

RECOMENDACIONES DE DISEÑO DE OBRAS MARÍTIMAS Y TERRESTRES SOMETIDAS A CARGAS DE TSUNAMIS

Patricio Winckler G. ¹, Mauricio Reyes G. ², Manuel Contreras L. ³

RESUMEN

El 27 de febrero de 2010, a hora local 3:34 AM, la zona central de Chile fue sacudida por un terremoto que alcanzó una magnitud de 8,8 grados en la escala de Richter, con epicentro 63 [km] al SO de Cauquenes y profundidad focal estimada en 47,4 [km] (Boroschek et al 2010). Como consecuencia del terremoto, se registraron ondas de tsunami que impactaron con gran intensidad aproximadamente 550 kilómetros a lo largo de la costa continental, desde San Antonio (33°35'S; 71°37'W) a Tirúa (38°20'S; 73°29'W) y territorio insular como la Isla de Juan Fernández (33°39'S; 78°52'W), ubicada a 600 [km] de la costa.

Debido a la ocurrencia de este fenómeno, se formó una comisión internacional de expertos bajo la coordinación del International Tsunami Information Center, cuyo objetivo fue evaluar las características de la inundación y las consecuencias sobre las instalaciones terrestres y portuarias mediante un levantamiento en toda la zona afectada.

Esta comisión se enfocó en evaluar los siguientes elementos: Tipo de la fuente del tsunami, parámetros tectónicos y sísmicos, avalanchas submarinas y derrumbes terrestres, efectos de la deformación del terreno, configuración de los lugares de llegada, parámetros de la aproximación y llegada del tsunami, efectos del tsunami, daños y víctimas, respuesta del público y las autoridades, observaciones adicionales, comentarios y recomendaciones. En este informe se ilustran los efectos en algunas localidades de la V, VI y VII regiones, visitadas por el equipo redactor.

Como parte de la información levantada, y por petición del Instituto de Ingenieros, se ha elaborado este informe preliminar cuyo objetivo es describir y clasificar los daños observados, definir criterios esenciales a considerar en futuros estudios y futuras líneas de acción de cara al planteamiento de normas estructurales, instrumentos de planificación urbana y planes de educación.

¹ Ingeniero Civil. MSc. In Environmental Technology. Master en Ingeniería de Puertos y Costas.

² Ingeniero Civil. Master en Ingeniería Estructural y Geotécnica (en curso).

³ Matemático. Ingeniero Informático. Magíster (c) Estadística.

1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO.

Existe abundante bibliografía sobre los fenómenos de generación y propagación de tsunamis que, en afán de síntesis, ha sido incluida como lectura complementaria en el Capítulo 0 de este documento. En consecuencia, se presentan algunas características generales de estos fenómenos y se profundiza en el arribo de las ondas a la costa.

Los tsunamis corresponden a ondas de período relativamente largo y baja probabilidad de ocurrencia, cuyos efectos a nivel costero son altamente dependientes del mecanismo que los genera y de las condiciones locales del emplazamiento. Los mecanismos de generación de tsunamis más comunes son los siguientes: terremotos submarinos, actividad volcánica, resonancias de las masas de agua, avalanchas submarinas, explosiones nucleares y tsunamis de origen atmosférico. Desde 1562 a la fecha, en Chile se han registrado 28 tsunamis de diferentes magnitudes¹, lo que sugiere una recurrencia de un tsunami cada 16 años. De ellos, los tsunamis más destructivos han sido generados por terremotos en los años 1730, 1835, 1868, 1877, 1922, 1960 y 2010, lo que sugiere una recurrencia cercana a los 50 años si se considera el borde costero nacional en su integridad.

Estas ondas pueden acumular suficiente energía para atravesar océanos. Se propagan como ondas gravitacionales, presentando un rango de períodos que varía entre 5 y 60 minutos y alturas menores a 1 [m] en mar abierto. Al aproximarse a la costa, los tsunamis incrementan su altura y pueden causar un impacto importante en las comunidades costeras. El daño puede manifestarse en muertes, destrucción de la infraestructura portuaria, en la inundación de grandes extensiones de terreno y en

¹ Los tsunamis registrados corresponden a 28 de octubre de 1562, 8 de febrero de 1570, 16 de diciembre de 1575, 24 de noviembre de 1604, 13 de mayo de 1647, 15 de marzo de 1657, 8 de julio de 1730, 25 de mayo de 1751, 11 de abril de 1819, 19 de noviembre de 1822, 20 de febrero de 1835, 7 de noviembre de 1837, 17 de noviembre de 1849, 26 de mayo de 1851, 5 de octubre de 1859, 13 de agosto de 1868, 9 de mayo de 1877, 16 de agosto de 1906, 4 de diciembre de 1918, 10 de noviembre de 1922, 1 de diciembre de 1928, 6 de abril de 1943, 22 de mayo de 1960, 28 de diciembre de 1966, 3 de marzo de 1985, 30 de julio de 1995, 21 de abril de 2007 y 27 de febrero de 2010.

daño a los sistemas de transporte, redes de energía y de agua potable. El arrastre de objetos y sustancias puede provocar contaminación ambiental y provocar enfermedades epidémicas en sectores poblados.

En general, los grandes terremotos en las costas de Chile presentan una zona de ruptura ubicada entre la fosa y 100 [km] al Este, en que se producen sollevamientos, y una zona interior entre 100 y 220 [km] al Oeste, en que se produce subsidencia. El contacto entre placas es rugoso, produciéndose un acoplamiento entre ellas y acumulación de energía en el período intersísmico. Los epicentros de estos sismos tsunamigénicos se localizan a unos 100 [km] de la fosa en el litoral y a una profundidad focal de hasta 60 [km]. Hasta la fecha se reconoce la existencia de 3 condiciones básicas para la generación de un tsunami de origen tectónico²:

- Que el epicentro del sismo, o una parte mayoritaria de su área de ruptura, esté bajo el lecho marino y a una profundidad menor a 60 [km].
- Que ocurra en una zona de hundimiento de borde de placas tectónicas, es decir, que la falla tenga movimiento vertical y no sea solamente de desgarre con movimiento lateral.
- Que el sismo libere suficiente energía y que el mecanismo de falla a través del cual ésta es transformada en energía hidrodinámica sea efectivo.

