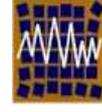




Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e
Ingeniería Antisísmica

N° A12-15.
**EVALUACIÓN DE LA NUEVA NORMA ACI 350 EN ESTANQUES
SEMIENTERRADOS DE HORMIGÓN ARMADO.**

Fernando Yáñez Uribe¹ y Cristián Fuentes Henríquez²

1.- *Ingeniero Civil, Director del IDIEM, Universidad de Chile.*

Plaza Ercilla 883, Santiago, Chile.

email: fyanez@ing.uchile.cl

2.- *Ingeniero Civil, IDIEM, Universidad de Chile.*

Plaza Ercilla 883, Santiago, Chile.

email: cfuentes@idiem.uchile.cl

RESUMEN

En nuestro país no existe una norma específica para el diseño de estanques de hormigón armado, esto motiva a evaluar como impactaría el uso del código ACI 350-01, en la práctica chilena. Para ello se escogió un estanque rectangular semienterrado, diseñado hace 20 años que tiene una capacidad de 20.000 m³, el que se rediseño utilizando sísmicamente el ACI 350.03-01, complementaria al ACI 350- 01.

Las normas americanas no incluyen sismos de origen subductivos, por lo que fue necesario ajustar los parámetros y ecuaciones. Este ajuste fue realizado utilizando la norma NCh 2369 Of. 2003 “Diseño Sísmico de estructuras e instalaciones industriales”.

El análisis de las fuerzas sísmicas indica que la normativa Chilena, al exigir coeficientes sísmicos mínimos para el caso convectivo y coeficientes sísmicos máximos para el caso impulsivo sobredimensiona el diseño. El uso del procedimiento descrito en el código ACI 350.03-01 considerando $R_i=4$ para el caso impulsivo, $R_c=1$ para el caso convectivo y los parámetros sísmicos de la norma NCh 2369 Of. 2003 conduce a un diseño muy similar al usado tradicionalmente en Chile.

Palabras Clave: Estanques, Diseño Sísmico, ACI 350.

1. INTRODUCCION

Los estanques son instalaciones indispensables en el proceso de distribución del agua potable, son ellos los que permiten regular el volumen y reservar el agua para las horas de mayor consumo o que se requiere en situaciones especiales como un incendio. Forman parte del sistema de almacenamiento y están destinados a recibir, almacenar, regular y entregar a la red de distribución el agua potable producida en la planta de potabilización, o bien extraída desde pozos subterráneos.

Estas obras deben mantener su funcionamiento en forma permanente, por lo que el criterio de diseño debe ajustarse a las condiciones de uso, resistir los esfuerzos internos y no presentar filtraciones. La presencia de estas últimas puede originar una interacción entre el ambiente externo y el agua, permitiendo el ingreso de agentes contaminantes y ocasionar problemas de salud a la población abastecida.

En estanques elevados un mal diseño puede ser fácilmente detectado, sin embargo, en estanques enterrados y semienterrados se presentan diferencias significativas con respecto a los que están sobre el nivel del suelo, debido a que la mayor parte de éste no está a la vista, por lo que la mayoría de los daños directos no serán visibles, lo que hará que la determinación real de los daños sea usualmente mucho más lenta y laboriosa.

Cuando un estanque de agua sufre deterioros en cualquiera de sus componentes, representa pérdidas económicas, además un estanque fuera de funcionamiento trae como consecuencia directa dejar a una población sin abastecimiento, lo que es inaceptable. Además se debe considerar que el proceso de reparación o rehabilitación es mucho más costoso que un tratamiento preventivo al momento de construir.

En Chile la gran mayoría de los estanques enterrados y semienterrados son realizados en hormigón armado, debido a su facilidad de moldeo, bajo costo relativo y gran durabilidad. Aparte de la capacidad resistente de la estructura, el principal problema es el de conservar su estanquidad (considerando que este tipo de estructuras mantienen volúmenes que van desde los 20 m³ a 20.000 m³) mediante el empleo de elementos adecuados y un correcto control de la fisuración producto de un buen diseño y detallamiento. Por otra parte, en nuestro país no existe una norma dedicada exclusivamente al diseño sísmico de estanques, sin embargo, consideraciones mínimas para este tipo de estructuras son incluidas en la norma chilena NCh 2369 Of. 2003: "Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales".

