



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL  
COMPORTAMIENTO DE LAS FUERZAS  
CONVECTIVAS E IMPULSIVAS EN TANQUES  
DE ALMACENAMIENTO - Presentación de un  
Ejemplo Práctico**

Autor(es)

Steven García Ocampo

Húber Danilo Ospina Ospina

Asesor:

Juan Fernando Velásquez Bedoya

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización En Análisis Y Diseño De Estructuras

Medellín, Colombia

2021



Recopilación Bibliográfica del Comportamiento de las Fuerzas Convectivas e Impulsivas  
en Tanques de Almacenamiento - Presentación de un Ejemplo Práctico.

**Steven García Ocampo**  
**Húber Danilo Ospina Ospina**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al  
título de:

**Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras**

Asesor:  
Juan Fernando Velásquez Bedoya  
I.C. M.Sc. Earthquake Engineering

Línea de Investigación:  
Análisis de estructuras e ingeniería sísmica.

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras  
Medellín, Colombia  
2021

## Tabla de contenido

1. Motivación y Planteamiento del problema.....	5
2. Objetivo general.....	2
2.1. Objetivos específicos.....	2
3. Marco teórico.....	3
3.1. Análisis del cambio de frontera en los muros del tanque .....	16
4. Caso ejemplo – Aplicación del código ACI 350.3-06 en el cálculo de las fuerzas convectivas e impulsivas en tanques de almacenamiento .....	17
4.1. Caso 1 - Comparación entre el análisis de las presiones calculadas por medio del código ACI 350.3-06 y un análisis dinámico cronológico (Time History).....	17
4.1.1. Análisis - Código ACI 350.3-06.....	18
4.1.2. Análisis Dinámico Cronológico (Time History) .....	24
5. Conclusiones.....	32
6. Referencias .....	35

## Listado de Figuras

Figura 1-1 Daños en depósitos de vino en el sismo de Chile 2010 .....	1
Figura 1-2 Daño en tanque por el sismo de Northridge 1994 .....	1
Figura 1-3 Daño en tanque por sismo.....	1
Figura 1-4 Daño en tanque por sismo de Ecuador .....	1
Figura 3-1 Mapa de valores $S_1$ y $S_s$ .....	4
Figura 3-2 Fuerzas actuantes en tanques de almacenamiento .....	7
Figura 3-3 Sistema dinámico equivalente de los fuerzas convectivas e impulsivas.....	9
Figura 3-4 Fuerza impulsiva y convectiva .....	10
Figura 3-5 Tipologías de tanques .....	10
Figura 3-6 Método Analítico Simple .....	11
Figura 3-7 Método Modificado.....	12
Figura 3-8 Método ASCE .....	12
Figura 3-9 Factor $(2\pi/\lambda)$ para el periodo convectivo de tanques rectangulares.....	13
Figura 3-10 Factor $(2\pi/\lambda)$ para el periodo convectivo de tanques circulares .....	13
Figura 3-11 Conexiones rígidas .....	14
Figura 3-12 Conexiones flexibles.....	14
Figura 4.1.1-1 Planta – Tanque.....	18
Figura 4.1.1-2 Elevación – Tanque.....	19
Figura 4.1.1-3 Ejes del tanque .....	19
Figura 4.1.1-4 Espectros de respuesta de las fuerzas convectiva e impulsivas .....	20
Figura 4.1.1-5 Modelo.....	23
Figura 4.1.1-6 Ejes locales .....	23
Figura 4.1.2-1 Acelerograma Armenia dirección X .....	25
Figura 4.1.2-2 Acelerograma Armenia dirección Y .....	25
Figura 4.1.2-3 Acelerograma Armenia dirección X .....	26
Figura 4.1.2-4 Acelerograma Armenia dirección Y .....	27
Figura 4.1.2-5 Espectro de aceleración – NSR-10 .....	27
Figura 4.1.2-6 Espectro Ajustado Armenia – NSR-10.....	28
Figura 4.1.2-7 Espectro Ajustado San Fernando – NSR-10 .....	28

Figura 4.1.2-8 Ejes locales .....	28
Figura 4.1.2-9 Desplazamientos eje X.....	30
Figura 4.1.2-10 Desplazamientos eje Y.....	30
Figura 4.1.2-11 Desplazamientos eje X.....	31
Figura 4.1.2-12 Desplazamientos eje Y.....	31

## Listado de Tablas

Tabla 3-1 Diseño tanques de acuerdo a cada norma.....	5
Tabla 3-2 Valores de $R_o$ para tanques .....	16
Tabla 4.1.1-1 Parámetros para el cálculo de los espectros.....	20
Tabla 4.1.1-2 Porcentaje y masa de las fuerzas convectivas e impulsivas – Eje X .....	21
Tabla 4.1.1-3 Porcentaje y masa de las fuerzas convectivas e impulsivas – Eje Y .....	21
Tabla 4.1.1-4 Periodos y coeficientes de aceleración convectivas e impulsivas – Eje X ...	22
Tabla 4.1.1-5 Periodos y coeficientes de aceleración convectivas e impulsivas – Eje Y ...	22
Tabla 4.1.1-6 Factores de modificación $R_i$ y $R_c$ .....	22
Tabla 4.1.1-7 Momento mayorados.....	24
Tabla 4.1.1-8 Cortantes máximas.....	24
Tabla 4.1.2-1 Factores para el cálculo del espectro .....	27
Tabla 4.1.2-2 Momento mayorados.....	29
Tabla 4.1.2-3 Cortantes máximas.....	29

## 1. Motivación y Planteamiento del problema

Hoy en día se puede observar un gran auge de las estructuras de almacenamiento alrededor del mundo, debido a la versatilidad que tienen estas estructuras en su uso. Encontrándolas en plantas de tratamiento, tanto de agua potable como de aguas residuales; en subestaciones; edificios residenciales y centros comerciales, donde son utilizadas como sistemas de almacenamiento para la red contra incendios y también en el área de hidrocarburos, donde se utilizan para el almacenamiento del petróleo, entre otros fluidos.

Son muchos los usos que se tienen de estas estructuras y es por este motivo que requieren especial atención en cuanto al comportamiento del fluido dentro del tanque; ya que las sollicitaciones que se generan por las fuerzas estáticas y dinámicas, pueden provocar daños en la estructura y en los elementos que tiene anclados, como son las tuberías, entre otros dispositivos que permiten su buen funcionamiento.

Aunque el uso de estas estructuras es muy común en nuestro país, su análisis y diseño se encuentran un poco limitados, teniendo en cuenta que nuestros códigos y reglamentos tienen un enfoque más que todo en edificios y puentes.

Sin embargo, con la nueva actualización del “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente”, NSR-10 (AIS. 2010), se incorporó en su capítulo C.23, el análisis y diseño de estructuras ambientales en condiciones estáticas, pero para las condiciones dinámicas, hace referencia al código “Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary”, ACI350.3-06 (ACI. 2006), donde se describe la forma de cómo calcular estas fuerzas, conocidas en el estado del arte de este tipo de estructuras como: fuerzas impulsivas y convectivas.

Al profundizar un poco en este código norteamericano, se encuentra que, para el cálculo de las fuerzas impulsivas en tanques rectangulares, se debe calcular el periodo del tanque, el cual requiere la rigidez del sistema, cuya rigidez se toma

como la de una viga en voladizo; por lo tanto, para el cálculo del periodo se toma la siguiente formula dada por el código ACI350.3-06:

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \text{ (Ec. 9 – 11, ACI350.3 – 06)}$$

Siendo m, la masa total por metro y k, la rigidez del sistema. La pregunta que surge sobre esto es ¿Qué pasaría si el sistema se analizará con condiciones de frontera diferentes a los concebidos en dicho reglamento, donde la cubierta este articulada a los muros y estos anclados a la losa de cimentación?

Los sismos históricamente siempre han sido parte de nuestra historia y se han venido presentando alrededor del mundo, causando en algunas ocasiones el colapso de algunas estructuras y provocando con esto, pérdidas económicas y humanas, debido a que no se tuvieron en cuenta en su diseño todas las consideraciones necesarias. Como sucedió con el sismo de Alaska en 1964, el cual tuvo una magnitud de 8.4 en la escala de Richter y causó algunos daños en los tanques de combustibles, lo que generó el derrame del crudo, provocando con esto incendios alrededor del lugar (Hernández et al 2018).

Otro caso fue el sismo de San Juan, Argentina en 1977, el cual fue de magnitud 7.4 en la escala de Richter y ocasionó daños en tanques de aceite y vino, provocando pérdidas económicas por el derrame de litros de vino, (Compagnoni y Martínez 2013). A continuación, en la Figura 1-1 a la Figura 1-4 se presenta algunos daños en tanques de almacenamiento.

Figura 1-1 Daños en depósitos de vino en el sismo de Chile 2010



Fuente: (Compagnoni y Martínez 2013)

Figura 1-2 Daño en tanque por el sismo de Northridge 1994



Fuente: (Compagnoni y Martínez 2013)

Figura 1-3 Daño en tanque por sismo



Fuente: (Iván F. Huergo 2020)

Figura 1-4 Daño en tanque por sismo de Ecuador



Fuente: (Sika 2016)

Cuando el fluido contenido en un tanque experimenta aceleraciones sísmicas, la parte del fluido más cercana al fondo se mueve conjuntamente con la estructura aportando masa a las propiedades inerciales de los muros, acción conocida como un comportamiento impulsivo, pero en zonas cercanas a la superficie, el líquido tiende a moverse en sentido opuesto al movimiento del tanque con una componente de desplazamiento vertical, fenómeno que genera un oleaje, provocando un comportamiento convectivo. (Patiño, O. 2012).



## 2. Objetivo general

Recopilar información necesaria para la interpretación, análisis y cálculo de las fuerzas convectivas e impulsivas en tanques de almacenamiento causadas por el movimientos sísmicos y presentación de un caso ejemplo donde se muestre el cálculo de este fenómeno.

### 2.1. Objetivos específicos

- Recopilar información bibliográfica sobre el cálculo y el comportamiento de estas dos fuerzas en tanques de almacenamiento, en diferentes artículos, normas y códigos internacionales.
- Analizar e interpretar la información adquirida sobre el comportamiento de las fuerzas hidrodinámicas en diferentes tipos de tanques, ya sea rectangular o circular.
- Investigar en cada norma o código el tipo de análisis que se realiza de acuerdo a cada tanque, ya sea en su forma o material.
- Encontrar la diferencia que puede existir, cuando se tiene dos tipos de condiciones de frontera; donde los muros están en voladizo o cuando la cubierta está articulada a los muros y los muros anclados a la losa de cimentación.
- Presentar un caso ejemplo del cálculo de las fuerzas convectivas e impulsivas en tanques de almacenamiento con la aplicación del código ACI 350.3-06.

