

## LAS FUERZAS QUE INDUCE UN TSUNAMI SOBRE EDIFICACIONES

Daniel Johanning Cordero

Asistente de Ingeniería

Programa de Ingeniería Estructural

Ing. Rolando Castillo Barahona. PhD

Coordinador, Programa de Ingeniería Estructural

Correo electrónico: [rolando.castillo@ucr.ac.cr](mailto:rolando.castillo@ucr.ac.cr)



### 1. INTRODUCCIÓN

Un tsunami consiste de una serie de olas generadas por el levantamiento repentino de un gran volumen de agua ocasionado, en la mayoría de los casos, por un evento sísmico. En años recientes, se han presentado casos de tsunamis devastadores iniciados por terremotos que han sido noticia alrededor del mundo. Entre los eventos más conocidos están el tsunami del Océano Índico en 2004 y el tsunami de Japón en 2011.

Ahora, ¿podría un tsunami de estas magnitudes llegar a impactar Costa Rica? En un artículo publicado por la Revista Girasol (2008), Mario Fernández Arce, geólogo de la Universidad de Costa Rica, comenta que esto es más probable de lo que muchas personas creen, debido a la alta sismicidad del país y de otras regiones cercanas. En Centroamérica ya se han presentado varios casos en el pasado, el más importante siendo el tsunami de Nicaragua de 1992 (a escasos kilómetros del territorio costarricense), el cual, según los datos del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, cobró la vida de 170 personas. Estos hechos evidencian la necesidad del país de tomar medidas preventivas ante este posible evento.

El tiempo disponible para evacuar a los habitantes de la zona afectada por el impacto de un tsunami es un factor importante a considerar para establecer planes de evacuación horizontal y vertical. La evacuación horizontal consiste en la evacuación de personas a las zonas altas ubicadas fuera de la zona de inundación, por lo que requiere de una cantidad de tiempo mayor. La evacuación vertical, por otro lado, consiste en evacuar a las personas a los niveles superiores de estructuras diseñadas para resistir las cargas tanto del tsunami como del sismo que lo provoca. Este último método se aplica cuando la evacuación horizontal no es posible o conveniente, ya sea

por la falta de tiempo o por la ausencia de zonas elevadas cercanas.

La agencia de emergencias estadounidense FEMA (2008) clasifica los tsunamis según el tiempo que tarda la ola en llegar a un sitio específico. Esta clasificación depende de la distancia a donde ocurre el evento que produce el primer levantamiento de agua. De esta forma, un tsunami originado por una fuente lejana tardaría 2 horas o más en alcanzar la costa, uno originado por una fuente intermedia tardaría entre 30 minutos y 2 horas, y uno originado por una fuente cercana alcanzaría la costa en menos de 30 minutos. La evacuación de personas en los primeros dos casos puede ser sencilla ya que existe tiempo suficiente para realizar una evacuación horizontal. Sin embargo, en el caso de un tsunami de fuente cercana, es necesario que las poblaciones costeras cuenten con un plan de evacuación vertical.

El caso de la ciudad de Puntarenas es de especial atención. Esta ciudad portuaria se ubica en una lengüeta de arena a escasos metros sobre el nivel del mar, lo cual la hace sumamente propensa a la inundación que podría generar un eventual tsunami. La existencia de una falla de subducción frente a la costas y la exposición al Océano Pacífico elevan la probabilidad de que un tsunami llegue a la zona. Adicionalmente, la ciudad cuenta con una única entrada y salida por tierra: una carretera angosta de dos carriles. Esto puede provocar que la evacuación en caso de un tsunami sea lenta y no haya tiempo suficiente para que todos los habitantes abandonen la ciudad a tiempo, especialmente si es un tsunami originado por una fuente cercana.

Una posible solución al problema de Puntarenas, y de otras poblaciones con una situación similar, reside en la construcción de nuevas estructuras que permitan realizar evacuación vertical,

o bien, rehabilitar estructuras existentes para que cumplan este mismo objetivo. Estas estructuras deben ser capaces de resistir las fuerzas generadas por el sismo y por el tsunami y deben contar con el espacio y facilidades mínimas para albergar a un número determinado de personas. De esta forma, sería posible evacuar a los habitantes dentro de la misma ciudad, evitando así el caos que provocaría el abandono simultáneo de toda la población. Para lograr el diseño de una estructura para evacuación vertical, primero es necesario estudiar los tipos de cargas inducidas por un tsunami, en lo cual estará enfocado el presente documento.