En este sentido, se reconoce que no existe una relación binaria entre terremotos y tsunamis, puesto que un movimiento sísmico de magnitud considerable puede indistintamente generar un tsunami importante o no hacerlo. Asimismo, se reconoce que la amplitud del tsunami no es necesariamente proporcional a la del terremoto y que no hay una reciprocidad clara entre ambos fenómenos. En términos energéticos, una fracción

² Estas condiciones son de carácter cualitativo y, de acuerdo al estado actual del conocimiento en la materia, no existe aún ningún modelo teórico ni método operacional totalmente satisfactorio y confiable que permita determinar el potencial tsunamigénico de un sismo.

de entre un 0,5% y un 10% de la energía sísmica es efectivamente convertida en energía hidrodinámica.

El perfil de ondas resultante de un tsunami generado en océano abierto depende de los parámetros de su fuente, de las características de la región de propagación y del tiempo o distancia transcurridos desde el inicio de esa propagación. Su velocidad de propagación depende básicamente de la profundidad del agua por la cual atraviesa. Esto determina que durante su trayectoria, el tsunami se vea sujeto a fenómenos de refracción y dispersión de energía. Se sabe que la gran longitud de onda que presentan los tsunamis de origen sismotectónico (100 a 300 km), provoca que su propagación en océano abierto se realice casi sin pérdida de energía por fricción de fondo y con una amplitud de onda de unos cuantos centímetros, por lo que resultan imperceptibles para las embarcaciones.

En la costa, en cambio, la disminución de la profundidad y su configuración, genera la concentración de la energía cinética de las ondas; disminuye su longitud y crece su altura, alcanzando un gran poder destructivo con alturas que pueden llegar hasta los 20 o 30 [m]. Las mayores alturas han sido observadas en bahías angostas o semicerradas (por amplificación resonante), en desembocaduras de ríos y en bahías con presencia de islas. La altura alcanzada por un tsunami al arribar a la costa se debe a la interacción de varios factores físicos y morfológicos; éstos son: características de las ondas en mar abierto, batimetría del fondo, configuración de la costa, de los fenómenos de difracción, refracción y reflexión de las ondas en las distintas formaciones costeras, etc. Estos factores determinan que el arribo del tsunami a la línea costera sea un proceso complejo, lo cual genera diferencias notables de altura máxima (run-up), aun a cortas distancias a lo largo de ella.

Cabe mencionar que el factor batimétrico es relevante en la determinación de la intensidad y, por ende, de la cota máxima que puede alcanzar un tsunami en la costa. De esta forma, un relieve de gran irregularidad, puede redundar en cotas de inundación variables a lo largo de la costa, en tanto que una batimetría regular generará variaciones menores en la inundación.

El gran impacto de las ondas en la costa es atribuible a las fuerzas hidrodinámicas sobre las estructuras, causadas por la velocidad de las corrientes y contracorrientes inducidas por el arribo de las olas. La altura y período de éstas, determinan la cantidad de inundación en términos del run-up, fuerzas de elevación y de flotabilidad. Esencialmente hay dos tipos de fuerzas hidrodinámicas que afectan a las estructuras: una proviene del impacto directo de las olas al inundar el borde costero y la otra es debido a las fuerzas erosivas producidas durante el proceso de elevación y descenso del nivel del agua, originado por el flujo alrededor de las estructuras.

Los efectos secundarios sobre las estructuras son causados principalmente por las fuerzas erosivas del agua al interactuar con el medio. Ejemplos son la pérdida de soporte del suelo debido a la erosión del terreno o cuando las fuerzas de elevación crean momentos de giro, en que una estructura puede ser levantada de sus cimientos o una embarcación soltada de sus amarras. En esta situación, las estructuras son transportadas en la dirección de las corrientes y el daño es causado por objetos o despojos flotantes de embarcaciones, autos, construcciones, etc., al impactar éstos sobre otras estructuras. El impacto de objetos flotantes contra tanques de combustible y terminales o redes eléctricas suele dar inicio a incendios.

2. DAÑOS OBSERVADOS.

En la literatura se reconoce una serie de daños directos asociados al impacto de tsunamis, los cuales se presentan en este capítulo mediante ejemplos registrados luego del terremoto y tsunami del 27/02/2010. Los daños directos asociados al ataque de las ondas se presentan a continuación:

- Pérdidas humanas y de animales por ahogamiento.
- Socavación y fallas de fundaciones.
- Fallas de tipo estructural.
- Daño en sistemas de almacenamiento de sustancias tóxicas.
- Inundación en sectores bajos.
- Arrastre de embarcaciones y elementos flotantes.
- Pérdida de servicios básicos y líneas de vida.
- Impactos sobre la morfología y ecosistemas.
- Pérdida de cultivos agrícolas.
- Fallas en suelos.
- Contaminación.

Se reconocen asimismo, daños que no están directamente asociados al ataque de las ondas, como los incendios causados por la inflamación

de combustibles, la contaminación debida al arrastre de material putrescible y el surgimiento de epidemias.

A continuación se presenta una descripción de los daños observados durante la salida a terreno, con énfasis en los aspectos relevantes desde el ámbito de la planificación, diseño y construcción de obras terrestres y marítimas.

2.1 SOCAVACIÓN FALLAS DE FUNDACIONES.

Se observaron daños en fundaciones de viviendas livianas que permitieron la flotación de las mismas (Figura 2-1) y fallos en fundaciones de estructuras mayores. Las fuertes corrientes generadas por un tsunami pueden alcanzar hasta 10 [m/s] y como consecuencia provocar la socavación de las instalaciones portuarias -como muelles sobre pilotes, escolleras, muros de defensa costera, tablestacados, gaviones- y costeras como estribos de puentes (Figura 2-2). El efecto erosivo es generalmente crítico durante la retirada del tsunami, cuando el flujo se ve potenciado por el arrastre de escombros. Los suelos cohesivos son particularmente susceptibles al avance de la inundación debido a que una vez saturados, disminuyen su capacidad de soporte.

