

5. EJEMPLO

5. Ejemplo de diseño.

En este capítulo se describe la aplicación de los conceptos antes mencionados, utilizando para ello la geometría de la obra de excedencias de la P.H. "La Angostura", en el estado de Chiapas.

Se propondrá el diseño para la estructura terminal, tomando en consideración las características hidráulicas de la obra, las cuales consisten en lo siguiente: dos canales a cielo abierto, con canal de llamada de sección transversal trapecial, la estructura de control (vertedor) está formado por cimacio, dos pilas y tres compuertas radiales, para cada canal; la rápida es de sección transversal rectangular y termina en una cubeta de lanzamiento.

Para analizar la estructura se tomó como material de diseño el peso volumétrico de una arena de tamaño uniforme, para la losa de fondo y muros, seca con un peso de 1.75 t/m^3 .¹

5.1.- Estructura de control

La geometría de la obra de excedencia de la Presa La Angostura se muestra en la figura siguiente:

¹ Manual de Diseño de Obras Civiles, Sección C1.2 "Acciones", página 1.2.10

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

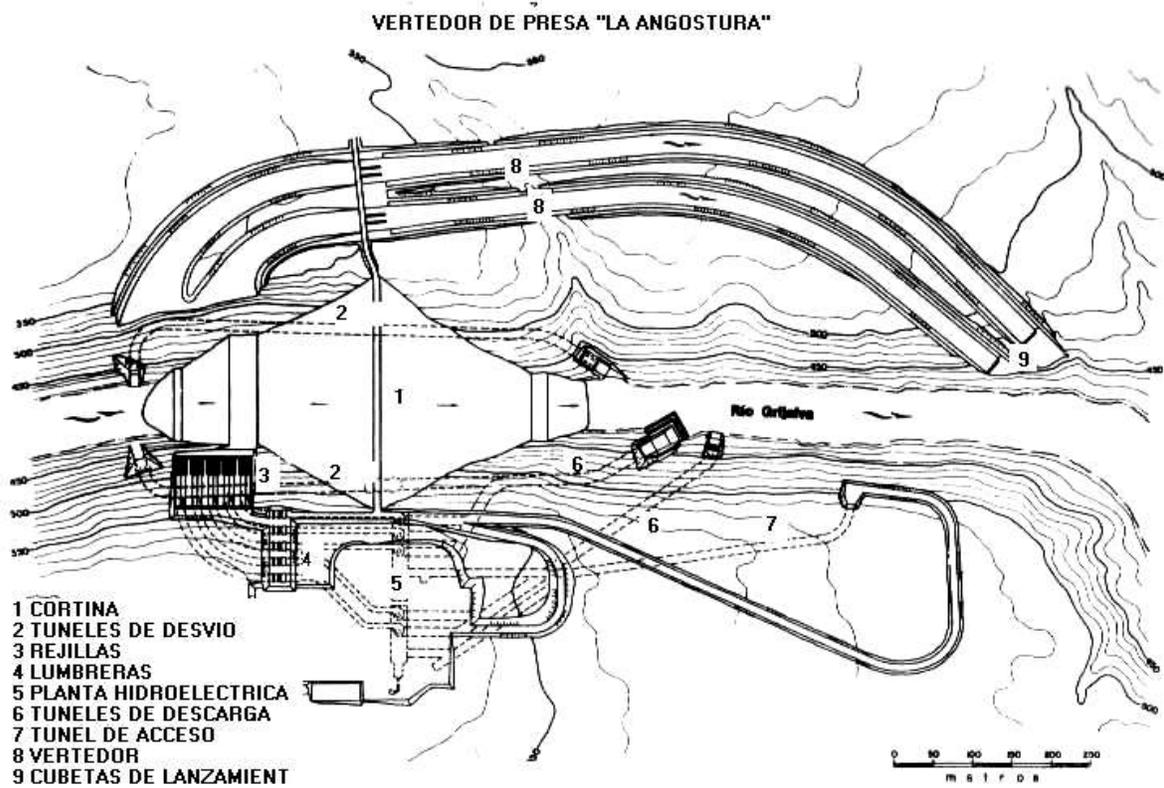


Figura 5.1 Planta de presa La Angostura, Chiapas



Foto 1 Vista del modelo de la obra de excedencias de la presa La Angostura

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

5.2 Perfil de agua sobre el cimacio

Para calcular el perfil aguas arriba de la cresta del cimacio, se utilizó la carga correspondiente al nivel de agua al NAME de $H_d=19.9$ m (condición de diseño). Como resultado de la relación $H/H_d=1$ se tiene:

| X/Hd | Y/Hd | X | Y |
|------------|---------------|----------|---------------|
| -1.0 | -0.941 | -19.90 | -18.73 |
| -0.8 | -0.932 | -15.92 | -18.55 |
| -0.6 | -0.913 | -11.94 | -18.17 |
| -0.4 | -0.890 | -7.96 | -17.71 |
| -0.2 | -0.855 | -3.98 | -17.01 |
| 0.0 | -0.805 | 0 | -16.02 |

Por los datos generados se sabe que el tirante sobre la cresta del cimacio corresponde al valor de 16.02 m

Los datos empleados para calcular el perfil sobre el cimacio son los siguientes:

$$\text{Gasto } (Q) = 1419.797 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Elevación 1 } (Z1) = 519.60 \text{ m}$$

$$\text{Elevación 2 } (Z2) = 518.70 \text{ m}$$

$$\text{Radio de fondo de canal } (R) = 25.94 \text{ m}$$

$$\text{Angulo de curva de plantilla de cimacio con respecto a la horizontal } (\theta) = 15.68^\circ$$

En el siguiente diagrama se presenta el perfil del agua sobre el cimacio, considerando que esta descargando al NAME. Este dato fue proporcionado del estudio hidráulico realizado². De acuerdo a lo generado se obtiene que el tirante sobre la cresta del cimacio es $Y = 16.02$ m y que corresponde al punto 1 de la figura siguiente:

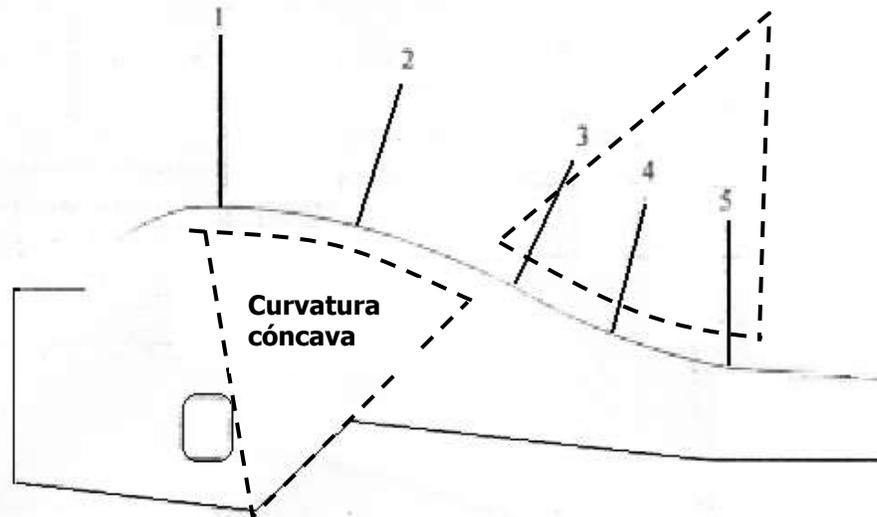


Figura 5.2 Perfil de la estructura de control (cimacio)

² Martínez, Félix: Tesis "Diseño estructural preliminar del canal de llamada, estructura de control (vertedor) y canal de descarga (rápida)", 2002, 136 p.

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

Para el cálculo del perfil de la superficie libre del agua sobre el cimacio de la estructura de control de la obra de excedencias, desde la cresta del mismo hasta el inicio de la transición hacia los canales se aplicó la ecuación de la energía entre dos puntos:

$$E1 = E2 - \frac{V^2 Y^2}{gR} \quad (5.1)$$

$$Z_1 + Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 \cos \theta + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_2^2 Y}{gR} \quad (5.2)$$

El término $V_2^2 Y / gR$, se refiere a la curvatura convexa que presenta la plantilla del canal, R es el radio del fondo del canal y se obtuvo con la expresión siguiente:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{(1 + Y'^2)^3}{Y''} \quad (5.3)$$

donde los términos Y' y Y'' son la primera y segunda derivada, respectivamente, en coordenadas rectangulares de la ecuación que define la curvatura del cimacio, siendo ésta:

$$Y = 0.0216006x^2 \quad (5.4)$$

De esta misma manera se lleva a cabo el análisis para las secciones 2 y 3 (véase figura 5.1), punto en el cual la curva que define la plantilla del canal deja de ser convexa para adquirir ahora una curvatura cóncava.

El planteamiento para las secciones 4 y 5 es similar, sin embargo se debe hacer un cambio de signo en el segundo término de la expresión de la energía:

$$E1 = E2 + \frac{V^2 Y^2}{gR} \quad (5.5)$$

$$Z_1 + Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 \cos \theta + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{V_2^2 Y}{gR} \quad (5.6)$$

La ecuación a emplear en la zona de curvatura de plantilla convexa en la sección dos (véase figura 5.1) será:

$$0.963Y_2^3 - 22.703Y_2^2 - 114.162Y_2 + 1480.678 = 0 \quad (5.7)$$

Obteniéndose los resultados siguientes:

$$Y_{21} = 6.653 \text{ m} \quad Y_{31} = 4.89 \text{ m} \quad Y_{41} = 6.52 \text{ m} \quad Y_{51} = 10.17$$

5.3 Canal de descarga

En el caso del canal de descarga, la obra de excedencias cuenta con dos canales para la descarga separados por un macizo rocoso, cada uno se de sección rectangular con un ancho de plantilla de

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

25 m y una altura de 9 m en muros laterales. Debido a la topografía del lugar, estos canales llevan en planta una curva horizontal y, longitudinalmente, una curva vertical convexa (ver figura 5.2).

5.4 Muros laterales

Estos muros van revestidos y se diseñan de acuerdo a las recomendaciones que se presentan en la tabla 5.1, tomada del reglamento ACI-Bureau of Reclamation y del Manual de Diseño de obras Civiles de la CFE, estos muros cuentan con un espesor aproximado de 70 cm, de acuerdo a proyecto original.

| ACERO DE REFUERZO | HORIZONTAL (%) | VERTICAL (%) |
|------------------------------|----------------|--------------|
| Cara adyacente al terreno | 0.15 | 0.15 |
| Cara no adyacente al terreno | 0.20 | 0.15 |

Tabla 5.1 Por ciento de acero recomendado para muros

Las combinaciones de acciones mas desfavorables que pueden ser ejercidas sobre los muros, se muestran en los siguientes esquemas:

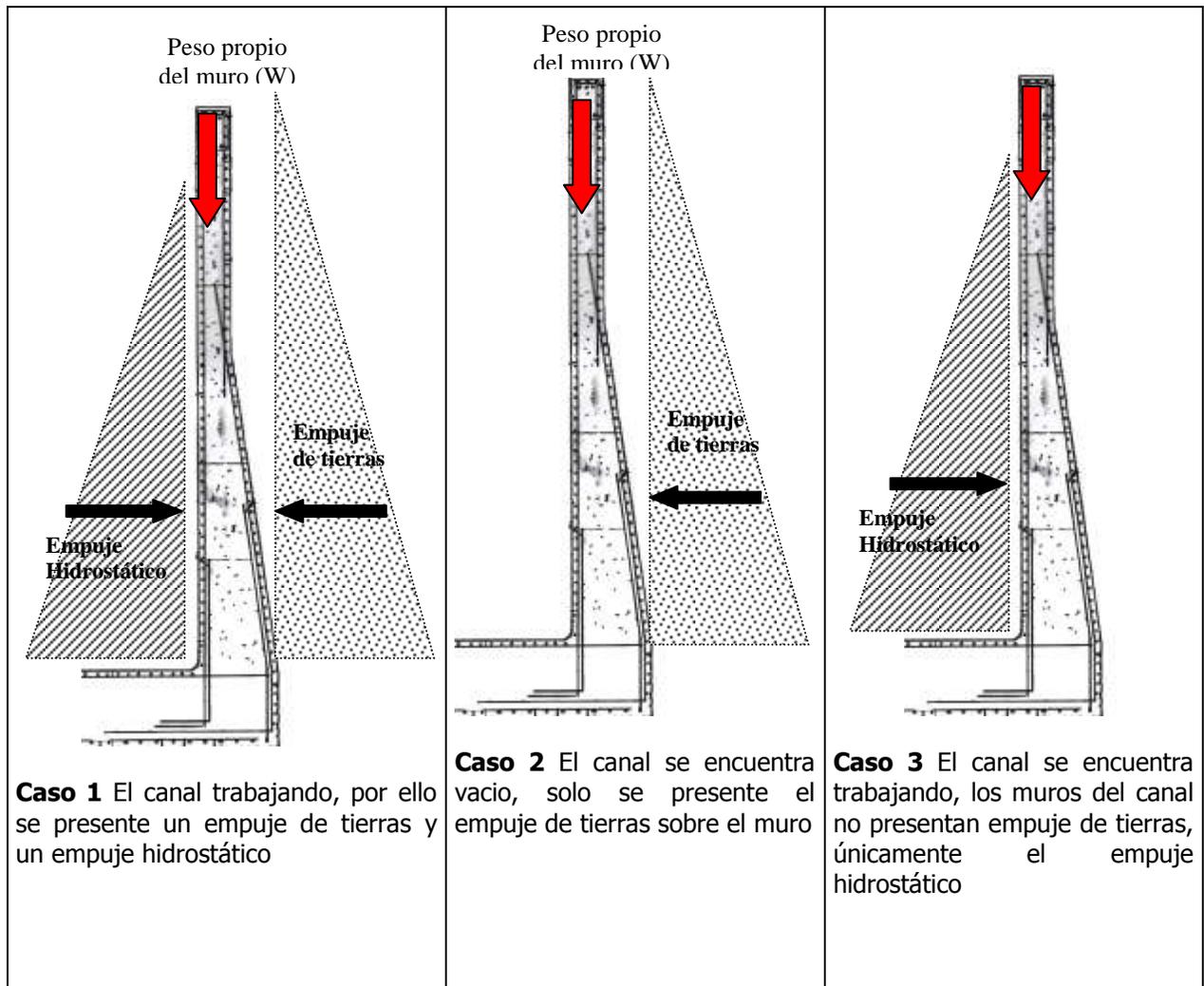


Figura 5.3 Descripción de las acciones sobre la estructura

5.5 Losa de piso y su anclaje

La losa de piso se analiza en el caso más desfavorable; es decir cuando no se encuentre en funcionamiento. Las fuerzas actuantes en ese momento serían únicamente la de su peso propio y las fuerzas de subpresión, como lo muestra la figura 5.4;

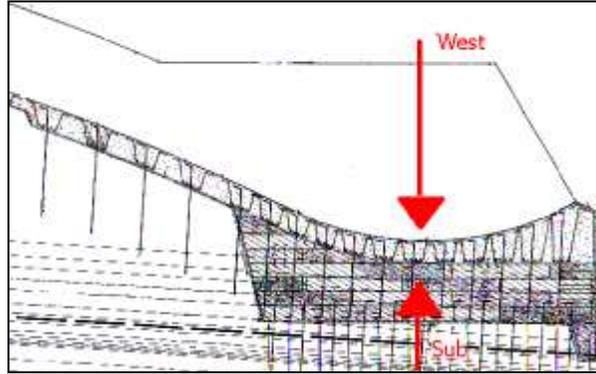


Figura 5.4 Descripción de las acciones sobre la estructura final

Según el cálculo hidráulico el valor promedio del tirante es de 8 m, de acuerdo a esta consideración y sabiendo que la losa tiene un espesor promedio de 0.60 m, el valor de la subpresión se calcula como sigue:

$$\text{subp} = \frac{1}{3} \gamma (Hm + e) = \frac{1}{3} (8 + 0.6) = 2.86 \text{ t/m}^2$$

Por otro lado, el valor del peso propio de la estructura es:

$$W = \gamma e = 2.4(0.6) = 1.44 \text{ t/m}^2$$

La diferencia existente entre estos dos valores, deberá ser absorbida por las anclas, es decir, 1.42 t/m² es una carga negativa, y de acuerdo a la ecuación para el cálculo de la resistencia, por ancla se tiene lo siguiente, considerando varillas de 1 1/2" :

$$R = 0.66 A_s f_y = 0.66 A_s f_y = 0.66(11.4 \text{ cm}^2)(4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}) = 31.6 \text{ t/pza}$$

Si consideramos que la carga que deba ser absorbida por las anclas es de 1.42 t/m² el patrón de anclaje queda definido de la siguiente manera:

$$W_{\text{max}} = \frac{Ra}{A} \Rightarrow A = \frac{Ra}{W_{\text{max}}} = \frac{31.6 \text{ t}}{1.42 \text{ t/m}^2} = 22.25 \text{ m}^2 / \text{ancla}$$

Y de acuerdo a los siguientes diagramas se aprecia que la separación entre anclas es de aproximadamente 4.72 m,

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

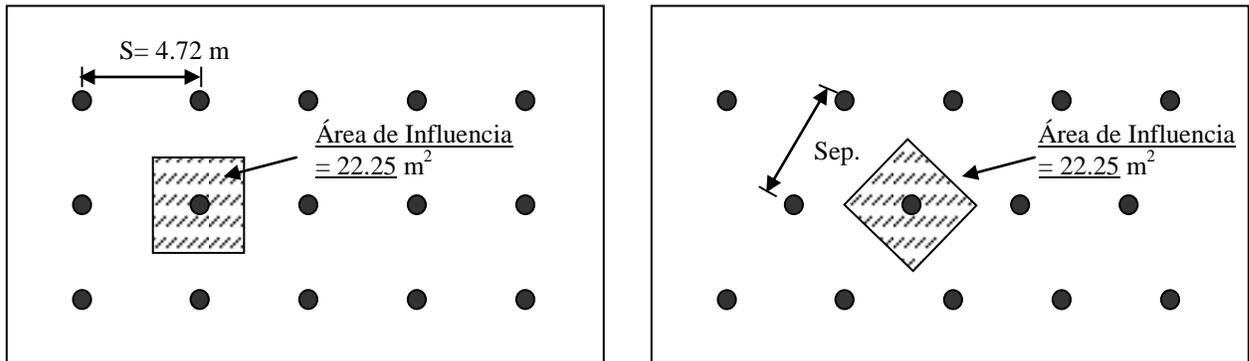


Figura 5.5 Patrón de anclaje normal y patrón de anclaje en tres bolillo

El patrón de anclaje calculado anteriormente guarda similitudes con el calculado para el proyecto de la obra terminal de la presa la Angostura, el cual se muestra a continuación:

