

## El impacto de un tsunami en la costa sur de Guatemala: Análisis de estructuras resistentes a tsunamis

Miriam Alejandra Ruano Aldana,

Egresada del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle de Guatemala  
rua12028@uvg.edu.gt

**RESUMEN:** Los sistemas de evacuación vertical son estructuras para albergue de personas en los niveles superiores y deben tener capacidad suficiente para resistir las fuerzas del tsunami. Esta investigación está orientada hacia un análisis comparativo entre el diseño sísmico y el diseño considerando las cargas producidas por un tsunami. Las normas de construcción actualmente están enfocadas en el diseño para cargas sísmicas y por viento; dada la falta de normas de diseño contra tsunamis, el trabajo se desarrolló bajo las consideraciones de carga de FEMA P-646. Se diseñó una estructura de concreto con marcos a momento en ambos sentidos utilizando una categoría de diseño sísmico D, con el fin de determinar si la estructura es capaz de resistir también las cargas inducidas por un tsunami y fungir como un refugio de desalojo vertical. Se determinó que las fuerzas laterales de un tsunami no resultan críticas para la estructura, es decir no generan problemas de desplazamientos ni estabilidad, sin embargo, el problema radica en las fuerzas de levantamiento las cuales generan daños locales a ciertos elementos, además de producir grandes problemas en las cimentaciones debido al desplazamiento vertical hacia arriba que se genera en los apoyos.

**PALABRAS CLAVE:** Tsunami, cota de inundación, consideraciones sísmicas, fuerzas de levantamiento, sistemas de evacuación vertical.

### The impact of a tsunami on the southern coast of Guatemala: Analysis of Tsunami - resistant structures

**ABSTRACT:** Vertical evacuation systems are structures designed for sheltering people at the higher levels. These structures should have sufficient capacity to withstand the tsunami's forces. This research was focused toward a comparative analysis between seismic and tsunami design. Construction codes are currently focused on design for seismic and wind loads; given the lack of design codes against tsunamis, the analysis was made under the load

considerations on FEMA P-646. The design was considering a concrete moment frame structure using a category D seismic design in order to determine whether the structure withstands the loads induced by a tsunami and work as a vertical evacuation refuge. It was determined that the tsunami's lateral forces are not critical for the structure, it means they do not cause problems of displacement or stability, however the problem are the uplift forces which generate local damage to certain elements and produce foundation problems.

**KEYWORDS:** Tsunami, Run Up, seismic considerations, uplift forces, vertical evacuation system.

### Introducción

Los tsunamis son fenómenos que generan un daño potencial y pueden provocar severos daños y pérdidas humanas en las comunidades costeras. Las estructuras de evacuación vertical proveen una medida de prevención para las personas dentro de esta región. Mediante el análisis de riesgo y el diseño estructural se puede conseguir una estructura tsunami - resistente que sea capaz de fungir como un sistema de evacuación vertical el cual permite evacuar a los habitantes de la zona en el tiempo necesario.

Los diseños de estas estructuras deben tener un balance entre riesgo y economía lo que requiere tanto consideraciones técnicas como sociales. El diseño de una estructura debe ser suficientemente flexible y redundante para soportar las vibraciones de un sismo que pueda ocurrir previo a un tsunami, al igual debe ser lo suficientemente resistente y rígida para soportar las fuerzas causadas por el fluido y las posibles fuerzas de impacto por escombros. Ambas consideraciones deben ser tomadas en cuenta para el diseño tsunami-resistente.

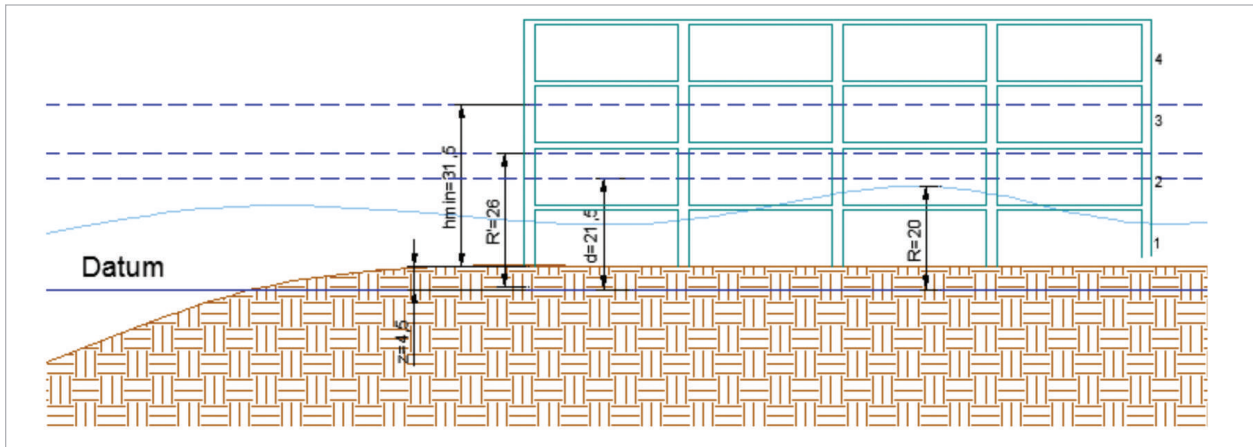


Ilustración 1. Parámetros hidrodinámicos y topográfico.

Para el análisis estructural, la velocidad, cota de inundación y terreno, altura y profundidad de inundación son parámetros esenciales que ayudan a determinar las fuerzas inducidas sobre la estructura. En FEMA P-646 se pueden encontrar ecuaciones para determinar las fuerzas a las que una estructura está sometida. Estas cargas no son aplicadas al mismo tiempo, si no que tienen una evolución conforme el paso de la ola en la estructura. Por esta razón existen combinaciones de carga que permiten tener el efecto combinado de cargas y tensiones máximas sobre las estructuras.

## Materiales y métodos

Para la realización de la presente investigación se parte de la necesidad de los daños que un tsunami puede causar a la infraestructura expuesta y por ende la pérdida de vidas humanas. Como primer punto se llevó a cabo recopilación de información la cual permitió definir posibles escenarios y condiciones críticas a las que una estructura es sometida ante la ocurrencia de un tsunami.