Figura 2-1: Falla de viviendas livianas en Llo-lleo, V Región.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-2: Falla por socavación del estribo del Puente Iloca, VII Región.



Fuente: Elaboración propia.

2.2 FALLAS DE TIPO ESTRUCTURAL.

Se observaron daños debidos al impacto de las primeras olas, cuyo efecto se suma al de la inundación más lenta asociada a las ondas secundarias del tsunami. El efecto sobre las viviendas fue variable, siendo en general de fallo total en instalaciones de madera, parcial en aquellas de adobe o albañilería y menor en las aquellas de hormigón armado. En la Figura 2-3 se ilustran tres tipologías y se destaca el diferente grado del daño ante inundaciones de aproximadamente dos metros: La vivienda de madera (izquierda) experimentó una pérdida total, en tanto que la de mampostería (centro), sufrió daños menores en vidrios y terminaciones. La vivienda de adobe (derecha), sufrió daños moderados pero al momento de la visita mostraba sus paredes húmedas por la absorción del agua.

Algunas viviendas de madera no experimentaron daños significativos por ubicarse a una cierta altura del suelo. La solución tipo palafito (Figura 2-4) resultó por lo general exitosa, salvo en aquellos casos en que la inundación llegó a nivel del piso de la casa.

En algunos casos, la fuerza del impacto de las ondas y la cota de inundación fue de tal magnitud que incluso destruyó viviendas de hormigón armado, como el caso de la casa de tres pisos ubicada en la ribera del río Maule (Figura 2-5). La vivienda, constituida por columnas, vigas y bloques de hormigón, experimentó pérdida parcial de la techumbre, ubicada a unos 12 [m] sobre el nivel del lago, por efecto del impacto de las olas.

2.3 INUNDACIÓN EN SECTORES BAJOS.

Se observaron daños por inundación por sectores bajos en lugares como Iloca (Figura 2-6) o Llo-lleo (Figura 2-7) donde las viviendas se fundaban en algunos casos a cotas inferiores a 3 [m] respecto del nivel del mar. En ocasiones, los emplazamientos urbanos parecían protegidos por la presencia de cordones dunares ubicados en la zona alta de la playa, que pudieron disminuir la velocidad del flujo pero resultaron ineficientes en el control de la inundación.

La inundación provocó la flotación de aquellas construcciones livianas que no estaban firmemente ligadas a las fundaciones y en ocasiones, fueron arrastradas hasta cientos de metros desde su posición original. En la Figura 2-8, por ejemplo, se muestran las cadenas de una vivienda encontradas a decenas de metros de su posición original en Iloca. En la Figura 2-9 se muestran los restos del segundo piso de una vivienda de madera desplazada desde su posición original, cuyo primer piso colapsó, y vivienda con el primer piso de hormigón armado en construcción sin daños en Iloca. En primer plano, el maestro constructor responsable de la casa sin daño.

Figura 2-3: Falla de diferentes tipologías estructurales en Iloca, VII Región.*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-4: Falla de diferentes tipologías estructurales en Iloca, VII Región.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-5: Falla en casa ubicada en la ribera del Río Maule, VII Región.



Fuente: Elaboración propia.

* Ver al ing. Patricio Catalán en vivienda del centro, indicando el nivel máximo de inundación.

Figura 2-6: Inundación en sectores bajos de Iloca, VII Región.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-7: Inundación en sectores bajos de Llo-lleo, V Región.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-8: Cadenas de vivienda encontradas a decenas de metros de su posición original (al fondo) en Iloca, VII Región.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-9: Restos del segundo piso de una vivienda de madera desplazada desde su posición original y vivienda con primer piso en construcción en Iloca, VII Región.



Fuente: Elaboración propia.

2.4 ARRASTRE DE EMBARCACIONES Y ELEMENTOS FLOTANTES.

Se observaron desplazamientos significativos de embarcaciones menores como botes y lanchas en prácticamente toda la costa afectadas, de pesqueros de mayor tonelaje en puertos como Talcahuano (Figura 2-10), de naves de gran tonelaje como el caso de buque oceanográfico “Cabo de Hornos” ubicado en los Astilleros ASMAR Talcahuano. Se registraron desplazamientos de contenedores lo que, sumados a otros elementos flotantes, generaron grandes daños en la infraestructura costera. Estos efectos son esperables ante ataque de tsunamis y su mitigación es compleja de implementar.

2.5 PÉRDIDA DE SERVICIOS BÁSICOS Y LINEAS DE VIDA.

Es probable que los postes del tendido eléctrico y/o el suelo de fundación de las instalaciones terrestres sea también socavado por el flujo de agua, provocando la pérdida total o parcial de líneas de ferrocarril, vías de comunicación y caminos. Ello trae como consecuencia la interrupción del tránsito y el retraso en las operaciones de rescate, emergencia y reconstrucción, una vez ocurrido un evento catastrófico.

2.6 IMPACTOS SOBRE LA MORFOLOGÍA COSTERA.

Se evidenciaron modificaciones significativas en la morfología costera en sectores altamente dinámicos como las desembocaduras de los ríos Mataquito y Boyeruca, entre otros, y lagunas costeras como el Yali. El caso de la desembocadura del Río Mataquito (Figura 2-14) es preocupante pues desaparecieron alrededor de 8 [km] de un cordón dunar cuya función es albergar un humedal de valor biológico relevante y dar abrigo a localidades costeras como La Trinchera y La Pesca. En esta última localidad, se registraron cotas máximas de inundación de alrededor de 10 [msnm] y en la actualidad no presenta dicha protección, por lo que puede sufrir los embates de los temporales de invierno si no se adoptan acciones preventivas.