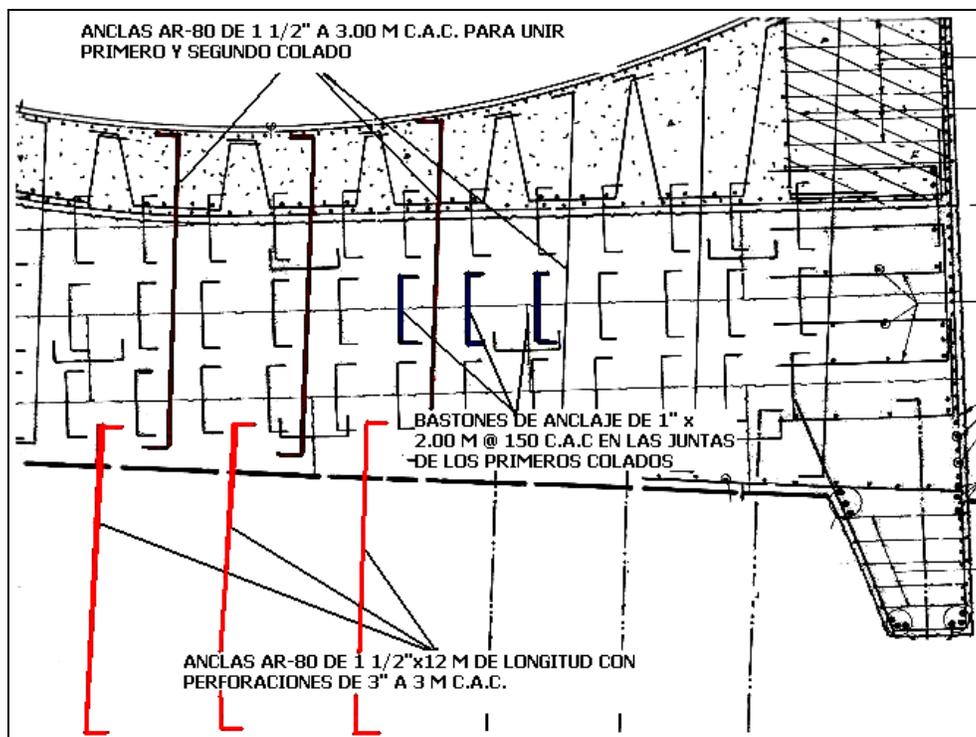


Figura 5.6 Anclaje final de la estructura

5.6 Refuerzo de estructura terminal

En el caso de la estructura terminal, la revisión se lleva a cabo como sigue. Primeramente se analiza la estructura como una losa con dos puntos de apoyo como se muestra en el diagrama que aparece en la figura 5.7

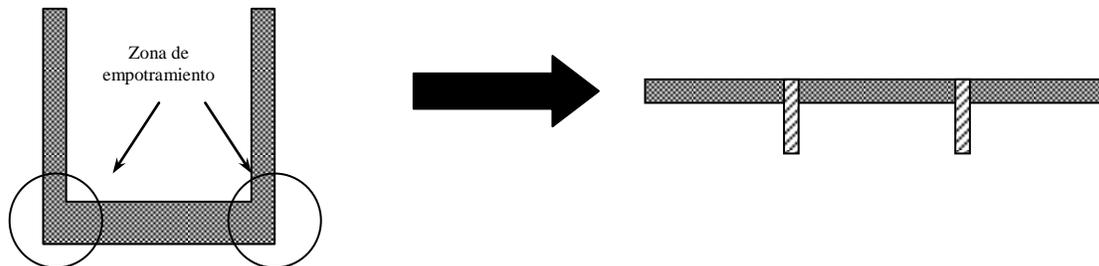


Figura 5.7 Idealización de la estructura terminal



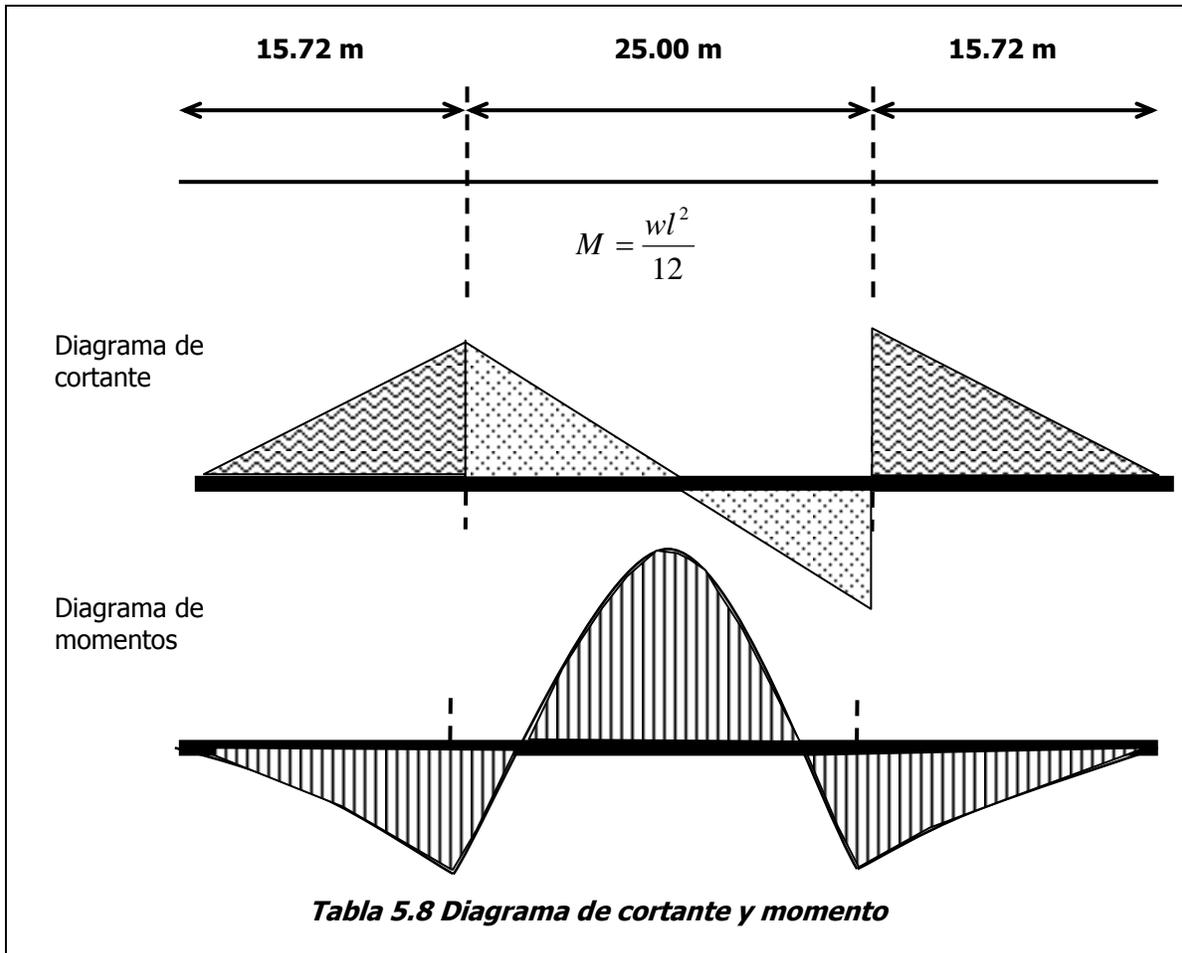
Foto 2 Vista del funcionamiento de la estructura terminal de la obra de excedencias, modelo de la presa La Angostura.