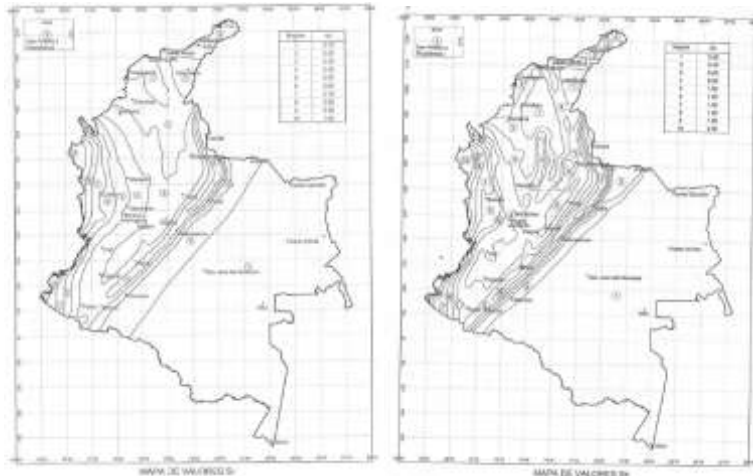
### 3. Marco teórico

Estas estructuras de almacenamiento son denominadas también como **estructuras ambientales**, las cuales pueden ser superficiales, estar enterradas, semienterradas o elevadas sobre un marco, ya sea en concreto, acero o mampostería.

Debido a que el reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) hace referencia al código ACI350.3-06 para el cálculo de las fuerzas convectivas e impulsivas, y conociendo que este código ACI350.3-06 es una norma internacional (EE.UU), los parámetros que se deben utilizar para el cálculo de las fuerzas, son propiamente del lugar donde se elaboró, es por este motivo que se debe recurrir al documento ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA (AIS 180-13. 2013), donde se proporciona la información requerida para realizar la conversión de los parámetros ( $A_a$  y  $A_v$ ) presentes en NSR-10 y así, poder transformarlos en los coeficientes sísmicos norteamericanos ( $S_1$  y  $S_s$ ) utilizados en el código ACI 350.3-06; y por ende, determinar el espectro de aceleración tanto de las fuerzas convectivas como impulsivas.

A continuación, en la Figura 3-1. Se presenta dos mapas del territorio nacional en los cuales se puede hallar los valores de  $S_1$  y  $S_s$  correspondientes a cada ciudad de Colombia.

Figura 3-1 Mapa de valores  $S_1$  y  $S_s$



Fuente: (AIS 180-13. 2013)

No obstante, si se desea hacer una conversión directa a partir de los valores de  $A_a$  y  $A_v$  contenidos en los mapas de amenaza sísmica del Reglamento NSR-10, se puede proceder como se explica a continuación:

$$S_s = 3,75 A_a \text{ (Ec. B.3-1, AIS 180-13)}$$

$$S_1 = 1,8 A_v \text{ (Ec. B.3-2, AIS 180-13)}$$

Hoy se puede encontrar criterios para el análisis y diseño de estructuras ambientales en diferentes normas internacionales como lo son:

ACI – “American Concrete Institute” – (Estados Unidos)

AWWA – “American Water Works Association” – (Estados Unidos)

API – “American Petroleum Institute” – (Estados Unidos)

NZSEE – “New Zealand Society for Earthquake Engineering” – (Nueva Zelanda)

FEMA – “Federal Emergency Management Agency” - (Estados Unidos)

IBC – “International Building Code” - (Estados Unidos)

Eurocode 8 – (Comité Europeo)

GSDMA – “Gujarat State Disaster Management Authority” – (India)

Este último organismo, GSDMA, realizó un completo estudio comparativo entre las metodologías del análisis hidrodinámico de cada una de las normas mencionadas, con el fin de documentar y fundamentar su propia normatividad con base en las condiciones locales de la India.

A continuación, se muestra en la Tabla 3-1 una recopilación de cómo sería el diseño de cada tipo de tanque para cada código de acuerdo a su forma, material y apoyo.

Tabla 3-1 Diseño tanques de acuerdo a cada norma

<b>CÓDIGO/NORMA</b>	<b>SISTEMA DE APOYO DEL TANQUE</b>	<b>MATERIAL DEL TANQUE</b>
International Building Code IBC 2015	Tanque sobre terreno Tanques elevados	Concreto y Acero
American Concrete Institute (ACI 350.3-06)	Tanque sobre terreno o enterrados	Concreto
American Water Works Association (AWWA D-110)	Tanque sobre terreno	Acero
New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE)	Tanque sobre terreno Tanques elevados	Concreto y Acero
American Concrete Institute (ACI 371R-16)	Tanque elevado	Concreto
American Water Works Association (AWWA D-100)	Tanque elevado	Acero
Eurocode 8	Tanque elevado	Concreto y Acero
American Petroleum Institute (API 650)	Tanque sobre terreno	Acero
Gujarat State Disaster Management Authority (GSDMA)	Tanque sobre terreno Tanques elevados	Concreto y Acero

Fuente: Elaboración propia

Se establece en los diferentes códigos y normas que para tanques apoyados sobre terreno o que estén enterrados, se debe considerar las fuerzas convectivas e impulsivas en su diseño. Para tanques elevados, el código AWWA D-100 no recomienda considerar las fuerzas convectivas, sino sólo las impulsivas. Mientras

que el Eurocode 8 and NZSEE recomiendan considerar las dos fuerzas en el diseño de los tanques elevados.

Para todos los códigos se recomienda tomar un amortiguamiento del 5% para las fuerzas impulsivas y un amortiguamiento del 0.5% para las fuerzas convectivas (Jaiswal et al 2007).

De acuerdo a una serie de análisis en el comportamiento de los sistemas estructurales, tanques vs aquellos edificios, se establece que los tanques tienen poca capacidad de absorción de energía y baja ductilidad; por lo que el diseño estructural de los tanques se realiza para fuerzas sísmicas más altas comparadas con las de un edificio (Jaiswal et al 2007).

Para el diseño de los tanques se deben considerar tanto las fuerzas estáticas como las fuerzas dinámicas. Estas fuerzas son listadas a continuación:

- Fuerzas de inercia debido al peso de los muros ( $P_w$ ), y el peso de la cubierta ( $P_r$ )
- Fuerza impulsiva hidrodinámica ( $P_i$ ) del líquido contenido.
- Fuerza convectiva hidrodinámica ( $P_c$ ) del líquido contenido.
- Fuerza horizontal producida por la aceleración vertical del fluido ( $P_v$ ).
- Fuerza dinámica del suelo contra la parte enterrada de la estructura ( $P_{eg}$ ).  
Si el tanque se encuentra enterrado o semienterrado.

La combinación de estas fuerzas o presiones se debe realizar de acuerdo con la siguiente fórmula dado en el código ACI 350.3-06, la cual es combinada por el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados,

$$V = \sqrt{(P_i + P_w + P_r)^2 + P_c^2 + P_{eg}^2 + P_v^2} \quad (\text{Ec. 4-5. ACI 350.3-06})$$

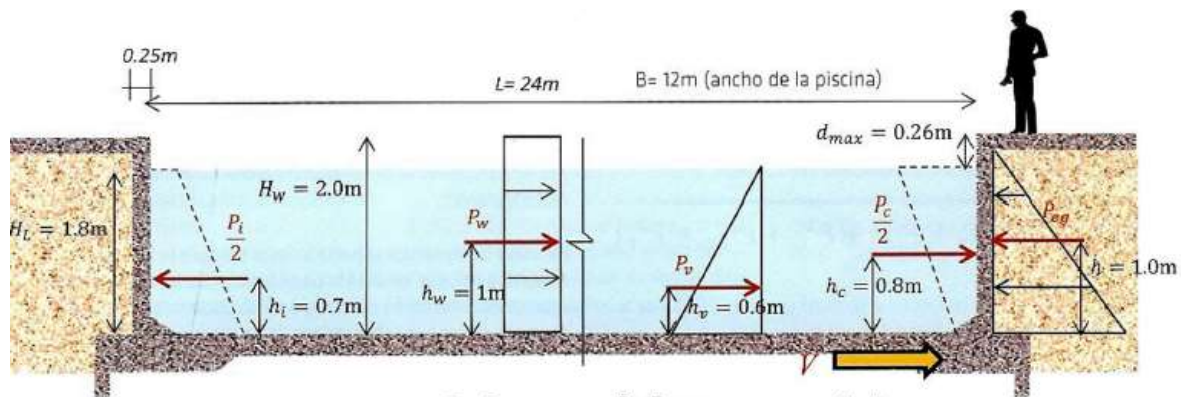
Este método fue desarrollado por E.Rosenblueth en su tesis doctoral (Rosenblueth, 1951); el método transforma los grados de libertad desacoplados en grados de libertad de la estructura independientes. Debe emplearse sobre los

resultados máximos modales y la transformación es lineal. Si el sismo es suficientemente largo puede decirse que la respuesta lineal está hacia la mitad del tiempo del lado positivo y la otra mitad del lado negativo.

Si existe la posibilidad de que ocurra acoplamiento modal, se debe utilizar el método de la combinación cuadrática completa. Este método fue planteado por primera vez por Rosenblueth (Rosenblueth y Elorduy, 1969) y posteriormente por Der Kiureghian (Der Kiureghian, 1981), y establece el caso en los cuales existe interacción modal (García 2000).

A continuación, en la Figura 3-2, se presenta un esquema de la aplicación de las fuerzas en un tanque enterrado.

Figura 3-2 Fuerzas actuantes en tanques de almacenamiento



Fuente: (Sika. 2016)

### Nomenclatura

$P_i$  = Fuerza Impulsiva

$P_v$  = Fuerza hidrodinámica por aceleración vertical

$P_w$  = Fuerza inercia muros

$P_c$  = Fuerza Convectiva

$P_{eg}$  = Fuerza por empuje dinámico del suelo

Una parte del líquido produce una ola que empuja las paredes de la estructura en su parte superior, y es conocida como la fuerza convectiva. Las presiones

generadas por esta fuerza van aumentando de abajo hacia arriba, formando un trapecio invertido.