No obstante, es necesario utilizar normas y bases de diseño apropiadas al tipo de estructura que se planea construir. En este caso una excelente norma es la ACI 350-01 "Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures".

En este trabajo se pretende comparar un diseño realizado con esta norma, ACI 350-01, con un diseño de acuerdo a la práctica corriente chilena.

2. ANÁLISIS SISMICO

La Norma NCh 2369 Of. 2003 señala que los estanques deben ser analizados, como mínimo para las acciones sísmicas en dos direcciones horizontales perpendiculares. No obstante, los elementos se pueden diseñar para el sismo actuando según cada una de las direcciones del análisis considerado, además el modelo de análisis debe considerar tanto la respuesta horizontal impulsiva como la respuesta horizontal convectiva asociada a la superficie libre.

Un procedimiento de diseño sísmico común para los estanques se basa en el modelo mecánico derivado por G.W. Housner para estanques rígidos. Housner utiliza un modelo análogo a un modelo mecánico, es decir, formuló una idealización para estimar la respuesta líquida en estanques rígidos, rectangulares y cilíndricos sísmicamente excitados. En su modelo, dividió la presión hidrodinámica del líquido contenido en dos componentes: la presión impulsiva, causada por la porción de líquido que aceleraba solidaria con el estanque, y la presión convectiva causada por la porción del líquido que oscila dentro del estanque. La componente convectiva entonces fue modelada como un oscilador de un grado de libertad, considerando el líquido como un material viscoso, y homogéneo.

Basándose en lo anterior el código de diseño ACI 350-01, generó un código especial para el diseño de estanques bajo las sollicitaciones sísmicas (ACI 350.03-01), dentro de este código se establece una metodología para realizar el análisis sísmico siguiendo el modelo de G.W. Housner para calcular las masas y períodos de vibración de las masas impulsivas y convectivas, y a partir de esto parámetros calcular los esfuerzos sísmicos. Esta metodología es la siguiente:

1. Calcular el peso de los muros del estanque W_w y de la losa de cubierta W_r . Calcular el coeficiente ε^1 de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \left[0.0151 \left(\frac{L}{H_L} \right)^2 - 0.1908 \left(\frac{L}{H_L} \right) + 1.021 \right] \leq 1.0 \quad (2.1)$$

con el coeficiente anterior se debe calcular el peso efectivo:

$$W_e = \varepsilon W_w + W_r. \quad (2.2)$$

2. Calcular el peso efectivo de la componente impulsiva W_i y de la componente convectiva W_c :

$$\frac{W_i}{W_L} = \frac{\tanh\left(0.866\left(\frac{L}{H_L}\right)\right)}{0.866\left(\frac{L}{H_L}\right)} \quad (2.3)$$

¹ El coeficiente ε corresponde a la razón entre la masa dinámica equivalente de la cáscara del estanque y la masa total de este.

$$\frac{W_c}{W_L} = 0.264 \left(\frac{L}{H_L} \right) \tanh \left[3.16 \left(\frac{H_L}{L} \right) \right] \quad (2.4)$$

3. Calcular las frecuencias naturales de vibrar para la componente impulsiva ω_i y para la componente convectiva ω_c :

$$m_w = H_w * t_w * \rho_c \text{ corresponde a la masa del muro.} \quad (2.5)$$

$$m_i = \left(\frac{W_i}{W_L} \right) * \frac{L}{2} * H_L * \rho_L \text{ corresponde a la masa impulsiva.} \quad (2.6)$$

$$m = m_w + m_i \quad (2.7)$$

luego la frecuencia y período para el modo impulsivo quedan definidos como sigue:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (2.8)$$

donde K es la rigidez del muro de hormigón y se define como $K = \frac{Ec}{4 * 10^6} * \left(\frac{t_w}{h} \right)^3$ (2.9)

y h es la altura del centro de gravedad entre la masa del muro y la masa impulsiva definiéndose como

$$h = \frac{h_w m_w + h_i m_i}{m_w + m_i} \quad (2.10)$$

De lo anterior se tiene que el periodo impulsivo es :

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (2.11)$$

por otra parte para la componente convectiva, la frecuencia y el periodo se calculan como sigue:

$$\lambda = \sqrt{3.16g \tanh \left(3.16 \frac{H_L}{L} \right)} \quad (2.12)$$

$$\omega_c = \frac{\lambda}{\sqrt{L}} \text{ frecuencia.} \quad (2.13)$$

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} \text{ periodo.} \quad (2.14)$$

4. Seleccionar la zona sísmica, tipo de suelo, factor de importancia de la estructura de acuerdo a su tipo y el lugar donde será emplazado. Los parámetros involucrados son: Z que corresponde a la aceleración

máxima efectiva del suelo, S que es un parámetro de acuerdo al tipo de suelo, I que es el factor de importancia.²

5. Calcular los factores de amplificación espectral (C_i para el caso impulsivo y C_c para el caso convectivo) de acuerdo a los períodos obtenidos en el punto 3 para cada componente.