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

5.6.1 Muros

5.6.1.1 Caras interiores

Para el acero vertical en paredes interiores, se diseñara con la presión ejercida por el agua. Se procede al análisis de la estructura por medio del método de Cross, y después de la iteración correspondiente obtenemos los momentos de diseño que a continuación se muestran:



| | | | | |
|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Peso unitario | W | 1 t/m ² | 1 t/m ² | 1 t/m ² |
| | Fd | 0 | -1 | +1 |
| Momento | Me | +647.45t-m | -52.08 | +52.08 |
| | M _{equi} | 1° d | 0 | -595.37 |
| Suma de momentos | ΣM | 647.45 | -647.45 | +647.45 |
| Cortante | V _i | | 12.5 | 12.5 |
| | V _h | | 0.0 | 0.0 |
| | M(+) | | 78.125 | |

Tabla 5.2 Cálculo de elementos mecánicos

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

Con los elementos mecánicos anteriores, se procede al diseño de las paredes laterales, caras interiores del canal en la zona de la estructura terminal.

Para conocer el porcentaje de refuerzo se emplea la ecuación:

$$\frac{Mu}{bd^2} \quad (5.8)$$

donde

Mu momento último de diseño en kg-cm
 b ancho de la sección a diseñar medida en cm
 d espesor de la sección medida en cm

El concreto a emplear tiene una resistencia de 300 kg/cm². Este concreto será considerado en el diseño para homologar las características con el empleado en el diseño original

$$Mu = FR M_R = (1.1)(64,745,000) = 71,219,500 \text{ Kg/cm}^2 \quad (5.9)$$

$$\frac{Mu}{bd^2} = \frac{71,219,500}{(100)(85)^2} = 98.57 \quad (5.10)$$

Con este valor, se consulta la tabla "Porcentaje de refuerzo para secciones rectangulares" página 728 Apéndice B, del libro "Fundamentos de concreto reforzado", y se obtiene que para la cuantía de acero no existe valor aproximado. Esto significa que la sección es demasiado pequeña para la cantidad de acero que se requiere colocar para soportar un momento como el calculado anteriormente.

Sin embargo esto tiene una aclaración. La magnitud de esta obra implica un trabajo multidisciplinario. Para este trabajo escrito, se hacen consideraciones básicas a partir de los planos de diseño originales, sin embargo, no se cuenta con la totalidad de los datos de proyecto, en particular las características geotécnicas del material circundante. Se llega entonces a la conclusión que los proyectistas emplearon datos adicionales que permiten el diseño sin ninguna eventualidad de carácter estructural, como ha sucedido en este caso.

Cabe hacer mención que de acuerdo al proyecto original, la obra de Excedencias de la presa la Angostura cuenta con dos canales de descarga, pero es caso particular que uno de ellos alcance una altura de 15.72 m.

Tomando como ejemplo este canal y a partir del acero indicado en plano se procede a una cálculo breve del tirante máximo que podría pasar por el sin dañar la estructura.

Datos de proyecto, proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad:

| VISTA | PROYECTO |
|------------------|---|
| Cara Interiores | Varilla del #8 @ 30 cm (cambios volumétricos) Varilla del #8 @ 20 cm (flexión) |
| Caras Exteriores | Varilla del #8 @30 cm (cambios volumétricos) Varilla del #8 @ 30 cm (flexión) |

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

$$s = \frac{b}{\text{num. de varillas}} \Rightarrow \text{No. de varillas} = \frac{100}{s} = \frac{100}{20} = 5 \text{ varillas}$$

$$A_s = \text{Num de varillas} \times a_s = 5 \times 4.91 \text{ cm}^2 = 24.55 \text{ cm}^2$$

De acuerdo a este valor, la cuantía de acero se calcula como sigue:

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{24.55 \text{ cm}^2}{100 \times 85} = 0.2888\%$$