### Parámetros hidrodinámicos y topográficos (Ilustración 1)

• **Cota de inundación (R):** Es la altura topográfica máxima que alcanza la ola del tsunami referida al nivel medio del mar o datum.

$$R = 20 \text{ pies}$$

Para que una estructura de desalojo vertical sea efectiva, es esencial que el área de refugio se localice sobre el nivel máximo de la inundación del tsunami. Debido a la incertidumbre que existe ante las fuerzas de un tsunami se establece que se tomará un 30% más de la altura pronosticada de inundación. (FEMA, 2008)

$$R^1 = 1.3 * R = 26 \text{ pies}$$

• **Cota de Terreno (z):** Elevación en el lugar de la estructura

$$z = 4.5 \text{ pies}$$

• **Altura mínima habitable:**

$$h_{min} = d + f = 31.5 \text{ pies}$$

Se recomienda que el área de refugio de las estructuras incluya una distancia adicional de por lo menos 3 metros sobre el nivel de elevación de alcance del tsunami. (FEMA, 2008)

• **Profundidad de inundación (d):** Diferencia de altura entre la superficie libre de agua en cada punto y su respectiva altura del terreno tomando como referencia el Datum.

$$d = R^1 - z = 21.5 \text{ pies}$$

• **Altura por Nivel (H)**

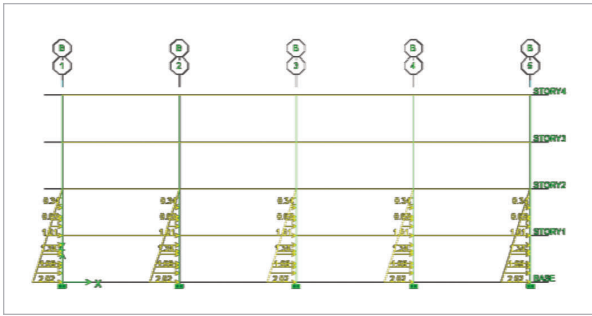
$$H = 12 \text{ pies}$$

• **Densidad del agua de mar considerando sedimentos ( $\rho$ ):**

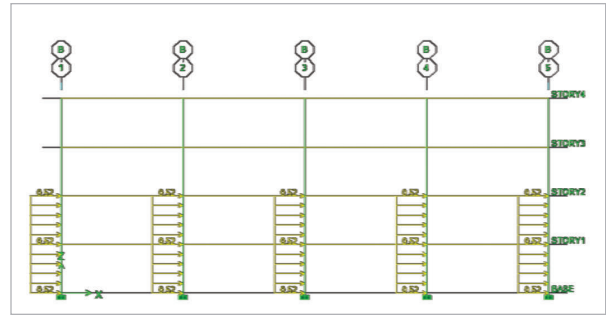
$$\rho = 75 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Para disminuir las fuerzas de un tsunami actuantes sobre una estructura, se deben considerar características estructurales como las áreas expuestas, por lo que la orientación de la estructura juega un papel importante al momento de contrarrestar las cargas inducidas por un tsunami, en este caso la estructura es simétrica tanto en el eje "x" como en el eje "y", por lo que la orientación no influye en la cantidad de elementos expuestos a las cargas del tsunami.

También es recomendable que en los primeros niveles no existan elementos que obstruyan el flujo de agua (evitar muros de concreto o mampostería), ya que la presencia de los mismos



**Ilustración 2.** Aplicación de las fuerzas hidrostáticas sobre la estructura.



**Ilustración 3.** Aplicación de las fuerzas hidrodinámicas sobre la estructura.

aumenta el área expuesta y las fuerzas laterales crecen generando mayores cargas sobre la estructura. El objetivo de que los niveles inferiores se permitan el paso fácil del flujo de agua ayuda a reducir el impacto de las olas y mejora la capacidad de soporte de carga de la estructura.

### Cargas producidas por un tsunami

• **Fuerzas hidrostáticas ( $F_h$ ) (Ilustración 2):** Las fuerzas hidrostáticas son las que fueron generadas por agua en reposo o con movimiento muy bajo. Esta carga actúa perpendicularmente sobre superficies planas.

$$F_h = \frac{1}{2} \rho g b d^2 = 52 \text{ kips}$$

$$F_h = \frac{F_h}{d} = 2.041 \frac{\text{kip}}{\text{pie}}$$

Donde:

$F_h$  = fuerza hidrostática

$b$  = ancho del elemento expuesto (columna 36")

$h$  = altura del elemento expuesto

$\rho$  = Densidad del flujo

$g$  = aceleración gravitacional

• **Fuerzas de levantamiento ( $F_b$ ):** Es una fuerza ascendente neta de presión hidrostática que actúa sobre un objeto sumergido o parcialmente sumergido. La fuerza de levantamiento se debe al aumento de la presión en un fluido con la profundidad. El fluido ejerce una fuerza hacia arriba sobre el cuerpo sumergido en él por lo que esta fuerza tiende a levantar el cuerpo hacia arriba. Esto genera en las estructuras problemas de estabilidad ya que la estructura se vuelve propensa al volteo y desplazamiento. (FEMA, 2008)

$$F_b = \rho g V = 23220 \text{ kip}$$

$$F_b = \frac{F_b}{\text{Area}} = 1.613 \frac{\text{kip}}{\text{pie}^2}$$

La fuerza boyante fue únicamente aplicada a la losa del primer nivel el cual es el que está sujeto a inundación total.

Donde:

$F_b$  = fuerza boyante

$V$  = volumen de agua desplazado

$\rho$  = Densidad del flujo

$g$  = aceleración gravitacional

• **Fuerzas hidrodinámicas ( $F_d$ ):** Las fuerzas hidrodinámicas también conocidas como fuerzas de arrastre son las inducidas por un flujo de agua que tiene determinada velocidad alrededor de las estructuras. (Ilustración 3)

$$F_d = \rho b (hu^2)_{\max} = 13.327 \text{ kip}$$

Donde:

$F_d$  = fuerza de arrastre en dirección del flujo

$\rho$  = Densidad del flujo

$b$  = ancho del elemento en plano normal a la dirección del flujo

La combinación  $hu^2$  representa el flujo de momento por unidad de masa. Es importante distinguir que  $(hu^2)_{\max}$  es el flujo máximo por unidad de masa que ocurre en cualquier momento durante el tsunami.

$$(hu^2)_{\max} = g * R^2 * (0.125 - 0.235 \frac{z}{R} + 0.11 (\frac{z}{R})^2) = 1907 \frac{\text{pie}^2}{\text{s}^2}$$

Donde:

$g$  = aceleración por gravedad

$R$  = elevación del alcance de diseño

$z$  = elevación en el lugar de la estructura

• **Fuerzas impulsivas ( $F_s$ ):** También conocida como fuerza de impacto de frente de ola. Las fuerzas impulsivas son cargas de corta duración que son generados por el impacto del tsunami contra la estructura.

$$F_s = 1.5 * F_d = 0.775 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

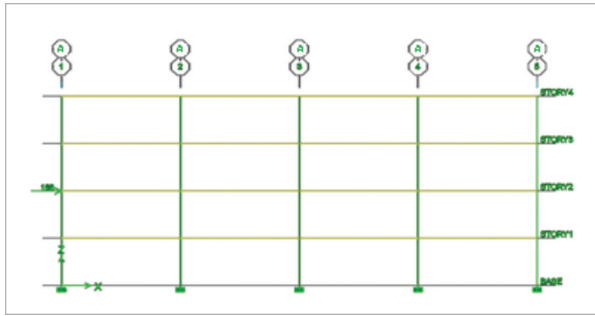


Ilustración 4. Aplicación de la fuerza de impacto por escombros sobre la estructura.