Para el caso impulsivo se tiene lo siguiente:

Si $T_i \leq 0.31$ seg.:

$$C_i = \frac{2.75}{S} \quad (2.15)$$

para $T > 0.31$ seg.:

$$C_i = \frac{1.25}{T_i^{2/3}} \leq \frac{2.75}{S} \quad (2.16)$$

Para el caso convectivo se tiene que el factor de amplificación esta dado por:

$T_c \geq 2.45$ seg.:

$$C_c = \frac{6.0}{T_c^2} \quad (2.17)$$

$T_c < 2.4$ seg.:

$$C_c = \frac{1.875}{T_c^{2/3}} \leq \frac{2.75}{S} \quad (2.18)$$

6. Seleccionar los factores de reducción de la respuesta R , para cada una de las componentes, impulsiva R_{w_i} y convectiva R_{w_c} , y para los muros del estanque en general R_w .

7. Calcular las fuerzas laterales dinámicas y el corte basal de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$P_W = ZSIC_i \frac{\varepsilon W W}{R_{w_i}} \quad (2.19)$$

$$P_{W'} = ZSIC_i \frac{\varepsilon W W'}{R_{w_i}} \quad (2.20)$$

$$P_R = ZSIC_i \frac{W_R}{R_{w_i}} \quad (2.21)$$

² Todos estos parámetros están tabulados en el código y deben ser ajustados a la realidad chilena.

$$P_i = ZSIC_i \frac{W_i}{Rw_i} \quad (2.22)$$

$$P_c = ZSIC_c \frac{W_c}{Rw_c} \quad (2.23)$$

con lo anterior se tiene que el corte basal está dado por :

$$V = \sqrt{(P_i + P_w + P_R)^2 + P_c^2} \quad (2.24)$$

8. Calcular las alturas importantes del centro de gravedad. Aquí se distinguen dos casos, el primero es excluyendo la presión en la base (EBP) y el segundo es incluyendo la presión en la base (IBP):

caso EBP:

la altura impulsiva esta dada por:

$$\frac{L}{H_L} < 1.33 \Rightarrow \frac{h_i}{H_L} = 0.5 - 0.09375 \left(\frac{L}{H_L} \right) \quad (2.25)$$

$$\frac{L}{H_L} \geq 1.33 \Rightarrow \frac{h_i}{H_L} = 0.375 \quad (2.26)$$

la altura convectiva se define como sigue:

$$\frac{h_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh \left[3.16 \left(\frac{H_L}{L} \right) \right] - 1}{3.16 \left(\frac{H_L}{L} \right) \sinh \left[3.16 \left(\frac{H_L}{L} \right) \right]} \quad (2.27)$$

caso IBP:

la altura impulsiva esta dada por:

$$\frac{L}{H_L} < 0.75 \Rightarrow \frac{h_i'}{H_L} = 0.45 \quad (2.28)$$

$$\frac{L}{H_L} \geq 0.75 \Rightarrow \frac{h_i'}{H_L} = \frac{0.866 \left(\frac{L}{H_L} \right)}{2 \tanh \left[0.866 \left(\frac{L}{H_L} \right) \right]} - \frac{1}{8} \quad (2.29)$$

la altura convectiva se define como sigue:

$$\frac{h_c'}{H_L} = 1 - \frac{\cosh\left[3.16\left(\frac{H_L}{L}\right)\right] - 2.01}{3.16\left(\frac{H_L}{L}\right)\sinh\left[3.16\left(\frac{H_L}{L}\right)\right]} \quad (2.30)$$

9. Calcular la distribución de las fuerzas verticales para todos los casos, impulsivas, convectivas y del muro en un punto cualquiera y.