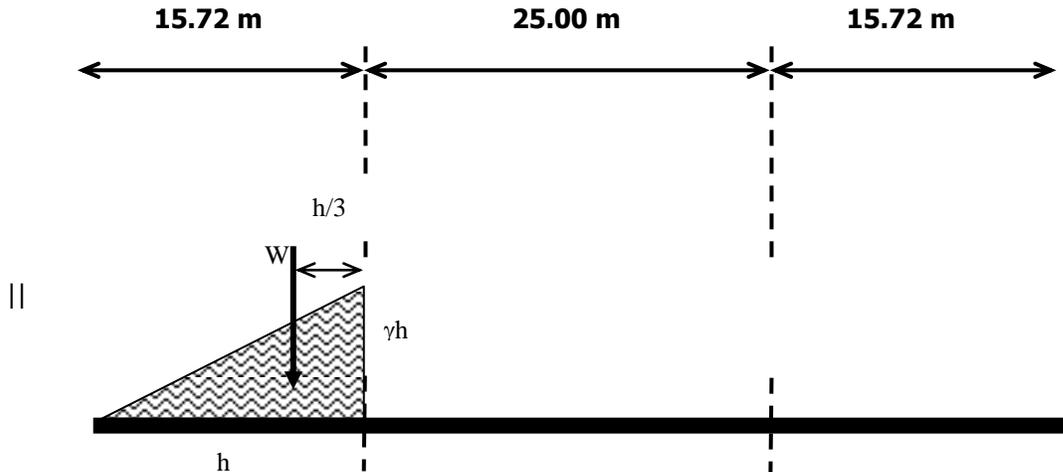
Con esta cuantía de acero, se consulta la tabla "Porcentaje de refuerzo para secciones rectangulares" página 728 Apéndice B, del libro "Fundamentos de concreto reforzado", para obtener el momento último que resistiría la estructura con este armado.

$$\frac{M_u}{bd^2} = 10.61$$

$$M_u = (10.61)(100)(85)^2 = 7,665,725 \text{ kg} - \text{cm} = 76.65 \text{ t} - \text{m}$$

$$MR = \frac{76.65}{1.1} = 69.68 \text{ t} - \text{m}$$

Con este momento resistente se obtiene el tirante que podría pasar por el canal:



$$M_r = W \frac{h}{3}, W = \frac{h}{2} (\gamma h) = \frac{\gamma h^2}{2}$$

$$M_r = \left(\frac{\gamma h^2}{2} \right) \left(\frac{h}{3} \right) = \frac{\gamma h^3}{6}$$

Despejando de la expresión el valor de h, se tiene

$$h = \sqrt[3]{\frac{6 M_r}{\gamma}} = 7.3928 \text{ m}$$

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

Es decir que para que el muro soporte el empuje del agua el tirante del canal no debiera ser mayor a 7.4 metros, un tirante mayor haría que la estructura fallara.

Sin embargo en estudios anteriores, tesis, se determino tirantes a lo largo del canal y en la cubeta de lanzamiento de forma práctica y de forma teórica. Para ello, los datos de los que se dispuso fueron el gasto que circulaba a lo largo del canal, la pendiente de la plantilla y la rugosidad a lo largo del mismo, la geometría de cada una de las secciones, así como el valor del tirante en una primera sección. Los cálculos se realizaron con valores de $n=0.015$ y $n=0.018$

Los resultados obtenidos son:

| Sección | $n=0.015$ | $n=0.018$ |
|---------------------|-----------|-----------|
| Tirante inicial | 4.974 m | 5.008 m |
| Pto. Intermedio | 9.924 m | 3.932 m |
| Tirante a la salida | 3.449 m | 3.934 m |

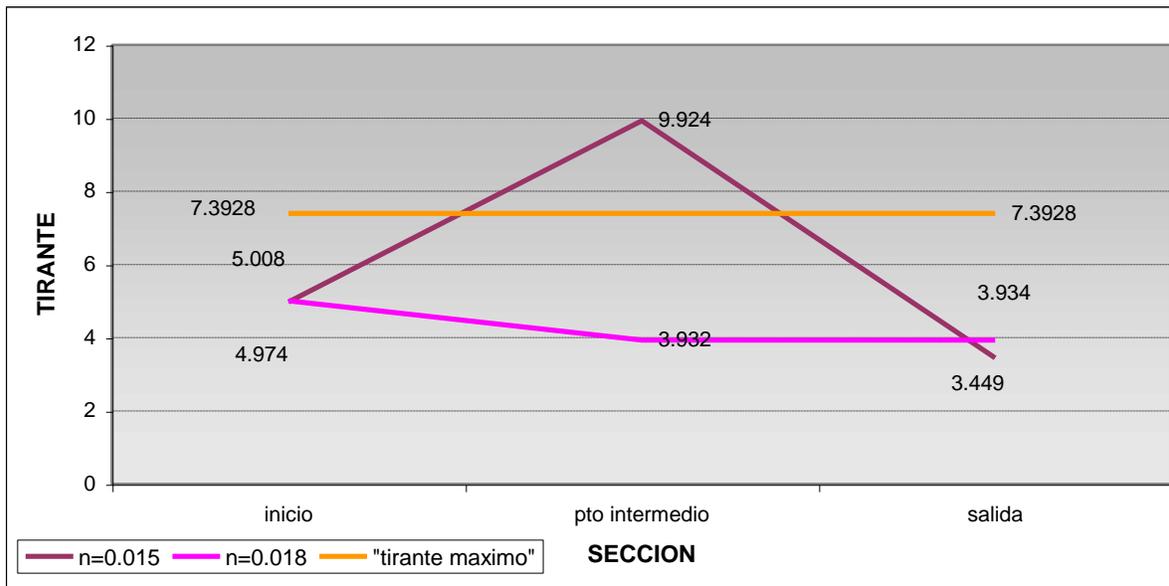


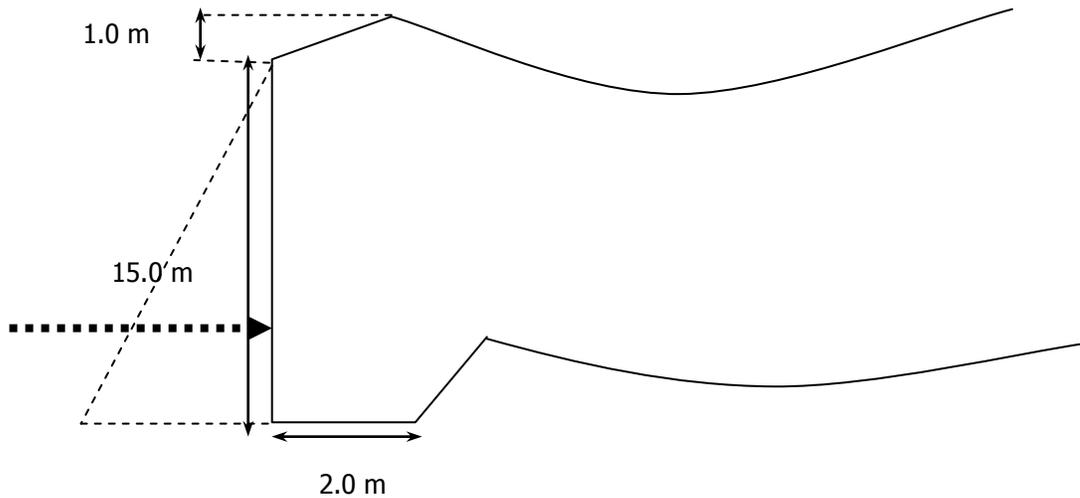
Figura 5.9 Comparativa de tirantes hidráulicos