La masa del líquido de la parte inferior produce la fuerza impulsiva, que empuja la parte inferior de los muros de la estructura como respuesta al movimiento sísmico. Esta fuerza en términos de magnitud es más grande que la fuerza convectiva y las presiones generadas por esta van aumentando a medida que se profundiza (Sika. 2016).

La componente sísmica vertical debe tenerse en cuenta de acuerdo con lo prescrito en cada documento de referencia que se utilice. Si los documentos de referencia no contienen requisitos de los efectos sísmicos verticales, las fuerzas de diseño deben calcularse de la siguiente manera:

El incremento de las presiones hidrostáticas causadas por la excitación sísmica vertical del líquido, se toma en cuenta como un aumento del peso unitario del líquido, calculando la fuerza vertical de la siguiente manera:  $0,5AaFa Y_L$ .

Para tanques circulares, las fuerzas anulares por altura unitaria,  $N_h$ , a una altura  $Y$ , de la base en la pared del tanque, causada por la excitación sísmica vertical, debe calcularse de acuerdo a la siguiente ecuación,

$$N_h = 0,5AaFaY_L(H_L - Y) \left(\frac{D_i}{2}\right) \text{ (Ec. 1)}$$

Siendo  $D_i$  el diámetro interno del tanque circular y  $H_L$  la altura máxima del fluido contenido (AIS 180-13. 2013).

Para el código ACI 350.3-06 el cálculo de la fuerza vertical se realiza de la siguiente manera:

$$P_{vy} = \ddot{U}_v * qhy \text{ (Ec. 2)}$$

Siendo,

$$\ddot{U}_v = Ct * I * \left[\frac{b}{R_i}\right] \geq 0.2S_{DS} \text{ (Ec. 3)}$$

$$qhy = \frac{\gamma_f * HL^2}{2} \text{ (Ec. 4)}$$

### Nomenclatura

Ct = Coeficiente sísmico

b = Relación entre la aceleración vertical y horizontal

H<sub>L</sub> = Nivel del fluido

S<sub>DS</sub> = Aceleración para amortiguamientos del 5%.

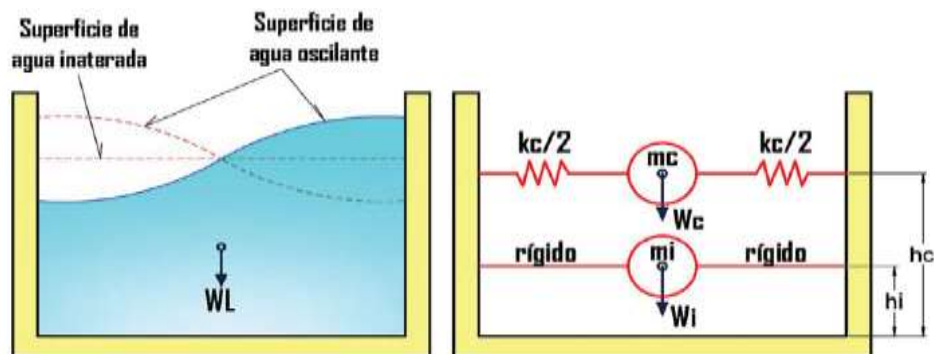
I = Coeficiente de importancia

R<sub>i</sub> = Factor de modificación de la componente impulsiva.

γ<sub>f</sub> = Densidad del fluido

A continuación, en la Figura 3-3 y Figura 3-4 se presenta una representación de lo mencionado anteriormente.

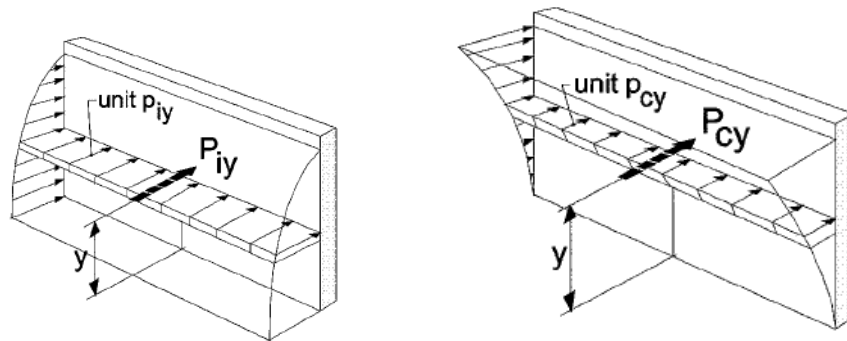
Figura 3-3 Sistema dinámico equivalente de los fuerzas convectivas e impulsivas



Fuente: (Orihuela J & Sánchez N. 2016)



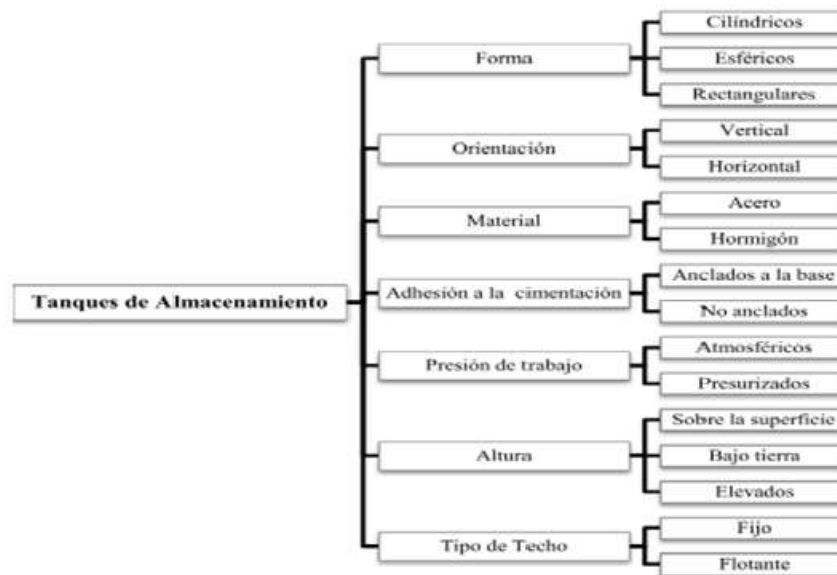
Figura 3-4 Fuerza impulsiva y convectiva



Fuente: (ACI. 2006)

Los tanques presentan diferentes configuraciones de acuerdo a su uso, como se presenta a continuación en la Figura 3-5.

Figura 3-5 Tipologías de tanques



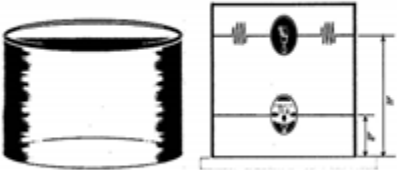
Fuente: (Pupiliars 2013)

Un tanque de almacenamiento, al verse sometido a movimientos sísmicos, experimentan diferentes fallas en su estructura por causa de las solicitaciones y esfuerzos que se generan dentro de la estructura. A continuación, se describen algunos de los daños registrados debido a las acciones sísmicas presentes en los tanques. (Cardona et al. 2012)

- Pandeo en la parte inferior de los muros del tanque, debido a la compresión axial y el momento de volcamiento por las fuerzas impulsivas.
- Daños en la parte superior de los muros del tanque, debido a los efectos del oleaje del líquido, cuando el tanque es de forma rectangular y su longitud no es muy grande.
- Daños en la cubierta o losa superior, debido a que no se dispone de un borde libre entre el fluido y la cubierta, provocando un golpeteo por la ola que se produce en el movimiento.
- Daños en las tuberías y otros accesorios que se vinculan rígidamente a las paredes de los tanques.
- Daños en la fundación del tanque.

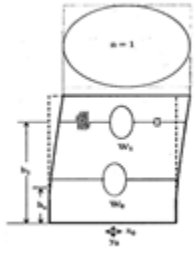
Para los tanques, existen varios métodos de análisis, dependiendo si se realiza un análisis dinámico o estático. El método dinámico y de nuestro interés, cuenta a su vez con varios métodos de cálculo, todos ellos basados en el modelo de Housner, como lo son: (Núñez. 2014):

Figura 3-6 Método Analítico Simple

METODO	DESCRIPCIÓN	FIGURA
<b>Analítico Simple</b>	Es un método equivalente al desarrollado por Housner y es el más simplificado, donde se toman en cuenta una masa equivalente $W_1$ y un resorte con una rigidez $K_1$ y amortiguamiento $C_1$ , que corresponden a la parte del oleaje, y una masa rígida $W_0$ en la zona inferior, como se muestra en la figura.	

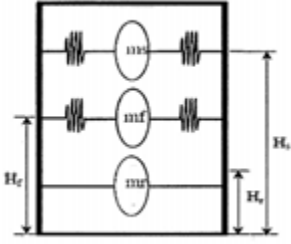
Fuente: (Hernandez et al 2018)

Figura 3-7 Método Modificado

<p><b>Modificado</b></p>	<p>Este método, además de considerar los efectos hidrodinámicos del tanque producidos por la suma de las fuerzas convectivas e impulsivas, tiene en cuenta la deformación elástica del tanque. En este caso la porción de masa correspondiente <math>W_i</math> actúa como un sólido conectado flexiblemente a las paredes del tanque, mientras que la masa restante <math>W_0</math> se considera conectada directamente a las paredes del tanque. En la figura se muestra el esquema del método.</p>	
--------------------------	--	---

Fuente: (Hernandez et al 2018)

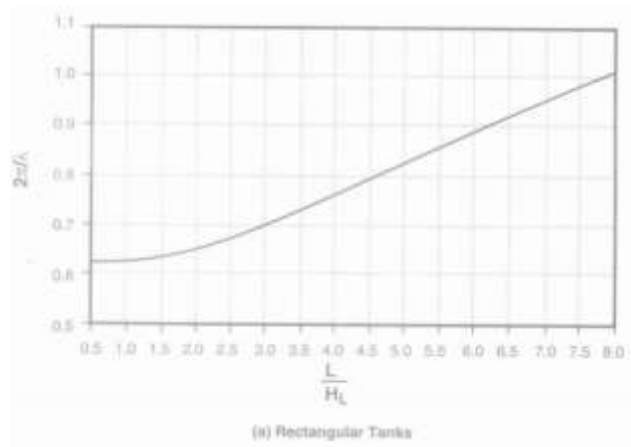
Figura 3-8 Método ASCE

<p><b>Método ASCE (Método propuesto por M. A. HAROUN)</b></p>	<p>Al igual que en los anteriores métodos, este método está basado en el modelo propuesto por Housner, pero en este caso se consideran dos modos de respuesta del líquido contenido en el tanque, el modo convectivo y el modo impulsivo. Este método, a diferencia de los anteriores, tiene en cuenta 3 masas para su análisis: la masa convectiva, la masa impulsiva y la masa rígida, como se muestra en la figura.</p>	
---	--	--