$$P_{w_y} = ZSI \frac{C_i}{Rw_i} \varepsilon \gamma_c B t_w \quad (2.31)$$

$$P_{i_y} = \frac{P_i \left[4H_L - 6h_i - (6H_L - 12h_i) \left(\frac{y}{H_L} \right) \right]}{H_L^2} \quad (2.32)$$

$$P_{c_y} = \frac{P_c \left[4H_L - 6h_c - (6H_L - 12h_c) \left(\frac{y}{H_L} \right) \right]}{H_L^2} \quad (2.33)$$

$$P_{v_y} = \ddot{u}_v q h_y$$

donde $\ddot{u} = ZSC_v I \frac{b}{Rw_i}$ en que $C_v=1.0$ para estanque rectangulares y b corresponde a la razón entre las

aceleraciones vertical y horizontal y esta razón tiene que ser $\leq 2/3$.

$q h_y = \gamma_L (H_L - y)$ corresponde a la presión ejercida por efectos hidrodinámicos.

10. Calcular los momentos debido a la acción de las fuerzas sísmicas. Se debe calcular tanto el momento flector como el momento volcante producto de estas fuerzas:

Momento flector (Mb):

$$M_w = P_w * h_w \quad (2.34)$$

$$M_R = P_R * h_R \quad (2.35)$$

$$M_i = P_i * h_i \quad (2.36)$$

$$M_C = P_C * h_C \quad (2.37)$$

$$Mb = \sqrt{(M_w + M_R + M_i)^2 + M_C^2} \quad (2.38)$$

Momento Volcante (Mo):

$$M_w = P_w \cdot h_w \quad (2.39)$$

$$M_R = P_R \cdot h_R \quad (2.40)$$

$$M_i = P_i \cdot h_i \quad (2.41)$$

$$M_C = P_C \cdot h_C \quad (2.42)$$

$$M_o = \sqrt{(M_w + M_R + M_i)^2 + M_C^2} \quad (2.43)$$

11. Se debe calcular la ola máxima generada por los efectos sísmicos horizontales de acuerdo a la siguiente expresión:

$$d_{\max} = \frac{L}{2} ZSI \cdot C_c \quad (2.44)$$

donde C_c corresponde al factor de amplificación espectral calculado anteriormente.

Antes de aplicar esta norma a un estanque en particular, es necesario ajustar los parámetros sísmicos a la realidad chilena. En el código ACI 350.03 "Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures" los parámetros que se deben ajustar son aquellos que pertenecen a la ecuación general del corte basal que a continuación se indica:

$$V = \frac{ZSI C}{R} \cdot W \quad (2.45)$$

La expresión anterior intenta ilustrar el movimiento de tierra impuesto, que es representado por un espectro elástico de la respuesta y que se obtiene de un expediente real del terremoto para el sitio en estudio, o es construido por analogía de los sitios con el suelo conocido y cuyas características sísmicas son también conocidas. El perfil del espectro de la respuesta es definido por el producto ZC . Donde el factor Z representa la aceleración máxima para el sitio, mientras que C es un factor espectral dependiente de la amplificación del período. Este último es representado como C_i y C_c que corresponden a las respuestas de las componentes impulsiva y convectiva respectivamente.

El factor I corresponde a la importancia que se le da a la estructura, es una medida que incrementa la seguridad para las distintas categorías de estructuras. Por último el factor R es el factor de reducción de la respuesta elástica espectral que considera la ductilidad de las estructuras y las propiedades disipativas de

energía, entre otros. Este término es distinto para cada una de las componentes impulsivas (R_{wi}) y componentes convectivas (R_{wc}).

El factor W corresponde al peso total de la estructura, y para el cálculo del corte basal se debe diferenciar el peso de cada una de las componente en estudio, es decir, para la componente del peso impulsiva se debe considerar W_i (Ec. 2.22) y para la componente del peso convectiva W_c (Ec. 2.23).

Cabe destacar que los parámetros anteriores están basados en la norma norteamericana “ Uniform Building Code” (UBC) del 1997, no obstante el ambiente sísmico subductivo no es considerado en detalle por el código antes señalado. En consecuencia, es necesario utilizar métodos de análisis y diseño que incluyan al ambiente esencialmente subductivo propio de la placa de nazca, que abarca a Chile desde Arica hasta la latitud de la península de Taitao, y también que cubran los casos de sismicidad cortical de carácter superficial que se presentan al sur de la península de Taitao y en otras zonas del país.