5.6.3 Armado de dentellón.

El objetivo de colocar el dentellón, es básicamente darle el peso necesario a la estructura para evitar cualquier tipo de volteo cuando ésta se encuentre en funcionamiento y también proteger a la estructura contra la erosión por la caída del chorro de agua en el río.

La configuración del dentellón es la siguiente:

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO



El diseño por flexión está regido por las siguientes expresiones

$$E_p = \frac{1}{2} K_p \gamma h^2$$
$$M_p = \frac{K_p \gamma h^2}{2} \times \frac{H}{3}$$

Siendo

- E_p Empuje pasivo
- K_p Coeficiente de empuje pasivo
- γ peso específico del material
- h altura del dentellón
- M_p Momento resultante de empuje

El caso más desfavorable es cuando el material en donde se coloque el dentellón sea un material arenoso suelto. Por ello es que para el cálculo se considerará este material.

Se considera un ángulo de reposo del material igual a $\phi = 28^\circ$:

$$K_p = \frac{1 + \text{sen} \phi}{1 - \text{sen} \phi} = \frac{1 + \text{sen}(28^\circ)}{1 - \text{sen}(28^\circ)} = 2.77$$

$$E_p = \frac{1}{2} (2.77)(1.75)(15)^2 = 545.34 \text{ t/m}$$

Que representa el empuje del material que rodea al dentellón. Aún cuando en la parte posterior del pie del dentellón se formaría otra cuña de presiones, esta es menor de la que se forma en su parte delantera, por lo que el armado que se determine para esta parte puede ser empleado en la parte posterior.

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

Considerando la sección del dentellón:

$$M_p = \frac{K_p \gamma h^2}{2} * \frac{H}{3} = \frac{(2.77)(1.75)(15)^2}{2} \times \frac{15}{3} = 2726.7 \text{ t-m}$$

Con este momento, obtenido a partir del empuje que el material ejerce sobre el dentellón, se procede a calcular la cuantía de acero

$$2726.7 \text{ t-m} = 2,726,700 \text{ kg-cm}$$
$$A_s = \frac{M_R}{bd^2} = \frac{2,726,700}{(100)(200)^2} = 0.6817$$

Se identifica la cuantía de acero necesaria, de acuerdo a las tablas "Porcentaje de refuerzo para secciones rectangulares"³. De acuerdo a esta tabla, el valor es inferior a los presentados, por lo que se requiere únicamente el empleo de la cuantía mínima:

$$\rho_{\min} = \frac{14}{f_y} = \frac{14}{4200} = 0.0033$$
$$A_s = \rho b d = 0.0033(100)(200) = 66 \text{ cm}^2$$

Empleando varilla del #8 (área=5.07 cm²), se cubre el acero requerido, por lo que la cantidad y la separación entre ellas es:

$$\text{Num de varillas} = \frac{66}{5.07} \approx 13 \text{ varillas}$$
$$s = \frac{100}{13} = 7.69 \text{ cm} \approx 8 \text{ cm}$$

Para el refuerzo por temperatura, el cálculo es como sigue:

$$A_1 = 0.002 A_{\text{bruta}} = (0.002)(200)(1500) = 600 \text{ cm}^2$$
$$\text{Dos lechos.....} \frac{600}{2} = 300 \text{ cm}^2$$

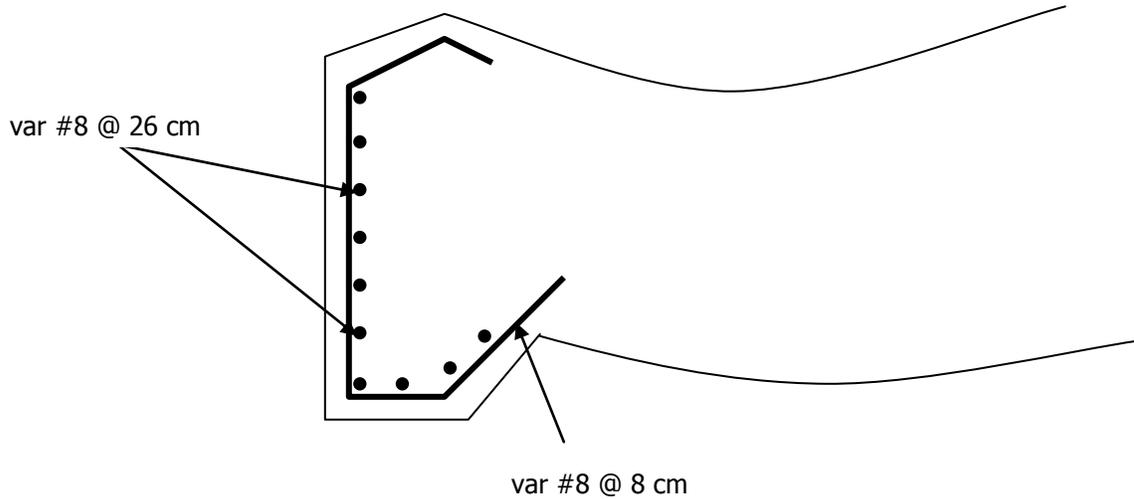
Utilizando el mismo tipo de varilla:

$$\text{Num de varillas} = \frac{300}{5.07} \approx 59 \text{ varillas}$$
$$s = \frac{1500}{59} = 25.4 \text{ cm} \approx 26 \text{ cm}$$