Donde:

$F_s$  = fuerza de impacto de la ola

$F_d$  = fuerza hidrodinámica

• **Fuerza de impacto por escombros ( $F_t$ ):** La fuerza de arrastre de las olas tiene la capacidad de acarrear elementos grandes que llegan a chocar contra la estructura. Estas cargas generan esfuerzos importantes sobre la edificación y provocar daños estructurales e incluso el colapso.

Para la modelación de la fuerza de impacto, esta se toma como una carga puntual actuando en determinado elemento estructural. (Ilustración 4)

$$F_t = 2U_{max} \sqrt{km} = 168 \text{ kip}$$

Donde:

$F_s$  = fuerza de impacto de escombros

$U_{max}$  = velocidad máxima de flujo

$m$  = masa efectiva de los escombros (1000lb)

$k$  = rigidez efectiva de los escombros = 165kip/ft

$$U_{max} = \sqrt{\frac{2gR'(1-z)}{R'}} = 37.195 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

Donde:

$g$  = aceleración por gravedad

$R'$  = altura del alcance de diseño

$z$  = elevación del suelo en la estructura

• **Fuerza por sobrecarga gravitacional ( $F_r$ ):** El agua retenida en pisos superiores puede agregar cargas gravitacionales que excedan las cargas tomadas en cuenta para el diseño. En este caso se aplicaron a los niveles 1 y 2.

$$F_r = \rho * g * h_r = 75 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2}$$

Donde:

$F_r$  = carga gravitacional adicional

$h_r$  = profundidad de agua retenida (se asumió 1 pie)

$\rho$  = densidad del flujo

Para consideraciones de diseño en tsunamis se tomará la recomendación de FEMA en donde se considera que la estructura estará completamente cargada con una carga viva de agrupación en el lugar de refugio (niveles 3 y 4) y el resto de las áreas (niveles 1 y 2) tengan una carga viva reducida del 25% del diseño. Por lo que la combinación será:

- $1.2D + 1.0T_s + 1.0L_{ref} + 0.25L$

- $0.9D + 1.0T_s + 1.0L_{ref} + 0.25L$

Como recomendación de FEMA se tomará una tercera ecuación para el análisis. Esta ecuación tiene efecto cuando los efectos de las cargas de gravedad están en oposición a los efectos de la carga de tsunami

- $1.2D + 1.0T_s$

Donde:

$D$  = Carga Muerta

$T_s$  = Carga de Tsunami

$L_{ref}$  = Carga de agrupación

$L$  = Carga viva

Es poco probable la ocurrencia de un sismo junto con la inundación máxima de tsunami, por esta razón no se consideran las cargas sísmicas combinadas con las cargas de tsunami. (FEMA, 2008).

## Características de la estructura

El edificio fue diseñado bajo normas de diseño

- ACI 318-14 - diseño de estructuras de concreto
- ASCE 7-10 "Estandar Minimum Design loads for Buildings and Other Structures" - magnitud de cargas, parámetros de estabilidad y derivas, categoría de diseño, sistemas de resistencia lateral.
- AGIES NSE 2-10 "Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección" - Condiciones de sitio para Puerto San José.
- El manual FEMA P-545 "Guías para el diseño de estructuras de desalojo vertical en caso de Tsunami". - Cargas aplicadas a tsunamis.

Las consideraciones de materiales para este prototipo fueron: esfuerzo de compresión del concreto a 28 días ( $f_c$ ) de 4000 psi, densidad del concreto ( $\gamma$ ) 150 pcf y esfuerzo a fluencia del acero ( $f_y$ ) de 60,000 psi. El modelo estructural se realizó utilizando hojas de cálculo en Mathcad y Excel, y softwares de diseño estructural Etabs 2009 y Staad Pro V8i.



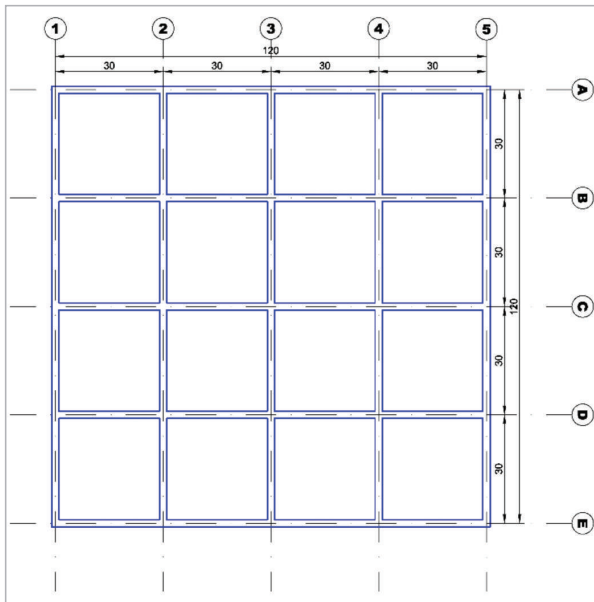


Ilustración 5. Planta de la estructura propuesta

El diseño de la estructura se realizó bajo consideraciones sísmicas con el fin de evaluar si bajo las cargas de un tsunami, el diseño obtenido, resulta suficiente y permite que la estructura no falle ante las cargas por tsunamis. Aunque en nuestro medio el viento no presenta fuerzas críticas sobre la estructura se consideró lo siguiente: En el puerto San José la velocidad básica del viento según (AGIES, 2010) es de 110 kph con una categoría de exposición D.