En Chile no existe un norma dedicada exclusivamente al diseño sísmicos de estanques, sin embargo, consideraciones mínimas para este tipo de estructuras son incluidas en la norma chilena NCh 2369 Of. 2003: “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales”; en esta se señala que el esfuerzo de corte basal horizontal en la base se debe calcular de acuerdo a la siguientes expresión:

$$Q_0 = CIP \quad (2.46)$$

Donde Q_0 es el esfuerzo de corte en la base, C es un coeficiente sísmico , I corresponde al factor de importancia de la estructura y P es el peso de esta sobre el nivel basal. Luego el parámetro C se define en la norma NCh 2369 como sigue:

$$C = \frac{2.75A_0}{gR} \left(\frac{T'}{T^*} \right)^n \left(\frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4} \quad (2.47)$$

Donde A_0 corresponde a la aceleración máxima del suelo de acuerdo a la zonificación sísmica; T' y n son parámetros referidos al suelo de fundación; T^* es el periodo fundamental en la dirección del análisis; R es el factor de modificación de la respuesta; ξ es la razón de amortiguamiento de la estructura. Para estanques de hormigón armado se debe utilizar $R = 3$ como valor máximo.

Para el caso impulsivo se debe considerar una razón de amortiguamiento $\xi = 0.03$, y con esto se tiene que el coeficiente sísmico para este caso queda:

Tabla 1. Coeficientes sísmicos máximos NCh 2369 Of. 2003

Coeficiente Sísmico impulsivo			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Ci	0.17	0.26	0.34

Por otra parte se tiene que los coeficientes convectivos deben ser determinados evaluando la ecuación Ec. 2.47 definida anteriormente considerando los parámetros para el suelo y zonas sísmicas descritos en la NCh 2369 Of. 2003. En este caso en particular se estimó el coeficiente convectivo C_c , para un suelo tipo II, válido para donde se encontraba emplazado el estanque en estudio. A partir de lo anterior se realizó un gráfico comparativo entre los valores que se obtiene de evaluar el coeficiente convectivo, tanto con la Norma ACI 350.03 como con la NCh 2369 Of. 2003.

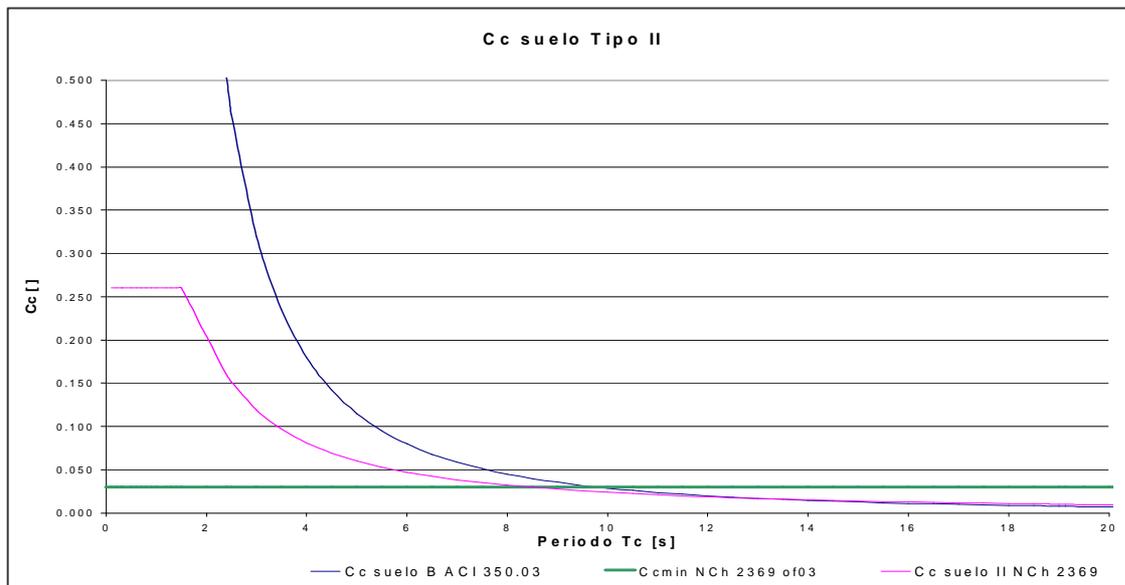


Figura N° 1. Gráfico Coeficiente convectivo suelo tipo II

3. COMPARACIÓN ACI 350.03-01 y NCH 2369 Of. 2003

Para realizar la comparación se utilizaron las siguientes consideraciones:

Se calcularon los esfuerzos considerando un sismo actuando en dos direcciones perpendiculares entre si, actuando sobre el estanque completo donde el sismo en la dirección larga (X) ejerce efectos en el lado corto, y el sismo en la dirección corta ejerce efectos sobre el lado largo del estanque.