2.7 FALLA EN SUELOS.

Se evidenciaron fallas en suelos en forma sistemática en la zona catastrada, en particular en zona cercanas a desembocaduras como en la ribera sur del río Maipo, en Llo-lleo (Figura 2-15), donde también se observó un relleno sanitario socavado y restos de residuos sólidos a decenas de metros de su emplazamiento original. Se encontraron jeringas quirúrgicas y otros residuos peligrosos que representan un peligro sanitario potencial en la zona de la playa de Llo-lleo.

Figura 2-10: Daños mayores en Puerto de Talcahuano, VIII Región.



Fuente: www.boston.com/bigpicture/2010/03/chile_three_days_later.html

Figura 2-11: Arrastre de contenedores en Talcahuano, VIII Región.



Fuente: www.boston.com/bigpicture/2010/03/chile_three_days_later.html

Figura 2-12: Falla de cables telefónicos y eléctricos en Concepción, VIII Región.



Fuente: www.boston.com/bigpicture/2010/03/chile_three_days_later.html

Figura 2-13: Falla del camino costero en La Trinchera, VII Región.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-14: Desaparición de la barra del río Mataquito, VII Región.



Fuente: Vuelo aéreo proporcionado por Andrés Camaño, Arauco.

Figura 2-15: Falla de suelo en la ribera del Río Maipo, V Región.



Fuente: Elaboración propia.

3. RECOMENDACIONES.

3.1 GENERALIDADES.

La planificación y diseño de infraestructura costera y portuaria debiera basarse en los siguientes principios:

- Evaluar el riesgo de tsunami en zonas costeras
- Incorporar mapas de zonificación de riesgo de tsunamis en el diseño de los instrumentos de planificación urbana.
- Considerar cargas de tsunami en instalaciones portuarias, de acuerdo a una escala de clasificación por importancia y la repercusión económica, social y ambiental de su fallo o paralización temporal.
- Considerar cargas de tsunami en obras industriales ubicadas en zonas de riesgo, de acuerdo a una escala de clasificación por importancia y la repercusión económica, social y ambiental de su fallo o paralización temporal.
- Considerar tipologías de viviendas adecuadas para zonas de riesgo.
- Localizar líneas de vida considerando el riesgo de tsunami.
- Implementar planes de evacuación de la población, que consideren.
- Implementar planes de contingencia en instalaciones industriales costeras.

3.2. EVALUAR EL RIESGO DE TSUNAMI EN ZONAS COSTERAS.

Los objetivos de una evaluación del riesgo de tsunami se basan en los siguientes elementos para evaluar el peligro asociado:

- Estudiar las fuentes de generación, fenómenos de propagación e impacto costero para tsunami de campo de carácter histórico o esperable en el área de interés.
- Mediante modelación numérica estimar la máxima inundación, campos de altura y de velocidades debidos a tsunamis desde el origen hasta su proceso de término. Debido a la complejidad de los procesos de interacción topográfica y batimétrica que experimentan las ondas de tsunami en su propagación hacia la costa, la evaluación del riesgo debe realizarse conociendo en detalle la distribución de sondas en el área de interés.
- Determinar las cargas hidrodinámicas de tsunami para el diseño estructural de los distintos elementos de las futuras obras marítimas.

Una vez analizado el peligro se debe evaluar la vulnerabilidad de un determinado asentamiento.

- Evaluar la vulnerabilidad mediante la definición de variables geodemográficas adaptadas a cada localidad en particular.
- Evaluar el riesgo mediante el cruce de la información de vulnerabilidad de la localidad y el peligro de tsunami.
- Definir medidas de mitigación del daño orientadas a minimizar la pérdida de vidas y el daño de las obras marítimas y terrestres.

3.3. CONSIDERAR CRITERIOS DE TSUNAMI EN INSTALACIONES COSTERAS.

3.3.1 DISEÑO DE INSTALACIONES CONSIDERANDO CARGAS DE TSUNAMI.

Se debieran incorporar cargas eventuales de tsunami en puertos de importancia regional y nacional, centrales termoeléctricas, instalaciones industriales y líneas de vida (sección 3.3.4). En la Tabla 3-1 se presentan una serie de causas, efectos y medidas de mitigación del riesgo de tsunami que debieran ser adoptados tanto en la planificación y diseño de futuras obras.

3.3.2 TIPOLOGÍAS DE VIVIENDAS ADECUADAS PARA ZONAS DE RIESGO.

Existen diferentes técnicas básicas de mitigación que pueden ser aplicadas en proyectos para reducir el impacto de tsunami (Figura 3-1):

- Evitar áreas inundables mediante estructuras altas tipo palafitos (avoiding).
- Disminuir o suavizar las corrientes generadas por el tsunami mediante el uso de elementos rugosos como zanjas, arboledas (slowing).
- Desviar el flujo mediante obras de defensa perimetrales (steering).
- Bloquear el flujo mediante obras de defensa costera (blocking).