Fuente: (Hernandez et al 2018)

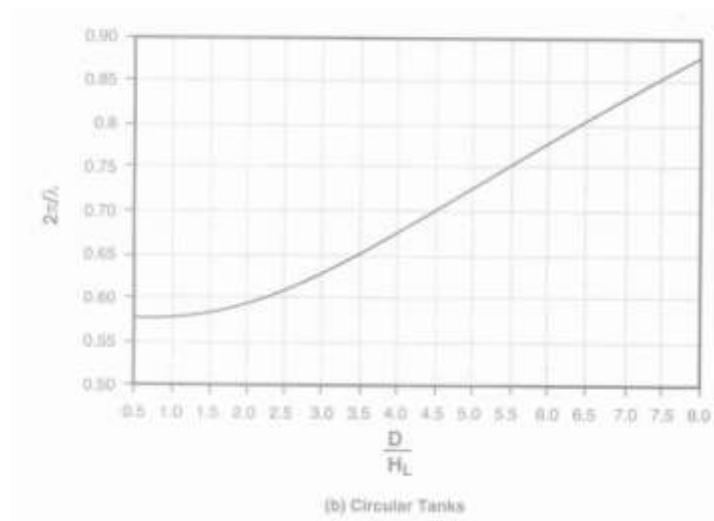
De acuerdo a la relación de la longitud interior y la altura del fluido ( $L/H_L$ ) para tanques rectangulares y la relación entre el diámetro interno y la altura del fluido ( $D/H_L$ ) para tanques circulares, se puede encontrar de manera rápida el factor ( $2\pi/\lambda$ ) para el cálculo del periodo fundamental de las fuerza convectivas, como se ilustra en la Figura 3-9 y Figura 3-10.

Figura 3-9 Factor  $(2\pi/\lambda)$  para el periodo convectivo de tanques rectangulares



Fuente: (Munshi, J.A 2002) y (ACI. 2006)

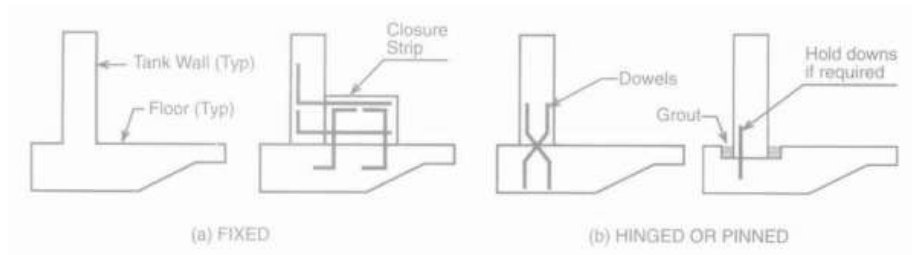
Figura 3-10 Factor  $(2\pi/\lambda)$  para el periodo convectivo de tanques circulares



Fuente: (Munshi, J.A 2002) y (ACI. 2006)

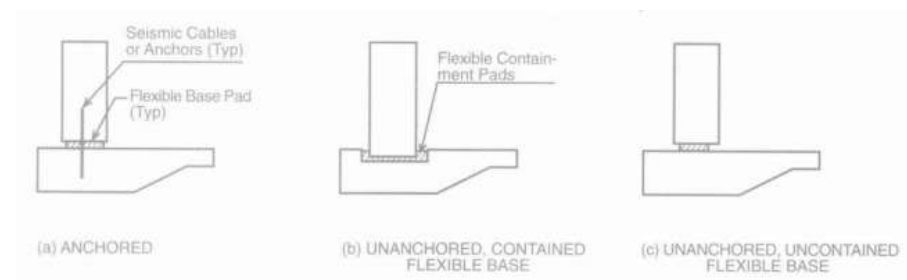
Para el diseño de los tanques también se debe tener en cuenta la conexión entre los muros y la losa de cimentación, encontrando diferentes tipos de conexiones los cuales pueden ser rígidas o flexibles como se ilustra a continuación en la Figura 3-11 y Figura 3-12.

Figura 3-11 Conexiones rígidas



Fuente: (Munshi, J.A 2002) y (ACI. 2006)

Figura 3-12 Conexiones flexibles



Fuente: (Munshi, J.A 2002) y (ACI. 2006)

Para el análisis sísmico de los tanques ubicados en edificios, los cuales tienen la función de suministrar agua a los residentes o que hacen parte del sistema contra incendios; se debe considerar los siguientes casos:

- Caso A

Caso en el cual la masa del tanque (Incluido la del fluido) sea menor del 25% de la suma de la masa del tanque y la edificación. Las fuerzas sísmicas de diseño del tanque, deben determinarse de acuerdo con lo prescrito en el capítulo A.9 – Elementos no estructurales del reglamento NSR-10, tomando los valores allí indicados para los parámetros  $R_p$  y  $a_p$ .

Se debe realizar una comparación entre las solicitaciones dadas por las fuerzas sísmicas calculadas con el capítulo A.9 del reglamento NSR-10 y las solicitaciones dadas por el cálculo de las fuerzas impulsivas y convectivas del código ACI 350.3-06, con el objetivo de hallar los máximos valores para el cálculo del anclaje del tanque a la edificación.

Para las fuerzas sísmicas de diseño de la edificación, se deben calcular de acuerdo con los requisitos del capítulo A.3 – Requisitos generales de diseño sismo resistente del reglamento NSR-10.

Para el cálculo de la masa total de la estructura, se debe incluir la masa del tanque.

- Caso B

Caso en el cual la masa del tanque es igual o mayor al 25% de la suma de la masa del tanque y la masa del edificio; se debe realizar un análisis en el cual se combinen las propiedades estructurales de ambas, para determinar las fuerzas sísmicas de diseño, de acuerdo con lo siguiente:

- Caso B.1

Cuando el periodo fundamental,  $T$ , del tanque, el cual se analiza como empotrado en su base es menor de 0,06 s, se debe considerar como un elemento rígido; por lo tanto, la edificación debe diseñarse de acuerdo con los requisitos del capítulo A.3 - Requisitos generales de diseño sismo resistente del reglamento NSR-10, y el valor básico del factor de disipación de energía,  $R_o$ , se puede tomar de acuerdo con el sistema de la edificación prescritos en el capítulo A.3., la masa total,  $M$ , debe ser la suma del tanque y la edificación.

El tanque y el anclaje de sus accesorios deben diseñarse por el procedimiento y fuerzas de diseño definidas en el capítulo A.9 - Elementos no estructurales del reglamento NSR-10; sin embargo, debe tomarse para el  $R_p$ ; el valor de  $R_o$  dado en la Tabla 3-2; para el valor de  $a_p$  debe tomarse como la unidad (1,0).

Se debe realiza el mismo procedimiento descrito en el caso 1, donde se debe evaluar las solicitaciones dadas por el procedimiento dado por el capítulo A.9., descrito anteriormente y las solicitaciones dadas por las fuerzas convectivas e impulsivas del código ACI 350.3-06.

- Caso B.2

Cuando el periodo fundamental, T, del tanque el cual se analiza como empotrado en su base, es igual o mayor de 0,06 s, se debe considerar como parte de la edificación. Se permite que el valor de Ro a utilizar para el sistema, el cual incluye la edificación y el tanque, sea el menor entre el valor dado por el capítulo A.3 para el sistema de la edificación y el Ro dado para el tanque que se muestra en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Valores de Ro para tanques

Tipo de estructura diferente a edificaciones	Requisitos de detallado	Ro	Ωo	Máxima altura permitida hn (m)		
				Alta	Intermedia	Baja
<b>4. Tanques de fondo plano apoyados sobre el terreno</b>						
<b>a. De acero o de plástico reforzado con fibras:</b>						
I. Anclados mecánicamente	Capítulo 7	3.0	2.0	Sin limite	Sin limite	Sin limite
II. Auto anclados	Capítulo 7	2.5	2.0	Sin limite	Sin limite	Sin limite
<b>b. De concreto reforzado o preesforzado:</b>						
I. Con base reforzada no deslizante	Capítulo 7	2.0	2.0	Sin limite	Sin limite	Sin limite
II. Anclados sobre base flexible	Capítulo 7	3.0	2.0	Sin limite	Sin limite	Sin limite
III. Base flexible no anclada ni restringida	Capítulo 7	1.5	1.5	Sin limite	Sin limite	Sin limite
c. Todos los otros casos		1.5	1.5	Sin limite	Sin limite	Sin limite

Fuente: (AIS 180-13. 2013)

### 3.1. Análisis del cambio de frontera en los muros del tanque

De acuerdo con lo descrito anteriormente donde se exponía que, para el cálculo del periodo de las fuerzas impulsivas en tanques rectangulares, se tiene en cuenta la rigidez de un sistema en voladizo, se presenta a continuación la ecuación dada por el código ACI 350.3-06 para un sistema en voladizo:

$$k = \frac{Ec}{4x10^3} \left(\frac{tw}{h}\right)^3 \quad (Ec. 5)$$

Donde Ec sería el módulo de elasticidad del concreto, tw, el espesor del muro y, h, la altura de la aplicación de la fuerza.

Ahora procedemos a plantear la hipótesis de un cambio de frontera en los tanques, donde se tendría un muro empotrado en su base y articulado en la parte superior, cuya rigidez sería la siguiente:

$$k = \frac{64Ec}{7 \times 10^3} \left(\frac{tw}{h}\right)^3 \quad (Ec. 6)$$

Se verificó el cambio de rigidez de las fuerzas impulsivas por medio de una hoja de programación, donde se tiene el método descrito en el código ACI 350.3-06 para tanques rectangulares.

El resultado que arrojó en el cambio de rigidez fue que se obtiene un periodo más pequeño que el dado por la ecuación anterior, proporcionando que el tanque sea más rígido.