## 2. NORMATIVA EXISTENTE

La información disponible para el diseño de estructuras verticales resistentes a tsunamis es limitada, ya que la mayoría de códigos de diseño se enfocan en cargas sísmicas o cargas de viento. Sin embargo, existen 4 documentos que han generado grandes avances en lo que respecta al diseño de estructuras resistentes a tsunamis. Estos documentos son: Federal Emergency Management Agency Coastal Construction Manual, FEMA 55 (FEMA, 2003), City and County of Honolulu Building Code (CCH, 2000), Guidelines for Structures that Serve as Tsunami Vertical Evacuation Sites (Yeh, 2005), y Structural Design Methods of Buildings for Tsunami Resistance (Okada, 2005). Estos códigos se enfocan en el diseño de estructuras en zonas de riesgo por tsunamis y en las regulaciones correspondientes.

En años recientes se publicó el documento Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, FEMA P646 (FEMA, 2008), el cual provee una guía para el diseño de estructuras de evacuación vertical resistentes a tsunamis. De este último documento se extrajo gran parte de la información que se presenta en la siguiente sección.

## 3. FUERZAS INDUCIDAS POR TSUNAMIS

En total se distinguen 6 fuerzas que produce un tsunami sobre una estructura. Estas fuerzas son: fuerza hidrostática, fuerza hidrodinámica, fuerza de flotación, fuerza impulsiva, fuerza por impacto y cargas gravitacionales adicionales. Estas fuerzas dependen de tres parámetros esenciales: la profundidad de la inundación, la velocidad del flujo y la dirección del flujo.

Cada una de estas fuerzas se describe a continuación:

### 3.1 Fuerza hidrostática

La fuerza hidrostática es la fuerza generada por agua en reposo o en movimiento a baja velocidad, la cual actúa perpendicularmente sobre superficies planas. Esta fuerza es generada por un desbalance en la presión producto de la diferencia en los niveles del agua a ambos lados del elemento

estructural.

El cálculo de la fuerza hidrostática se basa en una distribución triangular de presión, por lo que su resultante estará ubicada a un tercio de la altura desde la base del triángulo de presión (ver Figura 1).

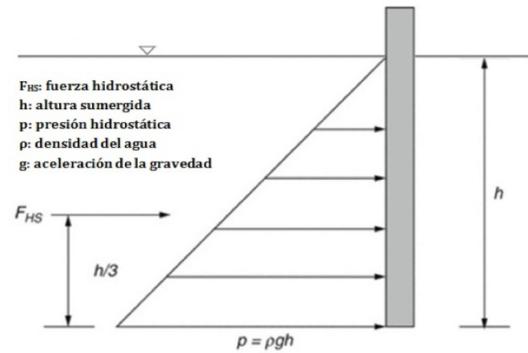


Figura 1. Distribución de presión triangular que genera la fuerza hidrostática

### 3.2 Fuerza hidrodinámica o de arrastre

La fuerza hidrodinámica o de arrastre es la fuerza inducida por el flujo de agua que avanza a velocidad moderada o alta alrededor de las estructuras. Esta fuerza es el resultado de las fuerzas laterales causadas por la presión que ejerce la masa de agua en movimiento y la fuerza de fricción generada cuando el agua fluye alrededor de la estructura.

La fuerza hidrodinámica es función de la velocidad de la ola y del coeficiente de arrastre, el cuál varía dependiendo de la forma geométrica del elemento estructural alrededor del cual ocurre el flujo. Este flujo se asume uniforme, por lo que la presión es constante a lo largo de la profundidad del flujo y el punto de aplicación de la fuerza resultante se ubica en el centroide del área proyectada (ver Figura 2).

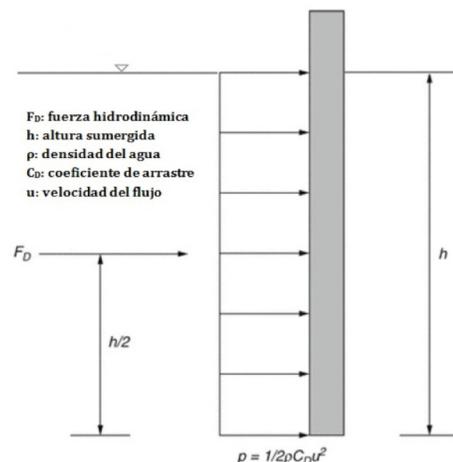


Figura 2. Distribución de presión uniforme para la fuerza hidrodinámica

### 3.3 Fuerza boyante o de flotación

La fuerza boyante o de flotación es la fuerza vertical que actúa hacia arriba a través del centro de masa de un cuerpo total o parcialmente sumergido. Su magnitud equivale al peso del volumen de agua desplazado por el cuerpo.

