

# **CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS**

## **Características generales de las estructuras hidráulicas**

- Las estructuras hidráulicas deben ser estancas
- La mayor parte de los líquidos conducidos son agresivos para los materiales de las estructuras (coagulante, líquidos cloacales, piletones de productos químicos)
- El suelo o la napa puede ser agresivo
- En general todas las estructuras están total o parcialmente enterradas
- En general las unidades de tratamiento fundamentalmente están ubicadas en lugares con baja calidad de suelo
- En general las unidades de tratamiento son estructuras que ocupan una gran extensión de terreno aumentando la probabilidad de tener asentamientos diferenciales
- Muchas estructuras sirven de soporte a elementos electromecánicos que involucran esfuerzos estáticos y dinámicos a tener en cuenta
- La solución de una estructura hidráulica pasa por un estudio multidisciplinario
- La mayor parte de las estructuras sanitarias están construidas en Hormigón

## **Reglamentaciones , Normas y recomendaciones para el cálculo de estructuras de hormigón y acero**

El Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles redactó un conjunto de Normas Reglamentaciones y Recomendaciones para el proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado, hormigón pretensado y estructuras de acero denominado CIRSOC. Su uso es obligatorio para la obra pública y es adoptado también para la obra privada.

El Reglamento CIRSOC 201 para la parte de dimensionamiento de hormigón armado vigente hoy está basado en la norma alemana DIN 1045 cuyas traducciones conforman los cuadernos 220 (dimensionamiento de H°A) y 240 (métodos auxiliares para determinación de solicitaciones y deformaciones en las estructuras de H°A°). Es de hacer notar que se encuentra en discusión pública una nueva versión del Reglamento Cirsoc 201 basado en la norma ACI 318-02 del American Concret Institute que cambia los requerimientos de deformación máxima , cantidad de armadura y resistencia mínimas del diseño de las estructuras de hormigón.

## **Requerimientos que deben satisfacer las estructuras**

Al iniciar el diseño de una estructura es necesario conocer que requerimientos debemos satisfacer por ejemplo:

- buen comportamiento ante cargas y sobrecargas estáticas
- buen comportamiento ante cargas dinámicas
- buen comportamiento frente a los esfuerzos de coacción
  - retracción de fragüe
  - asentamientos diferenciales
  - esfuerzos de variación de temperatura
- buenas condiciones de estanqueidad
- ser durable
  - frente a fenómenos climáticos y atmosféricos
  - frente a la agresión del suelo y de la napa
  - frente a la agresión química de los líquidos contenidos

### **Problemática del requerimiento de estanqueidad en estructuras de hormigón**

Una estructura de hormigón se considera estanca cuando no permite el ingreso y/o egreso de líquido a través de sus paredes. La estanqueidad es necesaria no sólo por las pérdidas o contaminación de los líquidos contenidos o transportados sino que hace fundamentalmente a la durabilidad del hormigón.

Un hormigón no será estanco cuando presente fisuras por donde el líquido ingrese a la masa por lo que lograr un hormigón impermeable conlleva a evitar la fisuración del mismo

La tensión de tracción característica del hormigón a rotura a tracción es

$$\sigma_{bk} = 0,5\sqrt{(\sigma'_{bk}(kg/cm^2))^2} \quad (1) \quad (*) \text{ según Reglamento 201 vigente al 2005}$$

donde  $\sigma'_{bk}$  es la tensión característica a compresión del hormigón.

Cuando una sollicitación genera tensiones de tracción en el hormigón mayores que lo que resulta de la fórmula (1) el hormigón se fisura

Lograr la estanqueidad en una estructura de hormigón implica la observacion de distintos aspectos tanto en

- a) El diseño de la estructura
- b) La dosificación de la mezcla de hormigón
- c) La correcta colocación y compactación del hormigón
- d) El correcto tratamiento de juntas de trabajo
- e) El correcto curado
- f) La protección adecuada de la superficie expuesta

a) En el diseño de la estructura debemos hacer hincapié en cuatro temas fundamentales :

\*La resistencia intrínseca del material que estamos utilizando, utilizar hormigones de mayor resistencia asegura un mejor comportamiento frente a la fisuración.