Para el modo impulsivo se consideraron los valores máximos de los coeficientes sísmicos para la Norma Chilena y la ecuación de C_i expresada en el ACI 350.03-01. Para el modo convectivo se utilizó el resultado de evaluar las ecuaciones C_c y del coeficiente C , esto se debió a que la norma ACI 350.03-01 no

Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica
IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción - Chile

posee un valor mínimo para este coeficiente, y los valores obtenidos siempre se encontraron por debajo del rango de valores mínimos exigidos en la norma chilena NCh 2369 Of 2003.

Dado lo anterior se comparó el modo convectivo considerando el rango mínimo exigido por la NCh 2369 Of 2003, variando el valor del factor de modificación de la respuesta de 3 a 1 para el caso de la norma chilena, debido a que esta última no discrimina entre modo convectivo e impulsivo, sino que entrega un único valor de $R = 3$ para ambos modos y la norma ACI 350.03-01 considera un valor $R = 1$ para el caso convectivo.

Se debe señalar que M_w corresponde al momento producido por los muros; M_i corresponde al momento producto de las fuerzas impulsivas; M_c corresponde al momento producto de las fuerzas convectivas; y M_b es el momento total volcante en la base del estanque.

Los resultados obtenidos de las comparaciones se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 2. Comparación Momentos Sísmicos según X.

Momentos	ACI 350.03-01 (a)	NCh 2369 Of. 2003 R=1 (b)	NCh 2369 Of. 2003 R=3 (c)	NCh 2369 Of. 2003 Cc mín (d)
	[t-m]	[t-m]	[t-m]	[t-m]
M_w	1.14	4.62	4.62	4.62
M_i	3.04	12.31	12.31	12.31
M_c	4.23	6.03	2.00	23.73
M_b	5.65	17.97	17.05	29.15

Nota: (a) Considera para el cálculo del momento sísmico utilizar $R_i = 4$ impulsivo; $R_c = 1$ convectivo;

(b) Considera para el cálculo del momento sísmico utilizar $R_i = 3$ impulsivo; $R_c = 1$ convectivo;

(c) Considera para el cálculo del momento sísmico utilizando $R_i = 3$ impulsivo; $R_c = 3$ convectivo;

(d) Considerando para el cálculo del momento sísmico la utilización el coeficiente mínimo convectivo de acuerdo a la NCh 2369 Of. 2003.

Tabla 3. Comparación Momentos Sísmicos según Y.

Momentos	ACI 350.03-01 (a)	NCh 2369 Of. 2003 R=1 (b)	NCh 2369 Of. 2003 R=3 (c)	NCh 2369 Of. 2003 Cc mín (d)
	[t-m]	[t-m]	[t-m]	[t-m]
M_w	0.58	4.62	4.62	4.62
M_i	3.05	12.34	12.34	12.34
M_c	7.99	7.26	2.42	11.66
M_b	8.79	18.44	17.13	20.56

Nota: (a) Considera para el cálculo del momento sísmico utilizar $R_i = 4$ impulsivo; $R_c = 1$ convectivo;

(b) Considera para el cálculo del momento sísmico utilizar $R_i = 3$ impulsivo; $R_c = 1$ convectivo;

(c) Considera para el cálculo del momento sísmico utilizando $R_i = 3$ impulsivo; $R_c = 3$ convectivo;

(d) Considerando para el cálculo del momento sísmico la utilización el coeficiente mínimo convectivo de acuerdo a la NCh 2369 Of. 2003.

4. CONCLUSIONES

El diseño sísmico se efectuó utilizando en su totalidad lo dispuesto por el código ACI 350.03-01, es decir, se utilizaron todos los parámetros sísmicos correspondientes a la clasificación que hace el UBC para Santiago de Chile, la que ubica a esta ciudad en zona 4.

