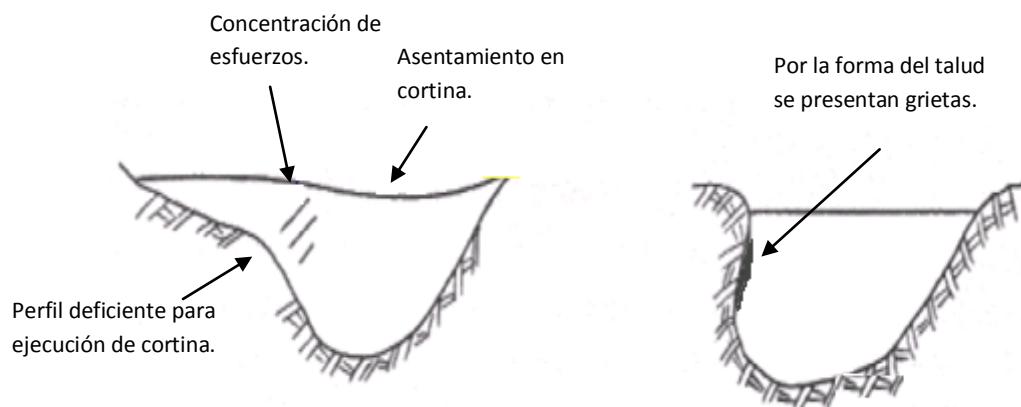


Imagen 2.2.7-1. Esquema de perfiles deficientes para desplante de cortina.

2.2.8. Construcción de los terraplenes.

En el diseño y construcción de los terraplenes no deben ser utilizados materiales orgánicos que provoquen el detrimento de la resistencia; por otro lado, en los enrocamientos debe utilizarse roca sana y si ésta fue sometida a un proceso de trituración, al compactarse debe ser diseñado como un suelo. Es necesario realizar pruebas de laboratorio periódicamente con la intención de saber si se está logrando la compactación adecuada según las características del proyecto.

2.2.9. Zonificación de la cortina.

Los materiales adecuados para la construcción de la presa no siempre se encuentran cercanos a la zona de desplante, la zonificación consiste en realizar un estudio detallado del comportamiento de la cortina considerando las características de los materiales en conjunto y las solicitaciones a las cuales estará expuesta la estructura en su vida útil; con estos datos se modela la cortina y se ubican las zonas expuestas a los diferentes esfuerzos para poder elegir la cantidad y calidad de los materiales adecuados reduciendo con esto los costos de la cortina.

2.2.10. Ancho de corona.

El ancho de la corona está en función directa del uso que se le vaya a dar a este elemento, podría ser utilizado como un camino o sólo como una zona de maniobras para limpieza y mantenimiento. El U.S Army Corps recomienda un ancho mínimo de 7.5m para efectos de tránsito de maquinaria y para una correcta compactación del material que constituye el núcleo impermeable.

Cada elemento que conforma la cortina debe ser diseñado y tratado teniendo en cuenta las solicitaciones a las que estará sometido, ya que un mal funcionamiento de alguno de sus elementos puede comprometer la estabilidad de la estructura y poner en riesgo la integridad de la presa.

Capítulo 3. Presas de Enrocamiento con Cara de Concreto (PECC).

3.1. Descripción.

En las Presas de Enrocamiento con Cara de Concreto (CFRD por sus siglas en inglés), la cortina está constituida por una serie de capas de grava-arena y enrocamiento, zonificadas con una granulometría adecuada en cada una de las secciones de la cortina, con la intención de que los materiales sean autoportantes y en caso de existir un flujo de agua a través de ellos, puedan servir como filtros que eviten la erosión garantizando en este aspecto la estabilidad de la estructura.

Esta cortina carece de núcleo impermeable ya que la impermeabilidad la proporciona aguas arriba una cara de concreto armado, la cual tiene un espesor variable y descansa sobre el enrocamiento. Debido al proceso constructivo de las losas de concreto, éstas tenderán a dejar juntas verticales y horizontales distanciadas según diseño (en función del tipo de cimbra a utilizar), en éstas juntas es indispensable un tratamiento que garantice la impermeabilidad, por esta razón se deben colocar una serie de materiales que en su conjunto generen las condiciones necesarias de estanqueidad.

Las losas que por su ubicación en el plano de la cara de concreto se encuentran inmediatas a la roca de la boquilla o a la zona del cauce del río, son denominadas losas perimetrales. Estas losas deben quedar cimentadas a la roca para continuar con el plano de estanqueidad de la presa, para tal fin se diseña un elemento de unión llamado plinto, el cual es de concreto armado y se ancla firmemente a la roca para que sobre él se apoyen las losas. Entre el plinto y las losas de concreto existen juntas constructivas denominadas por su ubicación juntas perimetrales, las cuales al igual que el resto de las juntas de concreto deben ser tratadas para evitar filtraciones.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

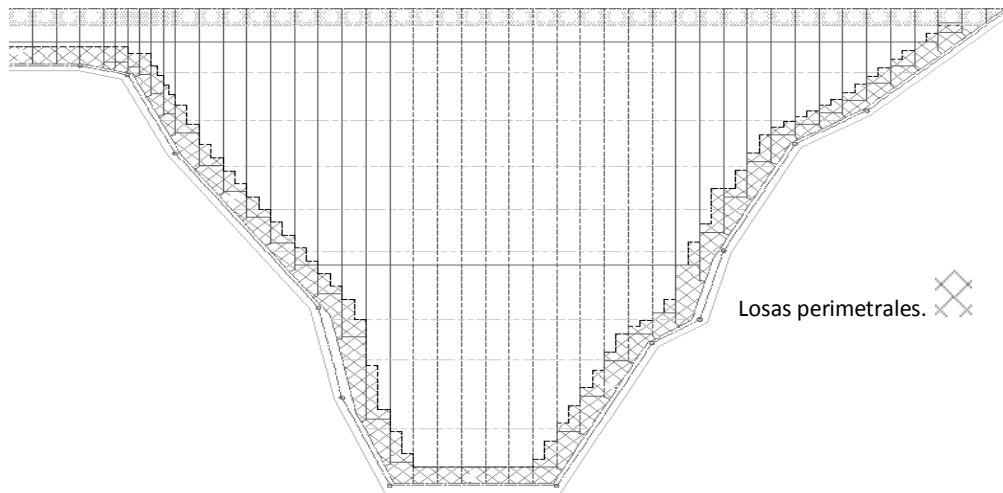


Imagen 3.1-1. Esquema de las losas que forman la cara de concreto, se aprecia la zona de las losas perimetrales. Cortesía C.F.E.

El plinto cubre también la función de ser una plataforma a través de la cual se ejecutan tratamientos de consolidación al terreno y de inyecciones profundas que evite filtraciones a través de la roca.

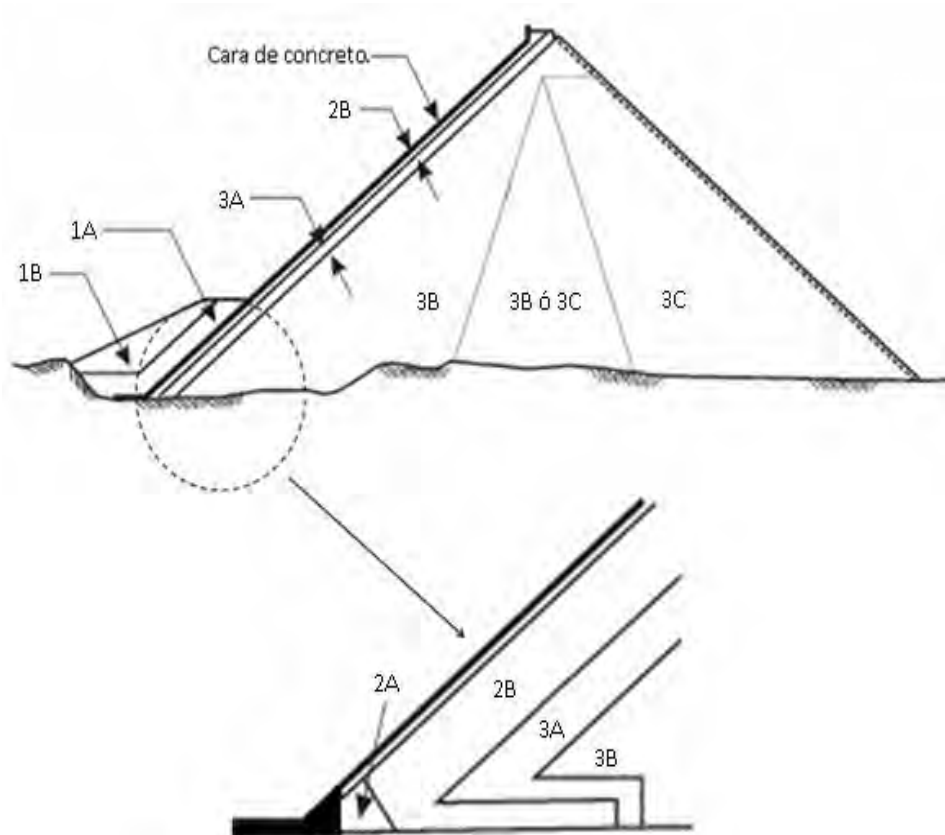
Actualmente las PECC han experimentado un auge constructivo debido al perfeccionamiento de las técnicas de construcción basadas en las experiencias de diseños anteriores, así como a los conocimientos adquiridos en la mecánica de rocas y comportamiento de los suelos, situación que ha permitido aumentar la estabilidad y seguridad de este tipo de estructuras haciéndolas económicamente factibles.



Fotografía 3.1-2. Construcción parcial de la cara de concreto C.H. El Cajón. (Nayarit, México). Cortesía C.F.E.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

3.2. Sección típica de las Presas de Enrocamiento con Cara de Concreto.



Zona	Material	Graduación	Espesor capa
2A	Filtro	< 36 mm	0.40 m
2B	Roca triturada	< 75 mm	0.40 m
3A	Enrocamiento	< 0.40 m	0.40 m
3B	Enrocamiento	< 1.0 m	1.0 m
3C	Enrocamiento	< 2.0 m	2.0 m

Imagen 3.2-1. Esquema general de una presa de Enrocamiento con Cara de Concreto (ICOLD 2004).

Rellenos tipo 1A

Son rellenos impermeables colocados en la base de la cara de concreto aguas arriba, su función es proteger y evitar posibles filtraciones en la parte baja de las losas de concreto, zona en la cual sería muy complicado efectuar reparaciones.

Rellenos tipo 1B

Son rellenos semipermeables formados por gravas y arenas, se disponen inmediatamente aguas arriba del material 1A dándole confinamiento y sirven como filtros del material.

Rellenos tipo 2A

Son rellenos de arena que se colocan inmediatamente aguas abajo del plinto, este material es filtro del 1A de manera que si ocurren filtraciones, el material 1A será retenido.

Rellenos tipo 2B

Son rellenos de gravas arenosas cuya función es darle a las losas de concreto una superficie de apoyo lisa, estable y homogénea. Otra característica de este material es que su permeabilidad es menor que la del resto de materiales aguas abajo, controlando filtraciones en caso de que las hubiese a través de las losas de concreto.

Rellenos tipo 3A

Son rellenos de gravas arenosas y constituyen una transición entre el material 2B y 3B, en caso de que hubiese un flujo a través de las losas de concreto, permitirá que el relleno 2B trabaje como un material que lo controle en caso de que se dañe la pantalla estanca.

Rellenos tipo 3B

Son rellenos constituidos por gravas, forman parte importante del muro de presa por lo que deben tener un buen grado de compactación, a fin de reducir al máximo las deformaciones de la cortina cuando se vea sometida a la carga del agua.

Rellenos tipo 3C

Son materiales rocosos extraídos de las excavaciones en las zonas en donde se obtenga roca sana; estos rellenos son los más abundantes de la presa y se disponen en el sector de aguas abajo de tal formar que robustezcan a la presa y le den buena apariencia.

3.3. Ventajas de la utilización de las PECC.

Debido al peso del enrocamiento que actúa directamente sobre la zona de desplante, este tipo de presas tienen un factor de seguridad ante el deslizamiento muy elevado; considérese por ejemplo que un cuerpo se encuentra en equilibrio estático si la relación entre las fuerzas equilibrantes y las desestabilizadoras es igual a la unidad, para las PECC dicha relación es mayor a 7 lo que implica un amplio margen de seguridad en este sentido; por otro lado, la estanqueidad en sus elementos de cimentación se logra mediante un correcto tratamiento a la roca, lo que disminuye notablemente las filtraciones y evita el efecto de subpresión que dañaría el respaldo aguas abajo de la cortina. Las características de los materiales que constituyen esta estructura, evitan presiones de poro que afectarían la estabilidad del elemento, además los movimientos de asentamiento después de construida la presa son pequeños y decrecen con el tiempo.

3.4. Comportamiento estructural de las losas que forman la cara de concreto.

El comportamiento de las losas de concreto que constituyen la cara impermeable de la presa, depende de los esfuerzos que el enrocamiento transmite cuando éste sufre un proceso natural de asentamiento; los esfuerzos son generados a través de las superficies de contacto entre las losas y el relleno de la presa, estos esfuerzos originan movimientos relativos entre losas de la cara de concreto y también con respecto al plinto.

3.4.1. Esfuerzos durante la construcción.

Durante el proceso constructivo los rellenos de la presa sufren deformaciones debidas al peso propio de los materiales, una vez que se ha colocado el concreto de las losas éstas comienzan a resistir esfuerzos que se presentan en ellas debidos a las deformaciones del enrocamiento. Las losas absorben esfuerzos de compresión o de tensión en esta etapa y son transmitidos por fricción en las superficies de contacto, los cuales son poco significativos debido a que únicamente está actuando el peso propio de las losas como carga normal a la superficie. La flexión que ocurre en las losas durante este periodo genera esfuerzos bajos (momentos y cortantes), y son el resultado del acomodo de las losas entre el periodo de colocación del concreto y las deformaciones presentadas al terminar el enrocamiento.

3.4.2. Esfuerzos durante el primer llenado.

En el proceso de llenado del embalse las losas se acomodan a las deformaciones del enrocamiento causadas por la aplicación de la carga hidrostática, absorbiendo básicamente dos tipos de esfuerzos; los primeros de ellos de compresión y/o tensión que se generan sobre el plano de la cara en el sentido vertical y horizontal, los segundos corresponden a esfuerzos de flexión que se generan por los asentamientos normales a la cara de concreto.

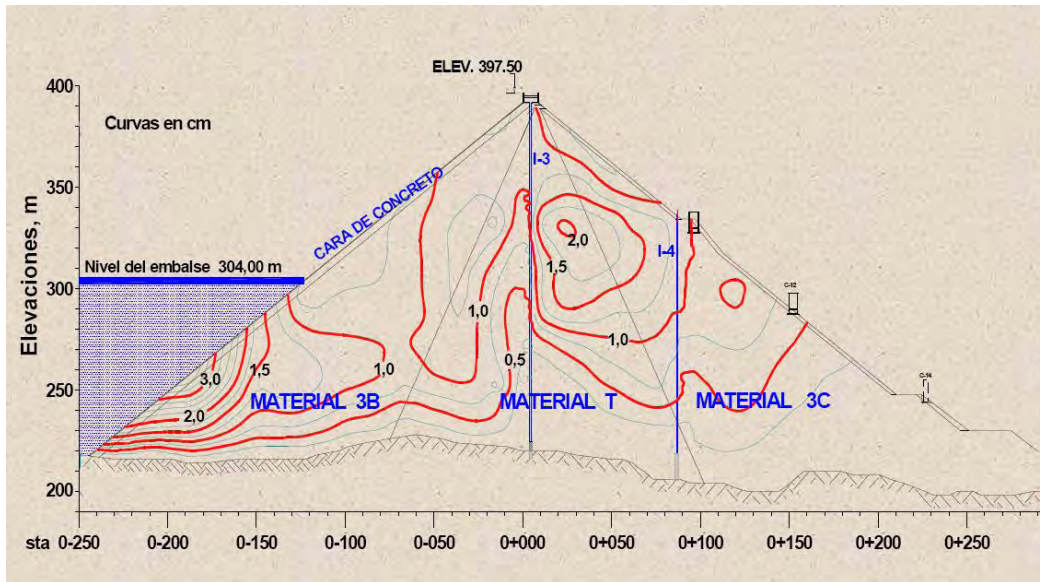


Imagen 3.4.2-1. Curvas de igual asentamiento con nivel de embalse al 50% en la cortina de la Central Hidroeléctrica El Cajón. Nayarit, México. (10 de agosto de 2006). Cortesía C.F.E.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

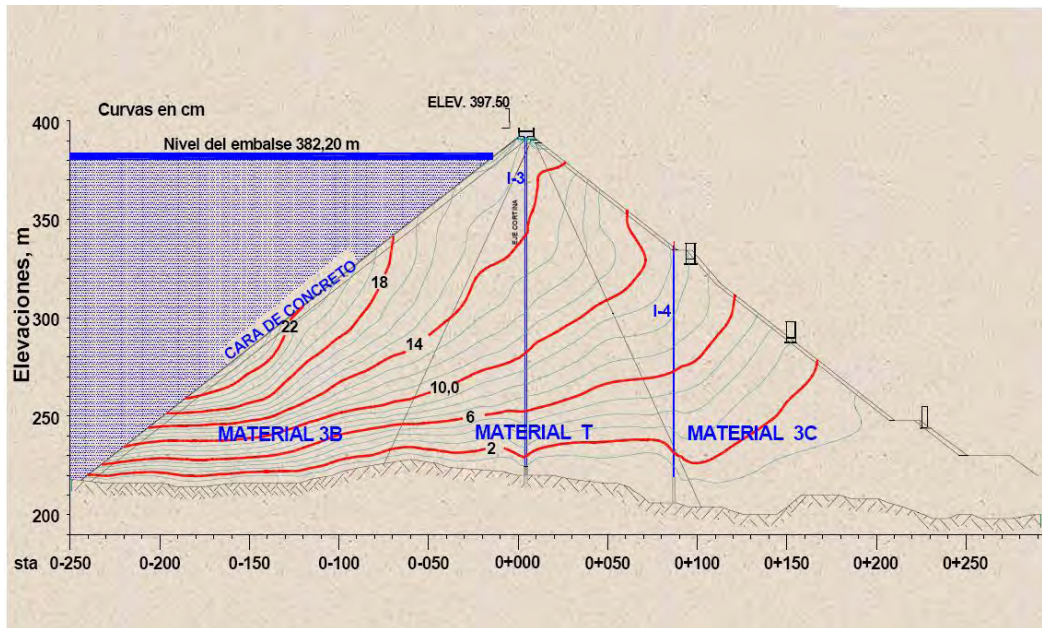


Imagen 3.4.2-2. Curvas de igual asentamiento con nivel de embalse al 95% en la cortina de la Central Hidroeléctrica El Cajón. Nayarit, México. (18 de enero de 2007). Cortesía C.F.E.

A apoyados en modelos de elemento finito que recrean los efectos del primer llenado y la experiencia de presas con características similares, se puede aproximar que en este tipo de estructuras los esfuerzos de compresión se concentran en la zona central de la cara de concreto, mientras que los esfuerzos de tensión se ubican en el perímetro adyacente a la junta perimetral.