Los efectos de erosión y deslizamiento en los cimientos no fueron considerados, dado que el modelo propuesto es hipotético y no dispone de información para el diseño de cimientos. Sin embargo, en los diseños estructurales reales es un factor que sí debe ser considerado, analizado y diseñado para evitar una falla en las cimentaciones.

La estructura consiste en un edificio de concreto con un área en planta de 14400 pies<sup>2</sup> (Ilustración 5) y 4 niveles los cuales tienen una altura de 12 pies cada uno, obteniendo así una altura total de 48 pies.

El proyecto reside en Puerto San José, Escuintla, por lo que los parámetros de aceleración utilizados fueron  $S_s=1.65$  y  $S_1=0.55$ , según (AGIES, 2010). El sistema de resistencia lateral consiste en un sistema de marcos a momento en ambos sentidos diseñados bajo una categoría de diseño sísmico (CDS) D. Debido a la categoría utilizada, el manual de diseño (ASCE, 2010) limita el diseño a marcos especiales a momento, por lo que la edificación fue diseñada bajo esta consideración. La diferencia entre marcos ordinarios y especiales radica en la cantidad de acero de refuerzo el cual le proporciona la ductilidad necesaria a la estructura ante un evento sísmico.

Como no existen registros de tsunamis previos en Guatemala se utilizarán como referencia los datos del Tsunami ocurrido en Nicaragua en 1992. La ola alcanzó entre 4 y 10 metros de altura y fue causada por un sismo de magnitud  $M_w = 7$  muy fuerte en el fondo del océano, causado por la interacción de las placas de cocos y del Caribe (fenómeno bastante común en Guatemala).

La cota de inundación (R) registrada en el Tsunami de Nicaragua de 1992 fue entre 13 y 20 pies (Shiki, Tsuji, & Minoura, 2008), por lo que para este análisis se consideró la cota máxima de inundación que fue de 20 pies.

Para la aplicación de fuerzas de tsunami se consideraron 4 combinaciones de carga críticas las cuales fueron las siguientes:

1. Fuerzas hidrodinámicas ( $F_d$ ) en los elementos que ya han pasado la ola y fuerza impulsiva ( $F_s$ ) en los siguientes conforme avanza la ola.
2. Fuerzas de impacto por escombros ( $F_t$ ) y fuerzas hidrodinámicas ( $F_d$ ) en los demás elementos
3. Fuerzas hidrostáticas ( $F_h$ ) y boyantes ( $F_b$ )
4. Fuerza por sobre carga ( $F_r$ ).

Se analizaron 4 distintos escenarios para las cargas por tsunami, ya que no todas las cargas ocurren al mismo tiempo. La cota de inundación utilizada es de  $R' = 26$  pies, es decir que el primer nivel está completamente sumergido, mientras que el segundo nivel es el que recibe las fuerzas de impacto por escombros. Las fuerzas laterales entonces, son aplicadas únicamente a los dos primeros niveles como se mostró en las Ilustraciones 2 y 3.

## Resultados

### Derivas y desplazamientos

El primer paso fue el chequeo de derivas y estabilidad de la estructura. Las derivas son un elemento básico en el proceso del diseño estructural; están asociadas con las deformaciones postelásticas de los elementos estructurales y no estructurales, estabilidad global de la estructura y daño a elementos no estructurales.

Las derivas ( $\delta$ ) se calculan en base a los desplazamientos que existe en cada nivel y se deben obtener los desplazamientos en dos puntos de la estructura perpendiculares a la dirección de la carga. La diferencia entre dichos desplazamientos obtenidos por cada nivel proporciona las derivas. Las derivas están asociadas al sistema de resistencia lateral que se utiliza, en ese caso es un sistema de marcos a momento por lo que el Factor de Amplificación de Desplazamiento Post-elástico ( $C_d$ ) es de 5.5, y dado el uso que la estructura va a tener se considera un factor de importancia ( $I_e$ ) de 1.5. Las derivas calculadas deben ser menores que las permitidas por el manual de diseño de diseño (ASCE-7-10) en donde limita las derivas al 1.5% de la altura del

**Cuadro 1.** Chequeo de derivas bajo cargas sísmicas.

Nivel	H	Desplazamiento	$\delta$	$\delta$ Cd / le	$\Delta p = 0.015hi$	Rel Der		Torsión
4.00	12.00	1.213	0.25	0.91	2.16	0.42	OK	0.944
		1.126	0.22	0.81	2.16	0.37		
3.00	12.00	0.965	0.35	1.30	2.16	0.60	OK	0.978
		0.906	0.34	1.24	2.16	0.58		
2.00	12.00	0.611	0.39	1.42	2.16	0.66	OK	0.963
		0.567	0.36	1.32	2.16	0.61		
1.00	12.00	0.223	0.22	0.82	2.16	0.38	OK	0.963
		0.207	0.21	0.76	2.16	0.35		

**Cuadro 2.** Chequeo de derivas bajo cargas laterales de tsunami considerando la carga por impacto por escombros sobre el eje

Nivel	H	Desplazamiento	$\delta$	$\delta$ Cd / le	$\Delta p = 0.015hi$	Rel Der	T	Torsión
4.00	12.00	0.037	0.00	0.01	2.16	0.00	OK	0.584
		0.142	0.01	0.04	2.16	0.02		
3.00	12.00	0.035	0.01	0.02	2.16	0.01	OK	0.604
		0.131	0.03	0.10	2.16	0.05		
2.00	12.00	0.029	0.01	0.05	2.16	0.03	OK	0.663
		0.102	0.06	0.22	2.16	0.10		
1.00	12.00	0.014	0.01	0.05	2.16	0.02	OK	0.666
		0.043	0.04	0.16	2.16	0.07		

nivel, para este caso. La torsión se refiere al promedio entre los dos puntos obtenidos de un nivel divididos dentro del valor más grande de ambos. Para que se considere que un edificio tiene torsión este valor debe ser mayor que 1.2.

El desplazamiento de la estructura causado bajo las cargas laterales de la estructura, se puede visualizar de forma gráfica en las Ilustraciones 6 y 7. La deformación de la estructura bajo consideraciones sísmicas (Ilustración 6) tiene un comportamiento diferente, en donde el desplazamiento aumenta conforme la altura. Esto sucede debido a que las cargas sísmicas son inerciales y están en función de la altura, mientras que las de tsunami no dependen de las propiedades inerciales de la edificación si no de su resistencia que esta tenga.