El mismo código ACI 350-01, en el capítulo 21, establece disposiciones que se deben seguir para desarrollar un análisis sísmico en estructuras ambientales. Pero para regiones con alto riesgo sísmico, como es el caso de Chile, se exige utilizar el código ACI 350.03-01, de diseño sísmico de estanques. La metodología utilizada es sólo para estanques rectangulares y que están apoyados en la superficie o enterrados o semienterrados. Para estanque circulares se deben hacer ajustes a las ecuaciones para estanque rectangulares las que aparecen detalladas en el ACI 350.03-01

Esta metodología evidentemente debe ser ajustada a la realidad del país, puesto que los coeficientes sísmicos utilizados por el ACI 350.03-01 están basados en los parámetros sísmicos del “Uniform Building Code” (UBC-1997) los cuales no serían válidos para sismos del tipo subductivo, como son los terremotos en Chile.

Por otro lado, la norma NCh 2369 Of. 2003 establece que las masas y alturas participantes en los esfuerzos hidrodinámicos pueden ser calculados mediante la metodología expuesta en el punto 2 de este documento, pero los coeficientes sísmicos, impulsivos y convectivos, deben ser calculados de acuerdo con la ecuación 5.2 de la NCh 2369 Of.2003. Para calcular los coeficientes sísmicos impulsivos y convectivos es necesario definir los valores del factor de modificación de la respuesta R.

La norma NCh 2369 Of.2003 no discrimina entre el caso impulsivo y convectivo, para el valor de R, indicando que se debe considerar $R = 3$ para ambos modos analizados, y un amortiguamiento de $\xi = 0.03$ para el caso impulsivo y $\xi = 0.005$ para el convectivo. No obstante la norma chilena entrega la libertad al diseñador para elegir parámetro R menor, previa justificación. Por el contrario el código ACI 350.03-01 establece valores distintos para los casos impulsivos y convectivos, $R_i = 4$ caso impulsivo y $R_c = 1$ para el caso convectivo.

En este estudio se calcularon los coeficientes sísmicos para las siguientes combinaciones de R:

- (a) NCh 2369 Of.2003: $R_i = 3$ impulsivo; $R_c = 3$ convectivo.
- (b) NCh 2369 Of.2003: $R_i = 3$ impulsivo; $R_c = 1$ convectivo.
- (c) ACI 350.03-01 : $R_i = 4$ impulsivo; $R_c = 1$ convectivo.
- (d) NCh 2369 Of. 2003 considerando el coeficiente mínimo convectivo de acuerdo al artículo 11.8.8 de esta norma.

4.1 Modo impulsivo:

Al comparar el modo impulsivo de la NCh 2369 Of. 2003 con el ACI 350.03-01 se puede ver que los valores de los coeficientes son muy distintos entre si, $C_i = 0.26$ para la norma chilena y $C_i = 0.06$ para la norma americana. Esto aplicado al ejemplo se traduce en grandes diferencias en las fuerzas obtenidas lo que se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 4. Comparación momentos sísmicos.

Momentos	Dirección X		Dirección Y	
	ACI 350.03-01	NCh 2369 Of.2003	ACI 350.03-01	NCh 2369 Of.2003
Mw	1.14	4.62	0.58	4.62
Mi	3.04	12.31	3.05	12.34

De lo anterior se puede deducir que la norma chilena al considerar coeficientes sísmicos altos sobredimensiona las fuerzas, por lo que al aplicar estas a los elementos implicaría un aumento en la sección resistente y un aumento en la cantidad de armadura requerida.

4.2 Modo Convectivo:

Para el modo convectivo se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 5. Coeficientes convectivos.

Coeficiente convectivo	Dirección		Factor
	X: $T_c = 23.7$ [s]	Y: $T_c = 12.1$ [s]	
Cc NCh 2369 Of. 2003	0.003	0.006	R = 3
	0.008	0.019	R = 1
	0.030	0.030	Cc mín
Cc ACI 350.03-01	0.005	0.020	R = 1

De la tabla anterior se desprende que los coeficientes sísmicos para $R = 1$ son del mismo orden, lo que se traduce en fuerzas sísmicas muy parecidas. Sin embargo, se encuentran muy por debajo del mínimo exigido por la norma NCh 2369 Of.2003.

Por otra parte se tiene que para $R = 3$ los coeficientes sísmicos son mucho más pequeños que los valores mínimos exigidos por la norma chilena, por lo que para el diseño en este caso se debe considerar el coeficiente mínimo, lo cual sobredimensiona la fuerza ejercida por la componente convectiva sobre las paredes del estanque.