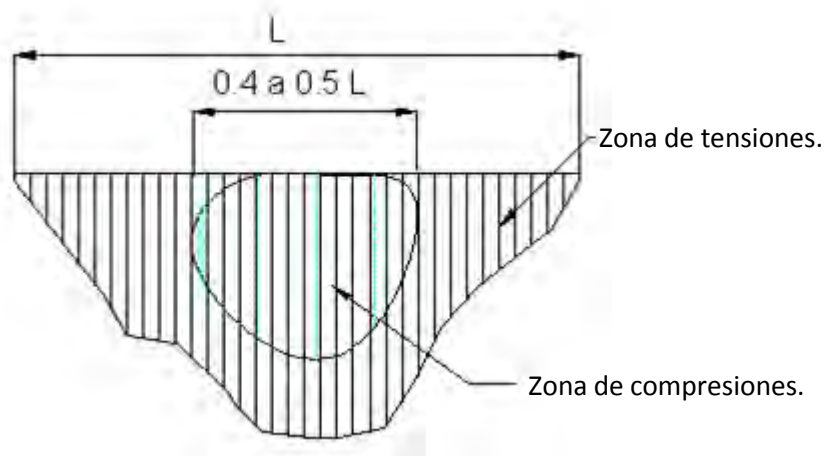


Imagen 3.4.2-3. Localización aproximada de los esfuerzos de tensión y compresión en la cara de concreto.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

Con la intención de minimizar la transmisión de esfuerzos de los rellenos de la presa hacia las losas de concreto, resulta necesaria la colocación de un elemento antiadherente entre las superficies de contacto, dicho elemento debe ser capaz de brindar la superficie necesaria para el desplante de las losas, y al mismo tiempo debe confinar el material sobre el cual se apoyarán; para tal fin se construye un bordillo extruido de concreto sobre el cual evita la adhesión y sólo permite la fricción entre las superficies de contacto, la máxima carga que los rellenos pueden transmitir a la losa está limitada a la carga de fricción que la superficie de contacto es capaz de transmitir, la cual es igual a la carga normal o empuje hidrostático multiplicado por el factor de fricción.

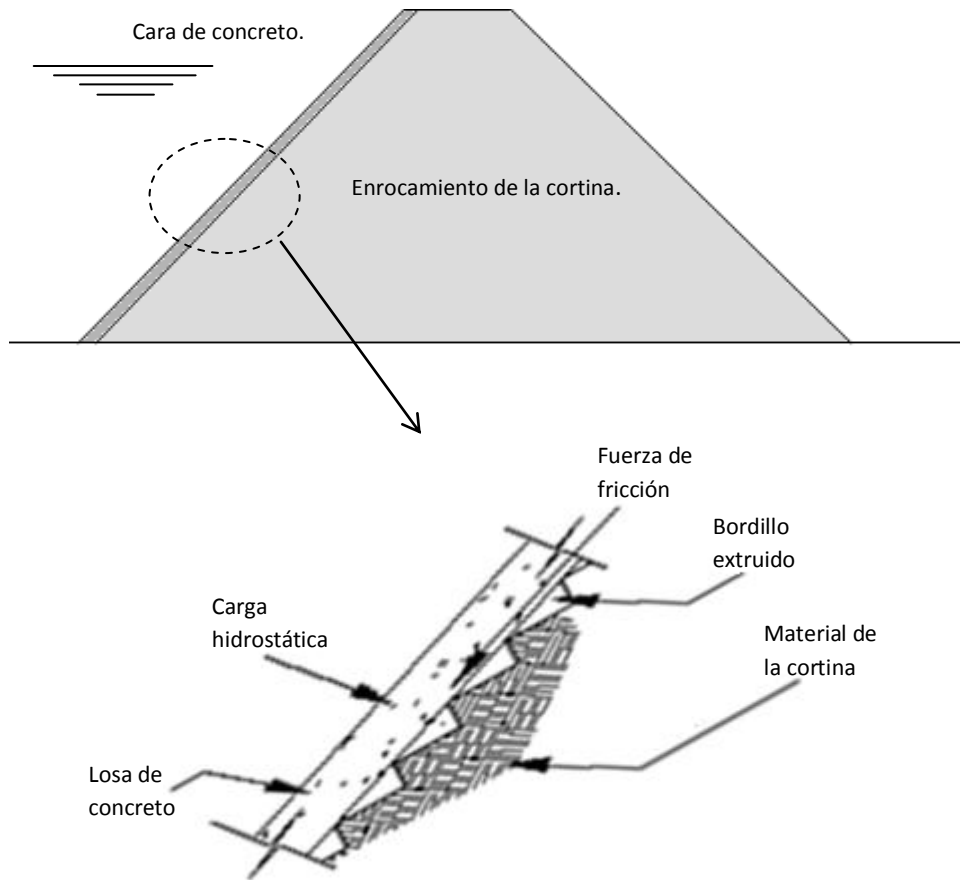


Imagen 3.4.2-4. Fuerzas actuantes entre superficies de contacto.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

Es de suma importancia minimizar los esfuerzos que se transmiten a la cara de concreto, existen ejemplos de presas en las cuales estos esfuerzos han sido mayores a los que las propias losas pueden soportar, originando daños y por ende filtraciones excesivas con las consecuentes reparaciones mayores en la cortina.



Fotografía 3.4.2-5.



Fotografía 3.4.2-6.



Fotografía 3.4.2-7.

Daños en la cara de concreto de una presa de enrocamiento.

3.5. Consideraciones para el diseño del plinto.

En las PECC el plinto es la estructura de concreto reforzado sobre la cual se apoyan las losas perimetrales, este elemento sirve también como extensión de la cara de concreto hacia la roca de cimentación.

Físicamente el plinto es una especie de rampa de ancho variable, se sujeta a la roca mediante la colocación de anclas de acero y es construido desde el lecho del río hasta la corona de la cortina, además de cumplir con el propósito de cimentación, el plinto sirve también como plataforma para efectuar los tratamientos posteriores a la roca para continuar con el plano de estanqueidad que requiere la presa.

El plinto está formado por dos partes: el plinto interno y el plinto externo; la parte interna del plinto corresponde a la sección que queda por debajo de los rellenos de la presa, mientras que el plinto externo se encuentra situado por fuera de los rellenos, en algunas ocasiones la construcción del plinto interno no es necesaria debido a la presencia de gradientes hidráulicos pequeños, pero en todos los casos el plinto externo si debe existir con la intención de dar continuidad a las losas de concreto hasta la roca de cimentación.

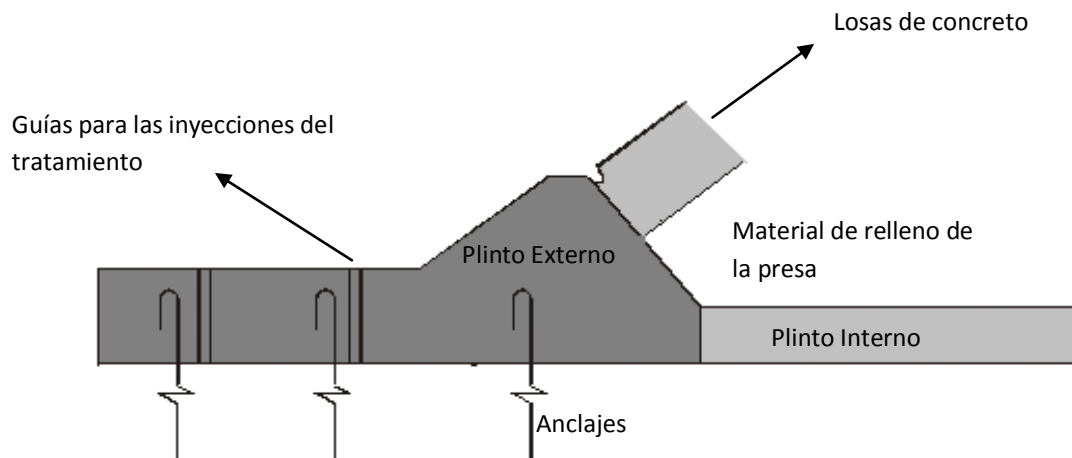


Imagen 3.5-1. Sección típica de plinto

3.5.1. Trazo del plinto.

Teniendo en cuenta los taludes de la cortina definidos en función de las características de los materiales, así como de los eventos sísmicos a los que pueda estar sometida la cortina; para definir el eje del plinto lo primero que se debe hacer es trazar la línea de intersección del plano de la cara de concreto con la superficie de las laderas de la presa. Esta primera línea equivaldría a cimentar la cara de concreto sobre la superficie del terreno natural sin realizar ningún tipo de excavación.

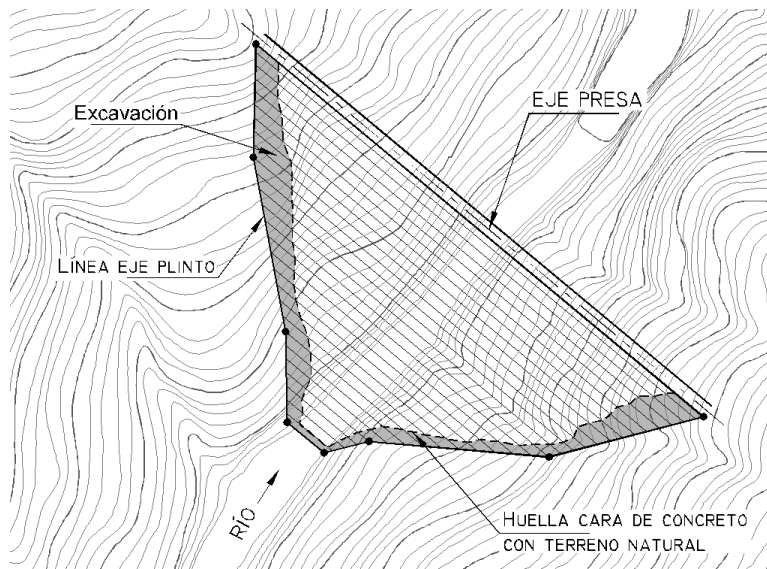


Imagen 3.5.1-1. Contacto entre laderas y plano de la cara de concreto. Cortesía C.F.E.

Una vez determinada la traza de la cortina, se procede al trazo del eje del plinto basado en el perfil de erosión de la roca, para lo cual es conveniente formar tramos rectos largos, minimizando los cambios de dirección y adaptándose a la topografía de la boquilla para reducir la altura de los cortes en la zanja de excavación. Es importante evitar quiebres bruscos y suavizar los cambios de dirección, evitando la generación de zonas de concentración de esfuerzos y movimientos diferenciales perjudiciales para el comportamiento de la losa, la definición del eje del plinto debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Siguiendo la geometría de la boquilla, las líneas del eje del plinto se deben desplazar hacia las laderas sin salirse del plano de la cara de concreto.
- Las líneas de los diferentes tramos del eje del plinto no deben formar cambios bruscos de dirección.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

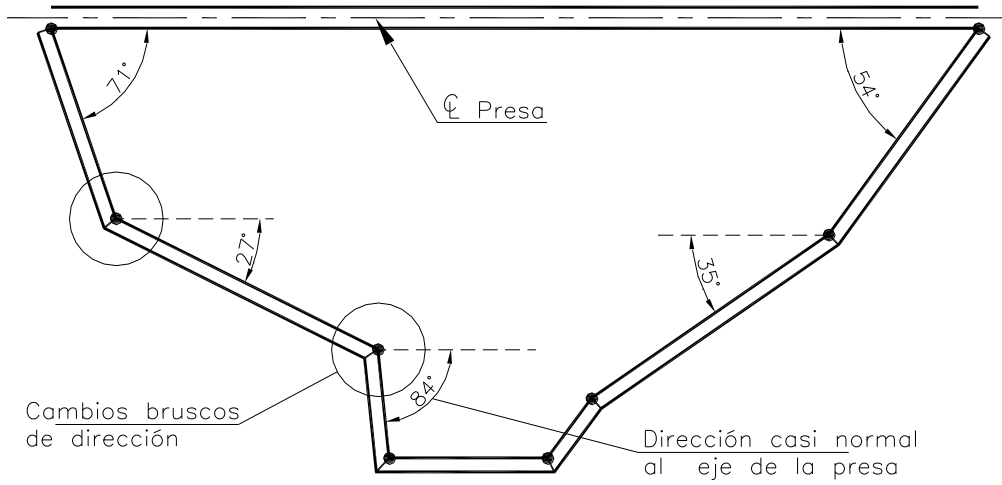


Imagen 3.5.1-2. Trazo incorrecto del eje del plinto.

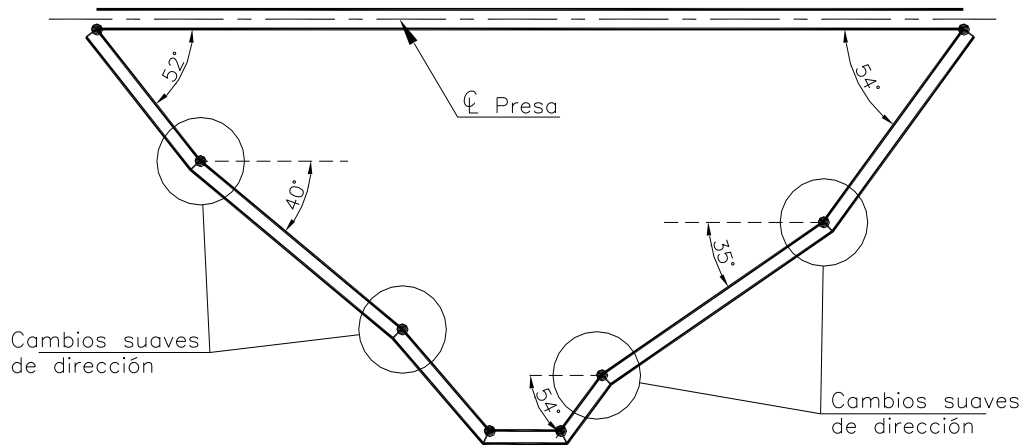


Imagen 3.5.1-3. Trazo correcto del eje del plinto.

3.5.2. Excavación para desplante del plinto.

La cimentación del plinto se debe realizar en roca de calidad aceptable que no esté erosionada y que sus características permitan un tratamiento a base de inyecciones; la excavación deberá realizarse hasta encontrar la roca con las características citadas evitándose en la medida de lo posible el uso de voladuras.

Otro aspecto a considerar en las excavaciones para el desplante del plinto es el espesor del relleno por detrás de la cara impermeable de concreto, se debe evitar en el diseño que el talud de excavación para llegar a la superficie en el sector de aguas abajo (después del ancho total de plinto $a+b$), forme un ángulo demasiado agudo con el plano de la cara de concreto, esta geometría produce una concentración de esfuerzos en la cara de concreto. Al momento de producirse el llenado del embalse y generarse el empuje hidrostático, es muy probable que se produzca el rompimiento de la losa en el punto donde se produce el cambio brusco del espesor del relleno.

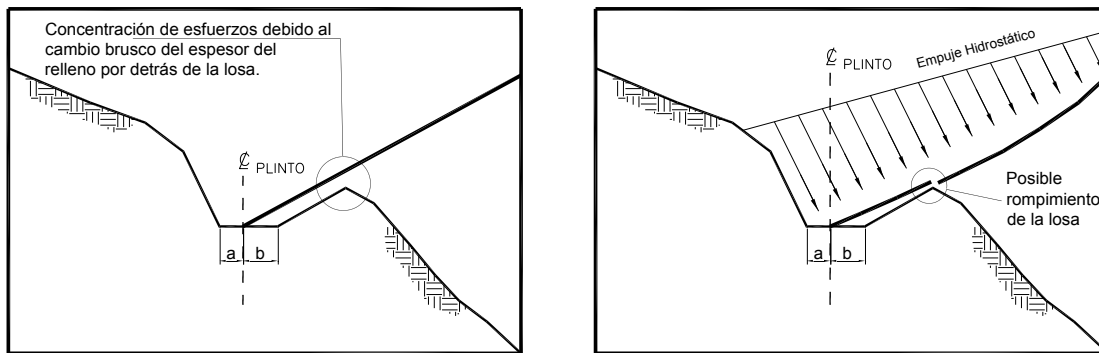


Imagen 3.5.2-1. Esquemas de excavaciones y colocación de rellenos de la presa de forma incorrecta.

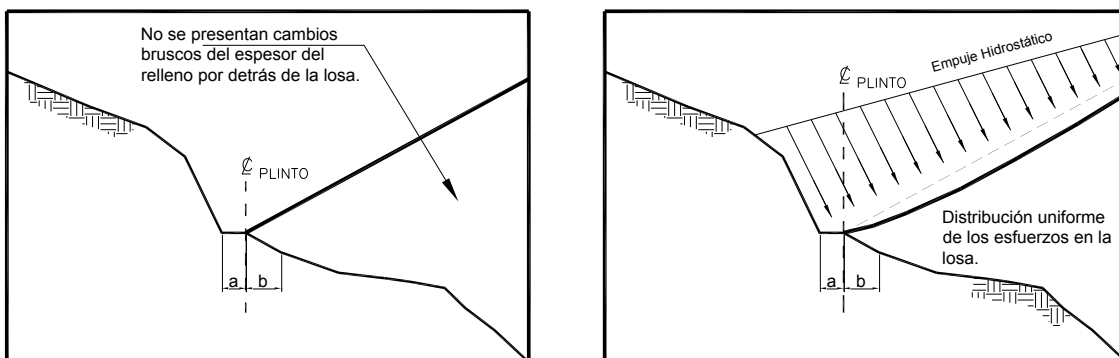


Imagen 3.5.2-2. Esquemas de excavaciones y colocación de rellenos de la presa de forma correcta.

3.5.3. Tratamientos a través del plinto.

A lo largo del plinto se efectuarán las inyecciones para dar tratamiento a la roca, estos tratamientos consisten en los tapetes de consolidación y en las pantallas profundas, su función es consolidar el terreno y disminuir la permeabilidad respectivamente.

La pantalla profunda no afecta la estabilidad del plinto ya que las inyecciones llegan hasta donde se encuentra la roca interna, sin embargo el tapete de consolidación superficial es probable que origine fuerzas de subpresión en el plinto, el anclaje tiene la función de garantizar que el plinto no se mueva durante las inyecciones superficiales, condición que debe ser revisada en el arreglo de las anclas. La fuerza de subpresión del plinto es muy aleatoria, debido a que el procedimiento que se sigue comúnmente en la práctica es ir inyectando barrenos separados, es decir, no se inyectan barrenos continuos y se hace uno a la vez; por lo tanto, la zona de influencia de las subpresiones generadas depende de las grietas y fisuras de la roca que afloran en superficie, lo cual es difícil de estimar originando así un criterio empírico para el diseño y distribución de anclas en el plinto.

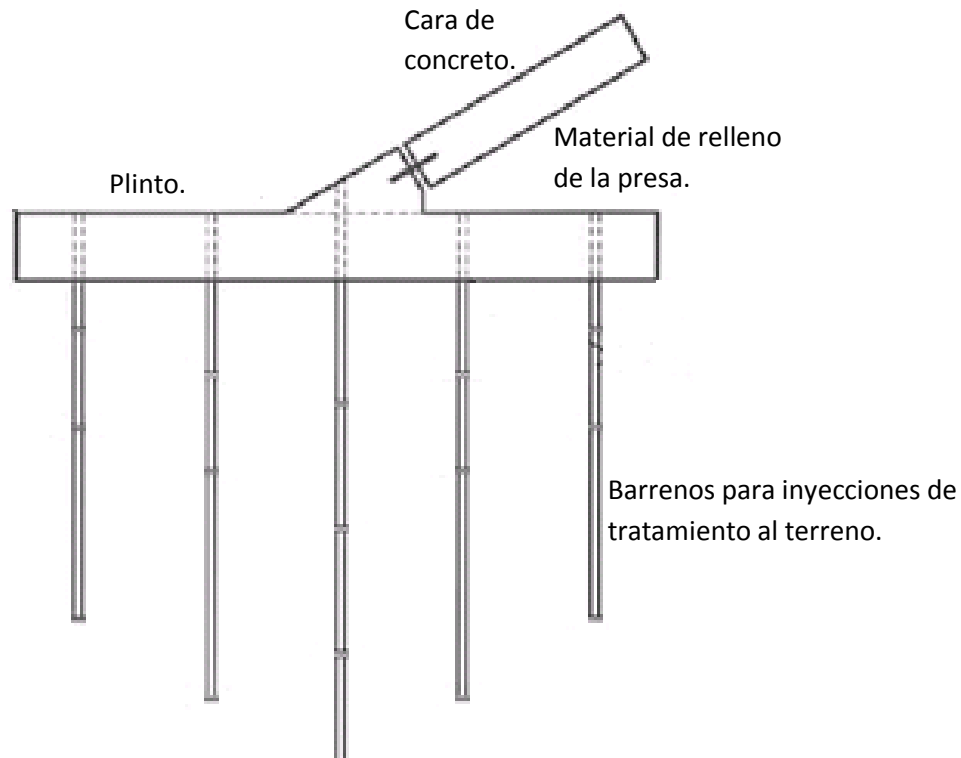


Imagen 3.5.3-1. Esquema de inyecciones a través del plinto para consolidar la roca.