En estudios anteriores de tsunamis, se pudo observar que las estructuras de concreto han tenido un comportamiento satisfactorio luego de sufrir fuertes aceleraciones debido al sismo y altas cargas laterales de un tsunami. Las edificaciones de concreto debido a la alta resistencia que poseen los efectos de estabilidad

y derivas de la estructura no se ven afectados. Generalmente los daños son locales en ciertos elementos debido a fuerzas de impacto y dependiendo del nivel de inundación, pueden sufrir daño las losas y vigas sujetas a fuerzas de levantamiento. La ventaja del concreto es que por el peso resulta ser una estructura estable caso contrario como suele suceder en las estructuras livianas como acero y madera en donde la construcción es más susceptible a sufrir deformaciones y colapsar. (Lekkas, 2011)

Se analizó el comportamiento general de la estructura y se puso observar que las columnas de los niveles inferiores se ven sometidas a una tensión bastante grande debido a la fuerza de levantamiento ejercida sobre el primer nivel. Las columnas en vez de estar sujetas a compresión como sería lo usual (Ilustración 8), se ven sometidas a una fuerza tensión (Ilustración 9), Este cambio de esfuerzos lo que produce es un levantamiento en la estructura y es allí donde se debe hacer una estricta revisión de las cimentaciones para evitar que la estructura colapse por falla en los cimientos.

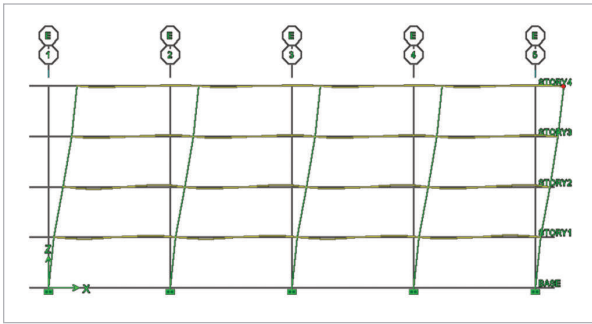


Ilustración 6. Deformación de la estructura bajo cargas sísmicas en dirección X

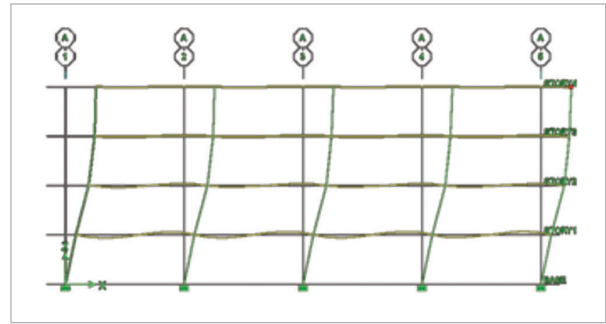


Ilustración 7. Deformación de la estructura bajo cargas laterales de tsunami.

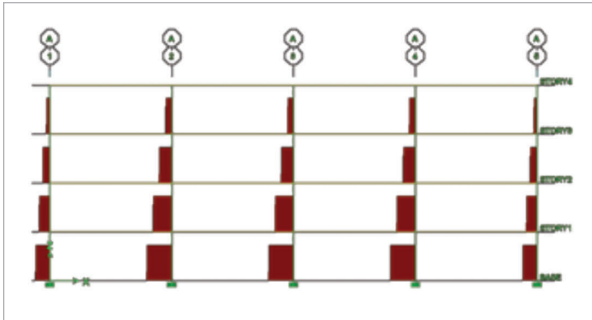


Ilustración 8. Diagramas de fuerza axial con la combinación 1.2DL + 1.6LL

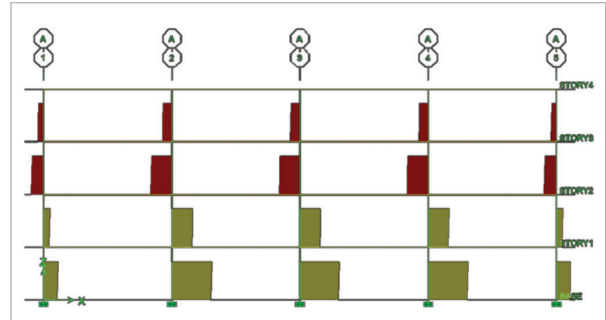


Ilustración 9. Diagramas de fuerza axial con la combinación 1.2 D + Fh + Fb + Lref + 0.25L

## Diseño de losas y vigas gravitacionales

Las losas fueron diseñadas como losas planas en dos direcciones y se utilizó un espesor de 6 pulgadas. Los requisitos y métodos de análisis fueron bajo las consideraciones del Capítulo 8 (Losas en dos direcciones) del manual de diseño ACI 318-14. Los cálculos se llevaron a cabo mediante hojas de Excel y la obtención de momentos fue mediante un análisis de elementos finitos utilizando el Software Staad Pro.

Las cargas que fueron aplicadas con base al manual de diseño ASCE 7 - 10 son las siguientes:

- Carga muerta (DL)
  - o Peso propio
  - o Instalaciones (4 psf)
  - o Contrapiso 2" (16 psf)
  - o Cielo suspendido (5.5 psf)
  - o Piso Cerámico (16 psf)

En el caso del diseño para un tsunami se consideraron 2 fuerzas verticales adicionales que son la fuerza boyante ( $F_b$ ) y la fuerza por sobre carga ( $F_r$ ).

- Carga Viva (LL)
  - o Ocupación (80 psf)

## Combinaciones utilizadas:

- 1.4DL 0.9 DL + (Fb o Fr) + 0.25LL
- 1.2 DL + 1.6 LL 1.2 DL + (Fb o Fr)
- 1.2 DL + (Fb o Fr) + 0.25LL

La carga máxima aplicada al primer nivel ( $W_u$ ) para el análisis de losas únicamente con carga viva y carga muerta fue de 267.8lb/ft<sup>2</sup>, en el caso crítico de la combinación 1.2DL + 1.6LL. Aplicando las cargas de tsunami se obtuvo una carga máxima aplicada de 1487.65 lb/ft<sup>2</sup>, en la combinación 0.9DL + Fb + 0.25 LL, es decir un 82% más grande que la obtenida en el primer caso.

En el caso de la losa del segundo nivel, la cual ya no se ve afectada por la fuerza boyante el  $W_u$  con cargas de tsunami fue de 234lb/ft<sup>2</sup> obtenido de la combinación 1.2 DL + Fr + 0.25LL; este valor es menor que el valor 267.8lb/ft<sup>2</sup> obtenido para carga viva y carga muerta.