\*El modelo físico con que representamos la estructura para calcular las solicitaciones, las hipótesis asumidas en el cálculo deben ser respetadas en la obra por ejemplo la rigidez de refuerzos, la existencia de empotramiento reales ,etc.

\*La disposición final de armaduras cubriendo correctamente las solicitaciones, en las ubicaciones indicadas en las planillas de armadura y con sus correspondientes longitudes de anclaje

\* Los esfuerzos de coacción (aquellos intrínsecos a la propia estructura: retracción de fragüe, temperatura, etc).

#### b) La dosificación de la mezcla de hormigón

El hormigón es una mezcla de cemento, áridos, agua y aditivos , luego la dosificación correcta de la mezcla para los requerimientos de cada caso es imprescindible.

El agua contenida en la mezcla queda retenida en el interior de la misma en el mezclado y luego del proceso de fragüe el agua excedente desaparece quedando en el interior del hormigón espacios que si están interconectados permitirán el paso de agua conformando hormigones poco estancos. Las dos medidas básicas a implementar son: relaciones agua - cemento bajas para la mezcla y la adición de incorporadores de aire que generen poros no comunicados entre si y que eviten que el agua penetre en la totalidad de la pared

Es condición obligatoria para las obras hidráulicas de envergadura realizar mezclas experimentales para definir la mejor composición. Los ensayos en estos casos no sólo se referirán a la resistencia sino que deberán realizarse ensayos de penetración por sumergencia de las muestras comprobando el espesor de hormigón que absorbe agua en cada caso

#### c) La correcta colocación y compactación del hormigón

El hormigón debe ser correctamente vibrado y compactado para evitar la formación de oquedades y nidos de abeja

#### d) El correcto tratamiento de juntas de trabajo

Cuando deben realizarse etapas de hormigonado debe tratarse la zona de contacto en el hormigón ya fraguado limpiando correctamente la superficie y/o picando la misma si es necesario y colocando un mortero de adherencia mejorada.

Las juntas de trabajo deben ser verticales , es conveniente evitar juntas horizontales .

Cuando la exigencia de la junta de trabajo hace muy complicado asegurar la estanqueidad se colocarán juntas tipo Waterstop o juntas hidroexpansivas

#### e) El correcto curado

El hormigón debe mantener húmedo durante su proceso de frague sino se producirán fisuras por contracción de frague.

#### f) La protección adecuada de la superficie expuesta

Encofrados con terminación "a la vista"

Membranas

Pinturas

### Exigencias para cálculo a fisuración y estanqueidad

El Reglamento CIRSOC 201 actualmente en vigencia (según DIN 1045) establece las verificaciones a realizar en el diseño de estructuras hidráulicas para :

- a) Controlar la fisuración (cálculo a fisuración)
- b) Generar hormigones impermeables (cálculo a estanqueidad)

*Nota: el proyecto de nuevo Reglamento Cirsoc en la Norma ACI 318 limita la fisuración a través de exigir para los casos de agresión mejor calidad de hormigón y limitar las deformaciones máximas en las estructuras*

a) El cálculo a fisuración implica lograr que sólo se produzcan pequeñas fisuras no pasantes del orden de 0,2mm/0,3mm .

Si suponemos una viga de hormigón con una única barra de acero, el estiramiento de esa barra de acero será la sumatoria de los anchos de fisura “w” repartidos en esa barra . Para lograr un hormigón más estanco es necesario tener una distribución de fisuras con w pequeño, distribuidas una distancia “a” chica. Cuando el acero es solicitado a tracción, dicha tracción se transmite por adherencia al hormigón , cuando la tensión es mayor que la resistencia a tracción del hormigón se produce una fisura a una distancia “a” .