3.5.4. Dimensiones del plinto.

Como se comentó con anterioridad además de servir como apoyo de la cara de concreto, el plinto cumple la función de ser la plataforma a través de la cual se efectúan los trabajos de mejoramiento de la calidad del terreno, en este sentido una de las variables que deben de considerarse en el diseño de las dimensiones del plinto, es precisamente un ancho que permita llevar a cabo los trabajos de inyección adecuadamente.

Por otro lado, el plinto permite minimizar los efectos de los gradientes hidráulicos hacia los rellenos de la presa, situación que está enteramente relacionada con la calidad de la roca de cimentación, por esta razón, se considera que el ancho puede variar desde 3 a 10 metros o más tal que el gradiente hidráulico bajo la losa sea del orden de 15 a 20. El espesor del plinto también está en función de la columna de agua a la que estará sometido, usualmente es del orden de 0.3 a 0.4 metros variando en las zonas de mayor gradiente; el ICOLD recomienda que el espesor sea constante para fines constructivos, generalmente se considera el gradiente crítico y se aplica a todo lo largo del plinto en las secciones donde aplique dicha consideración.

El criterio utilizado para el diseño del ancho del plinto en función de las características de la roca de cimentación, se presenta en la siguiente tabla:

Tipo de fundación	Clase de fundación	A/H ⁽¹⁾	RQD (%)	Grado de meteorización	Dureza	Macro Discontin. (N)	Clase de excavación
I	No erodable	1/18	> 70	I – II	1 – 2	< 1	1
II	Ligeramente erodable	1/12	50-70	II – III	2 – 3	1 – 2	2
III	Moderadamente erodable	1/6	30-50	III – IV	3 – 4	2 – 4	3
IV	Altamente erodable	1/3	0-30	IV – V	4 -5	> 4	4

A = Ancho total del plinto (externo + interno)

H = Columna de agua

Fundación = Se refiere a las características del material en la zona donde se desplantará el plinto.

Erodable=Se refiere a la facilidad con la que la roca se disgrega.

Tabla 3.5.4-1. Parámetros para el criterio del gradiente hidráulico. ICOLD 2004.

Tipo de fundación:

- I -Roca sana
- II – Roca poco meteorizada
- III – Roca moderadamente meteorizada
- IV – Roca muy meteorizada
- V – Roca descompuesta.

Grado de dureza:

1. Roca muy dura ($q_u > 200$ MPa);
2. Roca dura ($q_u = 100-200$ MPa);
3. Roca moderadamente dura ($q_u = 50-100$ MPa);
4. Roca moderadamente blanda ($q_u = 25-50$ MPa);
5. Roca blanda o friable ($q_u = < 25$ MPa).

N = Número de macro discontinuidades meteorizadas por 10 m de longitud.

Clase de excavación:

1. Requiere excavación con voladura
2. Requiere el uso de ripper pesado y voladura
3. Puede excavarse con ripper liviano
4. Puede excavarse con la cuchilla de un bulldózer pesado.

Haciendo uso de las recomendaciones de la tabla anterior, es posible fijar una dimensión de ancho del plinto que sea útil para los trabajos de inyección, y posteriormente revisar mediante el criterio del gradiente hidráulico si dicho ancho es apto de acuerdo a las características de la roca de cimentación.

3.5.5. Diseño estructural.

El refuerzo del plinto se diseña teniendo en cuenta la flexión que este elemento sufre, debido a los trabajos de inyección que se realizan al terreno a través de él, ya que al estar anclado a la roca por medio de barras de acero, se inducen esfuerzos de flexión en la losa del plinto que tienen que ser absorbidos por el acero, el cual se coloca en una sola malla en la cara superior.

De igual forma se revisa que el acero de refuerzo proporcionado, resista los esfuerzos que se generan en el plano del plinto por efectos de retracción de fraguado y cambios de temperatura. El diseño estructural se enfoca a evitar que el concreto se agriete ante cualquier sollicitación ya sea durante la construcción de rellenos, ejecución de las inyecciones y la colocación de la cara de concreto.

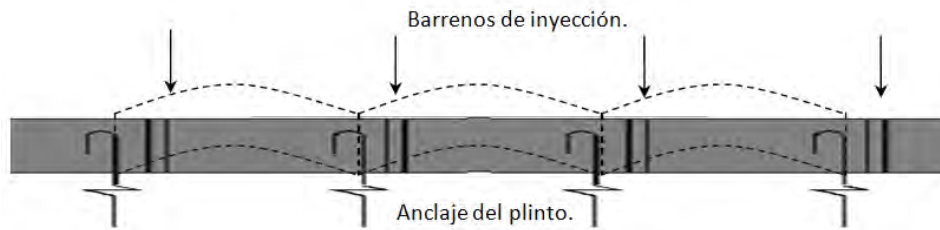


Imagen 3.5.5-1. Flexión en el plinto debido a los trabajos de inyección.

El acero de refuerzo que se debe de colocar según recomendaciones del ICOLD son las siguientes cuantías:

- Cuantía de refuerzo mínima en la dirección transversal al plinto $\rho = 0,003$.
- Cuantía de refuerzo mínima en la dirección longitudinal al plinto $\rho = 0,003$.

Estas cuantías deben ser verificadas para comprobar si están en condiciones de soportar los esfuerzos a los que estará sometido el plinto, los cuales tiene sus origen en las presiones de inyección y de contacto previstas, suponiendo para su diseño que el plinto se encuentra apoyado en las barras de anclaje que lo sujetan a la roca.

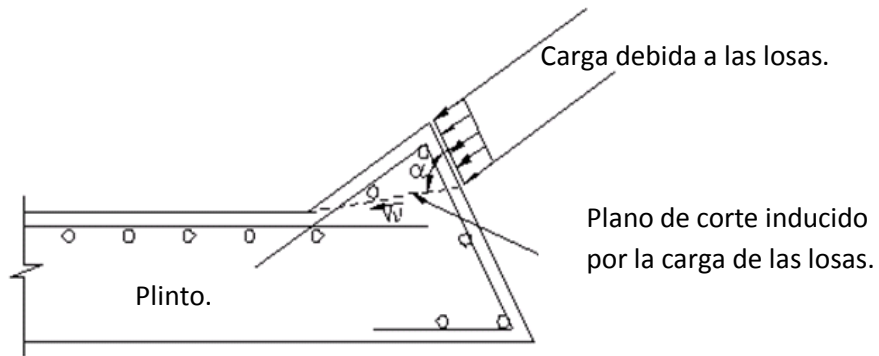
En el cabezal del plinto se coloca acero de refuerzo suficiente para absorber las compresiones transmitidas por la cara de concreto, especialmente en el tercio inferior de la presa.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

El refuerzo debe cumplir las siguientes ecuaciones del ACI-318S-05:

$$\phi V_n \geq V_u$$

$$V_n = A_v f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)$$



Donde:

ϕ : Factor de reducción de resistencia.

V_u : Fuerza Cortante aumentada en la sección.

V_n : Resistencia Nominal a cortante.

$A_v f_y$: Área de refuerzo de cortante por fricción.

μ : Coeficiente de fricción.

Para concreto colocado Monolíticamente $\mu=1,4\lambda$

λ : Factor de modificación relacionado con la densidad del concreto.

$\lambda=1,0$ para concreto normal.

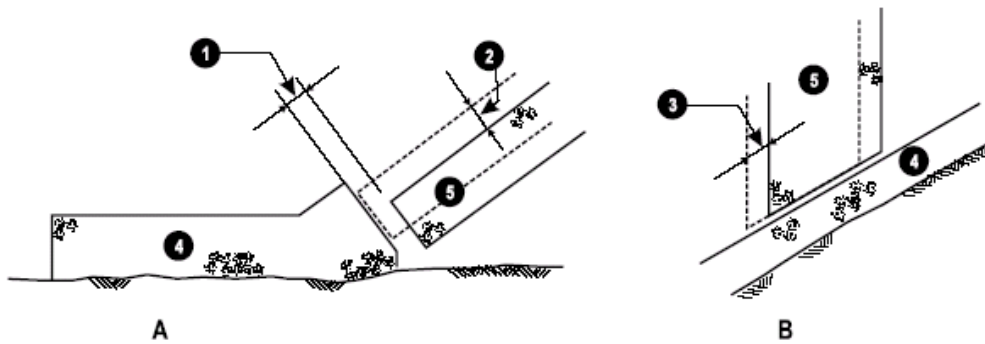
F_y Módulo de fluencia del acero de refuerzo.

Imagen 3.5.5-2. Esquema típico del armado del plinto. Cortesía C.F.E.

3.6. Diseño de los sellos impermeables para la junta perimetral.

Debido a la transmisión de esfuerzos sobre las losas de concreto originados por los asentamientos diferenciales de los rellenos de la presa, se tiene la necesidad de diseñar juntas entre dichas losas que permitan absorber movimientos existentes, sin comprometer con esto la estanqueidad de la cortina.

Los movimientos a los que estarán sometidas las losas dependen de la ubicación que estas tengan dentro del plano de la cortina; los movimientos que pueden experimentar son de deslizamiento paralelo y/o deslizamiento perpendicular al plano. En el caso del plinto las losas perimetrales debe soportar movimientos de abertura, cizallamiento y asentamiento sin que se rompan los sellos.



1. *Movimiento de abertura*
2. *Separación por asentamiento*
3. *Separación por deslizamiento*
4. *Sección transversal del plinto*
5. *Cara de concreto.*

Imagen 3.6-1. Movimientos en el las losas perimetrales.

3.6.1. Ubicación de los sellos.

En las juntas se definen dos zonas que deben ser protegidas con la colocación de sellos impermeables, la primera corresponde a la zona inferior de la junta que se encuentra en contacto con los rellenos de la presa, la segunda es la zona superior que estará directamente en contacto con el agua del embalse.

3.6.2. Sellos en zona inferior.

Para la zona inferior el diseño de los sellos consiste en la colocación de una primera barrera impermeable, constituida por una placa de cobre en forma de W del orden de 0.8 a 1.2 milímetros de espesor, la cual quedará embebida entre ambas losas evitando la filtración de agua entre ellas, la forma de W resulta práctica debido a que permite movimientos entre las losas sin romperse o desgarrarse. El bulbo de la parte central se diseña en función de los movimientos que se espera se presenten en las losas a lo largo de su vida útil. En el interior del bulbo se coloca una banda de neopreno de la misma forma y dimensiones que permitan proteger al elemento en caso de movimientos de compresión de las losas.

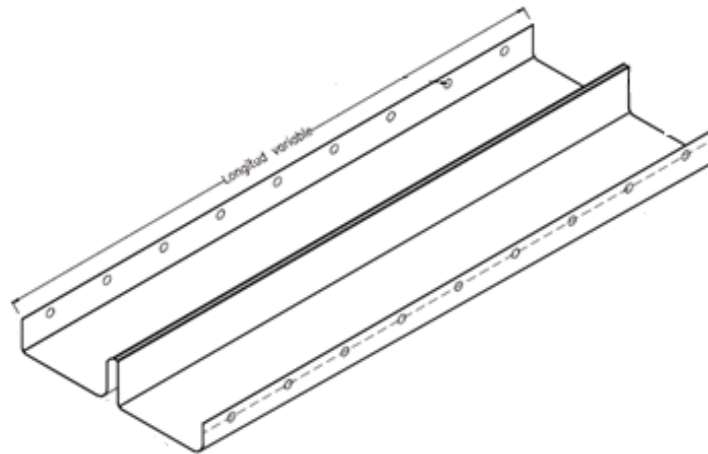
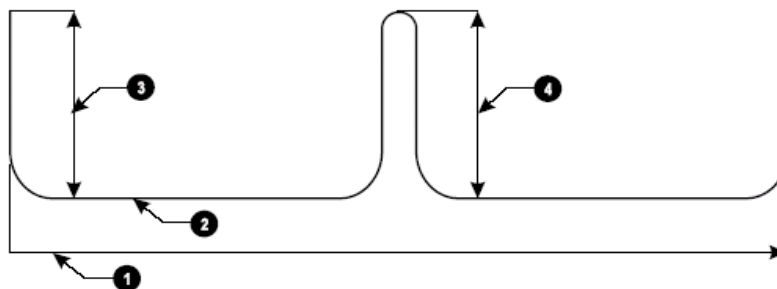


Imagen 3.6.2-1. Sello inferior de cobre en forma de W.



1. Ancho del sello de cobre.
2. Espesor de 0.8 a 1.2 mm
3. Aleta vertical embebida en el concreto.
4. Bulbo vertical.

Imagen 3.6.2-2. Sección general de un sello de cobre.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

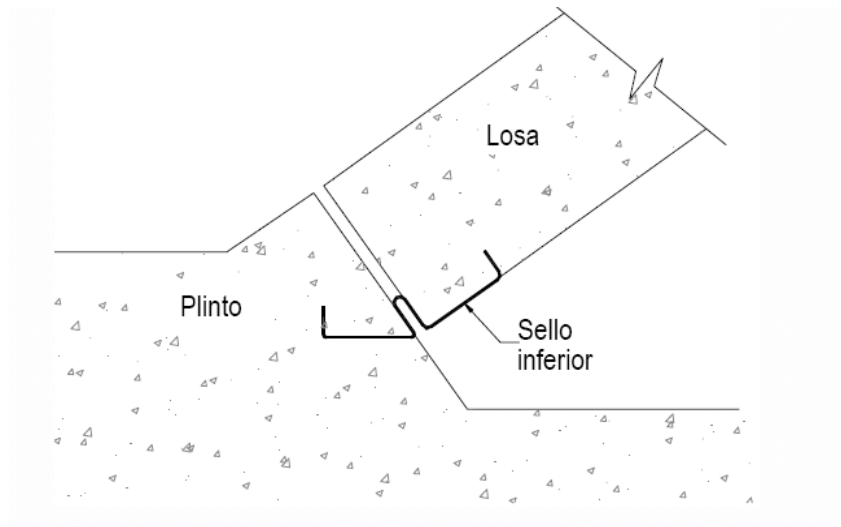


Imagen 3.6.2-3. Colocación de sello de cobre en la zona inferior.

3.6.3. Sellos en zona superior

La segunda barrera impermeable está formada por un sello de cobre colocado en la zona superior de la junta, tiene forma y espesor similar al inferior con excepción de que no posee aletas para integrarse al concreto, por esta razón se fija a las losas con la ayuda de taquetes expansivos, empaques, tuercas y rondanas que en conjunto evitan fugas a través de ellos.

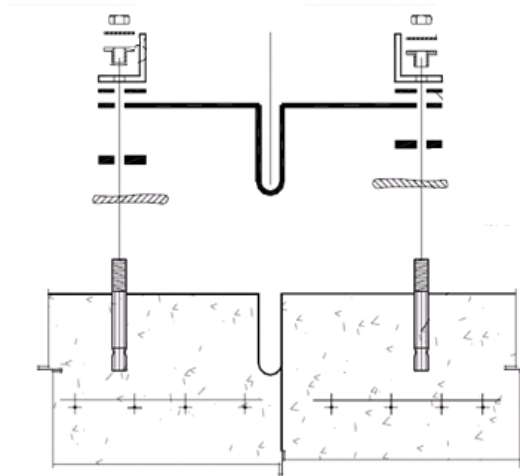


Imagen 3.6.3-1. Esquema de sello de cobre superior y su colocación en las losas. Cortesía C.F.E.

3.6.4. Contenedor de ceniza.

La tercera barrera impermeable está constituida por un depósito metálico, el cual contiene un material fino que ante una eventual filtración de agua, saturará los espacios existentes sellando nuevamente la zona afectada, el material fino es ceniza volante (fly ash) generada por la combustión de carbón natural en las carboeléctricas.

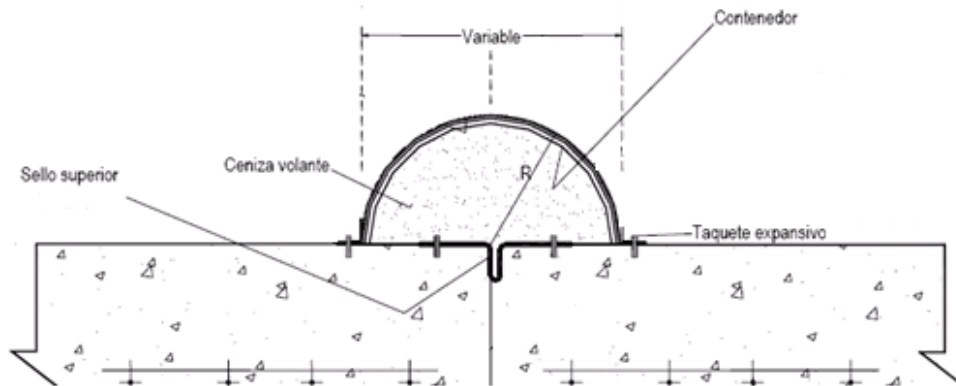


Imagen 3.6.4-1. Colocación del contenedor de ceniza sobre el sello superior de cobre. Cortesía C.F.E.

Adicionalmente a la colocación de los materiales impermeables para conformar el sello estanco, en las juntas perimetrales también se coloca un material cuya función es proteger a los elementos de concreto del efecto de cizallamiento, este material es madera dura de aproximadamente 1.9 centímetros (3/4") de espesor colocada entre el cabezal del plinto y la losa de concreto, evitando con ello fisuras en ambos elementos que pudieran favorecer las filtraciones de agua a través de ellos.

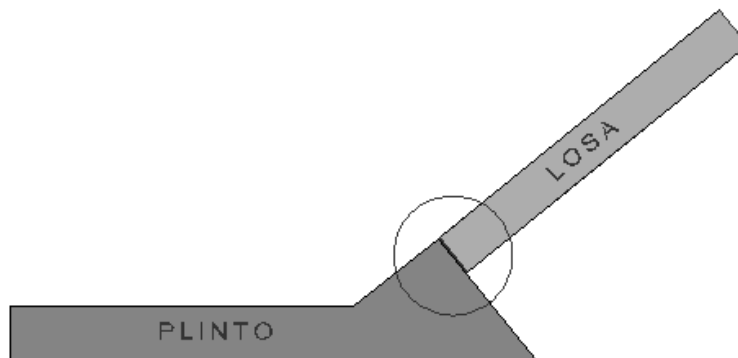


Imagen 3.6.4-2. Colocación de material de relleno entre ambas losas expuestas a compresión.

Capítulo 4. Proyecto Hidroeléctrico La Yesca.

4.1. Descripción.

El Proyecto Hidroeléctrico La Yesca forma parte del Sistema Hidrológico Santiago, que comprende a 27 proyectos con un potencial hidroenergético de 4,300 Mega Watts. La Yesca ocupa el segundo lugar en potencia y el tercero en generación dentro del sistema, después de la Central Aguamilpa-Solidaridad y El Cajón.

El Proyecto comprende la construcción de una presa de enrocamiento con cara de concreto de 205 metros de altura, para la cual se utilizarán aproximadamente 12 Millones de metros cúbicos de material (equivalente a 10 veces el volumen de la pirámide del sol en Teotihuacán, México). Estará ubicada sobre la riera del río Santiago aproximadamente a 105 km al noroeste de la ciudad de Guadalajara, y a 23 km al noroeste de la población de Hostotipaquillo, entre los estados de Jalisco y Nayarit. La boquilla de la presa se localiza a 90 km, en línea recta, al noroeste de la ciudad de Guadalajara, a 4 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Bolaños y Santiago⁵.