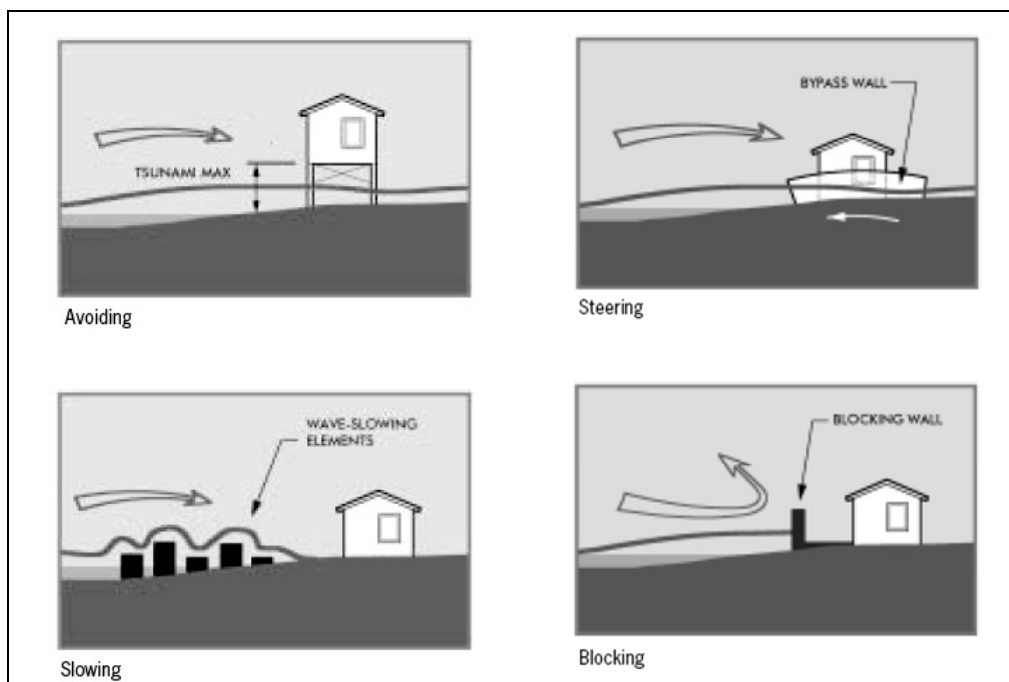
Estas estrategias pueden ser usadas en forma separada o combinadas dentro de una más amplia. Los métodos pueden ser usados en forma pasiva para permitir la pasada de los tsunamis a través de un área sin causar mayor daño o bien pueden ser usados construyendo estructuras resistentes que sean capaces de soportar las fuerzas de un tsunami. Estructuras firmes, tales como paredes, terrazas y bermas compactadas, estructuras de estacionamientos y otras construcciones rígidas pueden bloquear la fuerza de las ondas. Sin embargo, este bloqueo puede dar como resultado una amplificación de la altura de la onda y la energía de ésta puede ser refractada o redirigida hacia otra área.

Tabla 3-1: Matriz causa – efecto - medidas de mitigación ante un tsunami.

Causa	Efecto	Medida de mitigación
Inundación	Fundación y pisos inferiores inundados.	Ubicar edificaciones en sectores altos o elevarlas sobre el nivel de inundación.
	Falla en sistemas mecánicos, eléctricos y de comunicación.	Instalar equipamiento importante en pisos ubicados sobre el nivel de inundación.
	Daño a las construcciones, personas, y amoblado.	Proteger, reforzar y anclar depósitos de materiales peligrosos.
	Contaminación con materiales de alto contenido salino.	Evaluar la capacidad de soporte del suelo y utilizar materiales de construcción resistentes.
	Fuerzas hidrostáticas: Presión causada por diferentes niveles a ambos lados de un muro.	Ubicar edificaciones en sectores altos o elevarlas sobre el nivel de inundación.
		Diseñar los muros para fuerzas de presión hidrostáticas.
		Utilizar aperturas en las paredes que eviten los diferenciales de nivel y anclajes resistentes.
Flotación.	Ubicar edificaciones en sectores altos (sobre el nivel de inundación) y uso de anclajes.	
Saturación y disminución de la capacidad de soporte del suelo.	Evitar la construcción sobre taludes potencialmente afectos a inundación.	
	Evaluar la condición del suelo inundado.	
Corrientes	Fuerzas hidrodinámicas de impacto y de arrastre.	Ubicar edificaciones en sectores altos o elevarlas sobre el nivel de inundación.
		Diseño considerando fuerzas hidrodinámicas y uso de anclajes resistentes.
	Impacto de escombros.	Ubicar edificaciones en sectores altos o elevarlas sobre el nivel de inundación.
		Diseñar edificaciones considerando fuerzas hidrodinámicas de impacto.
Socavación.	Utilizar fundaciones profundas y elementos de protección al pie de la obra.	
Rompimiento	Fuerzas hidrostáticas	Diseño para oleaje rompiente.
	Impacto de escombros.	Ubicar edificaciones en sectores altos o elevarlas sobre el nivel de inundación. Diseño estructural considerando fuerzas de impacto.
Flujo de resaca	Inestabilidad estructural de muros de contención.	Diseño considerando suelos saturados y dotar de drenes eficientes.
	Socavación.	Utilizar fundaciones profundas y elementos de protección al pie de la obra.
Incendio	Ignición de materiales inflamables	Ubicar estanques de sustancias inflamables en zonas seguras y utilizar materiales resistentes al fuego.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-1 Estrategias para incorporar criterios de diseño de tsunamis en viviendas



Fuente: NTHMP (2001). "Designing for Tsunamis".

Donde no es posible ubicar nuevas edificaciones lejos de las áreas potencialmente inundables, el diseño de la edificación y su construcción juegan un rol crítico en el desempeño de las estructuras en el evento de un tsunami.

Un buen desempeño depende de las siguientes consideraciones:

- Ubicación de la edificación y su configuración (tamaño, forma, elevación y orientación).
- Intensidad y frecuencia del peligro de tsunami seleccionado para el diseño.
- Diseño estructural y no estructural estándar.
- Estructura y materiales.
- Confiabilidad requerida para la estructura.
- Capacidades profesionales de los diseñadores.
- Calidad de la construcción.

El diseño y la construcción de nuevas edificaciones deben enfocarse en las fuerzas asociadas al evento tsunamigénico o sus efectos como la presión del agua, boyantes, corrientes y olas, impacto de restos y fuego.

Después del tsunami de Sumatra-Andaman, ocurrido el 26 de diciembre de 2004, se formularon una serie de proyectos orientados al diseño y construcción de viviendas sociales de bajo costo en zonas de riesgo de tsunami. En general, estas soluciones consideran la elevación de la casa, la generación de ejes estructurantes más complejos que los simples muros perimetrales (de forma de dar mayor rigidez a la estructura), el uso de anclajes al suelo y sistemas de sujeción entre elementos estructurales robustos. Cabe mencionar que este tipo de soluciones deben considerar la realidad local, en cuanto a temperaturas, precipitación, humedad, disponibilidad de materiales, existencia de animales e insectos, tradiciones, entre otros, que demandan de la asistencia de especialistas.