El cálculo de los momentos es necesario para determinar el refuerzo de acero que necesita la losa o viga. En el manual de diseño ACI 318-14 se puede encontrar el procedimiento y fórmulas para hacer el cálculo del área de acero en base al momento requerido del elemento a diseñar. El objetivo es

**Cuadro 3.** Momentos obtenidos en las losas en el primer y segundo nivel.

Losa Nivel 1	(kip-ft/ft)	M	Mn (tsunami)
Momento maximo lado largo		1.42	11.3
Momento minimo lado largo		-2.11	-7.32
Momento maximo lado corto		2.79	19.5
Momento minimo lado Corto		-3.71	-15.4
Losa Nivel 2	(kip-ft/ft)	M	Mn (tsunami)
Momento maximo lado largo		1.41	1.25
Momento minimo lado largo		-2.1	1.85
Momento maximo lado corto		2.74	2.41
Momento minimo lado Corto		-3.71	3.27

**Cuadro 4.** Momentos obtenidos en las vigas secundarias en el primer y segundo nivel

		M	M Tsunami
Nivel 1		<b>Vano 1 y 4</b>	
	Momento positivo	303	1462
	Momento negativo 1	0	0
	Momento negativo 2	420	2028
		<b>Vano 2 y 3</b>	
	Momento positivo	141	678
	Momento negativo 1	420	2028
Nivel 2		<b>Vano 1 y 4</b>	
	Momento positivo	303	313
	Momento negativo 1	4	0
	Momento negativo 2	420	435
		<b>Vano 2 y 3</b>	
	Momento positivo	141	145
	Momento negativo 1	420	435
		282	292

proponer un refuerzo en cantidad de barras de acero que cumpla con el momento producido.

Los cuadros 3 y 4 muestran los momentos obtenidos en las cargas verticales en la combinación 1.2DL + 1.6LL y 0.9DL + (Fb o Fr) + 0.25 LL para losas y vigas secundarias respectivamente. En los niveles 3 y 4 no existen cargas verticales producidas por tsunami, ya que se espera que en estos niveles puedan estar albergadas las personas. La fuerza de levantamiento como ya se mencionó con anterioridad, es aplicada únicamente al primer nivel y es evidente que produce un momento con una magnitud más grande que la combinación 1.2DL + 1.6LL.

Las vigas secundarias fueron analizadas de manera similar a

las losas planas. El  $W_u$  en las vigas del primer nivel fue de 21090.5lb/ft obtenido de la combinación 1.2DL + Fb y 4337lb/ft para la combinación 1.2DL + 1.6LL. Al comparar el  $W_u$  obtenido en las combinaciones anteriormente mencionadas se obtiene que el  $W_u$  producido por las cargas de tsunami. 79.2% más grande.

El  $W_u$  obtenido para la losa del segundo nivel fue de 4522lb/ft siendo este únicamente 4.09% mayor que el  $W_u$  obtenido en la combinación 1.2DL + 1.6LL

Cabe notar que debido a que la fuerza boyante es aplicada en contra de la gravedad y tiene una magnitud bastante alta que no logra ser contrarrestada con la carga muerta y viva, existe una inversión de momentos como se puede observar en la Ilustración 10; es decir que los momentos positivos en la viga ocurren en la parte superior y en los extremos mientras que los momentos negativos ocurren en la parte inferior, la como se puede observar en la Ilustración 10.

### Sistema de resistencia lateral (Vigas principales y Columnas)

El diseño de las vigas principales se diseñó de acuerdo al capítulo 18 del manual de diseño ACI 318-14 de acuerdo a los requerimientos sísmicos para marcos especiales a momento. Para el diseño de las mismas fue necesario un modelo tridimensional (Ilustración 11) para obtener los momentos producidos en las vigas principales. Los momentos se chequearon bajo dos combinaciones de carga, la primera fue (1.2+0.2Sds) DL + LL + E, la cual es una combinación sísmica que determina los momentos máximos en los extremos de la viga. Para los momentos positivos al centro se utilizó la combinación 1.4DL + 1.6LL.

Las combinaciones utilizadas para el modelo tridimensional fueron:

#### Sísmicas y viento:

- 1.4D
- 1.2 D + 1.6 L
- 1.2D + 1.0W + L
- 1.2D + 1.0E + L
- 0.9D + 1.0W
- 0.9D + 1.0E
- (1.2+0.2Sds) DL + LL + E

#### Tsunami

- 1.2 D + Fd + Fs + L<sub>ref</sub> + 0.25L<sub>↖</sub>
- 1.2 D + Ft + Fd + L<sub>ref</sub> + 0.25L<sub>↖</sub>
- 1.2 D + Fh + Fb + L<sub>ref</sub> + 0.25L<sub>↖</sub>
- 1.2 D + Fr + L<sub>ref</sub> + 0.25L<sub>↖</sub>
- 0.9 D + Fd + Fs + L<sub>ref</sub> + 0.25L<sub>↖</sub>
- 0.9 D + Ft + Fd + L<sub>ref</sub> + 0.25L<sub>↖</sub>