Imagen 4.1-1. Ubicación del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca.

⁵ Fuente: Gerencia de Comunicación Social, C.F.E.

Esta presa tendrá una capacidad de almacenamiento de 2,392.90 millones de metros cúbicos de agua y su embalse proporcionará la carga hidráulica necesaria para poner en marcha dos turbinas tipo Francis de eje vertical de 375 Mega Watts cada una de 150 revoluciones por minuto.

4.2. Hidrología.

El río Santiago, con una longitud aproximada de 560 kilómetros, tiene su origen en el lago de Chapala, el cual es un vaso regulador de las aportaciones de la cuenca del río Lerma, cuya superficie tiene cerca de 50,000 kilómetros cuadrados.

La cuenca del río Santiago, ubicada al occidente del país, en la región central de la vertiente del Océano Pacífico, se localiza entre los meridianos 101°14' y 105°26' de longitud oeste y entre los paralelos 20°19' y 23°25' de latitud norte. La mayor parte de la cuenca se desarrolla al noreste del río, por regiones montañosas y de acceso relativamente difícil.

4.3. Geología de la zona.

La geología del sitio en donde se desplantarán las obras civiles del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, está conformada por un grupo de rocas volcánicas del Cenozoico, incluyen de las más antiguas a las más recientes: andesitas (Tomata), tobas líticas cristalinas riolíticas muy silicificadas (Tmtl), ignimbritas riolíticas de textura fluidal (Tmird), dacitas (Tda) e ignimbritas dacíticas porfídicas (Tmid), que conforman ambas márgenes, afectadas por diversos cuerpos intrusivos. Esta variedad litológica está cubierta parcialmente por depósitos lacustres y pumicíticos (Qlp), terrazas aluviales (Qta), depósitos de talud (Qdt) y aluviones recientes (Qal).



Imagen 4.3-1. Sección geológica por el eje de la cortina. Cortesía C.F.E.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

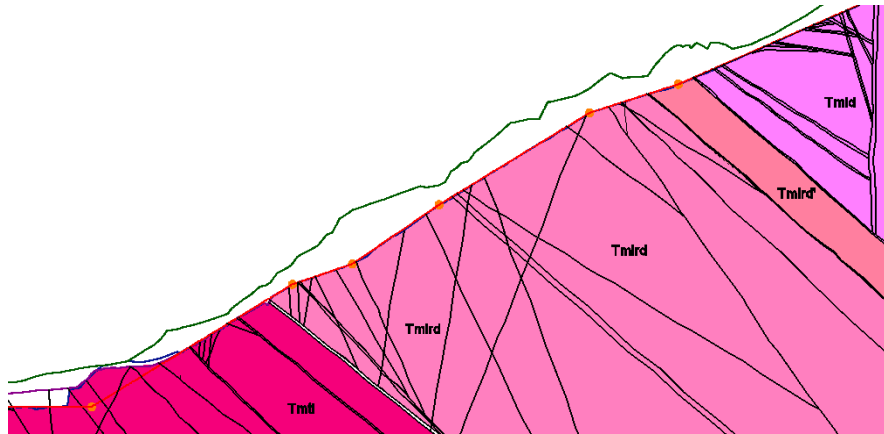


Imagen 4.3-2. Sección margen derecha. Cortesía C.F.E.

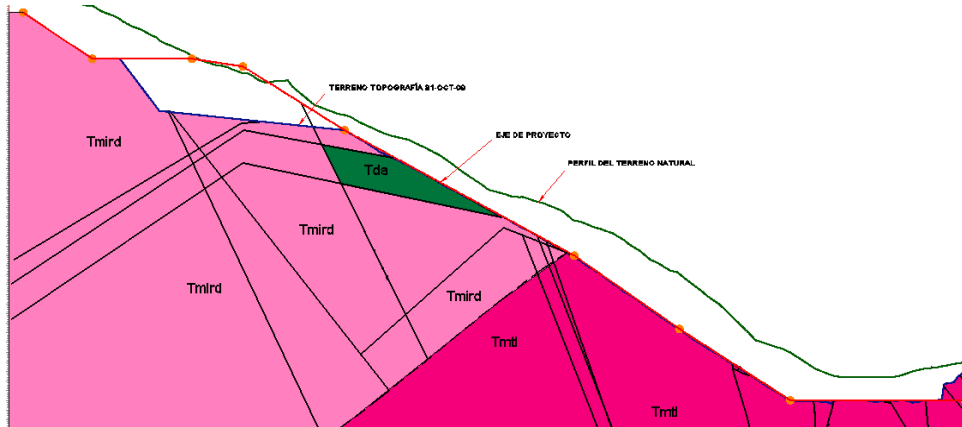


Imagen 4.3-3. Sección margen izquierda. Cortesía C.F.E.

4.4. Características del vaso.

VASO DE ALMACENAMIENTO		
Nivel de diseño (corresponde a la carga de diseño de la turbina)	556,49	msnm
Elevación al NAMINO	518,00	msnm
Elevación al NAMO	575,00	msnm
Elevación al NAME	578,00	msnm
Capacidad útil para generación (NAMO - NAMINO)	1 392	Mm ³
Capacidad de control de avenidas (NAME - NAMO)	100,00	Mm ³
Capacidad muerta (capacidad al NAMINO)	900,90	Mm ³
Área al NAME	33,4	km ²
Área al NAMO	32,50	km ²
Área al NAMINO	17,60	km ²

Tabla 4.4-1. Características del vaso de almacenamiento del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca.

4.5. Diseño del plinto.

Para el proyecto Hidroeléctrico La Yesca, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) estableció las dimensiones básicas para el ancho del plinto, con la intención de optimizar los volúmenes de excavación y en función de los trabajos que se desarrollarán posteriormente, relacionados con las inyecciones profundas y los tratamientos de consolidación bajo este elemento.

Estas dimensiones se revisarán mediante el criterio del gradiente hidráulico recomendado por el ICOLD, este criterio toma como referencia las características de la roca sobre la cual se cimentará el elemento. El diseño estructural está basado en la necesidad de soportar los esfuerzos a los que el elemento estará sometido, como los que se presentan durante los trabajos de inyección a través del plinto, y de igual manera las cargas transmitidas por las losas de concreto serán motivo de análisis.

Es importante aclarar que el diseño estructural del plinto así como la geometría mostrada en el presente trabajo, corresponden a los análisis que están contenidos en el criterio de diseño y en la memoria de cálculo del plinto⁶, los cuales se desarrollaron para el proyecto original previo a la determinación de la CFE de girar la cortina 14° tomando como eje de giro la margen derecha; esto derivado de estudios geológicos que muestran características desfavorables en cierta zona de la margen izquierda, sobre la cual se pretendía construir la cortina.

⁶ Comisión Federal de Electricidad, México. Proyecto Hidroeléctrico La Yesca. "Criterio de diseño del plinto." Comisión Federal de Electricidad, México. Proyecto Hidroeléctrico La Yesca. "Memoria de cálculo estructural del plinto."

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 4.5-1. Margen izquierda y margen derecha previo a las excavaciones para desplante del plinto



Fotografía 4.5-2. Excavación margen izquierda para desplante del plinto.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

4.5.1. Geometría del plinto.

La geometría del plinto se determinó a partir del trazado del eje de excavación suministrado por la CFE, con esta información se trazó la poligonal de la excavación.



Fotografía 4.5.1-1. Trazo del eje del plinto margen derecha.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

PUNTO	COORDENADAS (m)		COTA (msnm)	DISTANCIA (m)	RUMBO
	NORTE	ESTE			
P2	2.343.856,290	593.065,820	576,00		
				65,630	N 02°01'27" W
P3	2.343.921,879	593.063,502	545,00		
				94,122	N 11°28'17" E
P4	2.344.014,121	593.082,221	490,00		
				71,707	N 34°03'01" E
P5	2.344.073,534	593.122,371	440,00		
				63,933	N 17°43'55" E
P5'	2.344.134,430	593.141,843	400,00		
				39,939	N 17°46'55" E
P6	2.344.172,460	593.154,040	375,00		
				77,984	N 43°25'19" W
P7	2.344.229,101	593.100,437	375,00		
				66,891	N 61°43'08" W
P8	2.344.260,794	593.041,530	390,00		
				82,196	S 78°11'23" W
P8'	2.344.243,971	592.961,074	440,00		
				65,609	S 77°58'45" W
P8"	2.344.230,307	592.896,903	480,00		
				57,408	S 77°58'47" W
P9	2.344.218,351	592.840,754	515,00		
				41,033	N 81°18'40" W
P10	2.344.224,550	592.800,191	533,00		
				94,486	N 61°33'03" W
P11	2.344.269,561	592.717,116	554,00		
				49,215	N 82°09'52" W
P12	2.344.276,270	592.668,360	576,00		

Tabla 4.5.1-2. Coordenadas para la geometría del plinto.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

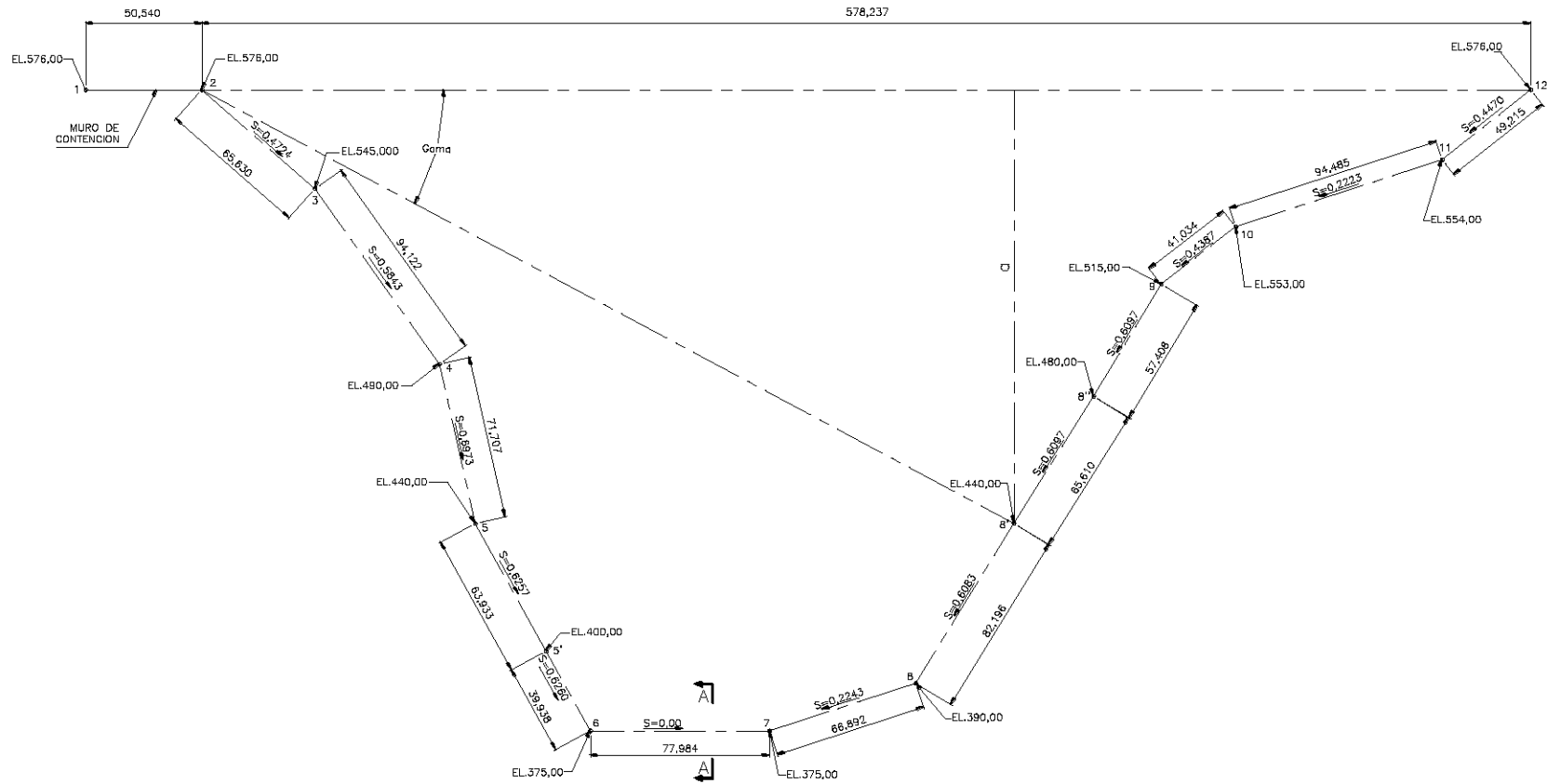


Imagen 4.5.1-3. Esquema general de las secciones del plinto con ubicación, pendiente y longitudes.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

Una vez que se tienen las coordenadas del eje del plinto, se calcula cada una de las variables tomando como referencia el ancho propuesto, es importante considerar que el cabezal del plinto debe ser normal en todo momento a la cara de concreto.

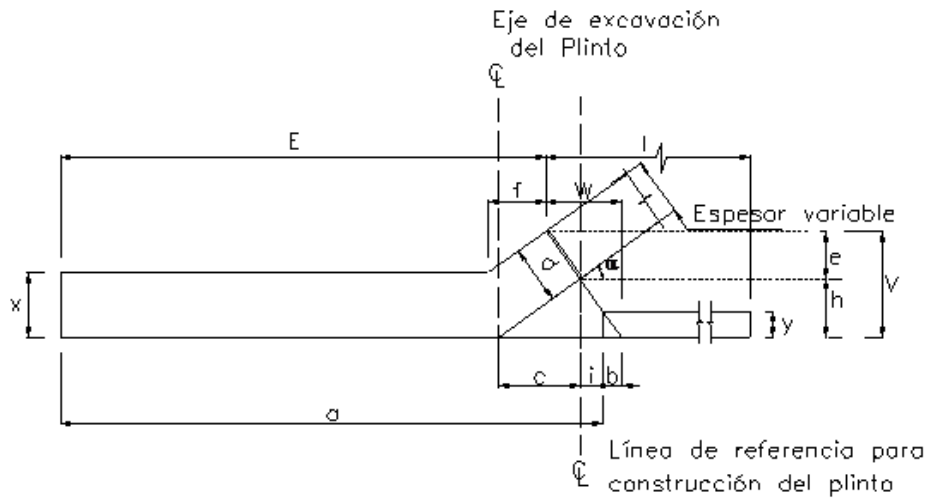


Imagen 30. Variables que definen las dimensiones del plinto.

El espesor del plinto externo “x” se determinó con base en la siguiente expresión tomada del ICOLD 2004:

$$T = 0.30 + 0.003H$$

Siendo “T” el espesor en metros de la losa del plinto y “H” la columna hidrostática respectiva en metros, con lo que se obtiene:

Elevación del punto considerado (m.s.n.m.)	H _{máx} (m)	T (m)	Espesor considerado (m)
375 a 440	203	0.91	1.00
440 a 533	138	0.71	0.80
533 a 578	45	0.44	0.70

Tabla 4.5.1-4. Espesores calculados para los distintos tramos del plinto.

El espesor del plinto interno “y” se fijó como mínimo de 0.30 m, de acuerdo con la misma publicación (ICOLD 2004).

4.5.2. Revisión del ancho del plinto.

Con la intención de verificar si los anchos del plinto propuestos por la CFE, son suficientes para cumplir con el criterio del gradiente hidráulico, se determinó la carga hidráulica promedio sobre cada uno de los tramos, y a partir del ancho total propuesto por la Comisión, se calculó la relación D/H_w ; donde D es el ancho del plinto externo y H_w es la carga hidráulica promedio para ese tramo.

Tomando como referencia las características de la roca obtenidas de las perforaciones realizadas sobre el eje del plinto y los planos geológicos preparados por la CFE, se determinó la relación D/H_w máxima que se puede aplicar según las recomendaciones del ICOLD 2004 (ver Tabla 3.5.4-1.); el procedimiento se describe a continuación:

1. Para cada uno de los 13 tramos (Puntos 2 al 12) que constituyen el alineamiento del plinto se determinó la elevación inicial y final para así obtener la correspondiente elevación promedio. (Véanse columnas I, II y III de la Tabla 4.5.2-1.).
2. A partir de la elevación promedio de cada uno de los tramos del plinto se calculó la carga hidrostática correspondiente (H_w) para un nivel máximo de operación del embalse en la Elev. 578,00 msnm. (Véase columna IV de la Tabla 4.5.2-1.).
3. Con base en la información geológica y geotécnica a lo largo del eje del plinto, se determinó el grado de meteorización y fracturamiento de la roca para cada uno de los tramos del plinto. (Véase columnas V de la Tabla 4.5.2-1.).
4. Con la información anterior se determinó el parámetro RQD de la roca y el tipo de material sobre el cual se cimentará el plinto (Véanse columnas VI y VII de la Tabla 4.5.2-1.).
5. Dependiendo del tipo de cimentación adoptado según las características del material sobre el cual se cimentará el plinto (Tabla 3.5.4-1.), se determinó la relación Ancho Total de Plinto/carga de agua (D/H_w) para cada tramo, según las recomendaciones de ICOLD (2004). (Véase columna VIII de la Tabla 4.5.2-1.).

6. El ancho externo del plinto se adoptó con base en el diseño conceptual de la CFE presentado para el proyecto. El ancho del plinto externo mínimo es de 4,50m para las zonas altas de los estribos (Puntos 2 a 5 y Puntos 12 a 8) y de 5,50m para las zonas intermedias (Puntos 5 a 5' y Puntos 8 a 7). Este ancho de plinto externo facilita las labores de inyección, consistente en una fila central de barrenos de inyección profunda y barrenos de consolidación y pantalla corta a los lados. Para estos tramos se tiene en total tres (3) filas de inyecciones. (Véase columna IX de la Tabla 4.5.2-1.).
7. En los sectores donde se presentan diques andesíticos (Tramos 5'-6-7) se aumentó el ancho del plinto externo hasta un máximo de 7,50 m, de tal forma que se faciliten las labores de inyección, consistente en una fila central de barrenos de inyección profunda y barrenos de consolidación (dos filas) y pantalla corta (dos filas) a los lados. Para estos tramos se tiene en total cinco (5) filas de inyecciones. (Véase columna IX de la Tabla 4.5.2-1.).
8. De la misma forma el ancho del plinto interno se adoptó basado en el diseño conceptual de la CFE. El ancho de plinto interno varía desde 0 m en la parte alta de los estribos hasta 14,50 m en la zona del cauce. (Véase columna X de la Tabla 4.5.2-1.).
9. Con el ancho externo e interno se determinó el ancho total de plinto: $D = A+B$. (Véase columna XI de la Tabla 4.5.2-1.).
10. Para el ancho total de plinto anterior se calculó la relación D/H_w adoptada y se verificó que estuviera acorde a la relación recomendada en los criterios de diseño del plinto (Véase numeral 5 y columna XII de la Tabla 4.5.2-1.).