Las fuerzas de flotación pueden provocar problemas de estabilidad al reducir la resistencia de la estructura al vuelco y al deslizamiento. Su efecto será notorio especialmente en estructuras que fueron diseñadas únicamente para resistir cargas gravitacionales, así como en losas del piso y cimentaciones de pared continua (ver Figura 3).

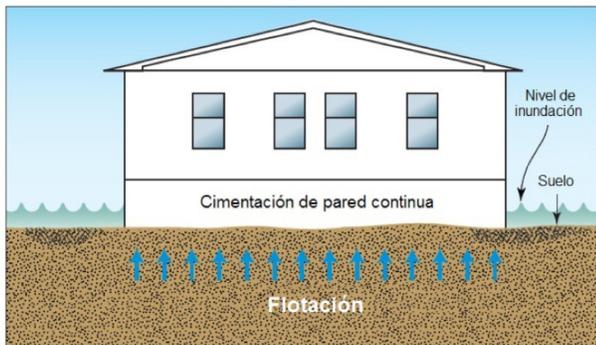


Figura 3. Fuerza de flotación actuando en la cimentación de una estructura

### 3.4 Fuerza impulsiva

La fuerza impulsiva es una carga de corta duración generada por el impacto inicial de la ola del tsunami sobre una estructura. La fuerza impulsiva actuará al momento del primer contacto del agua con la estructura, mientras que la fuerza hidrodinámica actuará una vez que haya pasado el impacto.

La magnitud de la fuerza impulsiva depende de la geometría del elemento estructural sometido al impacto y de la velocidad del tsunami. Sin embargo, debido a la falta de experimentos detallados aplicables específicamente a olas de tsunami,

el cálculo de la fuerza impulsiva no es exacto. Los autores Dames y Moore (1980) recomiendan su cálculo a partir de una distribución de presión 3 veces mayor que la presión hidrostática, lo cual resulta en una fuerza de magnitud 4.5 veces mayor que la fuerza hidrostática actuando a una distancia  $h$  de la base (ver Figura 4).

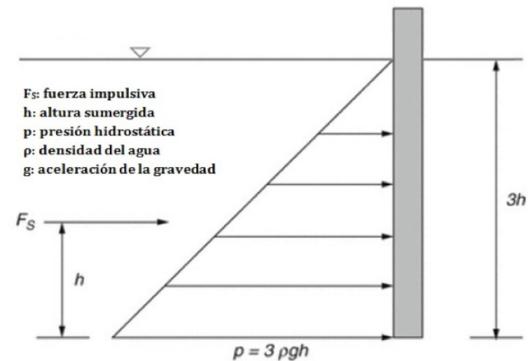


Figura 4. Distribución de presión triangular para calcular la fuerza impulsiva

### 3.5 Fuerza por el impacto de escombros

Una ola viajando tierra adentro a alta velocidad arrastrará escombros, tales como automóviles, piezas de edificios, madera a la deriva, botes, barcos y contenedores. El impacto de este tipo de objetos sobre una estructura puede inducir fuerzas significativas sobre la misma, provocando daños estructurales e incluso el colapso.

En comparación con las otras fuerzas, la fuerza por impacto de escombros es despreciable al evaluar la fuerza lateral total sobre la estructura, pero toma importancia en el diseño de miembros estructurales individuales sujetos al impacto (ver Figura 5). Esta fuerza puede modelarse como una carga puntual actuando sobre el elemento estructural.