Para los tanques de almacenamiento, la ductilidad del sistema y la capacidad de disipación de energía bajo cargas, no pueden obtenerse por medio de deformaciones inelásticas de tal magnitud que afecte la funcionalidad de la estructura. La degradación de rigidez o la disipación de energía debe obtenerse por medio de micro-fisuras limitadas o por medio de un sistema de resistencia sísmica que disipe energía sin que se presente daño (AIS 180-13. 2013).

Para el control de fisuras, se tiene como opción las microfibras dentro de la mezcla, las cuales limitan la aparición de fisuras en las paredes.

#### **4. Caso ejemplo – Aplicación del código ACI 350.3-06 en el cálculo de las fuerzas convectivas e impulsivas en tanques de almacenamiento**

##### **4.1. Caso 1 - Comparación entre el análisis de las presiones calculadas por medio del código ACI 350.3-06 y un análisis dinámico cronológico (Time History)**

A continuación se presenta una comparación entre el diseño de un tanque de almacenamiento; teniendo en cuenta los criterios del código ACI 350.3-06, para el cálculo de las fuerzas convectivas e impulsivas y un diseño por medio de un análisis dinámico cronológico (Time History). Teniendo en cuenta que para los dos

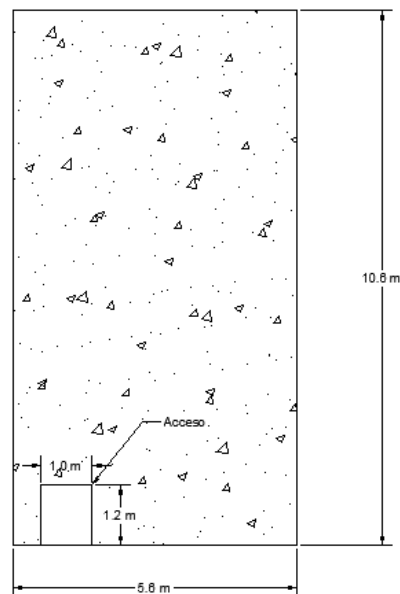


diseños se tomarán los mismos parámetros sísmicos, la misma geometría del tanque, al igual que sus materiales y el mismo sistema de cimentación.

#### 4.1.1. Análisis - Código ACI 350.3-06

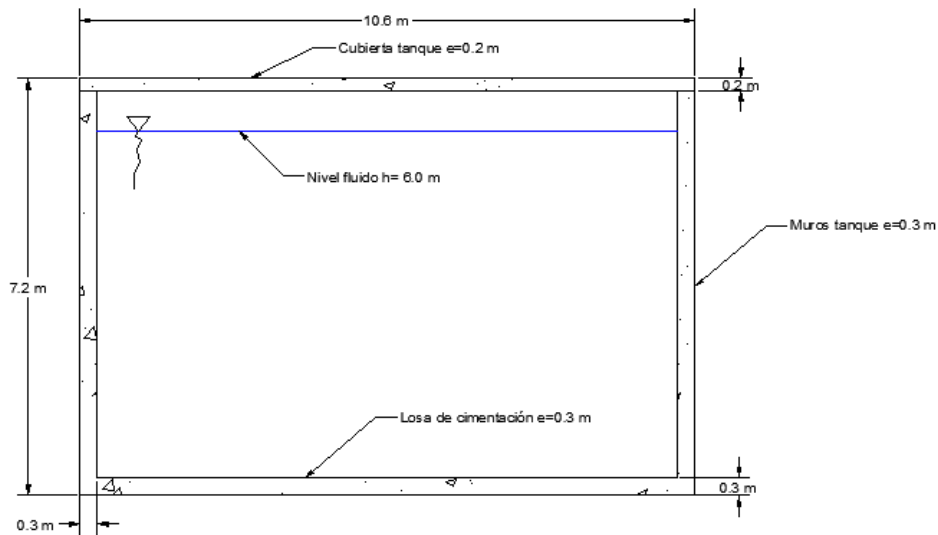
A continuación, se presenta el cálculo de las fuerzas convectivas e impulsivas en un tanque de almacenamiento de agua potable por medio del código ACI350.3-06. El tanque es rectangular de concreto reforzado; sus dimensiones en planta son de 10.60x5.60 m, las cubiertas tiene un espesor de 0.20 m; su losa de cimentación y sus muros tienen un espesor de 0.30 m. los muros cuentan con una altura de 6.70 m y el nivel del agua es de 6.0 m y su borde libre es de 0.70 m. La altura total del tanque es de 7.20 m. A continuación se presenta gráficamente lo descrito anteriormente.

Figura 4.1.1-1 Planta – Tanque



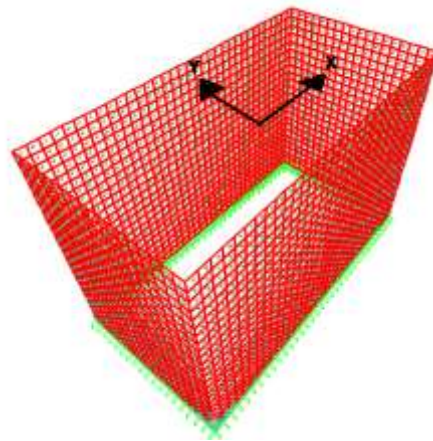
PLANTA - TANQUE

Figura 4.1.1-2 Elevación – Tanque



## ELEVACIÓN - TANQUE

Figura 4.1.1-3 Ejes del tanque



El tanque hace parte del sistema de abastecimiento del acueducto y está ubicado en la ciudad de Medellín – Colombia. (El tipo de suelo aquí presentado es hipotético).

Se procede a establecer los parámetros necesarios para el cálculo de los espectros de diseño para el cálculo de las fuerzas convectivas e impulsivas de acuerdo con la ciudad y el tipo de suelo del lugar. A continuación, en la Tabla

4.1.1-1 se presenta los parámetros requeridos para el cálculo de los espectros de respuesta. Los parámetros  $S_1$  y  $S_s$  también pueden ser calculados de acuerdo a la formulas (Ec. B.3-1, AIS 180-13) y (Ec. B.3-2, AIS 180-13) descritas anteriormente o por medio de los mapas del territorio nacional mostrados en la Figura 3-1.

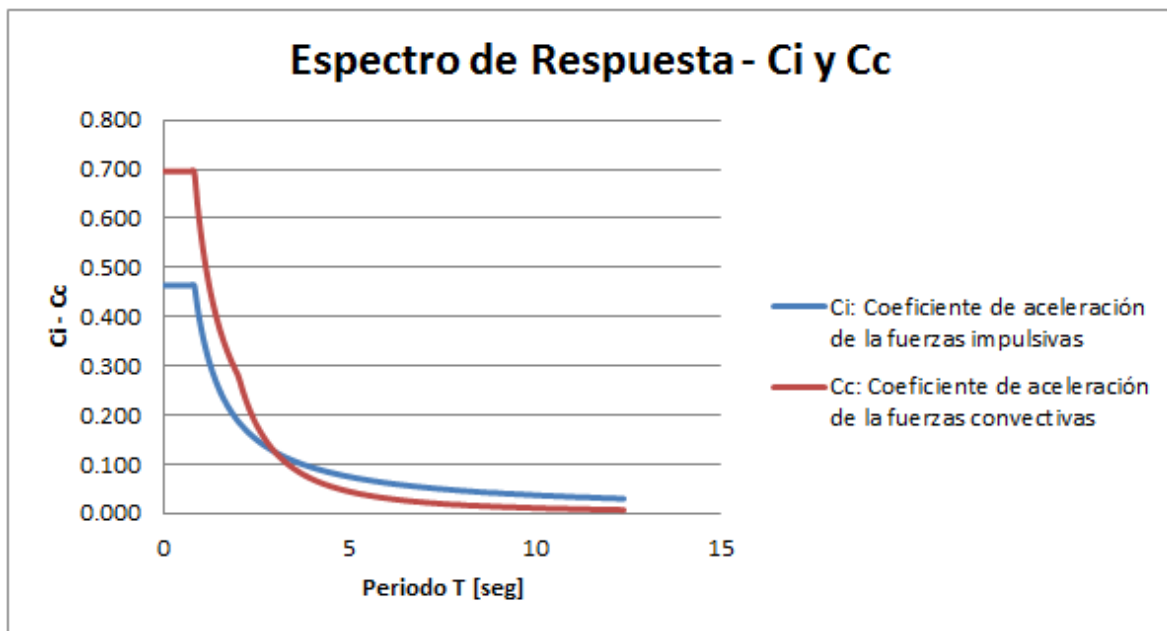
Tabla 4.1.1-1 Parámetros para el cálculo de los espectros

Configuración estructura	Ubicación	$S_1$	$S_s$	Tipo de Suelo	$F_a$	$F_v$
Tanque rectangular	Medellín	0.4	0.6	C	1.16	1.4

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo presentado anteriormente en la Tabla 4.1.1-1 se calcula los espectros de respuesta correspondientes a las fuerzas convectivas e impulsivas como se muestra en la Figura 4.1.1-4.

Figura 4.1.1-4 Espectros de respuesta de las fuerzas convectiva e impulsivas



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Figura 4.1.1-4 que el espectro convectivo presenta mayores aceleraciones que el espectro impulsivo debido al oleaje de las fuerzas.

Se asumió un coeficiente de importancia de 1.50, el cual hace referencia al grupo de uso III (Estructuras de importancia alta), por ser parte de un sistema de abastecimiento.

La resistencia a la compresión ( $f'c$ ) de los elementos que conforman el tanque es de 28 MPa a los 28 días.

Teniendo en cuenta la geometría del tanque y su capacidad de almacenamiento, se determina el porcentaje y la masa correspondiente a las fuerzas convectivas e impulsivas. A continuación, se presenta en la Tabla 4.1.1-2 los valores calculados:

Tabla 4.1.1-2 Porcentaje y masa de las fuerzas convectivas e impulsivas – Eje X

<b>Porcentaje fuerza convectiva [%]</b>	<b>Porcentaje fuerza impulsiva [%]</b>	<b>Masa fuerza convectiva [kN]</b>	<b>Masa fuerza impulsiva [kN]</b>
42,10	62,00	1261,78	1858,96

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1.1-3 Porcentaje y masa de las fuerzas convectivas e impulsivas – Eje Y

<b>Porcentaje fuerza Convectiva [%]</b>	<b>Porcentaje fuerza Impulsiva [%]</b>	<b>Masa fuerza Convectiva [kN]</b>	<b>Masa fuerza Impulsiva [kN]</b>
22,85	85,60	659,30	2568,80

Fuente: Elaboración propia

Se procede al cálculo del periodo y el coeficiente de aceleración para cada fuerza por medio de los espectros presentados en la Figura 4.1.1-4. Los valores calculados se presentan en la Tabla 4.1.1-4.