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

(I) Tramo	(II) Elevaciones (msnm)	(III) Elevación promedio (msnm)	(IV) Columna de agua H _w (m)	(V) Grado de meteorización	(VI) Tipo de material	(VII) RQD (%)	(VIII) Relación D/H _w según criterios	ANCHO PLINTO (m)			(XII) Relación D/H _w adoptada en el diseño
								(IX) A (Externo)	(X) B (Interno)	(XI) Total D = (A+B)	
2 - 3	576 - 545	560,50	17,50	III	Moderadamente erodable	30-50	0,17	4,50	0,00	4,50	0,26
3 - 4	545 - 490	517,50	60,50	II	Ligeramente erodable	50-70	0,08	4,50	0,00	4,50	0,07
4 - 5	490 - 440	465,00	113,00	II	Ligeramente erodable	50-70	0,08	4,50	5,00	9,50	0,08
5 - 5'	440 - 400	420,00	158,00	II	Ligeramente erodable	50-70	0,08	5,50	11,00	16,50	0,10
5' - 6	400 - 375	387,50	190,50	II	Ligeramente erodable	50-70	0,08	7,00	13,00	20,00	0,10
6 - 7	375	375,00	203,00	II	Ligeramente erodable	50-70	0,08	7,50	14,50	22,00	0,11
7 - 8	375 - 390	382,50	195,50	II	Ligeramente erodable	50-70	0,08	5,50	10,00	15,50	0,08
8 - 8'	390 - 440	415,00	163,00	II	Ligeramente erodable	50-70	0,08	4,50	6,00	10,50	0,06
8' - 8"	440 - 480	460,00	118,00	II	Ligeramente erodable	50-70	0,08	4,50	3,00	7,50	0,06
8" - 9	480 - 515	497,50	80,50	II	Ligeramente erodable	50-70	0,08	4,50	0,50	5,00	0,06
9 - 10	515 - 533	524,00	54,00	II	Ligeramente erodable	50-70	0,08	4,50	0,00	4,50	0,08
10 - 11	533 - 554	543,50	34,50	III	Moderadamente erodable	30-50	0,17	4,50	0,00	4,50	0,13
11 - 12	554 - 576	565,00	13,00	IV	Altamente erodable	0-30	0,33	4,50	0,00	4,50	0,35

Erodable=Se refiere a la facilidad con la que la roca se disgrega.

Tabla 4.5.2-1. Revisión del ancho del plinto.

4.5.3. Cálculo del acero de refuerzo

Para el cálculo del acero de refuerzo que debe ser colocado en el plinto, se consideran los esfuerzos a los que será sometido durante los trabajos de inyección, los cuales generan flexiones que deben ser resistidas por el acero de refuerzo, mismo que debe ser colocado en una sola malla en la cara superior. El diseño estructural se enfoca a evitar que el concreto se agriete ante cualquier solicitación que pueda ocurrir, durante la construcción de los rellenos, ejecución de las inyecciones y colocación de la cara de concreto. El ICOLD 2004 recomienda las siguientes cuantías:

- Cuantía de refuerzo mínima en la dirección transversal al plinto $\rho = 0,003$.
- Cuantía de refuerzo mínima en la dirección longitudinal al plinto $\rho = 0,003$.

4.5.4. Armados de la losa del plinto.

Tomando como referencia la cuantía mínima requerida para este tipo de elementos, se considerarán los tramos de plinto con igual espesor para conocer la distribución del acero de refuerzo, posteriormente se realizará un análisis con ayuda del método de elementos finitos, para revisar si esta cuantía es suficiente para resistir los esfuerzos a los cuales será sometido el plinto.

Acero de refuerzo plinto externo.

Tramos 5-5', 5'-6, 6-7, 7-8, 8-8' (ver Imagen 4.5.1-3).

Espesor de la losa del plinto 1.00 m.

$$A_s = (0.0030)(100)(100) = 30.00 \frac{cm^2}{m}$$

Colocar # 8 a 0,17 m en ambas direcciones.

Tramos 3-4, 4-5, 8'-8'', 8''-9, 9-10 (ver Imagen 4.5.1-3).

Espesor de la losa del plinto 0.80 m.

$$A_s = (0.003)(100)(80) = 24.00 \frac{cm^2}{m}$$

Colocar # 8 a 0.21 m en ambas direcciones.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

Tramos 2-3, 10-11, 11-12 (ver Imagen 4.5.1-3).

Espesor de la losa del plinto 0,70 m.

$$A_s = (0.003)(100)(70) = 21.00 \frac{cm^2}{m}$$

Colocar # 8 a 0,24 m en ambas direcciones.

Acero de refuerzo para el plinto interno.

Tramos 4-5, 5-5', 8-8', 8'-8'' (ver Imagen 4.5.1-3).

Espesor de la losa 0.30 m.

$$A_s = (0.003)(30)(100) = 9.00 \frac{cm^2}{m}$$

Colocar # 6 a 0,30 m en ambas direcciones.

Tramos 5'-6, 6-7, 7-8 (ver Imagen 4.5.1-3).

Espesor de la losa 0.40 m.

$$A_s = (0.003)(40)(100) = 12.00 \frac{cm^2}{m}$$

Colocar # 6 a 0,24 m en ambas direcciones.



Fotografía 4.5.3-1. Detalle de armado para plinto tramo 11-12 con espesor de 70 cm.

Capítulo 5. Análisis estructural del plinto.

5.1. Idealización del elemento.

Con la intención de verificar si la cuantía de acero propuesta es suficiente para soportar los esfuerzos a los que el plinto será sometido durante los trabajos de inyección, se realizó un análisis con ayuda del software de análisis estructural SAP 2000 V.10.07⁷, para ello se tomó como referencia el plinto en el segmento 6-7 debido a que por su ubicación dentro de la cortina resulta crítico a la sollicitación de esfuerzos (ver imagen 4.5.1-3).

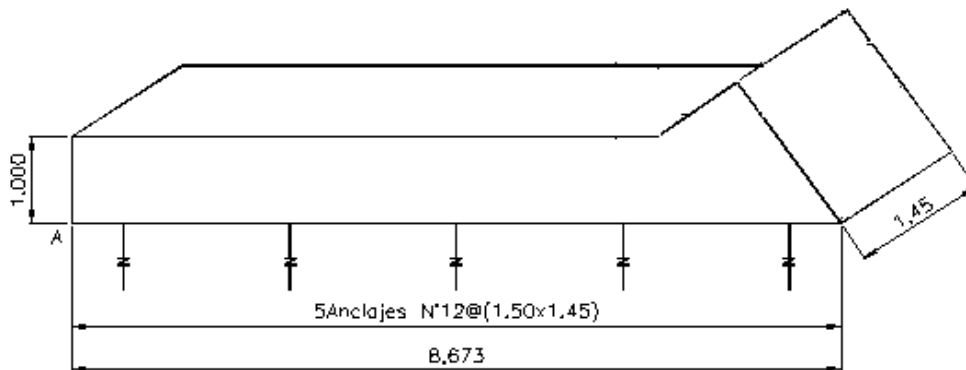


Imagen 5.1-1. Isométrico del plinto segmento 6-7.

Para realizar el modelo en SAP 2000 V.10.07 la losa del plinto se idealizó como un elemento simplemente apoyado en donde las anclas son representadas como apoyos simples, las dimensiones de la losa para el análisis son las distancias a las cuales se colocó cada una de las anclas.

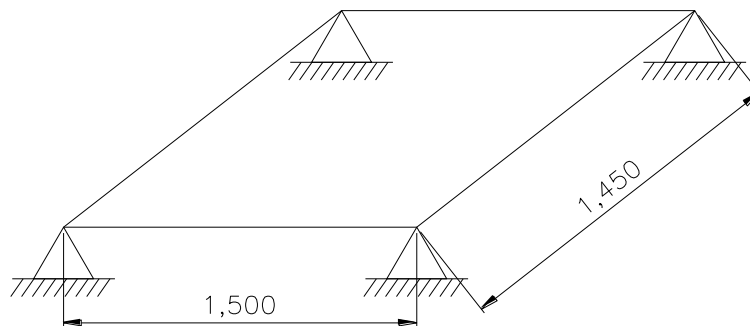


Imagen 5.1-2. Segmento de losa del plinto para el análisis en SAP 2000 V.10.07.

⁷ Las propiedades asignadas del concreto, del acero y las características de los elementos "Shell" se presentan en el anexo 1.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

Las cargas a las que está sometida la losa son:

$$\text{Ascendente}(s) = 196.2 \frac{kN}{m^2} = \left(20.0 \frac{t}{m^2}\right) \text{ (Trabajos de inyecciones)}$$

$$\text{Peso Propio}(D) = 23.54 \frac{kN}{m^2} = \left(2.4 \frac{t}{m^2}\right) \text{ (Gravitacional)}$$

El análisis de la losa se realizó bajo el criterio de factores de carga y resistencia (LFRD por sus siglas en inglés). Las cargas a las que está sometida la losa del plinto son consideradas como cargas muertas; siguiendo el criterio mencionado se tienen las siguientes combinaciones de cargas de diseño:

$$\text{COMB1} = 1.4 (D+S) = 1.4 (\text{Peso propio} + \text{Ascendente})$$

$$\text{COMB2} = 1.0 (D+S) \text{ Para obtener las reacciones con cargas de trabajo.}$$

Después de ejecutar el análisis en el SAP 2000 V.10.07, se tienen los siguientes diagramas que muestran los momentos máximos para cada dirección de la losa.

$$M_{11} M_{\text{máx}} = 80.01 \text{ kN-m (8,16 t-m)}$$

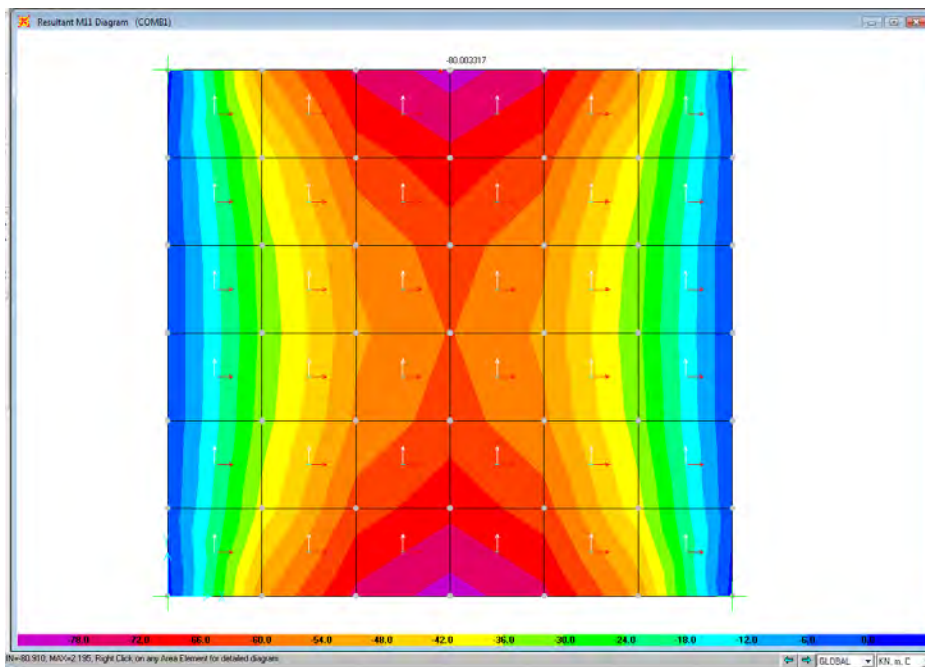


Imagen 5.1-3. Diagrama de momentos resultantes en el eje 1 (Eje rojo).

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

M22 Máx.= 73,47 kN-m (7,50 t-m)

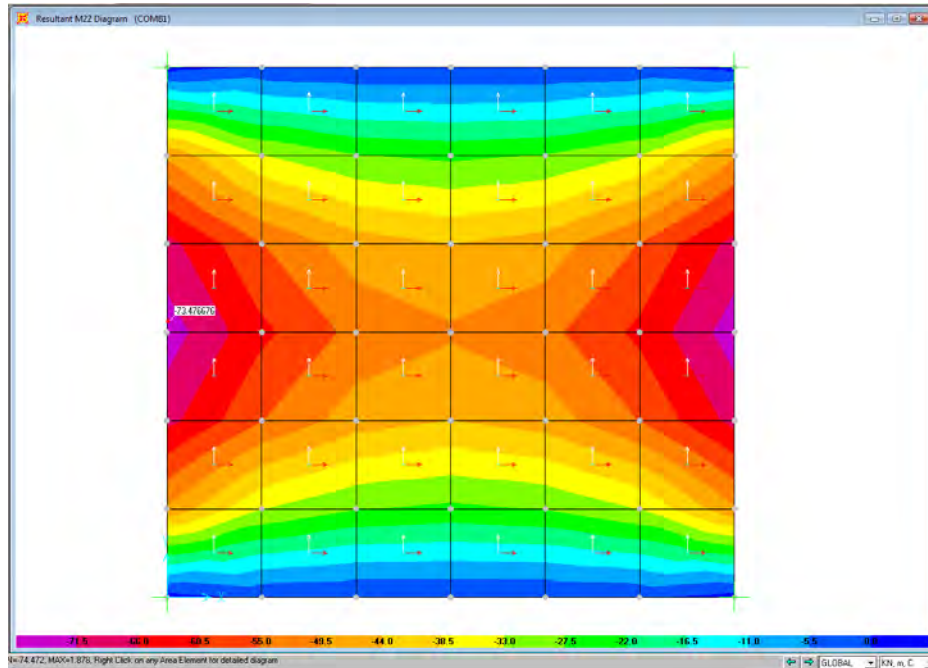


Imagen 5.1-4. Diagrama de momentos resultante para el eje 2 (Eje blanco).

Resultante en los apoyos = 90.61 kN (9.24 t)

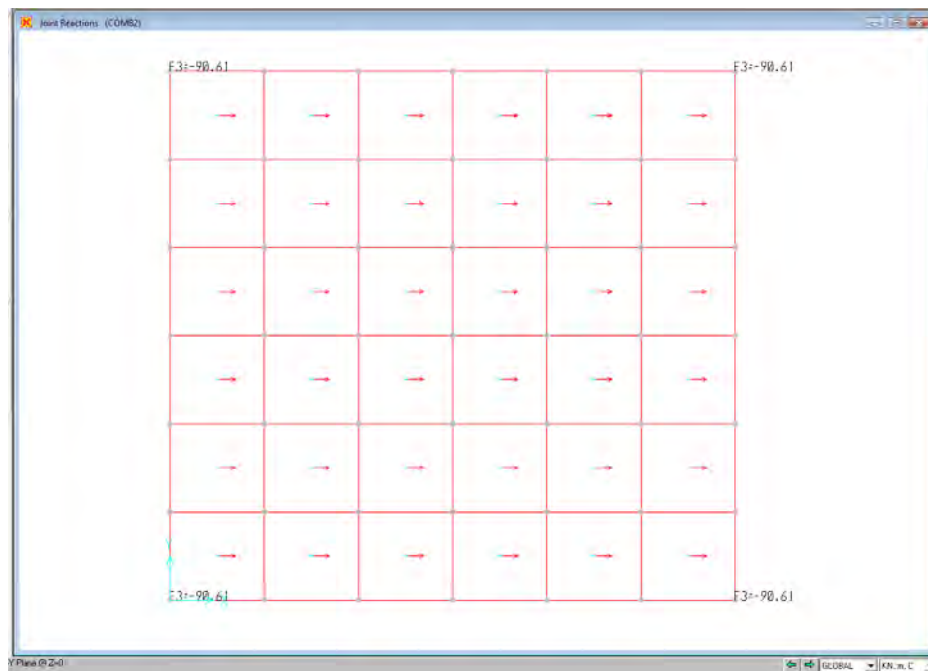


Imagen 5.1-5. Resultante en los apoyos de la losa del plinto.

5.2. Revisión por Flexión.

Teniendo en cuenta el refuerzo suministrado por cuantía mínima se tiene:

$$A_{s_{\text{suministrado}}} = \#8 @ 0.17 \text{ m} = 3000 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$A_g \text{ barra } \#8 = 510 \text{ mm}^2$$

Según ACI-318S-05⁸:

$$Mn = 0.85 f'c a b \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

Siendo:

$$a = \frac{Asfy}{0.85 f'c b}$$

fy: Esfuerzo de fluencia del acero (412 MPa)

f'c: Resistencia a compresión del Concreto (24.52 MPa)

b: Ancho de la sección (1000 mm)

d: Altura efectiva (950 mm)

Según lo anterior:

$$a = \frac{(3000 \text{ mm}^2)(412 \text{ MPa})}{(0.85)(24.52 \text{ MPa})(1000 \text{ mm})} = 59.30 \text{ mm}$$

$$Mn = (0.85)(24.52 \text{ MPa})(59.30 \text{ mm})(1000 \text{ mm}) \left(950 - \frac{59.30 \text{ mm}}{2} \right) (10^{-6})$$

$$Mn = 1137.5 \text{ kN m} = (115.99 \text{ t m})$$

De acuerdo con el criterio de factores de carga y de resistencia:

Con $\phi=0,90$

$$\phi Mn = (0.90)(1137.5 \text{ kN m}) = 1023.74 \text{ kN m} = (104.39 \text{ t m})$$

Comparando M11max y M22max con ϕMn :

$$M11 = 80.01 \text{ kN m} \ll 1023.74 \text{ kN m} = (8.16 \text{ t m} \ll 104.39 \text{ t m})$$

Con lo cual se comprueba que el acero suministrado por cuantía mínima $\rho=0.0030$ es mayor que la requerida para las cargas y condiciones mencionadas.

⁸ "ACI 318S-05 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary"

5.3. Determinación de las cargas actuantes sobre el plinto.

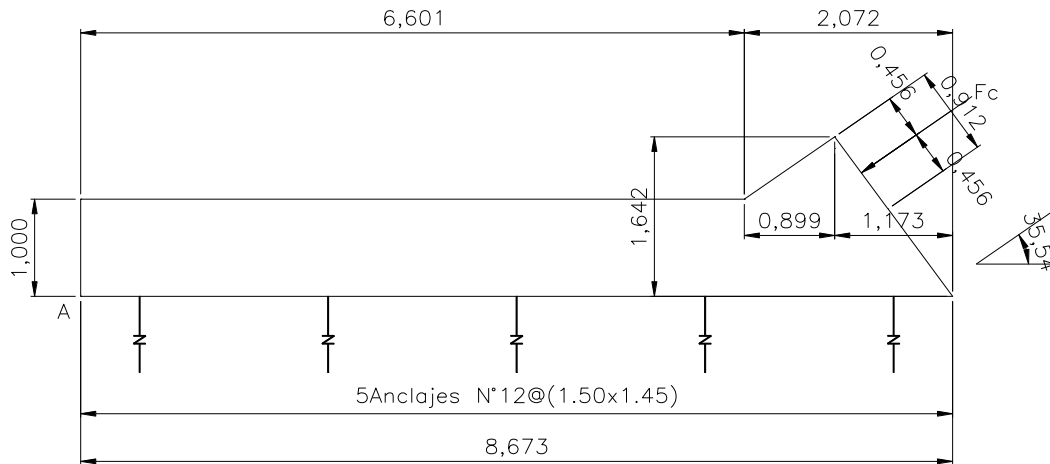


Imagen 5.3-1. Cargas actuantes sobre el plinto.

Las cargas que soportará el plinto, se definen a continuación:

- Peso Propio Losa del Plinto (Carga Descendente).

Espesor de losa: 1.0 m

$$\gamma_{concreto} = 23.54 \frac{kN}{m^3} \left(2.4 \frac{t}{m^3} \right)$$

$$Peso\ propio = \left(23.54 \frac{kN}{m^3} \right) (1.0\ m) = 23.54 \frac{kN}{m^3} \left(2.4 \frac{t}{m^2} \right)$$

- Presión ascendente: $196.2 \frac{kN}{m^2} \left(20 \frac{t}{m^2} \right)$
- Carga debida a la Cara de Concreto.

Considerando un factor de fricción (f) entre las losas de la cara de concreto y el relleno de $f = \tan 35^\circ$, se tiene:

$$f = \tan 35^\circ = 0.70$$

$$F_c = W_t - W_n f$$

F_c = Resultante en dirección paralela al plano de la losa.

W_t = Componente del peso de la losa en dirección paralela a ella.

W_n = Componente del peso de la losa dirección normal a ella.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

Cálculo de la fuerza máxima actuante en la sección 6-7 con embalse nulo. (El embalse lleno no aumenta la componente tangencial que es la que influye directamente sobre el cabezal del plinto).