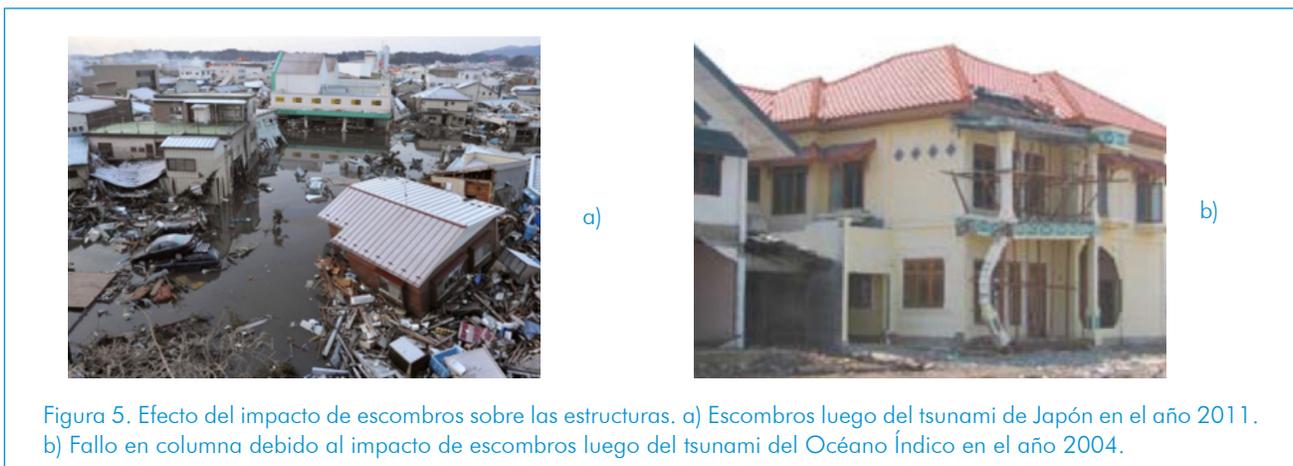


Figura 5. Efecto del impacto de escombros sobre las estructuras. a) Escombros luego del tsunami de Japón en el año 2011. b) Fallo en columna debido al impacto de escombros luego del tsunami del Océano Índico en el año 2004.

### 3.6 Cargas gravitacionales adicionales

El retiro de la inundación puede resultar en la retención de agua en los pisos elevados de la estructura. Esta retención de agua impone un peso adicional sobre los elementos del entrepiso que podría introducir una carga mayor a la utilizada para su diseño.

## 4. COMBINACIONES DE CARGA

Dado que las fuerzas mencionadas anteriormente no ocurren de forma simultánea, se han propuesto distintas combinaciones de carga con el fin de calcular la fuerza total del tsunami que debe resistir la estructura. Un ejemplo es la combinación propuesta por Nouri (2007), en la que separa las fuerzas en dos escenarios: impacto inicial y post-impacto (ver Figura 6). El impacto inicial considera únicamente la fuerza impulsiva y la fuerza por impacto de escombros, mientras que el post-impacto incluye las fuerzas hidrostática, hidrodinámica y por impacto de escombros, así como la fuerza de flotación. Esta última fuerza no forma parte de la fuerza lateral total, pero sí debe considerarse en el diseño de los elementos del piso.

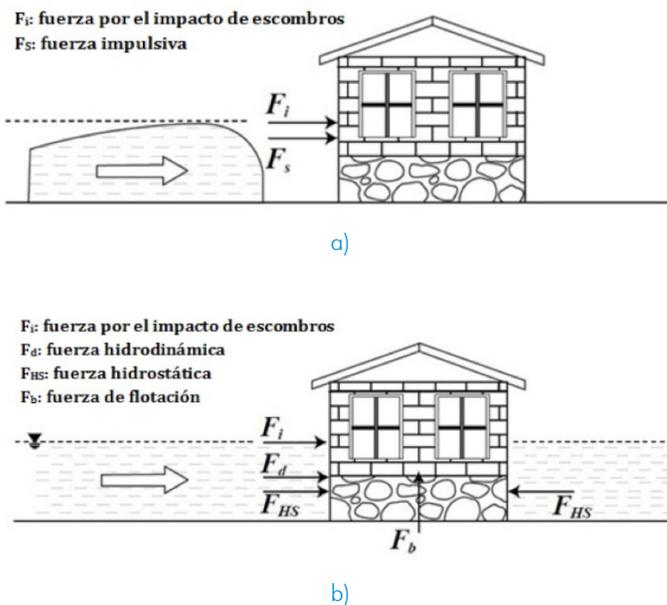


Figura 6. Combinaciones de carga asociados con a) el impacto inicial y b) el post-impacto, según Nouri (2007)

## 5. OTRAS CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO

No solo la resistencia de una estructura es importante para contrarrestar las cargas provenientes de un tsunami, sino que también la orientación de la misma puede ser clave. Las fuerzas inducidas por un tsunami aumentan proporcionalmente con el área expuesta de la estructura. Por lo tanto, es conveniente orientar los edificios con su lado más corto paralelo a la costa (ver Figura 7). Las paredes estructurales también deben orientarse de modo que se minimice el área expuesta.