³ Ver página 68

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

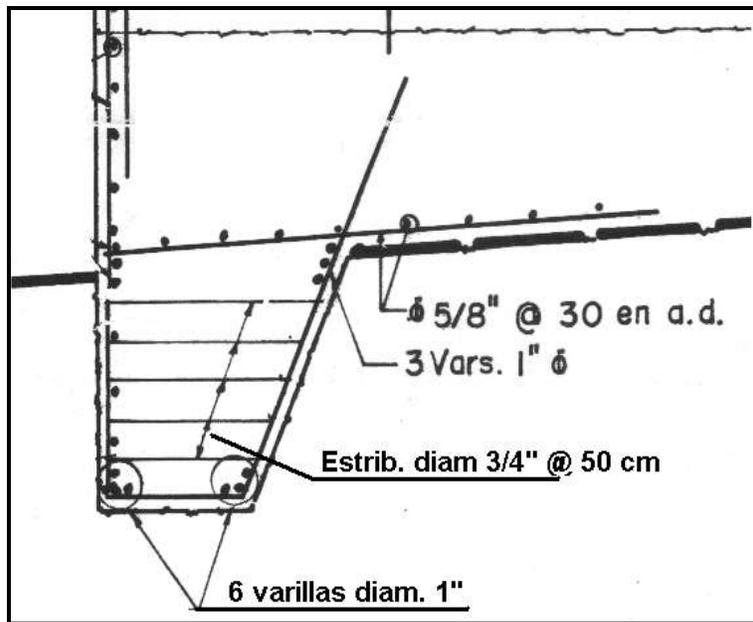
El armado obtenido con este procedimiento se muestra a continuación:



Haciendo una comparativa con respecto a lo indicado en planos de proyecto, proporcionado por la Comisión Federal de Electricidad, se tiene:

| VISTA | PROYECTO | CALCULADO |
|-----------------------|---|---|
| Armado lecho superior | Varilla del #6 @ 30 cm (cambios volumétricos) Varilla del #6 @ 30 cm (flexión) | Varilla del #10 @ 30 cm (cambios volumétricos) Varilla del #12 @ 15 cm (flexión) |

El armado de proyecto original es el siguiente:



5.6.4 Algunas consideraciones en el concreto

5.6.4.1 Características del agregado

El tamaño máximo de grava que es conveniente usar en un concreto determinado, se acostumbra definir tomando en cuenta factores tales como características dimensionales y de refuerzo de la estructura, equipos disponibles para mezclado, transporte y colocación del concreto, características granulométricas de la fuente, magnitud de la resistencia requerida, resistencia de los propios agregados, etc.

5.6.4.2 Concreto arquitectónico clase D

Una superficie clase D, incluye todas aquellas superficies permanentemente expuestas en las que no se especifica que la calidad de la superficie debe ser elevada (estructuras hidráulicas tales como túneles, canales y sifones, vertedores, etc).

5.6.4.3 impermeabilización y protección a prueba de humedad

El paso del agua a través del concreto puede ocurrir de dos maneras. En la primera, puede pasar a través de fisuras o aberturas en el concreto cuando el agua esta bajo presión hidrostática y en contacto con la superficie del concreto, también denominado permeabilidad, y que es controlada por medio de impermeabilización. La segunda es por capilaridad. La infiltración por capilaridad resulta, no de una presión, sino de un constante suministro de humedad en una superficie de concreto y de la evaporación por otro lado. Esta infiltración se controla por medio de protección a prueba de humedad.

La mejor manera de asegurar un concreto impermeable es que estas propiedades se incorporen a la estructura durante su construcción, utilizando un concreto de buena y alta calidad, por ello es necesario emplear agregados sanos y bien graduados de baja porosidad, en particular, la arena debe estar formada por partículas redondeadas en vez de angulosas o planas, de tal manera que se produzca un concreto trabajable, con una relación mínima de agua-cemento, que no exceda de 0.54 en las secciones delgadas o ligeramente mayor en secciones masivas. La inclusión de aire es apropiada para reducir el sangrado y detener la lubricación del agua en el concreto.

El concreto debe manejarse de manera que no haya segregación o formación de juntas frías. Debe consolidarse por medio de vibración. Las juntas de construcción son fuentes potenciales de filtración, especialmente en los planos horizontales entre un colado y otro, y por lo tanto requieren que la colocación y vibración se hagan con cuidado.

La consideración de mayor importancia es la de aplicar prácticas de construcción adecuadas, incluyendo su diseño, materiales, manejo y curado.

5.6.4.4 Tratamientos superficiales

Los tratamientos superficiales consisten en revestimientos relativamente delgados que se aplican como la pintura, o en membranas gruesas de una o mas capas.

Las capas de repellado de mortero de cemento Pórtland aplicadas en los muros laterales expuestos al agua, protegen de manera eficaz el concreto poroso contra la penetración de agua bajo presión.

CAPITULO 5. EJEMPLO DE DISEÑO

Cualquier grieta en el concreto debe desconcharse y rellenarse con mortero seco antes de aplicar la capa de repellado.

5.6.4.5 Inspección de la construcción de concreto

La magnitud y amplitud de la inspección en cualquier obra depende de las especificaciones, tamaño y tipo de construcción. En la industria de la construcción se tiene la obligación de inspeccionar diversos tipos de elementos estructurales que abarquen la totalidad de la estructura. Las condiciones que se mencionan a continuación ejercen un efecto directo sobre la calidad final del concreto:

- 1) La elevada temperatura o los vientos fuertes secan el concreto durante el transporte
- 2) Las lluvias fuertes hacen una mezcla con demasiada agua
- 3) Si algún recipiente tiene fugas, abra perdida de mortero durante el transporte, lo cual reducirá la trabajabilidad
- 4) Si el concreto no se transporta con suficiente rapidez, puede estar demasiado rígido al llegar al sitio, sobre todo el lugares de clima caluroso.
- 5) La contaminación del concreto con aceite o suciedad del equipo, da como resultado la perdida de calidad.
- 6) Puede haber segregación debido al empleo incorrecto de canalones colocadores o tuberías, o bien por el recorrido de grandes distancias en bandas transportadoras.
- 7) La película de mortero que queda en el recipiente, se seca con rapidez por lo que debe ser eliminada al final de la jornada