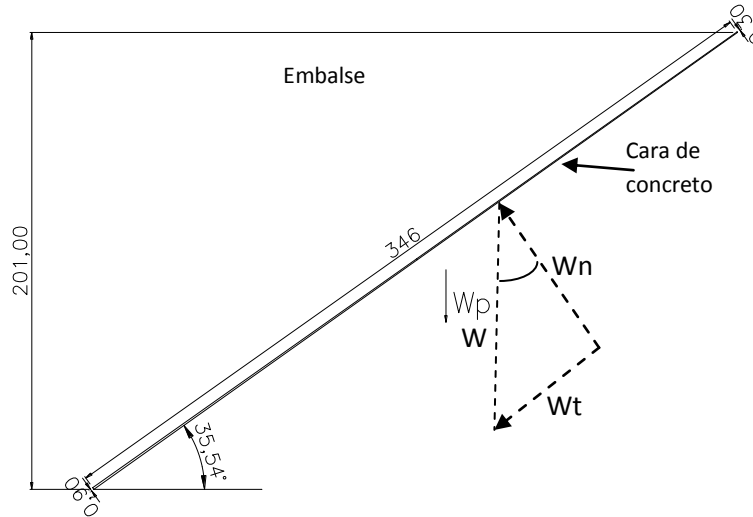


Imagen 5.3-2. Sección transversal de la cara de concreto en el tramo 6-7 del plinto.

Calculo de la fuerza debida al peso de la cara de concreto.

$W = (\text{Peso del concreto}) (\text{Área transversal de losas})$

$$W = 23.54 \left(\frac{kN}{m^3} \right) \left[\frac{(0.30 m + 0.504 m)}{2} (172 m) + \frac{(0.5 m + 0.912 m)}{2} (174 m) \right]$$

$$W = 4,519.4 \frac{kN}{m} = \left(460.85 \frac{t}{m} \right)$$

$$W_n = (\cos \alpha)(W_p) = (\cos 35.54) \left(4,519.4 \frac{kN}{m} \right) = 3,677.48 \frac{kN}{m} = \left(375.0 \frac{t}{m} \right)$$

$$W_t = (\sin \alpha)(W_p) = (\sin 35.54) \left(4,519.4 \frac{kN}{m} \right) = 2,627.0 \frac{kN}{m} = \left(267.88 \frac{t}{m} \right)$$

Entonces la fuerza actuante sobre el cabezal:

$$F_c = \{2,627 - [3,677.48(0.70)]\} = 52.76 \frac{kN}{m} = \left(5.38 \frac{t}{m}\right) \text{ compresión.}$$

Componente horizontal sobre el cabezal F_{ch} :

$$F_{ch} = 52.76 (\cos 35.54^\circ) = 42.94 \frac{kN}{m} = \left(4.38 \frac{t}{m}\right)$$

Componente vertical F_{cv} :

$$F_{cv} = 52.76 (\sen 35.54^\circ) = 30.67 \frac{kN}{m} = \left(3.13 \frac{t}{m}\right)$$

5.4. Verificación del cortante por fricción en el cabezal.

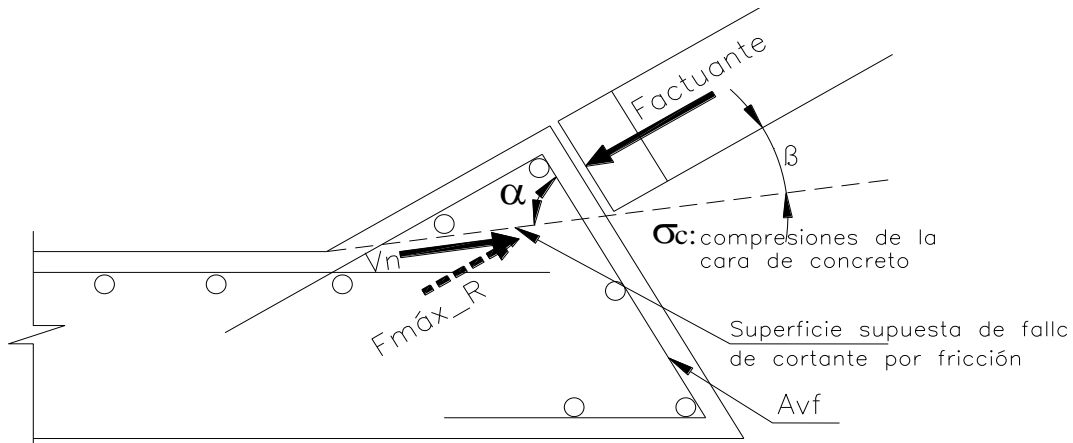
El cabezal del plinto es el elemento sobre el cual se apoyan las losas de concreto perimetrales, como se menciona anteriormente el elemento debe ser normal en todo momento al eje de las losas. Se realiza la verificación del refuerzo de tal manera que sea apto para absorber los esfuerzos transmitidos por compresiones de la cara de concreto.



Fotografía 5.4-1. Vista del armado en el cabezal del plinto tramo 11-12.

5.4.1. Fuerza máxima resistente en el cabezal.

Se debe verificar que la carga de compresión transmitida por las losas no sobrepase la resistencia del refuerzo especificado.



Variables: Según ACI 318S-05

$$\phi V_n \geq V_u$$

$$V_n = A_{vf} F_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)$$

Donde:

ϕ : Factor de reducción de resistencia.

V_u : Fuerza Cortante aumentada en la sección.

V_n : Resistencia Nominal a cortante.

A_{vf} : Área de refuerzo de cortante por fricción.

μ : Coeficiente de fricción.

Para concreto colocado Monolíticamente $\mu=1.4\lambda$

λ : Factor de modificación relacionado con la densidad del concreto.

$\lambda=1.0$ para concreto normal.

F_y Módulo de fluencia del acero.

Imagen 5.4.1-1. Esquema de fuerzas actuantes sobre el cabezal del plinto.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

Considerando el segmento 6-7 del plinto (ver imagen 4.5.1-3) y sustituyendo en la ecuación anterior se tiene:

$$V_n = \left(3000 \frac{mm^2}{m}\right) (412 MPa) [(1.4)(1.0)(\text{sen } 50.5^\circ) + (\text{cos } 50.5^\circ)]$$

$$V_n = 2,121.4 \frac{kN}{m}$$

$$\phi V_n = (0.85) \left(2,121.4 \frac{kN}{m}\right) = 1,803.19 \frac{kN}{m}$$

La fuerza máxima resistente se obtiene por geometría (véase Imagen 5.4.1-1.):

$$F_{Max.Resistente} = \phi V_n \cos \beta = \left(1,803.19 \frac{kN}{m}\right) (\cos 39.5^\circ) = 1,390.6 \frac{kN}{m}$$

La máxima carga actuante en el cabezal afectada según ACI 318S-05⁹ (véase 5.3. Determinación de las cargas actuantes sobre el plinto) es:

$$F_{actuante} = \left(52.76 \frac{kN}{m}\right) (1.4) = 73.86 \frac{kN}{m}$$

$$F_{actuante} < F_{Max.Resistente}$$

$$73.83 \frac{kN}{m} < 1,390.6 \frac{kN}{m}$$

La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos para cada uno de los segmentos del plinto, se destaca el segmento 6-7 debido a que presenta la mayor fuerza actuante.

f'_c 250 kgf/cm² = 24,53 MPa

μ 1.4

Φ 0.85

Tramo	A_{vf} (cm ² /m)	α (grados)	β (grados)	α (rad)	V_n (kN/m)	ΦV_n (kN/m)	$F_{m\acute{a}x_R}$ (kN/m)	$F_{act_M^{(1)}}$ (kN/m)
2-3	21	70.2	19.8	1.2252	1,432.8	1,218	1,145.9	5.3
3-4	26.4	69.5	20.5	1.2131	1,807.3	1,536	1,439.0	20.9
4-5	26.4	82.0	8.0	1.4312	1,659.4	1,410	1,396.7	39.5
5-5'	30	67.2	22.8	1.1733	2,074.0	1,763	1,625.5	58.4
5'-6	30	68.2	21.8	1.1903	2,065.8	1,756	1,630.3	72.3
6-7	30	50.5	39.5	0.8807	2,121.4	1,803	1,390.6	73.8
7-8	30	51.4	38.6	0.8969	2,123.5	1,805	1,410.4	72.3
8-8'	30	63.0	27.0	1.0996	2,103.0	1,788	1,592.8	63.8
8'-8''	26.4	71.2	18.8	1.2426	1,792.2	1,523	1,442.0	39.5
8''-9	26.4	71.0	19.0	1.2390	1,794.1	1,525	1,441.8	24.5
9-10	26.4	64.2	25.8	1.1212	1,844.2	1,568	1,411.8	12.8
10-11	21	67.7	22.3	1.1815	1,449.1	1,232	1,139.6	3.7
11-12	21	70.7	19.3	1.2332	1,429.5	1,215	1,146.5	3.5

$F_{m\acute{a}x_R}$ = Fuerza máxima **resistente** en el cabezal del plinto por metro lineal.

$F_{act_M^{(1)}}$ = Fuerza **actuante** afectada según ACI 318S-05 en el cabezal del plinto por metro lineal con embalse vacío.

$F_{act_M^{(2)}}$ = Fuerza **actuante** afectada según ACI 318S-05 en el cabezal del plinto por metro lineal con embalse lleno.

Tabla 5.4.1-2. Verificación del cortante para los diferentes tramos del plinto.

⁹ "ACI 318S-05 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary"



Fotografía 5.4.1-3. Detalle del armado del cabezal.

5.5. Estabilidad del plinto ante deslizamiento.

Debido a la función que el plinto desempeña en la presas de enrocamiento, este elemento debe permanecer inmóvil en su lugar de desplante. Pudiera pensarse que por encontrarse anclado a la roca de cimentación el plinto garantizaría su inmovilidad con respecto al terreno; sin embargo, las anclas no son diseñadas para evitar movimientos de deslizamiento con respecto al suelo, la estabilidad ante el deslizamiento la proporciona el peso propio del elemento y en caso necesario, la adherencia entre el concreto y la roca sería considerada a favor de esta situación.

Las anclas del plinto son colocadas para soportar los esfuerzos de flotación ejercidos en un momento dado por los trabajos de inyección (análisis que escapa de los alcances del presente trabajo)¹⁰, estas anclas deben tener la resistencia necesaria para evitar que el plinto flote cuando se realizan los tratamientos a través de él.

¹⁰ El lector interesado puede consultar: “Manual de anclajes en Ingeniería civil” de Roberto Ucar Navarro. Madrid -2004 y los trabajos de Brown D. G. (1970): “Uplift Capacity of Grouted Rock Anchors”. Ontario Hydroresearch Quartely Vol. 22 No. 4, pp 18-24.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

Para un segmento del plinto 6-7 sin considerar la presión ascendente de los tratamientos se realizará el análisis de estabilidad del elemento.

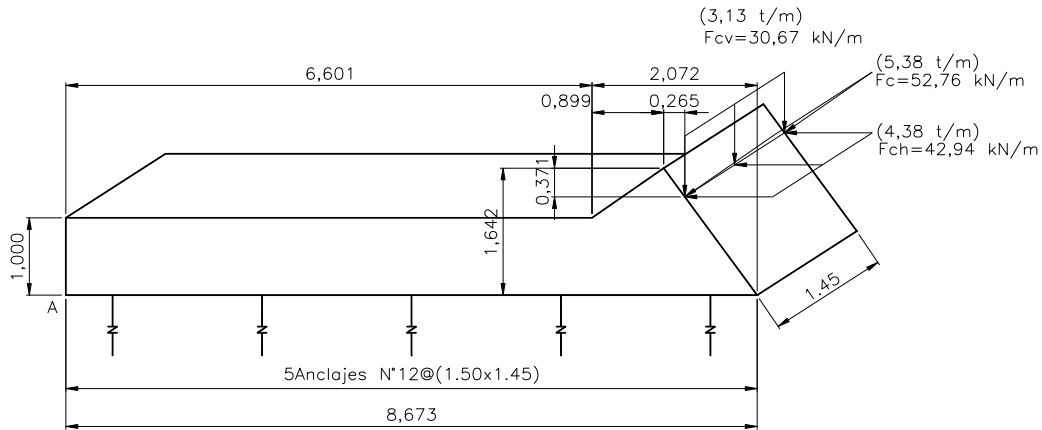


Imagen 5.5-1. Fuerzas actuantes sobre el plinto.

Fuerzas Verticales:

$$\begin{aligned}
 \text{Volumen: } (6.601\text{m}) (1.0\text{m}) (1.45\text{m}) &= 9.57 \text{ m}^3 \\
 (0.899\text{m}) (1.0\text{m}+1.642\text{m}) (0.5) (1.45\text{m}) &= 1.72 \text{ m}^3 \\
 (1.173\text{m}) (1.642\text{m}) (0.5) (1.45\text{m}) &= \underline{1.40 \text{ m}^3} \\
 &= 12.69 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\text{Peso losa} = (12.69 \text{ m}^3) \left(23.54 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) = 298.72 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 Fc \text{ vertical} &= \left(30.67 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right) (1.45 \text{ m}) = 44.47 \text{ kN} \\
 &= \underline{\underline{343.19 \text{ kN}}}
 \end{aligned}$$

Fuerzas Horizontales resistentes:

$$\text{Fricción: } (343.19 \text{ kN}) (0.7) = 240.23 \text{ kN} = (24.49 \text{ t})$$

$$\text{Fuerzas horizontales actuantes: } = 42.94 \text{ kN/m}$$

Factor de seguridad al deslizamiento FS

$$FS = \frac{F_{Hresistentes}}{F_{Hactuantes}}$$
$$FS = \frac{240.23 \text{ kN}}{\left(42.94 \frac{\text{kN}}{\text{m}}\right)(1.45 \text{ m})} = 3.86$$

Se observa que para la sección crítica del plinto las fuerzas horizontales debidas a las losas de concreto (véase 5.3. *Determinación de las cargas actuantes sobre el plinto*), no comprometen la estabilidad del elemento.

Como ya se mencionó anteriormente, las barras de anclaje no trabajan a corte; el peso propio del plinto es suficiente para absorber la fuerza que eventualmente puede recibir de las losas de la cara de concreto; sin embargo, despreciando la fricción entre la roca y el concreto del plinto, las anclas de acero trabajarían a corte y su esfuerzo estaría dado por:

$$\text{De resistencia de materiales: } \tau = \frac{F}{A}$$

Donde F es paralela al plano A .

Definiendo:

A_g : Área de la barra de anclaje

F_{CH} : Componente horizontal de la resultante paralela al plano de la losa.

B : Separación de anclajes en sentido perpendicular al plano de estudio.

De acuerdo a lo anterior utilizando Barra #12 para los anclajes se tiene:

$$\tau = \frac{F_{CH} B}{(\text{No. de anclajes.})(A_g)} = \frac{\left(42.94 \frac{\text{kN}}{\text{m}}\right)(1.45 \text{ m})}{(5)(1140 \text{ mm}^2)} (10^3) = 10.92 \text{ MPa}$$

Este esfuerzo es bajo comparado con F_s (admisible para servicio):

$$\frac{\sigma(\text{actuante})}{\sigma(\text{resistente})} = \frac{10.92 \text{ MPa}}{(0.40)(412 \text{ MPa})} (100) = 6.62\%$$

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 5.5-2. Colocación del anclaje para el plinto.

5.6. Factor de Seguridad ante volcamiento:

Un factor importante a considerar en el plinto es la seguridad ante el volcamiento, esta situación comprometería gravemente la estanqueidad de la presa. Para la sección crítica del plinto (ver *Estabilidad del plinto*), se tienen las siguientes cargas (ver imagen 5.5-1.).

	Fuerzas Actuantes (kN)	Brazo alrededor de A (m)	Momentos alr de A (kN-m)
Fuerzas Estabilizantes (+)			
Peso propio del plinto	298.72	4.34	1,296.4
Componente vertical de la fuerza actuante en el cabezal	44.47	7.77	345.3
	343.19		1,641.8
Fuerzas Desestabilizantes (-)			
Componente horiz de la fuerza actuante en el cabezal	62.26	1.27	79.1
	62.26		79.1

Factor de Seguridad al volcamiento:

F.S.	20.75
------	-------

Tabla 5.6-1. Resultados del análisis ante el volcamiento.

Capítulo 6. Sellos impermeables de cobre para la junta perimetral.

6.1. Descripción.

En el Proyecto Hidroeléctrico La Yesca la colocación de los materiales que servirán como sellos impermeables en las juntas entre el plinto y las losas de concreto, se realiza según lo estipulado por la Comisión Federal de Electricidad, la cual establece el procedimiento a seguir así como las especificaciones de los materiales que deben ser colocados tal y como a continuación se menciona.

6.2. Material de los sellos superior e inferior.

El material de los sellos es cobre con una aleación C 12200 laminado en caliente, su nombre comercial es cobre fosforado y de temple suave, de acuerdo con las normas ASTM B 152 y ASTM B 248 en su edición vigente¹¹. El material a utilizar debe ser inspeccionado físicamente y además, el fabricante debe proporcionar la documentación necesaria certificando la calidad del material suministrado.

6.3. Dimensiones de los sellos.

6.3.1. Sello inferior.

Los sellos son fabricados en lámina de cobre fosforado calibre 18 (1.24 mm de espesor nominal), la cual, es suministrada a la obra en rollos de ancho suficiente para cada perfil (21" para el sello inferior), y con longitudes adecuadas para cubrir el total de la junta.

Para doblar la lámina de cobre y obtener las dimensiones de los sellos, se utiliza una roladora diseñada y construida específicamente para esta actividad, en la cual se inserta la lámina obteniendo las siguientes dimensiones para el sello:

¹¹ ASTM B152 "Standard Specification for Copper Sheet, Strip, Plate, and Rolled Bar"

ASTM B248 "Standard Specification for General Requirements for Wrought Copper and Copper-Alloy Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar"

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

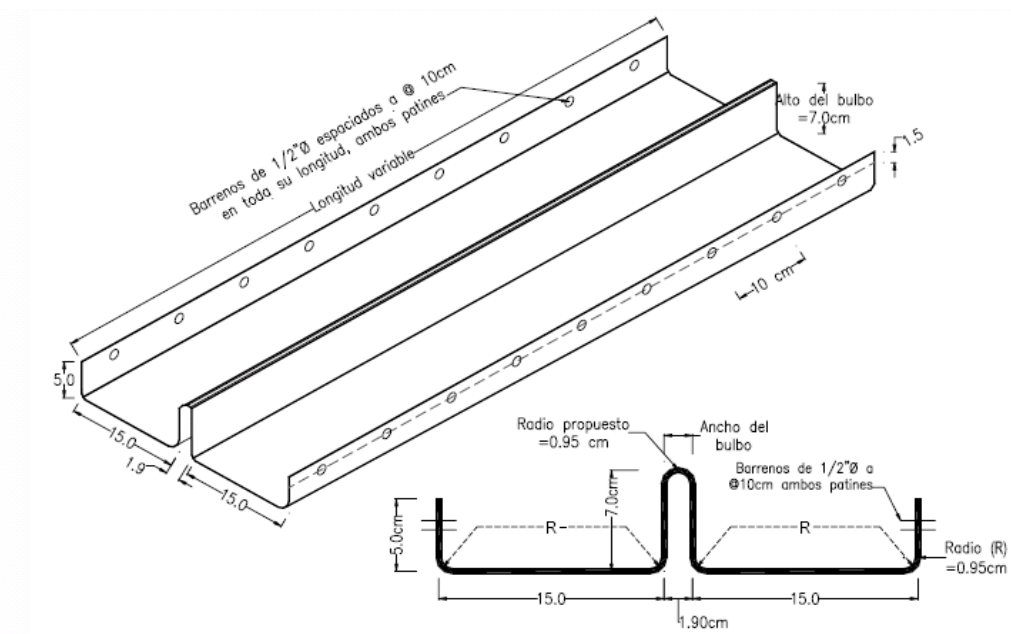


Imagen 6.3.1-1. Dimensiones del sello superior de cobre. Cortesía C.F.E.