Un ejemplo de este tipo de soluciones es la propuesta por Tenzin Priyadarshi, del MIT, en 2005 para la Prajnopaya Foundation. El proyecto “*Tsunami-safe(r) house: A design for the prajnopaya foundation*” contempla algunos de

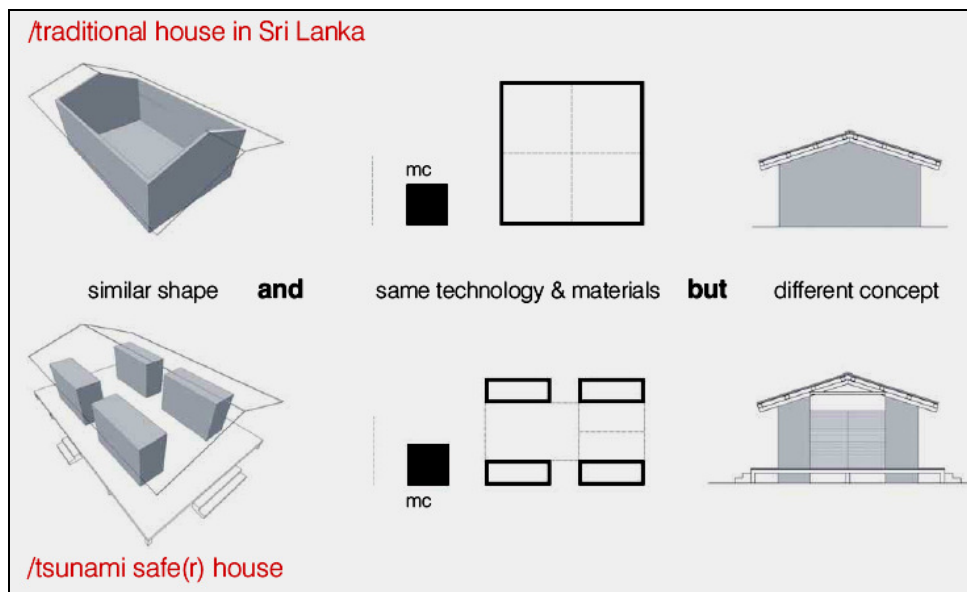
estos elementos y es de fácil acceso en Internet (Figura 3-2).

Figura 3-2: Proyecto de vivienda social Tsunami-safe(r) house.



Fuente: Priyadarshi, T. (2005) “Tsunami-safe(r) house”.

Figura 3-3: Proyecto de vivienda social Tsunami-safe(r) house.



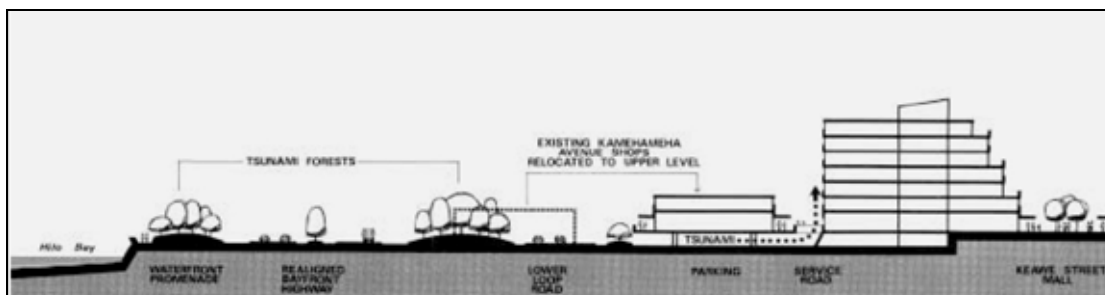
Fuente: Priyadarshi, T. (2005) “Tsunami-safe(r) house”.

3.3.3 ARBOLEDAS DE PROTECCIÓN EN ZONAS DE RIESGO.

Un de las técnicas para disminuir las corrientes generadas por el tsunami, involucran la creación de fricción que reduzca el destructivo poder de las ondas. Esto se logra diseñando zanjas, pendientes, arboledas de protección y bermas que puedan detener y filtrar los restos o escombros acarreados por las ondas. Las técnicas para guiar la fuerza de las ondas de tsunami lejos de las zonas vulnerables consisten en implementar estructuras estratégicamente espaciadas, tales como paredes

anguladas y zanjas o usando superficies pavimentadas que generen una vía de fricción lenta para que el agua continúe su paso. Naturalmente, estos arreglos denominados “tsunami forests” requieren de espacio suficiente en la zona costera y requiere del uso de especies de buena adaptación al clima local, con raíces profundas y vegetación frondosa, de modo de disipar la energía de las ondas. En la Figura 3-4 se muestra una propuesta de Arboledas de protección propuestas para la ciudad de Hilo, Hawaii.

Figura 3-4: Arboledas de protección propuestas para la ciudad de Hilo, Hawaii.



Fuente: NTHMP (2001). “Designing for Tsunamis”.

3.3.4 LÍNEAS DE VIDA E INSTALACIONES ESENCIALES PARA COMBATIR LA EMERGENCIA.

Como medida de planificación del uso del suelo, se debiera considerar un ordenamiento territorial en las zonas de alto riesgo, basado en el tipo de actividad, funcionalidad e importancia de las edificaciones y, en la medida de lo posible, ubicar las siguientes instalaciones a cotas superiores a +10 [m] sobre el nivel del mar:

- Sistemas de generación y transmisión de electricidad, subestaciones de control.
- Sistemas de recepción, almacenamiento y distribución de gases.
- Sistemas de comunicación terrestre (tendido eléctrico y tuberías).
- Antenas de comunicación vía satélite.
- Sistemas de emisión de televisión y radio.
- Sistemas de agua potable.
- Sistemas de alcantarillado y aguas lluvias.

- Oleoductos.
- Sistemas autónomos de generación eléctrica.
- Estanques de almacenamiento de aguas y materiales peligrosos.
- Puertos y terminales de carga / descarga de combustibles.
- Sitios de almacenaje de materiales químicos y radiactivos.