Tabla 4.1.1-4 Periodos y coeficientes de aceleración convectivas e impulsivas – Eje X

Periodo F. Convectivo [seg]	Periodo F. Impulsivo [seg]	Coficiente Convectivo [Cc]	Coficiente Impulsivo [Ci]
3,76	0,331	0,0081	0,464

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1.1-5 Periodos y coeficientes de aceleración convectivas e impulsivas – Eje Y

Periodo F. Convectivo [seg]	Periodo F. Impulsivo [seg]	Coficiente Convectivo [Cc]	Coficiente Impulsivo [Ci]
2.67	0,339	0,165	0,46

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Tabla 4.1.1-4 y Tabla 4.1.1-5 que las fuerzas convectivas presentan un periodo mayor que el de las fuerzas impulsivas, esto se debe a que las fuerzas impulsivas se aceleran con los muros del tanque, por lo que su rigidez es mayor y da como resultado un periodo menor.

Para determinar los factores de modificación  $R_i$  y  $R_c$ , se supondrá que el tanque es superficial y la unión entre los muros y la losa inferior es flexible.

Tabla 4.1.1-6 Factores de modificación  $R_i$  y  $R_c$ 

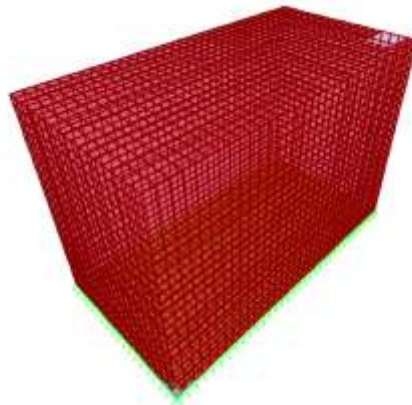
$R_i$	$R_c$
2	1

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos presentados anteriormente, se procede al cálculo de las presiones sobre los muros, teniendo en cuenta también la fuerza vertical que se presenta en el tanque debido al sismo y la aceleración del muro.

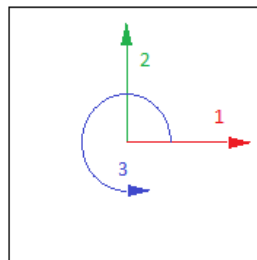
Para el cálculo de las solicitaciones en los muros, se realizó un modelo en el programa SAP® , el tanque se modeló con elementos tipo “Shell” y se le aplicaron las presiones calculadas.

Figura 4.1.1-5 Modelo



La orientación de los ejes locales de los elementos se presenta a continuación:

Figura 4.1.1-6 Ejes locales



Para la interpretación debe tenerse en cuenta la siguiente notación:

Momento M11: Momento mayorado alrededor del eje local 2 del elemento shell.

Momento M22: Momento mayorado alrededor del eje local 1 del elemento shell.

Cortante V13: Cortante mayorado en las caras 1 del elemento shell, en dirección del eje local 3.

Cortante V23: Cortante mayorado en las caras 2 del elemento shell, en dirección del eje local 3.

Cortante V Max: Cortante máximo mayorado del elemento shell, calculado como:

$$VMax. \sqrt{V13^2 + V23^2}$$

Tabla 4.1.1-7 Momento mayorados

Momentos Mayorados				
Elemento	Solicitaciones		Resistencia	Unidad
Muros (e = 0,30 m)	M11	Máx	15.05	kN/m
	M11	Min	12.44	kN/m
	M22	Máx	16.68	kN/m
	M22	Min	15.46	kN/m

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1.1-8 Cortantes máximas

Cortante Máx			
Elemento	Solicitudión	Resistencia	Unidad
Muros (e = 0,30 m)	V <sub>máx</sub>	10.67	kN/m

Fuente: Elaboración propia

## 4.1.2. Análisis Dinámico Cronológico (Time History)

Ahora procedemos hacer el análisis sísmico del tanque por medio de un análisis dinámico cronológico (Time History) con el fin de comparar la respuesta del tanque desarrollado por medio del método simplificado del ACI 350.3-06. Para este análisis, se tomaron dos registros sísmicos reales, presentados a continuación:

### Sismo de Armenia

El sismo de Armenia ocurrió el 25 de enero de 1999 en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia a las 13:19 hora local con epicentro en el Departamento del Quindío, el cual alcanzó una magnitud de 6.2 en la Escala de Richter (MS). La gran pérdida de vidas humanas (2.000 muertos) y las graves consecuencias económicas y sociales hacen que este sismo sea considerado como uno de los más desastrosos para la historia sísmica de Colombia y en especial para los departamentos de Quindío, Caldas y Risaralda. En total fueron detectadas 14 réplicas del terremoto; la primera ocurrida a las 17:40 de magnitud 5,4 en la escala de Richter, otras réplicas que causaron pánico entre los habitantes ocurrieron el día 29 de enero a las 23:33 hora local, de magnitud 4,2 (MS) y el día 31 de enero a las 03:03 hora local, de magnitud 3,5 (MS).

A continuación, se presenta uno de los registros sismológicos del terremoto de Armenia con el que se va a realizar el análisis no lineal para evaluar el desempeño sísmico de la estructura, el cual cuenta con 3983 registros cada 0.005 segundos en la dirección X y 3597 registros cada 0.005 segundos en la dirección Y; cabe resaltar que los análisis matemáticos se hicieron tomando 4000 registros en la dirección X y 3600 registros para la dirección Y, para un total de 20 y 18 segundos, respectivamente.

Figura 4.1.2-1 Acelerograma Armenia dirección X

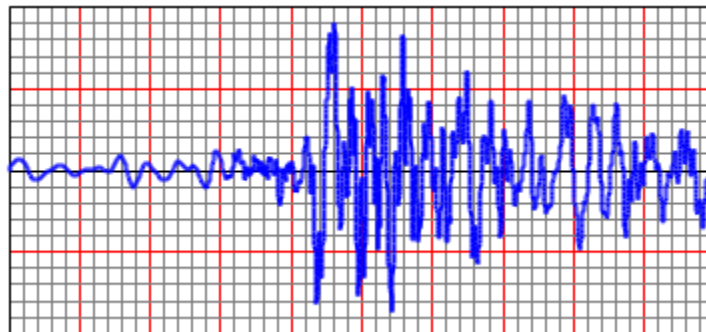
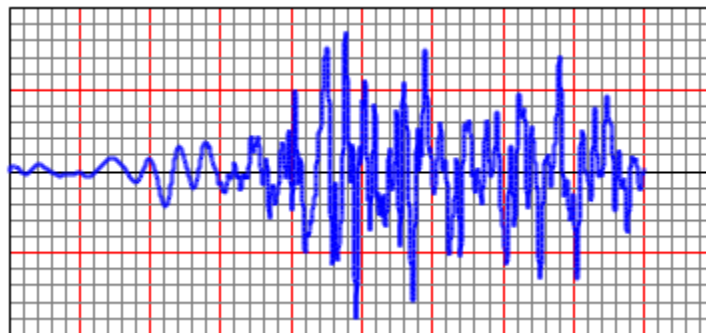


Figura 4.1.2-2 Acelerograma Armenia dirección Y



## Sismo de San Fernando

El sismo de San Fernando se produjo el 9 de febrero de 1971 a las 06:00 hora local, en las estribaciones de las montañas de San Gabriel en el sur de California, Estados Unidos, con epicentro a 5 millas al norte del Valle de San Fernando. El terremoto tuvo una magnitud de 6,5 en la escala de Richter (MS) y una duración aproximada de 12 segundos. Los daños fueron severos a nivel local en el norte del



Valle de San Fernando, lo que provocó agrietamiento superficial al sur del epicentro en las montañas, así como los entornos urbanos a lo largo de las calles y barrios, además de levantamiento y otros efectos que perjudicaron viviendas y empresas, dejando más de 50 muertos y más de 200 personas heridas.

Se registraron 200 réplicas de magnitud 3.0 (MS) o mayor y cuatro réplicas de magnitud 5.0 (MS) o mayor. Durante la primera hora de actividad, las réplicas más grandes fueron eclipsando los eventos más pequeños.

El registro sismológico del terremoto de San Fernando utilizado para realizar el análisis no lineal, cuenta con 6018 registros cada 0.01 segundos en ambas direcciones ortogonales; cabe resaltar que los análisis matemáticos se hicieron tomando en ambas direcciones ortogonales 6020 registros para un total de 60.2 segundos.

Figura 4.1.2-3 Acelerograma Armenia dirección X

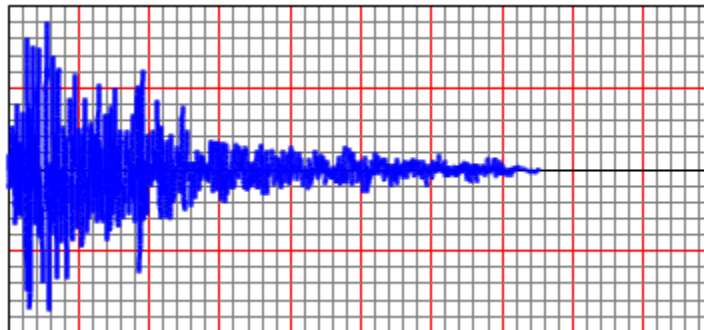
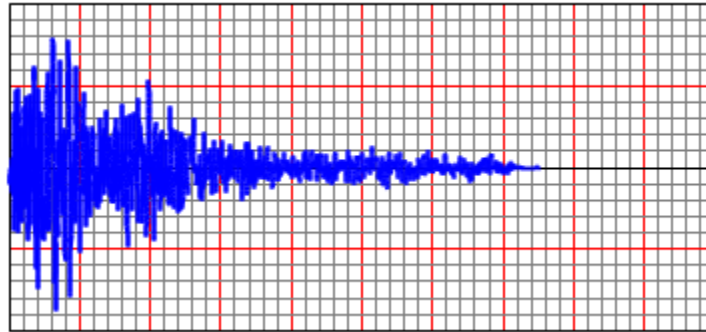