Fotografía 6.3.1-2. Lamina de cobre entrando a la roladora para obtener la forma del sello.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 6.3.1-3. Lamina en proceso de rolado.



Fotografía 6.3.1-4. Lamina en proceso de rolado.

6.3.2. Sello superior.

El sello superior se fabrica en lámina de cobre con las mismas especificaciones que el sello inferior y su rolado es muy similar, con la diferencia de que es menos ancho y no posee aleros. El objetivo del sello superior es instalar una barrera adicional en aquellas zonas de mayor deformación, como lo es la junta perimetral; este elemento se sujeta mediante barrenos a las diferentes losas.

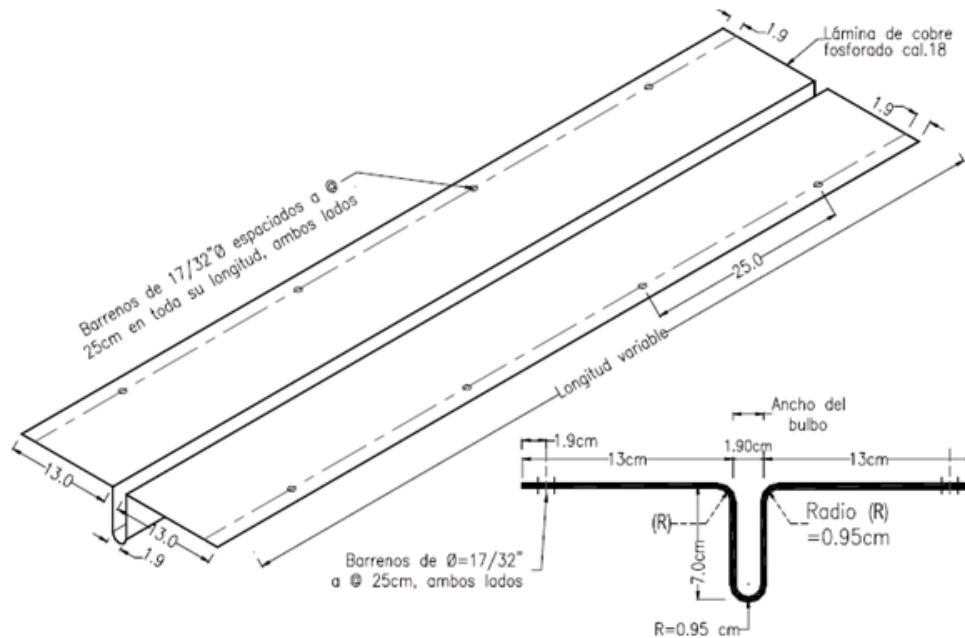


Imagen 6.3.2-1. Dimensiones del sello perimetral superior. Cortesía C.F.E.

6.4. Unión de los elementos de cobre.

Por cuestiones constructivas y de diseño los sellos de cobre en algún momento deben unirse y cambiar de dirección para continuar a todo lo largo del plinto, por ello, para lograr una correcta unión entre los diferentes elementos se hace un traslape tanto del sello superior como del inferior.

La longitud del traslape entre las piezas a unir es de 15 mm (± 1 mm), antes de soldarse las piezas se presionan entre sí firmemente por medio de una prensa, de tal manera que se garantice que al aplicar la soldadura no queden oquedades o posibles poros donde pudiera filtrarse el agua.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 6.4-1. Prensa diseñada para la unión de piezas de cobre.

6.5. Transiciones en los sellos.

El proceso de unión entre dos secciones de cobre para continuar con el sello de estanqueidad es una actividad que debe realizarse con sumo cuidado, por esta razón las piezas de conexión en forma de "T", "Y" o cualquier otra geometría para cambios de dirección, se fabrican en el taller con dispositivos especialmente diseñados, de manera que en campo se logren empalmes de tramos rectos más sencillos de soldar; es importante resaltar que en las dimensiones de las piezas que serán empalmadas deben estar consideradas las longitudes de traslape.



Fotografía 6.5-1. Tee habilitada en el taller



Fotografía 6.5-2. Tee colocada en el plinto.

6.6. Colocación del sello inferior.

El sello inferior se coloca cuidadosamente en la zona que formará el cabezal del plinto, alineado con el eje del mismo para que durante las maniobras de colado, uno de los aleros sea embebido en el concreto del cabezal; posteriormente durante los colados de la cara impermeable, el otro alero será embebido en el concreto de las losas.

Para que exista una buena adherencia entre el sello de cobre y el concreto, es necesaria la colocación de una resina epóxica que garantice una perfecta adherencia entre los dos elementos.

Por debajo del sello y sobre los rellenos de la presa se coloca una capa de arena asfáltica que sirve de asiento homogéneo al cobre, encima de la plantilla de arena se coloca una banda de PVC cuyo espesor es de 0.6 cm (1/4") y con un ancho de 60 cm, logrando con esto una superficie uniforme y evitando que las imperfecciones de la plantilla dañen los elementos de cobre por efecto de punzonamiento.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Imagen 6.6-1. Colocación de arena asfáltica y banda de PVC bajo el sello inferior de cobre.

La banda de PVC debe ser continua a todo lo largo del sello, adaptándose a los cambios de dirección y a las transiciones que se presenten; en las uniones de la banda no deben existir traslapes que comprometan la estabilidad del sello, para ello se deja una junta entre bandas no mayor a 1.0 mm. El vaciado y el vibrado del concreto en las losas contiguas deben ser realizados cuidadosamente para garantizar un embebido perfecto y completo en los patines del sello.

Debido a que la junta perimetral respecto a las losas no se encuentra en un solo plano, en el taller se realiza el doblado necesario para que la junta adquiriera la pendiente necesaria y al momento de su colocación, ensamble perfectamente tanto en el plinto como en las losas de concreto.



Fotografía 6.6-2. Sección transversal de dos tramos de sello con inclinaciones diferentes.

6.7. Colocación del sello superior.

El sello superior tiene forma similar al sello inferior con excepción de que no posee aleros que puedan embeberse en el concreto, por esta razón es colocado sobre la junta con ayuda de barrenos, taquetes expansivos y tuercas que mantienen fijo al elemento. Con la finalidad de proporcionar homogeneidad entre el sello de cobre y el concreto, se coloca una banda de neopreno de 4" x 1/4" que protege al cobre del efecto de punzonamiento. Para hacer más efectiva la unión entre el concreto, el cobre y el neopreno, se coloca material adherente para fijarlos firmemente. El proceso se realiza de la siguiente manera:

- Se limpia el sello de cobre para evitar que contenga grasas o detergentes, esta actividad se realiza en taller y, posteriormente también en campo.
- La superficie de concreto donde será colocado el sello debe secarse y estar exenta de imperfecciones e impurezas que impidan la correcta colocación del sello.
- Se coloca una capa uniforme de material adherente para posteriormente instalar la banda de neopreno y adherirla al concreto.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

- Se coloca una capa de material adherente sobre la banda de neopreno para fijarla al sello de cobre que se asienta sobre ella.
- Para la colocación del adherente (sellador elástico de poliuretano) se debe tener cuidado en su manejo y aplicación, ya que se puede contaminar fácilmente con polvo o tierra quedando inutilizable.
- Se colocan y aprietan las tuercas y los elementos superiores que fijan de manera definitiva los sellos al concreto.

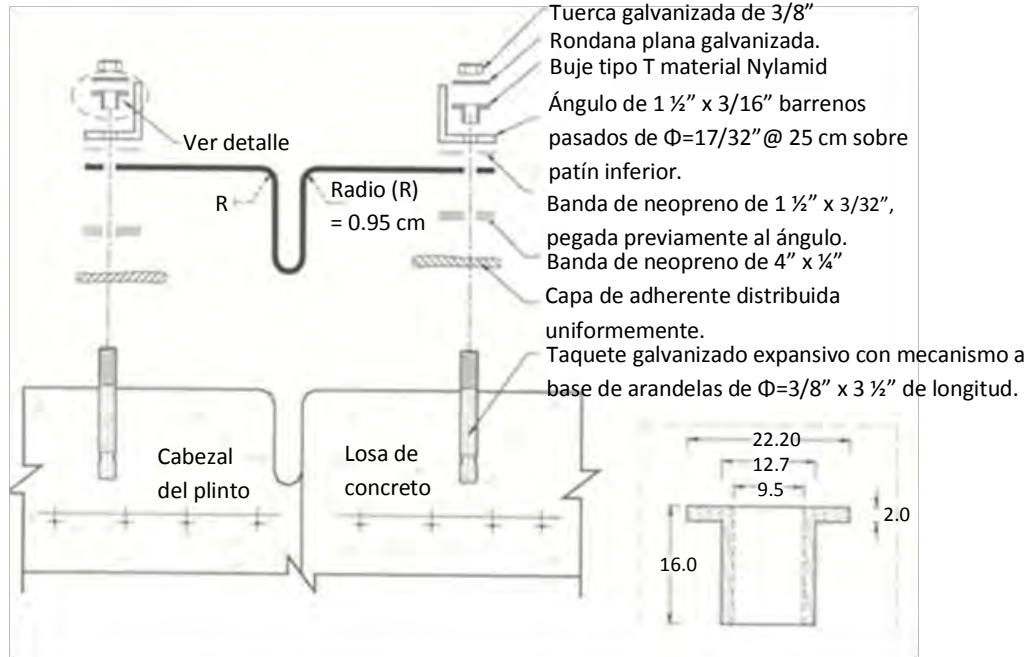


Imagen 6.7-1. Esquema general de la colocación del sello superior de cobre. Cortesía CFE.



Fotografía 6.7-2. Colocación del sello superior de cobre sobre las bandas de neopreno en la C.H. El Cajón (Nayarit, México). Cortesía ICA.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 6.7-3. Sujeción del sello de cobre en la C.H. El Cajón, (Nayarit, México). Cortesía ICA.



Fotografía 6.7-4. Sello superior colocado en la C.H. El Cajón, (Nayarit, México). Cortesía ICA.

6.8. Material de relleno en las juntas perimetrales.

Los asentamientos de las losas de la cara de concreto, en algunas zonas generarán movimientos que tenderán a disminuir el espacio existente comprimiendo la junta, por esta razón es necesario colocar material de relleno que absorba el posible impacto entre las losas de concreto y el plinto, evitando efectos de cizallamiento y fracturas que dañen la integridad de las losas.

Para el relleno de las juntas perimetrales en el plinto, el material utilizado es madera dura de $\frac{3}{4}$ " (1.9 cm) de espesor obtenida de los árboles clasificados como: angiospermas, latifoliados u hojosos, entre los cuales se pueden mencionar: el encino blanco, el encino roble, el chicozapote, el cencarro, el pucté o el ramón. Este tipo de árboles son de fibras anchas, que en la mayoría de los casos forman un follaje vistoso.

6.8.1. Colocación del material de relleno

La madera se coloca en toda la junta perimetral fijándola al plinto ya colado, se impregna previamente por ambas caras con antiadherente, evitando con esto que la losa de la cara de concreto se adhiera a la madera, los tablonces se alinean en forma continua con una separación en los empalmes máxima de 1 mm.

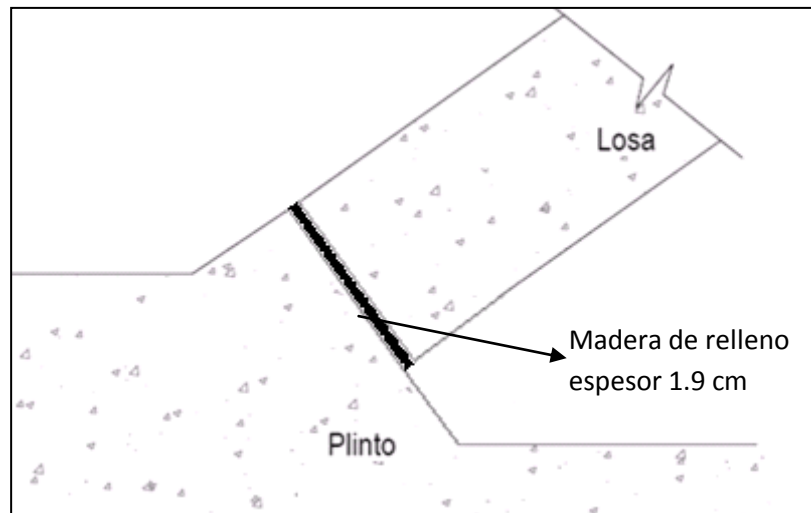


Imagen 6.8.1-1. Detalle de la colocación de la madera de relleno.

6.9. Contenedor de ceniza.

El contenedor es un elemento que alberga la ceniza volante, es semicircular con aleros rectos y está fabricado de lámina galvanizada calibre 18 con perforaciones de 6.35 mm de diámetro, con separaciones de 9 mm entre centros, en arreglo de 9 agujeros por pulgada cuadrada.

En su interior está colocado un geotextil no tejido (Nonwoven) de polipropileno estabilizado, como el MIRAFAI 1160 N, o el PROPEX 4510.

Este geotextil a su vez está rodeado por otro contenedor de las mismas características que el anterior sólo que en lámina calibre 20. Las dimensiones del contenedor están en función de los desplazamientos máximos que se esperan en las juntas donde se colocan.

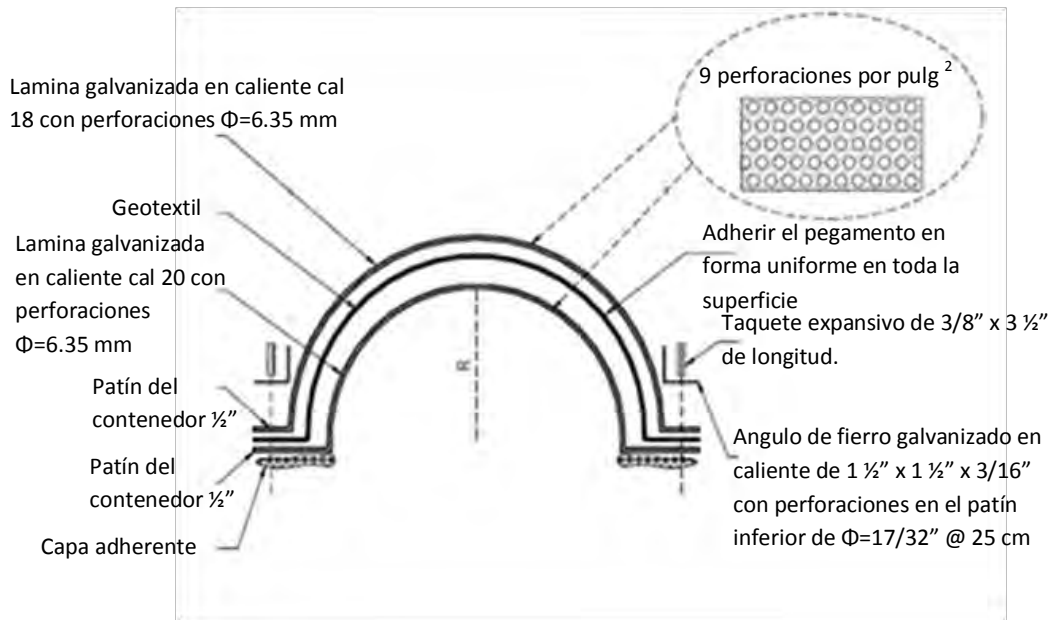


Imagen 6.9-1. Detalle de los contenedores de ceniza. Cortesía CFE.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 6.9-2. Contenedor galvanizado y geotextil. Cortesía ICA.

6.9.1. Ensamble de contenedores y geotextil.

La colocación de los contenedores se hace por medio de ángulos metálicos, anclas y adhesivos para fijarlo al concreto.

Para el ensamble de los contenedores superior e inferior se utiliza un pegamento de contacto de alta resistencia, esto permite sujetar el geotextil firmemente entre ambos contenedores, esta operación se hace en el taller para que en campo sólo se adicione lo que respecta al anclaje del conjunto y la aplicación de la base del sellador elástico de poliuretano.



Fotografía 6.9.1-1. Transición de contenedores de ceniza habilitada en taller. Cortesía ICA.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 6.9.1-2. Colocación del geotextil entre los contenedores. Cortesía ICA.



Fotografía 6.9.1-3. Colocación del contenedor de ceniza sobre el sello superior de cobre. Cortesía ICA.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 6.9.1-4. Colocación del contenedor de ceniza sobre sello superior de cobre. Cortesía ICA.

El traslape entre contenedores para su unión es de 5 cm, entre el contacto de ambos se tiene una franja de sellador de poliuretano cubriendo todo el empalme para que no deje pasar la ceniza.

6.9.2. Llenado de contenedores con ceniza volante.

Después de instalar los contenedores, éstos son llenados con ceniza volante en su totalidad, es recomendable que las partes del contenedor a llenar no tengan una longitud mayor a 50 m, el relleno se realiza por gravedad mezclando la ceniza con agua hasta que tenga la consistencia totalmente fluida (el agua no es limitante ya que se sale a través del geotextil), por medio de una manguera introduciéndola en toda la parte a rellenar. Conforme se vaya avanzando en el proceso de llenado, la manguera se va retirando hasta concluir.

Capítulo 7. Proceso de Soldadura de los sellos de cobre.

7.1. Descripción.

Las uniones de los diferentes tramos de cobre se realizan mediante el proceso de soldadura fuerte (brazing en inglés), es un proceso de unión térmica caracterizada por realizarse a temperaturas mayores de 450° C, el metal de aporte se calienta hasta su fusión fluyendo por capilaridad en la holgura que existe entre los materiales a soldar.

El material de aportación que se utiliza en este tipo de soldaduras, se debe seleccionar en función del material a unir y del uso que se le vaya a dar al elemento.

MATERIAL AÑADIDO	PUNTO DE FUSIÓN	USOS	RESISTENCIA MECÁNICA
Varilla de aluminio 1.5 mm	575°C	Exclusivamente unión de aluminio	10 Kg/mm ²
Varilla de plata (40%) 1.5 mm	630°C	Unión de todos metales excepto aluminio, estaño, plomo, hierro colado	42 kg/mm ²
Varilla cobre fósforo 1.5 mm	750°C	Exclusivamente unión de cobre	50 kg/mm ²
Varilla cobre fósforo plata (5%) 1.5 mm	780°C	Exclusivamente unión de cobre	60 kg/mm ²

Tabla 7.1-1. Tipos, propiedades y usos del metal de aporte a la soldadura.

La unión de los sellos de cobre en las soldaduras de taller como las de campo se efectúa con equipo de oxiacetileno, empleando varillas de soldadura desnuda de 1/16" (1.5 mm) de diámetro con un contenido mínimo de plata del 56%, exenta de cadmio, con una resistencia a la tensión de 59.76 kg/mm² (85 000 PSI). Las áreas de trabajo donde se llevara a cabo el proceso de soldadura deben estar libres de polvo, lluvia y/o viento.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 7.1-2. Protección de la zona de trabajo en obra.

Para efectuar la unión de las piezas se realiza una limpieza minuciosa en el área de la junta eliminando grasa y solventes que contaminen la soldadura, además se debe evitar el deslizamiento de tierra y partículas de polvo de la parte alta del sello durante el proceso, posteriormente se untan los elementos con el fundente y se colocan en las prensas para presionar firmemente entre sí las partes a unir, cuidando que la sobreposición de los piezas no se realice en las perforaciones de los aleros antes de soldar. La varilla de soldadura se limpia previamente y después se cubre con un fundente para soldadura desnuda.



Fotografía 7.1-3. Limpieza de los elementos previo a la soldadura.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 7.1-4. Colocación de la capa de material fundente en los elementos de cobre.



Fotografía 7.1-5. Colocación de la prensa que presiona los traslapes.

El fundente utilizado tiene la capacidad de remover los óxidos superficiales y proteger al mismo tiempo de corrosión atmosférica durante la unión y el enfriamiento, está diseñado para ser usado con aleaciones de plata con un rango de fusión entre 535° C y 870° C.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 7.1-6. Colocación de fundente sobre la soldadura desnuda.