En aquellos casos en que las instalaciones de alta peligrosidad deban ser emplazadas en los sectores críticos, se debieran proteger ya sea mediante anclajes o muros de defensa. La protección mediante este tipo de estructuras constituye una buena medida para minimizar la acción hidrodinámica del tsunami y, aún cuando no sean suficientemente robustas para reflejar completamente las ondas, pueden ayudar a la mitigación del daño.

Se sugiere asimismo, tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Los edificios de hormigón armado, acero o mampostería presentan una alta resistencia al ataque de un tsunami, en tanto que edificaciones de madera, albañilería u otros materiales livianos son susceptibles de colapsar ante estos. Por ende, se recomienda utilizar hormigón armado en aquellas edificaciones ubicadas de zonas de alto riesgo.
- Se recomienda diseñar las estructuras costeras considerando los efectos de estabilidad estructural, socavación al pie u otros mecanismos asociados al ataque de un tsunami.
- Aquellos edificios que no son imprescindibles luego de un evento desastroso y pueden admitir daño estructural debieran ser diseñados para resistir tsunamis con bajo potencial destructivo.
- Las instalaciones de alta peligrosidad, en cambio, debieran ser diseñadas para soportar un tsunami potencialmente destructivo, de manera de garantizar su operatividad e integridad luego del ataque de un tsunami.
- Los niveles inferiores de los edificios debieran ser diseñados de manera de albergar los sitios de uso público (lobby, estacionamientos, servicios, etc.) y debieran permitir el paso del agua a través de subestructuras no estructurales que cedan ante el ataque de la onda.
- Se sugiere reforzar las construcciones en estado de deterioro estructural y, dotar, en la medida de lo posible, de anclajes resistentes al suelo de fundación.

3.3.5 PLANES DE CONTINGENCIA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES.

Uno de los aspectos importantes a considerar en las instalaciones portuarias se refiere al manejo de sustancias peligrosas. Se recomienda adoptar las siguientes medidas precautorias para los sistemas de almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas:

- Efectuar una inspección de los estanques de almacenamiento, equipos de conducción y sistemas de bombeo de materiales peligrosos en las zonas de riesgo, en donde se examine su integridad estructural. En aquellos casos en que la estructura sea esencial para el funcionamiento de la planta, es recomendable realizar un estudio específico a objeto de verificar su diseño estructural, considerando las cargas de tsunami.
- Actualizar en forma sistemática los sistemas de seguridad industrial y de prevención de riesgos, incorporando las medidas de protección ante un tsunami.
- Elevar por sobre los niveles máximos de inundación, aquellos sistemas eléctricos y de conducción que pudieren ser impactados por un tsunami y establecer una cota de seguridad sobre la que éstos puedan ser ubicadas.
- Establecer un plan de contingencia orientado a las instalaciones industriales que considere, entre otras medidas, el cierre de las válvulas y la paralización de cualquier operación de llenado o vaciado de estanques. En el plan se debiera evaluar de antemano y mediante un protocolo establecido, cualquier posibilidad de ocurrencias de derrames.

3.4 INCORPORAR EL RIESGO DE TSUNAMIS EN LA PLANIFICACIÓN URBANA.

Se debiera incorporar los estudios de riesgo de tsunamis y otros fenómenos naturales³ en los instrumentos de planificación urbana (planes reguladores), evitando desarrollos urbanos en sectores de alto riesgo y racionalizar el uso del suelo. Tal vez esta medida a medio o largo plazo es de las más eficientes al momento de definir las consecuencias asociadas al impacto de fenómenos de esta naturaleza.

3.5 PLANES DE EDUCACIÓN A LA POBLACIÓN.

En la salida a terreno costeras de la VII Región se constató que, a pesar de que el sistema de alarma, en su concepción habitual, no funcionó, casi no hay fatalidades humanas que lamentar en las comunidades locales aun cuando la devastación es impresionante. La explicación es que la gran mayoría de la población había aprendido de sus padres o bien de campañas de información específicas, que ante un terremoto de larga duración en el cual fuera difícil caminar, es necesario buscar un punto alto y protegerse.

3.5.1 PLANES DE EVACUACIÓN DE LA POBLACIÓN.

Con el objetivo de evitar la pérdida de vidas humanas durante la ocurrencia de un tsunami, se recomienda instruir a la comunidad local sobre cómo actuar ante la eventualidad. Se debe tomar en cuenta que el ciudadano común tiene poco conocimiento del fenómeno y de las acciones a adoptar. La instrucción debe llevarse a cabo de manera periódica mediante personal capacitado, con un manejo cauteloso de la información para evitar un temor excesivo del riesgo de tsunami. Las autoridades deben tener presentes las siguientes recomendaciones con el fin de adoptar medidas tendientes a evitar o minimizar la pérdida de vidas y daños materiales:

- Dado que los tsunamis tienen su origen en un sismo, la zona de mayor peligro es precisamente en el área costera donde éste se ha sentido violentamente. La ocurrencia de un sismo de gran intensidad y de duración superior a 30 [s] en la zona costera debe considerarse como alarma natural, ya que el tiempo de que se dispondrá para evaluar la situación es de entre 20 y 60 minutos después de producido el sismo.
- Si el tsunami es de campo lejano (generado a más de 100 [km] de distancia), son los organismos encargados de la Protección Civil a través del sistema Nacional de Alerta de Maremotos los responsables de proporcionar oportunamente la información para que la comunidad evacue hacia las zonas seguras.
- Se debe considerar que durante la ocurrencia de un sismo y tsunami de campo cercano, las comunicaciones se cortan o tienden a saturarse, lo que imposibilita transmitir de manera eficiente la información. En consecuencia, la red de comunicaciones debe ser inalámbrica, vía radio o satelital, y autónoma en su fuente de energía.
- Las zonas seguras para la evacuación de la población debieran estar ubicadas en alturas superiores a 20 [msnm]. Aquellos sectores en que no hay cotas suficientes o que se encuentran muy distantes de las zonas seguras, los operarios debieran buscar protección en un bosque o los pisos altos de estructuras de hormigón armado que no hayan experimentado daño significativo durante el terremoto.