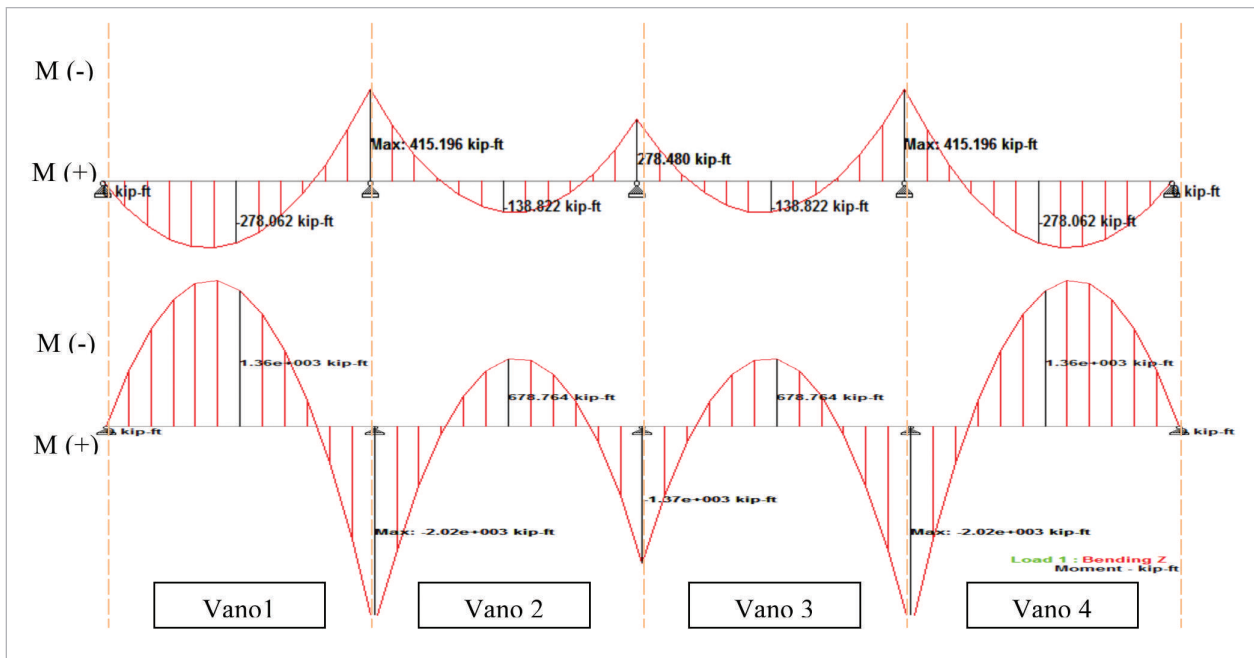


Ilustración 6. Diagrama de momentos para las vigas secundarias del primer nivel a)  $1.2DL + 1.6LL$  b)  $1.2DL + Fb$

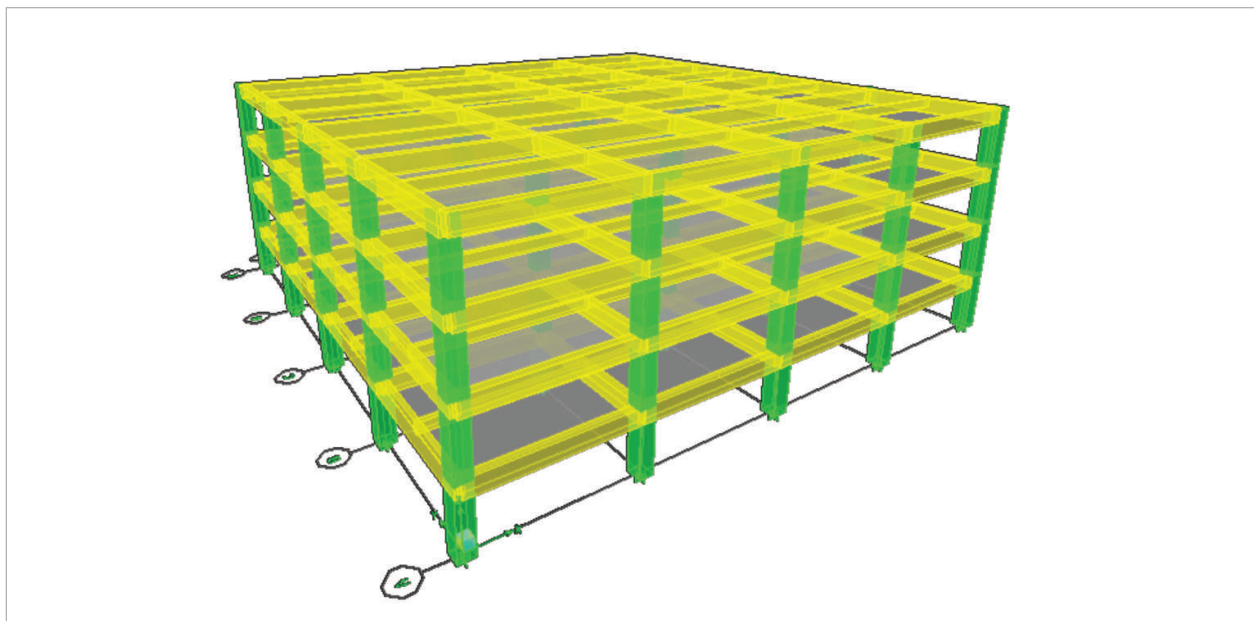


Ilustración 7. Modelo tridimensional utilizado para el análisis de los marcos especiales a momento.

- $0.9 D + Fr + L_{-ref} + 0.25L$
- $1.2 D + Fd + Fs$
- $1.2 D + Ft + Fd$
- $1.2 D + Fh + Fb$
- $1.2 D + Fr$

Las cargas laterales son las que generan los momentos negativos en los extremos de las vigas que forman parte del sistema de

resistencia lateral. Para las combinaciones que incluyen las cargas de tsuanmi, la combinación que generó los momentos máximos negativos fue  $1.2 D + Ft + Fd + L_{ref} + 0.25L$ .

Cabe mencionar, que la revisión de los momentos para las vigas principales resulta ser más compleja que la de las vigas secundarias. Para el chequeo de momentos en las vigas principales se debe evaluar viga por viga y obtener los momentos en ambos extremos y al centro de cada viga, ya que cada viga tiene un



**Cuadro 5.** Chequeo de derivas bajo cargas sísmicas sin consideración de vigas y losa del primer nivel.

Nivel	hi, ft	Despl, in	$\delta$ , in	$\delta$ Cd / le, in	$\Delta p = 0.015h_i$ , in	Rel Der		Torsión
4.00	12.00	1.319	0.25	0.90	2.16	0.42	OK	0.96346
		1.227	0.23	0.84	2.16	0.39		
3.00	12.00	1.073	0.36	1.30	2.16	0.60	OK	0.96623
		0.999	0.33	1.21	2.16	0.56		
2.00	24.00	0.718	0.72	2.63	4.32	0.61	OK	0.96496
		0.667	0.67	2.45	4.32	0.57		

**Cuadro 6.** Chequeo de derivas bajo cargas de tsunami sin consideración de vigas y losa del primer nivel.

Nivel	hi, ft	Despl, in	$\delta$ , in	$\delta$ Cd / le, in	$\Delta p = 0.015h_i$ , in	Rel Der		Torsión
4.00	12.00	0.056	0.00	0.01	2.16	0.01	OK	0.62261
		0.200	0.02	0.06	2.16	0.03		
3.00	12.00	0.052	0.01	0.03	2.16	0.02	OK	0.62032
		0.184	0.04	0.14	2.16	0.06		
2.00	24.00	0.043	0.04	0.16	4.32	0.04	OK	0.64713
		0.146	0.15	0.54	4.32	0.12		

comportamiento distinto dependiendo de la ubicación dentro de la estructura.

El modelo realizado en ETABS proporcionó la información requerida y de esto se pudo concluir que los momentos negativos obtenidos para las cargas de tsunami son más bajos que los momentos sísmicos, es decir que las magnitudes de las fuerzas sísmicas son más grandes que las fuerzas laterales del tsunami.