La flama requerida es ligeramente carburante, ajustándola lejos de las piezas a soldar para evitar contaminarla. Se calienta con el soplete de manera amplia y uniforme el área de la junta a soldar, iniciando con la zona de las prensas metálicas manteniendo la flama a una distancia de entre 3 y 6 cm entre el cono de la llama y el metal base, hasta que se derrita el fundente.



Fotografía 7.1-7. Inicio proceso de soldadura.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 7.1-8. Soplete calentando el cobre.

Posteriormente se coloca la varilla de soldadura conservando el soplete en constante movimiento, hasta que el material de la varilla fluya por capilaridad, durante este proceso la prensa se afloja para que la soldadura penetre en su totalidad en toda la unión, teniendo la precaución de no dejar excesos de soldadura, ya que no favorecen la eficiencia de la junta al no ser soldadura de relleno.



Fotografía 7.1-9. Proceso de soldadura al interior del sello.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 7.1-10. Proceso de soldadura en un extremo del sello.



Fotografía 7.1-11. Proceso de soldadura en el bulbo del sello.

Se recomienda iniciar el proceso en el bulbo ya que es la zona más delicada de la junta, se deja enfriar lentamente y se retira el residuo del fundente. La temperatura de unión es del orden de 652° C a 760° C (1206° F a 1400° F), por lo cual se utiliza un medidor óptico infrarrojo adecuado para monitorear constantemente la temperatura y controlar

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

la aplicación de la misma, ya que las partes a unir no deben ser sobrecalentadas y no deben existir deformaciones (sobre todo en el bulbo), ni exceder de 45 minutos el proceso de soldadura.



Fotografía 7.1-12. Termómetro infrarrojo.



Fotografía 7.1-13. Revisión de la temperatura con el termómetro infrarrojo.

7.2. Pruebas a la soldadura.

7.2.1. Inspecciones a la soldadura (pruebas no destructivas).

Todas las soldaduras realizadas en taller y en campo deben ser inspeccionadas visualmente y sometidas a la prueba no destructiva, la cual consiste en la colocación de líquidos penetrantes sobre la unión soldada ya terminada. Estos líquidos penetran en las aberturas de la soldadura (en caso de existir), y al aplicarles la mezcla reveladora hace visibles al ojo humano cualquier grieta existente que afecte la calidad de la soldadura. Si un elemento unido con soldadura no supera esta prueba, no podrá ser colocado en el plinto ni será canalizado al laboratorio para el resto de los ensayos.



Fotografía 7.2.1-1. Colocación de líquidos penetrantes. Cortesía I.C.A.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 7.2.1-1. Aplicación de la mezcla reveladora. Cortesía I.C.A.

7.2.2. Ensayes a probetas.

Para garantizar la seguridad en las uniones de los sellos de cobre, la Comisión Federal de Electricidad establece que por cada cinco uniones de taller y por cada veinte de campo deben efectuarse pruebas de tensión y de doblado a las soldaduras, las cuales son seleccionadas aleatoriamente de entre las juntas terminadas, con la intención de evaluar la resistencia de los elementos y al mismo tiempo sirve de parámetro para calificar la destreza del personal encargado de la soldadura.

Las probetas de cobre que se analizaran se extraen de las uniones realizadas tal y como se muestra en el siguiente esquema.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

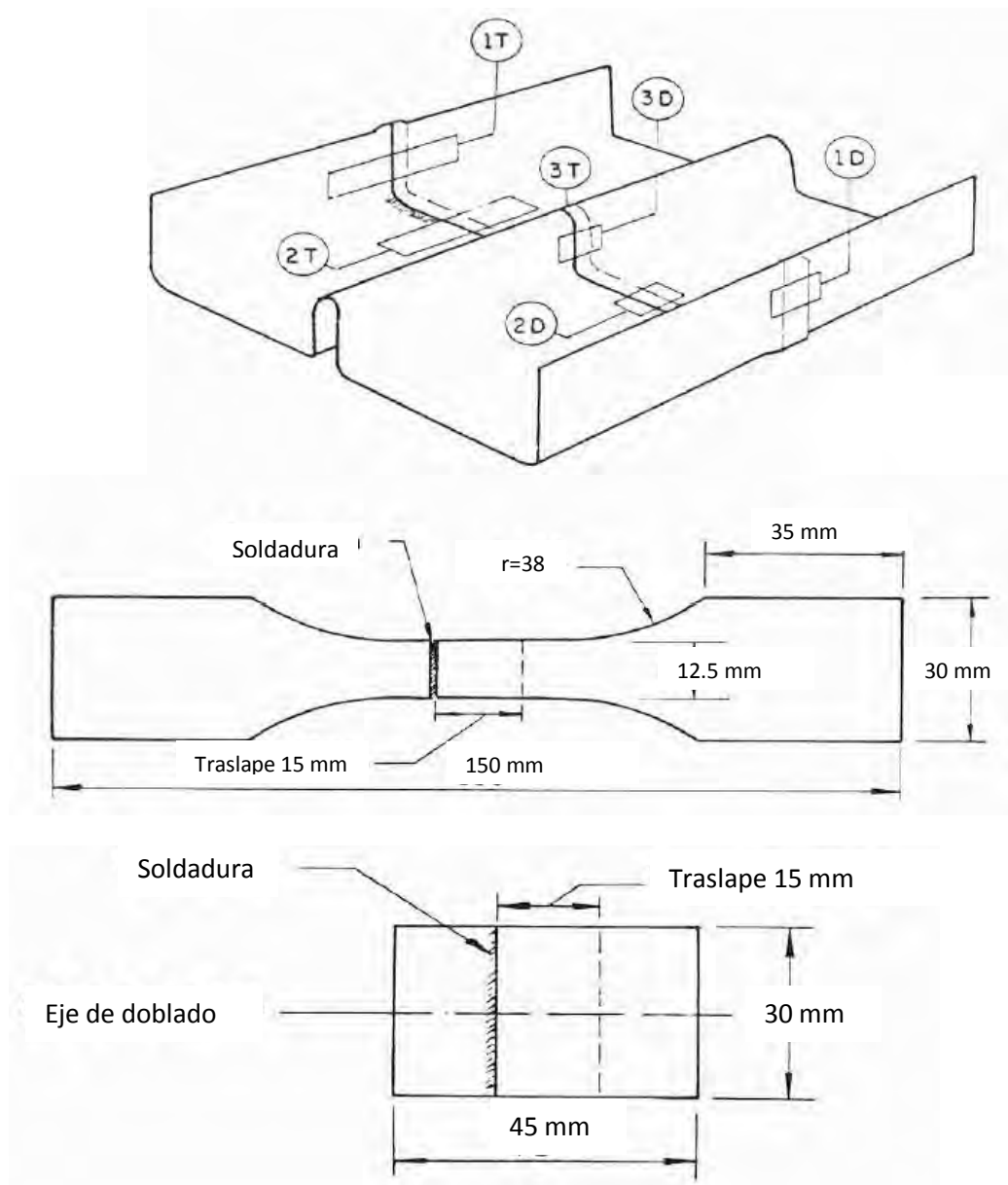


Imagen 7.2.2-1. Zonas del sello de cobre para obtención de las probetas. Cortesía C.F.E.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

Las probetas marcadas 1T, 2T y 3T son sometidas a prueba de tracción, y las marcadas 1D, 2D y 3D a prueba de doblado, a un ángulo de 180° sobre un mandril de 6 mm de radio colocado bajo la soldadura y normal a ésta. En la prueba de tensión, la rotura debe ocurrir en la lámina y no en la soldadura. En la prueba de doblado no debe apreciarse rotura o grietas en la soldadura o alrededor de ella, de cada unión entre las seleccionadas se deben muestrear tres probetas para prueba de tracción y tres para prueba de doblado.



Fotografía 7.2.2-2. Probeta de cobre para ensayo de tensión. Cortesía I.C.A.

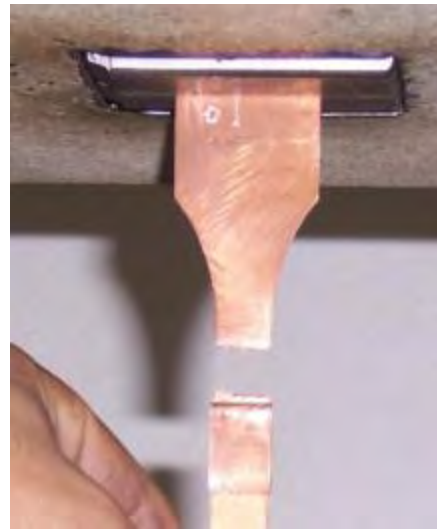
Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 7.2.2-3. Probeta colocada en el marco de carga. Cortesía I.C.A.



Fotografía 7.2.2-4



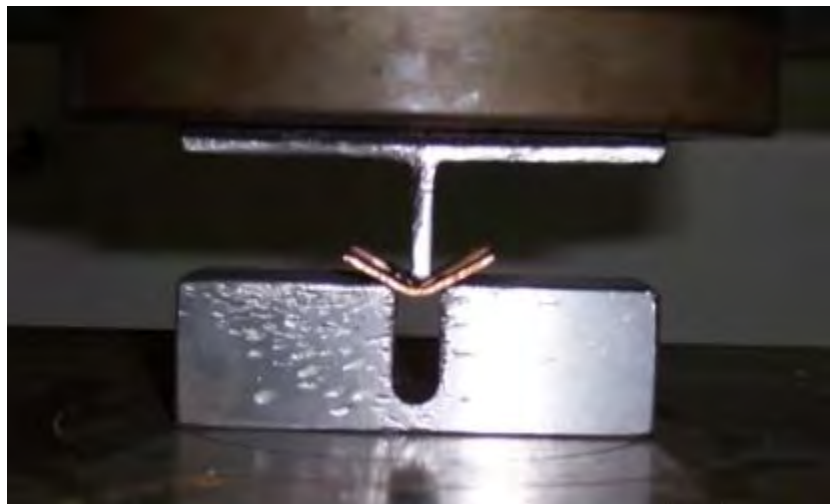
Fotografía 7.2.2-5

Probeta ensayada en marco de carga. Cortesía I.C.A.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 7.2.2-6. Probetas de cobre para prueba de doblado. Cortesía I.C.A.



Fotografía 7.2.2-7. Probeta de cobre en el marco de carga durante la prueba de doblado. Cortesía I.C.A.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 7.2.2-8. Probeta de cobre despues de la prueba de doblado. Cortesía I.C.A.

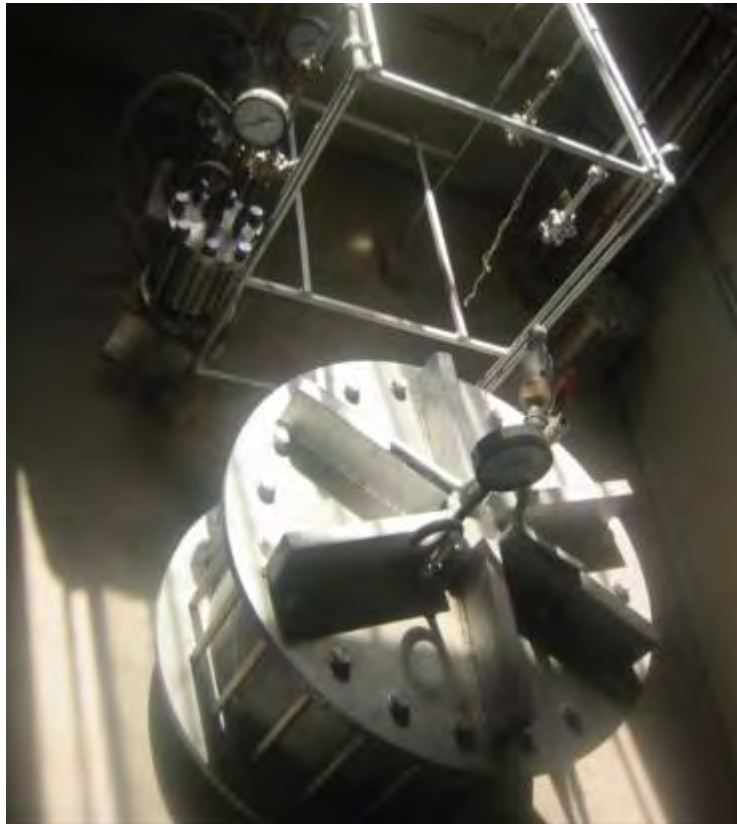
7.2.3. Pruebas de estanqueidad.

Los sellos que se encuentran en el plinto cercano a la zona del cauce, estarán sometidos a presiones del orden de 20 kg/cm^2 , para garantizar la estanquidad en este punto las uniones soldadas deben someterse a pruebas que recreen esta situación, para tal fin se creó un dispositivo que permite evaluar en el laboratorio las muestras de las uniones seleccionadas.



Fotografía 7.2.3-1. Cámara de presión donde se coloca la muestra de cobre. Cortesía I.C.A.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.



Fotografía 7.2.3-2. Dispositivo de prueba. Cortesía I.C.A.

Las pruebas de estanqueidad se realizan con la misma frecuencia que los ensayos a tensión de las soldaduras de campo, se mantienen las probetas presurizadas durante 24 horas y se revisa en ese lapso que el elemento no presente fugas a través de la soldadura.

Conclusiones.

El hecho de que el plinto constituya la cimentación de la cara de concreto en las PECC, obliga al proyectista a poner especial atención en los factores que intervienen en su diseño, esto en virtud de que los materiales que forman el cuerpo de la cortina no son diseñados para estar en contacto directo con el agua embalsada; por lo tanto ante una eventual falla estructural del plinto la estabilidad de la cortina sería gravemente afectada por los fenómenos hidráulicos que ocurrirían en su interior (erosión, subpresión y/o tubificación), los cuales comprometerían gravemente la estabilidad y sobre todo la seguridad de la presa.

El diseño del plinto en años recientes ha sido motivo de análisis y de constantes revisiones; a través de un conocimiento empírico se han logrado determinar las características geométricas y estructurales adecuadas para hacer frente a las sollicitaciones que comúnmente se presentan en las presas, ejemplo de esta situación se tiene en los documentos que son editados por el ICOLD; sin embargo el diseñador se encontrará constantemente con elementos geológicos y geotécnicos adversos, los cuales requerirán análisis adicionales sobre todo de índole estructural, situación que debe ser considerada para calcular las dimensiones y la resistencia del elemento.

Otro aspecto importante a evaluar relacionado con el plinto lo constituye la colocación del sello impermeable en la junta perimetral, siendo este indispensable para la generación del plano de estanqueidad de la presa y al mismo tiempo permite movimientos relativos de las losas que se apoyan sobre el plinto, sin que esto conlleve filtraciones excesivas a través de la junta.

La utilización del cobre para la elaboración del sello estanco se debe a las ventajas que ofrece por encima de otros metales cuando está en contacto directo con el agua, ya que la corrosión del cobre es lenta y el producto generado llamado comúnmente pátina lo recubre formando una capa protectora ante la oxidación. Por otro lado, el cobre es maleable y permite elaborar la geometría de los sellos en forma práctica, resistiendo adecuadamente los esfuerzos debidos a la carga hidráulica. A través de la experiencia para las PECC con alturas máximas del orden de 186 m (El Cajón en Nayarit, México), las placas de cobre entre 0.8 mm y 1.2 mm de espesor han demostrado ser adecuadas mientras que la forma de "W" permite adecuadamente movimientos de abertura en la junta perimetral.

Recomendaciones.

Para que el plinto cumpla la función de apoyo para la cual se diseña, es importante que se encuentre firmemente sujeto al terreno, esto se logra removiendo el material que no sea apto y excavando hasta el contacto con roca de buena calidad en donde ya sea factible el desplante.

No es necesaria la colocación de anclas u otro tipo de elementos que sujeten el plinto al terreno, ya que la adherencia entre el concreto y la roca es suficiente para evitar deslizamientos, además la geometría y el peso propio del elemento lo hacen estable ante una posible volcadura; sin embargo, debido a que es práctica común ejecutar tratamientos al terreno a base de inyecciones a través del plinto, debe contemplarse la colocación de anclas que lo sujeten a la roca. Es importante considerar que esta situación generará flexiones sobre el plinto durante los tratamientos que deben ser consideradas en el diseño estructural.

Es deseable desplantar el plinto en zonas en donde no existan fallas geológicas importantes, ya que son regiones de terreno en las cuales las características de la roca están alteradas y resulta complicado corregirlas, además generalmente en las fallas geológicas se tienen brechas arcillosas que no garantizan una correcta adherencia entre el concreto y el terreno.

Con respecto a los sellos perimetrales, una vez que se han tratado las placas de cobre y se les ha dado la geometría necesaria, estos elementos se vuelven rígidos y complicados de manipular, se debe tener especial cuidado en su manipulación del taller a la obra ya que fácilmente pueden doblarse y alterar su resistencia desarrollando zonas potenciales de falla. Es recomendable que el taller de habilitado de cobre esté lo más cerca posible de la zona de colocación final, sin que esto conlleve riesgos o entorpezca las actividades en la obra, además se requiere de camiones con plataformas exclusivas para su transporte una vez que ha sido rolado para evitar que se contamine o maltrata el cobre.

Cuando el cobre se coloca en el cabezal del plinto, por cuestiones constructivas este elemento pasará un largo periodo a la intemperie, por esta razón resulta necesario protegerlo de los agentes físicos adversos, esto se logra por ejemplo con la colocación de cajas de madera que lo cubran de posibles golpes de rocas.

Diseño del plinto y colocación de los sellos impermeables en la junta perimetral, para la cortina del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, México.

Anexo 1

Propiedades del concreto y del acero asignadas en SAP V.10.07 para la ejecución del análisis de las losas del plinto.

Materiales:

Propiedades del Concreto

TABLE: Material Properties 01 - General

Material	Type	DesignType	UnitMass	UnitWeight	E	U	A
Text	Text	Text	KN-s2/m4	KN/m3	KN/m2	Unitless	1/C
CONCRE	Isotropic	Concrete	2.3536	23.536	19311890.06	0.2	0.0000108

TABLE: Material Properties 04 - Design Concrete

Material	Fc	RebarFy	RebarFys	LtWtConc	LtWtFact
Text	KN/m2	KN/m2	KN/m2	Yes/No	Unitless
CONCRE	24516.63	41187.93	41187.93	No	1

Propiedades de los elementos Shell

TABLE: Area Section Properties

Section	Material	MatAngle	AreaType	Type	Thickness	BendThick
Text	Text	Degrees	Text	Text	m	m
LOSA	CONCRE	0	Shell	Shell-Thin	1	1

Referencias.

1. Cooke, J. B. y Sherard, J. L. 1985. "Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction and Performance". American Society of Civil Engineers (ASCE).
2. International Commission on Large Dams (ICOLD), 2004. Committed on Materials for Fill Dams. "Concrete Face Rockfill Dams – Concepts for Design and Construction"
3. Robin Fell, Patrick MacGregor, David Stapledon, Graeme Bell "Geotechnical Engineering of Dams", A.A. Balkema, 2005.
4. Kutzner, Christian. "Earth and rockfill dams, principles of design and construction", A.A. Balkema, 1997.
5. American Concrete Institute (ACI), "ACI 318S-05 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary"
6. Marsal, J.R. y D. Reséndiz, "Presas de tierra y enrocamiento", Editorial Limusa, México 1975.
7. Flores Berrones, Raúl; Vassilev Hristov, Vangel; Li Liu Xiangyue (ed). "Geotecnia en ingeniería de presas", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2001.
8. González de Vallejo, Luis I; Ferrer, Mercedes; Ortuño, Luis; Oteo, Carlos. "Ingeniería Geológica", Pearson Educación, S.A., España 2004.
9. Comisión Federal de Electricidad, México. Proyecto Hidroeléctrico La Yesca. "Criterio de diseño del plinto."
10. Comisión Federal de Electricidad, México. Proyecto Hidroeléctrico La Yesca "Memoria de cálculo estructural del plinto"