La fuerza que se transmite del hormigón al acero en el tramo de longitud “a” es:

$$F = m \pi \phi a \tau \quad (2)$$

Donde:

$\phi$  = diámetro de la barra

$\tau$  = tensión de adherencia

A su vez para que la fisura penetre en una sección de  $A_{bz}$  necesito una fuerza

$$R = A_{bz} \sigma_b k \quad (3)$$

Donde  $\sigma_b k$  es la tensión a tracción a rotura de hormigón y  $A_{bz}$  la sección de hormigón fisurada

La fisura se produciría cuando a una distancia “a” tal que  $F = R$ . Esto permitiría determinar el diámetro de la barra necesaria. Las investigaciones posteriores sobre fisuración concluyeron que el fenómeno no es tan lineal y que en las nervaduras de una barra de acero próxima a una fisura se produce una concentración de tensiones que quita adherencia aumentando las tensiones de tracción en el acero.

A partir de esta investigación se deducen las fórmulas de “w” y pueden obtenerse el diámetro necesario de armadura en función de la cuantía  $\mu$  (relación entre la superficie de la sección transversal de las barras de acero y la sección de hormigón traccionada)

Aproximando estas curva con tres rectas se obtiene tres condiciones a cumplir entre el diámetro de la armadura y la cuantía de armadura que fija el reglamento CIRSOC:

- 1)  $\mu \leq 0,3\%$  ( no usar porque la pieza queda con poca armadura frente a los problemas de

- coacción)
- 2)  $\phi \leq \phi_{\text{limite}}$
  - 3)  $\phi < r \frac{\mu\epsilon}{\sigma_{sd}^2} 10^4$

donde;

$\phi_{\text{limite}}$  es el diámetro máximo de armadura a colocar en función de la condición de fisuración requerida y el tipo de acero utilizado

r es un coeficiente en función del ancho de fisura requerida y del tipo de acero

$$\mu\epsilon = 100 A_{\text{acero}} / A_{\text{bz}}$$

$\sigma_{sd}$  : tensión de rotura a tracción del acero en MN/m<sup>2</sup>

#### b) Cálculo a estanqueidad

El cálculo diseña al hormigón en Estado I o sea que no se supere en la fibra extrema de la sección de hormigón las tensiones de rotura

\*Se calculan las tensiones en el hormigón como material homogéneo

$$\sigma_N + \sigma_M$$

\*Se multiplica esta tensión por un factor  $\eta$  que es función del espesor ideal

$$d_i = d (1 + \sigma_N / \sigma_M)$$

considerando tensión positiva la tracción . A mayor  $d_i$  mayor  $\eta$  con un valor máximo de 1,8

\*Se compara esta tensión con la tensión de comparación

$$0,5\sqrt[3]{(\sigma_{bk}(kg/cm^2))^2}$$

o si la condición es muy rigurosa

$$0,4\sqrt[3]{(\sigma_{bk}(kg/cm^2))^2}$$

### Fisuración por esfuerzos de coacción

#### A) Fisuras por fragüe

El hormigón al fraguar se retrae, esta retracción es función de la humedad de la atmósfera y de la edad del hormigón al ponerse en contacto con la atmósfera,

- Cuando más seco sea el ambiente mayor será la retracción.
- Cuanto más se demore en poner en contacto la superficie del hormigón con la atmósfera

- menor será la retracción.
- la retracción será menor a igual humedad para una pieza de mayor espesor.

Las tensiones de tracción por retracción que se generan en el material pueden ser decisivas para la fisuración, el diseño de las estructuras debe tratar de evitar este tipo de problemas

Por ejemplo una viga simplemente apoyada permitirá una disminución de la longitud no generando tensiones en el material. En cambio si la viga está empotrada en ambos extremos se generarán tensiones de tracción que pueden duplicar las tensiones máximas de rotura a tracción del hormigón, luego la pieza se contrae hasta que rompe porque se alcanzaron las tensiones de rotura. La pieza aparece fisurada mucho antes de que se produzca toda la contracción

La producción de esta fisuración no se puede evitar pero si limitar el ancho de las fisuras que se producen lo que se logra teniendo "a" (distancia entre fisuras) chicas.