³ Se debieran incorporar todos los riesgos naturales esperables en cada localidad. Entre estos destacan los sismos, remociones en masa, subsidencia, inundación, variación del nivel del mar.

- Si se observa un repentino recogimiento del mar por debajo del nivel normal de la marea, dejando en seco grandes extensiones del fondo marino, debe considerarse la posibilidad de un retorno violento de las aguas. Por ende, ante esta situación debiera buscarse protección en zonas seguras.
- Se debe tener presente que un maremoto tiene varias olas destructivas que pueden llegar a la zona costera dentro de un lapso bastante prolongado. En el caso del terremoto del 27-02-2010, se registraron anomalías significativas del nivel del mar hasta 10 horas después de transcurrido el sismo. Por lo tanto se recomienda prohibir el regreso de la población a sus casas hasta que el tsunami se haya extinguido completamente.
- Se deben mantener operativos los planes de evacuación. Las autoridades deberán garantizar la presencia de vehículos de emergencia y personal capacitado ante la eventualidad.
- Las embarcaciones deberán zarpar, en la medida de lo posible, ya que el tsunami es destructor sólo en la costa. Puede considerarse a la nave fuera de peligro cuando se encuentre en profundidades mayores de 150 [m]. De no ser posible el zarpe dentro de los primeros 10 minutos de ocurrido el sismo, deberá alistarse a la nave o embarcación en forma análoga a la preparación para soportar un temporal de grandes proporciones. El personal a bordo deberá ser premunido de chalecos salvavidas y ropas de abrigo.

3.5.2 PLAN DE EDUCACIÓN EN ENSEÑANZA SECUNDARIA, TÉCNICA Y UNIVERSITARIA.

En el largo plazo se debieran incorporar asignaturas relacionadas con el riesgo sísmico y de tsunamis en las mallas curriculares de las carreras universitarias de Ingeniería Civil, Construcción Civil, Arquitectura, Ingeniería Ambiental, Oceanografía, Biología Marina, Pedagogías, Turismo y especialidades de las Fuerzas Armadas. La instrucción debe considerar la orientación de la disciplina, su eventual injerencia ante la ocurrencia de un tsunami. El enfoque según cada carrera demandará la instrucción de especialistas en oceanografía, ingeniería costera, sismología, geología, licuefacción de suelos, sedimentología, sociología, planificación urbana, prevención de riesgos y/o salud pública. Se debieran implementar en forma sistemática cursos de capacitación a organismos públicos que tengan relación con la planificación urbana y la defensa civil.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Existe escasa bibliografía específica sobre recomendaciones de diseño de obras marítimas y terrestres que contemplen los efectos de tsunamis. En general, la literatura es reciente y requiere de un análisis y contextualización al caso chileno. Como primera aproximación, se recomienda la revisión crítica de los siguientes textos, organizados en orden de aparición:

4.1 BIBLIOGRAFÍA RELACIONADA CON DISEÑO DE OBRAS TERRESTRES.

- Ref.1 Priyadarshi, Tenzin (2005). *“Tsunami-safe(r) house: A design for the prajnopaya foundation”*. MIT / Prajnopaya Foundation.
- Ref.2 National Institute of Disaster Management. Ministry of Home Affairs. Government of India (2005). *“Design Criteria for reconstruction of Houses in Tsunami affected areas in India”*.
- Ref.3 NTHMP (2001). *“Designing for Tsunamis. Seven Principles for Planning and Designing for Tsunami Hazards”*.

4.2 BIBLIOGRAFÍA RELACIONADA CON DISEÑO DE OBRAS MARITIMAS.

- Ref.4 PIANC (2009). *“Mitigation of tsunami disasters in ports”*. PIANC working group 53. Draft version III august 30, 2009.
- Ref.5 PIANC (2009). *“Restoration of Port Operations following earthquakes”*. PIANC working group. Post an Earthquake Action. Draft.
- Ref.6 Allsop et al. (2004). *“Wave-in-deck loads on exposed jetties and related structures. Development of new prediction methods”*. HR Wallingford, England.
- Ref.7 OCDI (2002). *“Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan”*.
- Ref.8 Preuss, J. (1988). *“Planning for Risk: Comprehensive Planning for Tsunami Hazard Area. Urban Regional Research”*.
- Ref.9 UNESCO (1998). *“Guía de campo para levantamientos posteriores a un tsunami”*. Primera Edición). Comisión Oceanográfica Intergubernamental.

4.3 BIBLIOGRAFÍA RELACIONADA CON EL FENÓMENO TSUNAMI.

- Ref.10 Murty, T. (2007). *“The Indian Ocean Tsunami”*. Department of Civil Engineering, University of Ottawa. Ottawa, Canada. ISBN-13 978-0-415-40380-1.
- Ref.11 Satake, K (2005). *“Tsunamis: Case Studies and Recent Developments”*. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Japan. Advances in Natural and Technological Hazards Research Volume 23.
- Ref.12 Levin, B y Nosov, M. (2009). *“Physics of Tsunamis”*. ISBN 978-1-4020-8855-1.

5. MIEMBROS DE LA COMISIÓN INTERNACIONAL DE EXPERTOS. COORDINACIÓN DEL INTERNATIONAL TSUNAMI INFORMATION:

- Costas Synolakis, Coordinador de la US National Science Foundation mission, EEUU.
- Hermann Fritz, team leader, Georgia Institute of Technology, EEUU.
- Catherine Petroff, team leader, University of Washington, EEUU.
- Robert Weiss, Texas A&M University, EEUU.
- Thanassis Papadopoulos, Technical University of Crete, Grecia.
- Carl Ebeling, Northwestern University, EEUU.
- Nikos Kalligiers, Technical University of Crete, Grecia.
- Rodrigo Cienfuegos, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- Patricio Winckler, Universidad de Valparaíso, Chile.
- Manuel Contreras, Universidad Playa Ancha, Chile.
- Patricio Catalán, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.