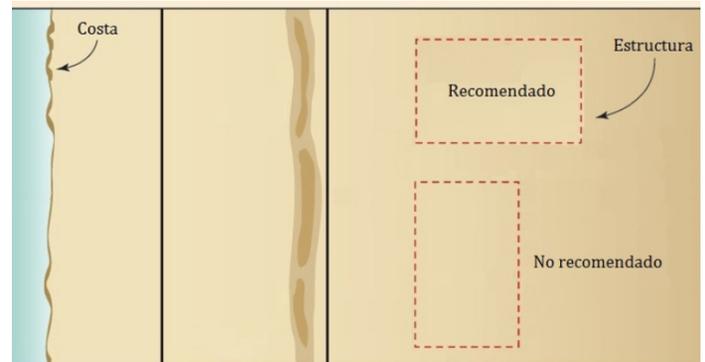


Figura 7. Orientación recomendada y no recomendada de una estructura al considerar el área expuesta

## 6. CONCLUSIONES

A pesar de la ocurrencia poco frecuente de los tsunamis, este tipo de evento es una amenaza latente. La alta sismicidad presente en Costa Rica y en otras regiones cercanas lo convierten en un país susceptible a la ocurrencia de un tsunami. El caso particular de Puntarenas recibe especial atención debido a sus condiciones geográficas, las cuales además de producir una alta susceptibilidad a inundaciones, pueden complicar también la evacuación de la población.

Debido a esto, es importante que Puntarenas y otras regiones con condiciones similares cuenten con un plan adecuado de evacuación ante un tsunami. La construcción dentro de la misma ciudad de estructuras que tengan capacidad de resistir tanto las cargas del tsunami, así como del evento sísmico que lo produce, puede ser clave en la elaboración de este plan, ya que reduciría significativamente el tiempo necesario para llevar a las personas a un lugar seguro.

A la hora de realizar el diseño de estructuras resistentes a tsunamis, deben considerarse las fuerzas hidrostáticas, hidrodinámicas, boyantes, impulsivas y gravitacionales que el tsunami ejercería sobre la misma, así como las cargas adicionales por el impacto de escombros arrastrados por el agua. Otras consideraciones adicionales tales como la orientación de la estructura también deben tomarse en cuenta.

Es de suma importancia generar conciencia en las autoridades,

comisiones de emergencia, ingenieros estructurales y la población en general, sobre la necesidad de tomar acciones preventivas ante la ocurrencia de un tsunami. El trabajo conjunto y una preparación adecuada puede llegar a evitar la pérdida de vidas humanas y mitigar así los efectos devastadores que los tsunamis son capaces de producir.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Dames & Moore. (1980). Design and Construction Standards for Residential Construction in Tsunami Prone Areas in Hawaii. Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2003). Coastal Construction Manual (FEMA P55). Federal Emergency Management Agency. Maryland, EE.UU.
- FEMA. (2008). Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis (FEMA P646). Federal Emergency Management Agency. Maryland, EE.UU.
- FEMA. (2009). Vertical Evacuation from Tsunamis: A Guide for Community Officials (FEMA P646A). Federal Emergency Management Agency. Maryland, EE.UU.
- INETER. (2005). El tsunami (maremoto) de 1992 en Nicaragua. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.
- Nouri, Y., Nistor, I., Palermo, D. (2007). Tsunami induced hydrodynamic and debris flow forces on structural elements. Proceedings of 9th Canadian Conference of Earthquake Engineering, p. 2267-2276.
- Palermo, D. & Nistor, I. (2008). Tsunami-Induced Loading on Structures. Structure Magazine. Structure Magazine, p. 10-13.
- Palermo, D., Nistor, I., Saatcioglu, M. (2013). Tsunami Loads on Infrastructure. Encyclopedia of Earth Sciences Series, p. 1046-1053
- Power, W., Leonard, G. (2013). Tsunami. Encyclopedia of Earth Sciences Series, p. 1036-1045.
- Vindas, M. (2008). País vulnerable al impacto de maremotos. Girasol N° 37.