Aunque en ambos casos se está por debajo del mínimo se realizó el diseño considerando $R_c = 1$ para el caso convectivo y $R_i = 4$ para el impulsivo (ACI 350.03-01), debido a que los resultados obtenidos se asemejan al diseño original del ejemplo. Esto pone en manifiesto que la norma americana, al discriminar entre los valores de R , se obtienen resultados acordes y no cae en el sobrediseño de los elementos, en el que se incurriría si se usara la NCh 2396 Of.2003.

Para el caso estudiado, en los muros perimetrales considerando un metro lineal de estos, se obtuvo que los coeficientes sísmicos calculados de acuerdo a la norma chilena, son bastante altos en comparación a los obtenidos con el ACI350.03-01.

Cabe destacar que dentro de los resultados sísmicos obtenidos en este estudio y de acuerdo al ACI 350.03-01 las fuerzas laterales convectivas, son el 63% y el 86% del esfuerzo de corte total, en la dirección X e Y respectivamente. Por otra parte, en la norma chilena predominan los esfuerzos impulsivos, siendo en ambas direcciones prácticamente la totalidad del corte, haciendo prácticamente insignificante el aporte del modo convectivo. Esto se debe a que la norma Nch 2369 Of. 2003 exige calcular el coeficiente sísmico impulsivo a partir de los coeficientes máximos establecidos en la norma (tabla 5.7 NCh 2369 Of.2003), y para este caso en particular se obtuvo $C_i = 0.26$, el cual es muy superior al calculado con el ACI 350.03-01.

REFERENCIAS

ACI Committee 350 (2001), "Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-01) and Commentary (350R-01)," American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.

ACI Committee 350 (2001), "Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures" (ACI 350.3-01) and Commentary (350.3R-01), American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.

Fuentes, C. (2004), "Evaluación de la Norma ACI 350 en Estanques Semienterrados de Hormigón Armado" memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile.

Haroun, M. A.(1984), "Stress Analysis of Rectangular Walls Under Seismically Induced Hydrodynamic Loads", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **74:3**, 1031-1041.

Housner, G. W. (1955), "Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers ,," *Bulletin of the Seismological Society of America*, **47**, 15-35.

Housner, G. W. (1963), "Dynamic Pressure on Fluid Containers" *Technical Information (TID) Document 7024 U.S. Atomic Energy Commission*, Chapter 6, and Appendix F.

Housner, G.W. (1963), "The Dynamic Behavior of Water Tanks", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **53:2**, 381-387.

Housner, G.W. and Haroun, M.A. (1981), "Seismic Design of Liquid Storage Tanks" *Journal of the technical councils of ASCE*, **107:TC1**, 91-207.

INN (2003), NCh 2369 Of. 2003 "Diseño sísmico de estructuras industriales", Santiago de Chile.

New Zealand Standard, (1986) "Code of Practice for Concrete Structures for the Storage of Liquids," NZS 3106.

Uniform Building Code (UBC) (1997) "Division IV-Earthquake Design" **16:2**, and appendix **16:2**.

NOTACION

H_L : altura máxima de la columna de agua.

H_w : altura del muro.

h : altura del centro de gravedad entre la masa del muro y la masa impulsiva.

hr : altura de la losa de cubierta desde la base del estanque

hi : altura impulsiva no considerando la presión que se siente en la base del estanque.

hc : altura convectiva no considerando la presión que se siente en la base del estanque.

hi' : altura impulsiva considerando la presión en la base.

hc' : altura convectiva considerando la presión en la base.

T_w : espesor muro

T_i : periodo impulsivo

T_c : periodo convectivo. .

\ddot{u} : aceleración efectiva espectral tomada desde un espectro de respuesta inelástica vertical, este es derivado según una escala desde un espectro de respuesta elástica horizontal, expresado como una fracción de la aceleración de gravedad.

W_c : peso convectiva.

W_i : peso impulsivo.

W_r : peso de la losa de cubierta.

W_w : peso de los muros del estanque.

W_L : peso total del líquido contenido en el estanque

y : Toda distancia cualquiera a partir de la base del estanque.

Z : aceleración máxima efectiva del suelo según el ACI 350-02.

γ_c : peso específico del hormigón armado ($2,5 \text{ t/m}^3$)

γ_l : peso específico del agua, en (t/m^3).

ξ : Razón de amortiguamiento de la estructura

ρ_c : densidad del hormigón.

ρ_l : densidad del líquido.