Por otro lado, dado que el momento positivo lo generan las cargas verticales, era de esperarse que la fuerza de levantamiento iba a afectar estos valores. Tal como sucede en las vigas y losas el momento que la fuerza de levantamiento genera es muy grande.

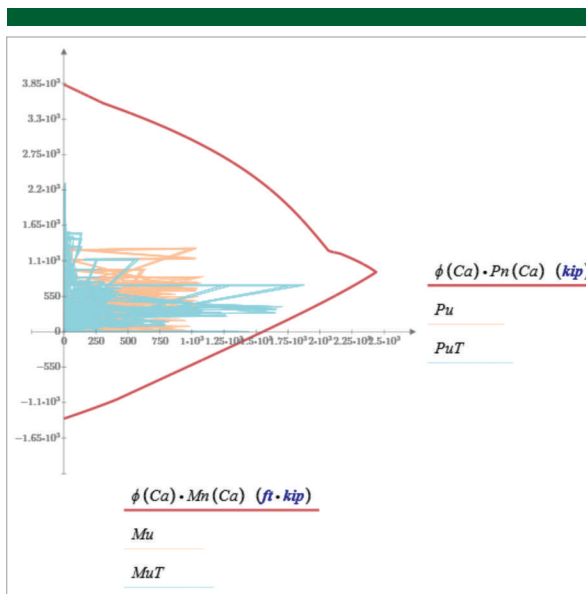
Luego de ver el comportamiento que tiene la losa, vigas principales y vigas secundarias en el primer nivel debido a la fuerza boyante, se asumen que estos elementos van a fallar por lo que se realizó un modelo en donde no se considera la contribución que estos elementos puedan tener el primer nivel en la estabilidad del edificio, es decir se asumió un edificio que tiene una doble altura en el primer nivel. Como se puede observar en los Cuadros 5 y 6 la nueva altura del nivel 2 es de 24 pies. Con este nuevo modelo se procedió a determinar nuevamente las derivas como se muestra a continuación.

De este modelo se pudo determinar que si todas las vigas y losa del primer nivel llegara a fallar, la estructura permanece estable y no sufriría daños en los niveles superiores donde estarían las personas.

Las columnas se analizaron en base al capítulo 18 del manual de diseño ACI 318-14 de acuerdo a los requerimientos sísmicos

para marcos especiales a momento. Se analizaron unas columnas con una sección de 36"x36" y una cuantía de acero de 1.65%. Mediante el modelo tridimensional se obtuvieron las cargas axiales ( $P_u$ ) y los momentos máximos generados ( $M_u$ ) para realizar el diseño y revisión de las columnas mediante una hoja de cálculo en MathCad.

En la Ilustración 12 se muestra el diagrama de interacción



**Ilustración 8.** Diagrama de interacción para las columnas con sección 36"x36"

En el diagrama de interacción se observan picos, los cuales corresponden a los valores que genera la fuerza boyante. Es importante mencionar que las columnas si deben estar diseñadas para soportar las fuerzas de levantamiento y por ningún motivo se debe considerar la posibilidad que fallen, ya que esto si puede afectar de manera significativa la estabilidad de la estructura y por ende colapsar.

## Discusión de resultados y conclusiones

La capacidad que tenga una estructura que se encuentre en las cercanías de la zona costera o que este propensa a inundaciones es importante para resguardar la vida de las personas. Si una estructura es capaz de soportar las fuerzas inducidas por un tsunami puede servir entonces como un refugio de evacuación vertical. Es importante tener en consideración que las estructuras primero deben ser capaces de soportar un sismo que puede ocurrir previo a un tsunami. Es importante que las estructuras tsunami-resistentes ubicadas en las zonas costeras se encuentren de tal manera que permita el flujo de agua. Los elementos no deben entorpecer el paso de agua, ya que se generarían fuerzas adicionales en los primeros niveles

En el chequeo de las derivas se puede observar que las derivas más altas ocurren en los primeros niveles los cuales son lo que reciben toda la carga del tsunami. Sin embargo, no resultan valores críticos que afecten la integridad de la estructura. Por ende, las fuerzas laterales de tsunami no afectan la estabilidad ni desplazamiento de la estructura

La fuerza boyante es la carga crítica para una estructura sometida a fuerzas de un tsunami, ya que posee una magnitud muy alta que aparte de generar esfuerzos locales muy grandes en los elementos, a nivel general de la estructura produce tensión en las columnas de los niveles inferiores. Las columnas de los niveles inferiores se ven sometidas a una tensión bastante grande, en vez de estar sujetas a compresión como sería lo usual. Este cambio de esfuerzos lo que produce es un levantamiento en la estructura y es allí donde se debe hacer una estricta revisión de las cimentaciones para evitar que la estructura colapse por falla en los cimientos.

En el análisis se hizo la suposición de que los elementos del primer nivel (vigas y losas) iban a fallar debido a que los momentos generados por la fuerza de levantamiento resultaron ser muy altos. Por lo que se realizó un modelo donde este nivel no aportara estructuralmente. Los resultados obtenidos indicaron que la estructura sigue permaneciendo estable.

Por último, se puede decir que las fuerzas laterales de un tsunami con una cota de inundación de 20 pies son más pequeñas que las fuerzas sísmicas aplicadas para una categoría de diseño sísmico D, por lo que el diseño realizado permitiría que la estructura tuviera daños estructurales en elementos como vigas y losas del primer nivel, sin embargo, el edificio no colapsaría ante la ocurrencia de un tsunami.

## Bibliografía

- American Concrete Institute - ACI - (2014) *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI318SUS-14) y Comentario (ACI318USR-14)* Estados Unidos, 591 páginas.
- Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica - AGIES - (2010) *Demandas Estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección NSE 2-10* Guatemala, 72 páginas.
- Federal Emergency Management Agency - FEMA - (2008) *Guidelines for Design of Structures for vertical Evacuations from Tsunamis FEMA P646* Estados Unidos, 173 páginas.
- Lekkas, E., Andreadakis, E., V. Alexoudi, V., E. Kapourani, E., Kostaki, I. (2012) *The Mw=9.0 Tohoku Japan Earthquake (March 11, 2011) Tsunami Impact on Structures and Infrastructure* Universidad Nacional y Kapodistriana de Atenas, Grecia, 9 páginas.
- Shiki, T., Minoura, Y. (2008) *Tsunami Features and Implications* Italia: Elsevier.