Figura 4.1.2-4 Acelerograma Armenia dirección Y



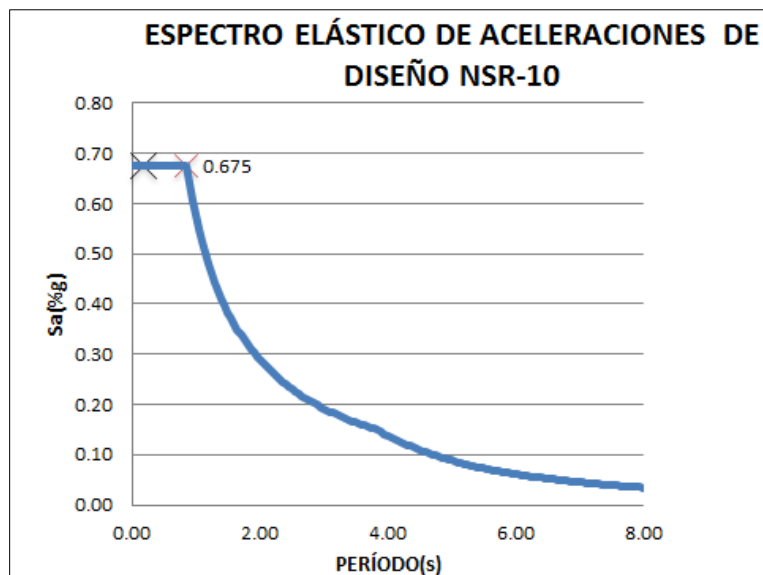
Se procede a calcular el espectro de respuesta dado por el reglamento NSR-10 [1] de acuerdo a los parámetros mostrados en la siguiente Tabla 4.1.2-1.

Tabla 4.1.2-1 Factores para el cálculo del espectro

Configuración estructura	Ubicación	Aa	Av	Tipo de Suelo	Fa	Fv
Tanque rectangular	Medellín	0.15	0.2	C	1.2	1.6

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1.2-5 Espectro de aceleración – NSR-10



Cabe aclarar que el espectro mostrado anteriormente en la Figura 4.1.2-5 es compatible con los espectros mostrados en la Figura 4.1.1-4, debido a que los parámetros tomados para el cálculo de estos, fueron los mismo; la variación radica

en que los espectros mostrados en la Figura 4.1.1-4 están amplificados de acuerdo a cada fuerza, ya sea convectiva e impulsiva.

Por medio del espectro del reglamento NSR-10 mostrado en la Figura 4.1.2-5 y los acelerogramas del sismo de Armenia y San Fernando, se procede a realizar el análisis dinámico cronológico (Time History), donde las aceleraciones de estos registros acelerográficos se ajustarán al espectro del reglamento NSR-10.

Figura 4.1.2-6 Espectro Ajustado Armenia – NSR-10

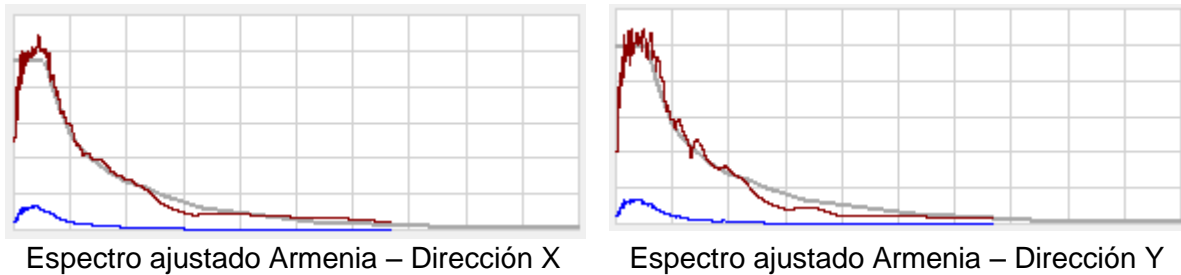
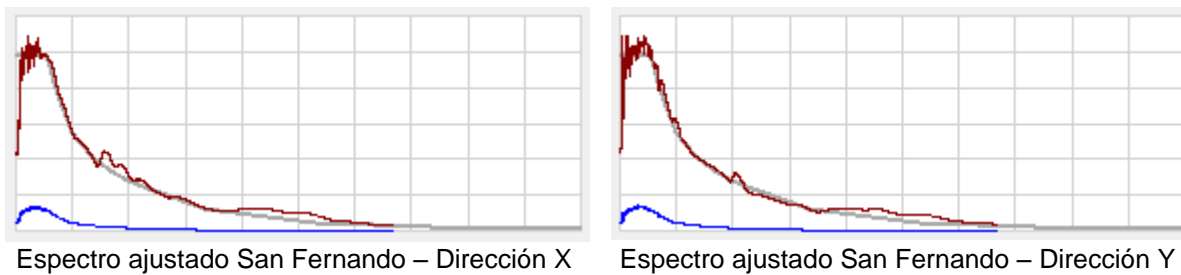


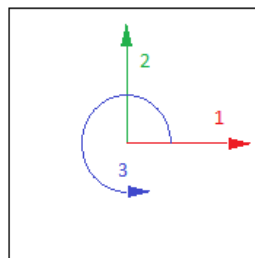
Figura 4.1.2-7 Espectro Ajustado San Fernando – NSR-10



Se procede a realizar el cálculo de las sollicitaciones en los muros, teniendo en cuenta los acelerogramas ajustados, anteriormente mostrados.

La orientación de los ejes locales de los elementos se presenta a continuación:

Figura 4.1.2-8 Ejes locales



Para la interpretación debe tenerse en cuenta la siguiente notación:

Momento M11: Momento mayorado alrededor del eje local 2 del elemento shell.

Momento M22: Momento mayorado alrededor del eje local 1 del elemento shell.

Cortante V13: Cortante mayorado en las caras 1 del elemento shell, en dirección del eje local 3.

Cortante V23: Cortante mayorado en las caras 2 del elemento shell, en dirección del eje local 3.

Cortante V Max: Cortante máximo mayorado del elemento shell, calculado como:

$$VMax. \sqrt{V13^2 + V23^2}$$

Tabla 4.1.2-2 Momento mayorados

<b>Momentos Mayorados</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Solicitaciones</b>		<b>Resistencia</b>	<b>Unidad</b>
<b>Muros (e = 0,30 m)</b>	M11	Máx	38.15	kN/m
	M11	Min	35.72	kN/m
	M22	Máx	76.62	kN/m
	M22	Min	49.21	kN/m

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1.2-3 Cortantes máximas

<b>Cortante Máx</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Solicitud</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Unidad</b>
<b>Muros (e = 0,30 m)</b>	Vmáx	16.5	kN/m

Fuente: Elaboración propia

Después de realizar los dos análisis mostrados anteriormente, uno de ellos por el código ACI 350.3-06 y el otro por medio del análisis dinámico cronológico (Time History), procedemos a realizar la comparación de los resultados.

A continuación, se presenta los desplazamientos que tendría los muros por cada método de análisis (Por motivos de poder realizar la comparación, se tomarán todos los valores en valor absoluto). La dirección de los ejes se tomará como se muestra en la Figura 4.1.1-3.

Figura 4.1.2-9 Desplazamientos eje X

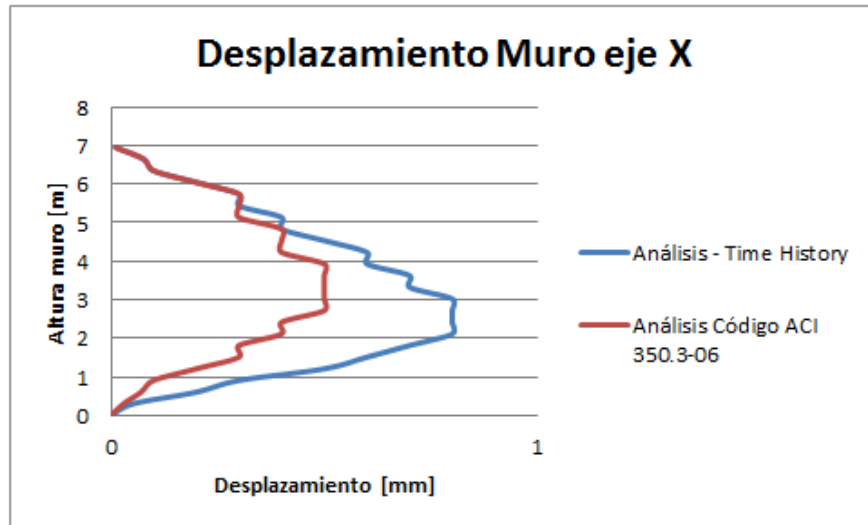
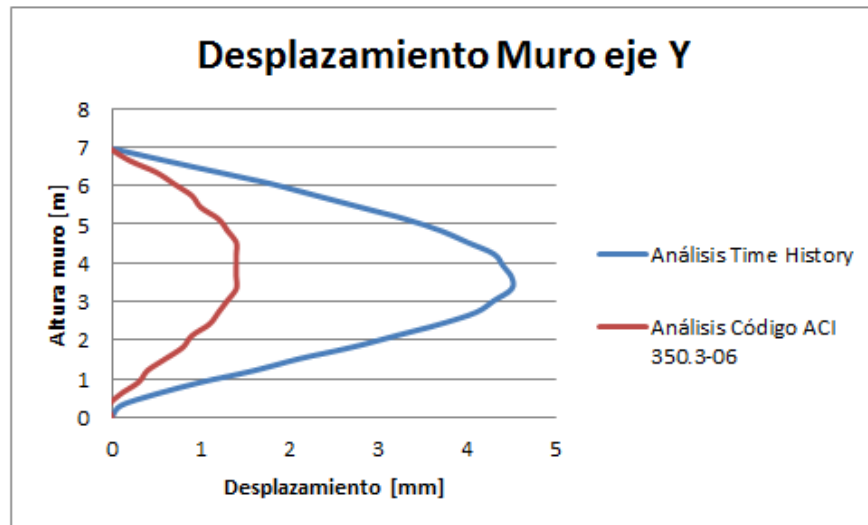


Figura 4.1.2-10 Desplazamientos eje Y



De acuerdo con los criterios dados en el código ACI 350.3-06, se establece que cuando se presenta un sismo en un tanque, el movimiento de las dos fuerzas que allí se producen, las convectivas e impulsivas son opuestas entre sí, por lo tanto, el muro se desplaza tanto en la dirección positiva como negativa. A continuación se presenta gráficamente este fenómeno por medio de los desplazamientos.