Volviendo a las fórmulas (2) y (3) la fisura se produce cuando  $F = R$ , luego la separación entre fisura "a" es:

$$a = \frac{A_{bz} \cdot \sigma_{bk}}{m \cdot \pi \cdot \phi \cdot \tau}$$

si expresamos esta misma fórmula en función de la cuantía y considerando que  $\sigma_{bk}$  y  $\tau$  son constantes del material queda

$$a = \frac{\phi}{4k\mu}$$

o sea que para lograr fisuras chicas y bien repartidas es convenientes colocar armaduras de pequeño diámetro con una cuantía importante.

#### B) Problemas de variación de temperatura

La temperatura genera dentro de las estructuras hiperestáticas donde se restringen los grados de libertad efectos similares a los explicados para la retracción de fragüe si hablamos de variaciones de temperatura del orden de 25 grados. Si la variación es mayor los esfuerzos son importantes y deben preverse juntas de dilatación que permitan la expansión del material sin generar tensiones.

Un ejemplo típico es la junta de un pavimento

Si suponemos una fisura existente queremos calcular a que distancia "L" aproximadamente se producirá la otra fisura

$$F = 1m \times L \times \delta \quad \text{donde } \delta \text{ es la fricción entre tierra y hormigón } \cong 5t/m^2$$

$$R = 1m \times h \times \sigma_{bk} \quad \text{donde h es el espesor del pavimento}$$

Si suponemos  $h = 0,20m$  resulta  $L = 7m$ , distancia aproximada donde deben colocarse las juntas de dilatación para que no se produzcan fisuras

Otro tema a considerar es la dimensión máxima de una estructura lineal sin juntas de dilatación. Siguiendo el razonamiento anterior debemos suponer una junta de dilatación cada 40/50m lineales de estructura.

### C) Asentamientos diferenciales

Cuando los suelos presentes características variables a lo largo de la fundación de una estructura o cuando dos estructuras de distinto comportamiento (peso, longitud , rigidez ) estén en contacto es necesario tomar uno de dos criterios:

- a) calcular la estructura para resistir los esfuerzos que se generen
- b) permitir el asentamiento mediante la materialización de juntas elásticas evitando la generación de esfuerzos internos

Una junta típica puede ser (la junta tipo waterstop se coloca cuando además debo asegurar estanqueidad):

### **Otros problemas de durabilidad**

#### 1) Presencia de sulfatos

El contenido de sulfatos tanto el suelo como en el agua debe controlarse debido a que genera procesos químicos destructivos de la masa de hormigón. Deben especificarse en estos caso los denominados cementos ARS ( de alta resistencia a los sulfatos)

#### 2) Presencia de cloruros

Existen en las normativas valores máximos de ion cloruro a estar presente en los cementos

#### 3) Reacción alcali agregado

Deben estudiarse los agregados para no generar reacciones destructivas de la masa de hormigón

#### 4) PH bajos

Normalmente la solución a un problema de Ph bajo se resuelve revistiendo el hormigón  
El ejemplo típico es el revestimiento de las cañerías cementicias : H°A°, pretensadas, de Hierro dúctil (ya que tienen un revestimiento pasivador de la corrosión de base cementicia) , asbesto cemento ,etc para conducciones cloacales . La generación de sulfhídrico genera un ambiente ácido que las deteriora

Otra solución para los problemas de durabilidad es proteger la estructura con membranas plásticas.

## CONCEPTOS BÁSICOS A TENER EN CUENTA EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS

- Esquema de cálculo lo más parecido al real
- La armadura debe cubrir ampliamente todas las solicitaciones
- Debe verificarse las condiciones de fisuración
- Colocar cuantías importantes
- Considerar los esfuerzos de coacción
- Verificar las condiciones del suelo y prever juntas en casos necesarios
- Correcta dosificación del hormigón
- Buen curado