Figura 4.1.2-11 Desplazamientos eje X

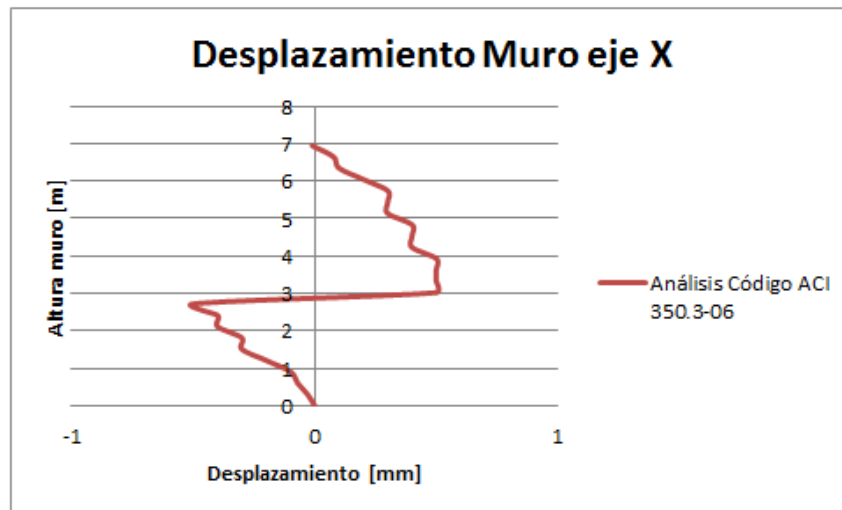
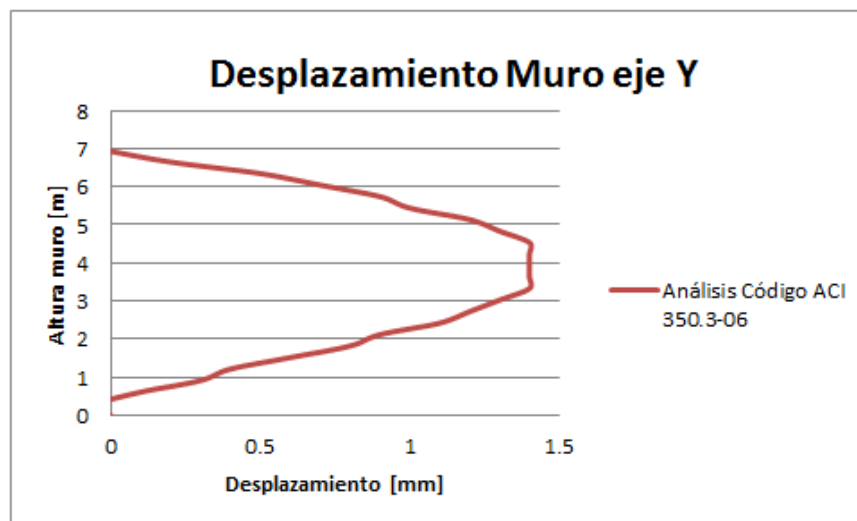


Figura 4.1.2-12 Desplazamientos eje Y



## 5. Conclusiones

- ✓ De acuerdo con los resultados obtenidos entre los dos análisis, se puede concluir que las sollicitaciones dadas por el código ACI 350.3-06, teniendo en cuenta que los parámetros sísmicos fueron extraídos de tablas, son de menor magnitud, que las que tendría la estructura con un evento sísmico. Por lo que se evidencia que los valores propios del sitio son más apropiados para un diseño; ya que si solo se tiene en cuenta para el diseño de un tanque las presiones calculadas por el código ACI 350.3-06, este diseño podría quedar insuficiente, provocando fallas de la estructura al verse sometido a un movimiento del terreno. Como se describió anteriormente, los datos para el cálculo de las presiones por medio del código ACI 350.3-06, son tomadas de tablas, que fueron calculadas con probabilidades y que fueron transformadas para poderlas aplicar en nuestro territorio, lo cual puede provocar errores en el valor exacto, por lo tanto, es recomendable realizar una microzonificación sísmica del lugar o un estudio de sitio particular y con esto, obtener los resultados reales del sitio y así, poder aplicar los criterios del código ACI 350.3-06.
- ✓ Al observar la forma de los desplazamientos que se presentan en los muros por las presiones calculadas con el código ACI 350.3-06, se puede observar un fenómeno interesante, donde se puede evidenciar que estas fuerzas convectivas e impulsivas presentan un movimiento opuesto cuando la dirección del movimiento es grande, como ocurre en el eje X del tanque, allí el muro se desplaza en la posición positiva y negativa, lo que significa que las fuerzas convectivas e impulsivas tiene igual magnitud, pero diferente dirección, en cambio en el eje Y, se puede observar que el muro solo se desplaza en una sola dirección, esto se debe a que la fuerza convectiva no tiene gran magnitud ya que no alcanza a producir un oleaje fuerte.
- ✓ Observando las gráficas mostradas en la Figura 4.1.2-11 y la Figura 4.1.2-12, se presenta una diferencia entre los valores de los

desplazamientos, debido a la presencia de las fuerzas convectivas, siendo más evidentes en el eje X que en el eje Y. Esto es debido a la longitud de formación de la ola (Fuerzas convectivas) que es mayor en el eje X que en el eje Y. Pero se presenta un resultado bastante curioso a juicio de los autores, el cual implica que, aunque las fuerzas convectivas en el eje X son mayores que en el eje Y, los desplazamientos de los muros en el eje Y, son mayores; esto radica en que las fuerzas impulsivas, la cual se generan en la parte inferior del fluido, son mayores, ocasionándole al muro mayores desplazamiento y con esto mayores sollicitaciones.

- ✓ De acuerdo con estos resultados podemos concluir que en tanques con una geometría cuadrada, las fuerzas impulsivas son mayores que las convectivas, debido a que no se produce un oleaje fuerte (Fuerza convectiva), ocasionando que los muros solo se desplacen hacia un solo lado, presentando grandes desplazamientos y sollicitaciones, en cambio en tanques rectangulares donde hay un lado mayor que el otro, las fuerzas convectivas e impulsivas son casi iguales para el sentido del lado mayor, ocasionando desplazamientos y sollicitaciones menores que en el otro lado corto donde es mayor la fuerza impulsiva.
- ✓ Es importante resaltar que el análisis de un tanque varía de acuerdo con su geometría y condiciones de apoyo. Para este caso, la base del tanque se tomó empotrada en el terreno natural, lo que lo hace más estable. Sin embargo, si se realiza el análisis del mismo tanque como una estructura elevada, estas serían más vulnerables a los efectos sísmicos, debido a la masa concentrada en su extremo superior (Tanque) y a su poca rigidez lateral dado por los apoyos tipo columna, por lo que su diseño es gobernado por las fuerzas sísmicas, comportándose como un péndulo invertido.
- ✓ Si observamos las magnitudes de los desplazamientos en las figuras 4.1.2-9 y 4.1.2-10, claramente son mayores en el análisis de tiempo-historia (time history). Esto se debe a que, si bien, el espectro del time-history fue



ajustado al de la NSR-10, las vibraciones del acelegrama entregan información de los cambios de aceleración en todo el evento sísmico, por lo que se tienen picos reales más altos que en el análisis con el método del ACI y el espectro usado para éste, por lo tanto, las sollicitaciones usando el análisis de tiempo-historia son mayores y corresponden a la respuesta de la estructura a lo largo de un sismo real.

## 6. Referencias

1. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, AIS. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10. Bogotá D.C. Colombia. Marzo 2010.
2. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, AIS 180-13. Recomendaciones para requisitos sísmicos de estructuras diferentes de edificaciones. Bogotá D.C. Colombia. Enero 2013.
3. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI. Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary (ACI 350.3-06). ACI Committee 350. First Printing. USA. November 2006.
4. SIKA. Consideraciones de diseño y construcción para tanques y piscinas (Según la NSR-10. (ACI 350M-06)).
5. Saint, N; & Calderín, F; & Álvarez, E. (2018). Procedimiento para el análisis sísmico de tanques cilíndricos de acero. *CIGET, Vol. 1, núm 4*.
6. Guillén, M & Rojas, A. (2017). Análisis del comportamiento dinámico del agua en tanques apoyados rectangulares y cilíndricos bajo acciones sísmicas. (Tesis de pregrado). Universidad Peruana de ciencias aplicadas. Lima. Perú.
7. Matiz, J. (2011). Método simplificado para el análisis y diseño de tanques rectangulares en concreto reforzado a partir de la formulación de los elementos finitos. (Tesis maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colombia.
8. Orihuela J & Sánchez N., (2016). Diseño estructural de tanques rectangulares y sus aplicaciones. *INGENIUM*, Vol 1, num 2.
9. Hernández V; & Sánchez H; & Martínez C. (2018). Evaluaciones de presiones convectivas e impulsivas en tanques de almacenamiento sujetos a sismos. SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL.
10. Pupillales, A, (2013). Análisis de la interacción fluido-estructura en el diseño de tanques cilíndricos de acero según las norma americana, neozelandesa,

ecuatoriana y métodos simplificados (tesis para optar el título de ingeniero civil). Quito: Universidad San Francisco de Quito.

11. Cardona, A; & Kohan, P; & Quinteros, R, & Storti M. (2012). Análisis del comportamiento dinámico de tanques cilíndricos bajo excitaciones sísmicas. AMCA, Vol 21. Salta, Argentina.
12. Núñez, L. (2014). Esfuerzos Hidrodinámicos en reservorios circulares de concreto armado, por la variación de esbeltez; altura del agua-diámetro. (Tesis pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca Perú.
13. Munshi, J.A (2002). Design of Liquid-containing Concrete Structures for Earthquake Forces. Portland Cement Association. USA.
14. García, L.E (2000). Métodos de combinación de la respuesta modal. *Dinámica estructural Aplicada al Diseño Sísmico* (3era ed. pp. 521-537). Bogotá, Colombia.
15. API 650, Apéndice E (2000). "Welded storage tanks for oil storage", American Petroleum Institute Standard, Washington, D.C.
16. Jaiswal O.R; & Rai D.C; & Jain S.K (2007). Review of Seismic Codes on Liquid – Containing tanks. *Earthquake Spectra. Volumen (23) N°1*. pp 239 – 260. Kanpur, India.