

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
SECCION DE POSTGRADO**



**“ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO TSUNAMI-
SISMORRESISTENTES BASADAS EN EXPERIENCIAS DE
LOS SUTNAMIS EN EL OCEANO INDICO (2004) Y CAMANA
(2001)”**

TESIS

Para Optar el Grado de Maestro con Mención en:

GESTIO DE RIESGO DE DESASTRE

Ing. ERICK ARTURO MAS SAMANEZ

**Lima - Perú
2009**

AGRADECIMIENTOS

Al CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA (CONCYTEC) por el apoyo y la contribución brindada hacia mi persona durante el período de estudios y la ejecución de la tesis.

Así mismo, al Dr. Benjamín Marticorena Castillo ex-Director del CONCYTEC, por la confianza y el apoyo brindado para la culminación de mis estudios de posgrado.

Mi más profundo agradecimiento al Prof. **JULIO KUROIWA HORIUCHI**, quien en estos cinco años ha compartido sus experiencias y conocimientos con mi persona, brindándome paternal amistad y orientación en las investigaciones y trabajos que he desempeñado.

Al Profesor Fumihiko Imamura, Dr. Anat Ruangrassamee y Arq. Benny Kuriakose, quienes me asistieron y resolvieron dudas a través de los correos electrónicos compartidos.

En Camaná, al Ing. Alfredo Siu, Ing. Armando Minaya y a los pobladores de los balnearios de La Punta y Los Cerrillos, por su apoyo y por compartir sus trabajos y experiencias de un lamentable día en esta ciudad, como lo fue el 23 de Junio del 2001.

En Pisco, a los residentes y pescadores de San Andrés y Lagunillas por asistirme en mi recorrido y recopilación de información compartiendo experiencias a veces muy dolorosas pero con un incansable espíritu solidario.

A mis compañeros de la Maestría de Gestión de Riesgo de Desastres para el Desarrollo Sostenible, por compartir momentos agradables y el enriquecimiento de nuestras mentes a través del intercambio de experiencias y conocimiento.

A mis familiares y amigos cercanos por acompañarme en mis días estresantes y mis días de satisfacción y logros cumplidos.

DEDICATORIA

A Dios:

QUIEN ME BRINDA FORTALEZA, AMOR Y
PROTECCIÓN. GRACIAS POR LOS PEQUEÑOS
Y BELLOS DETALLES

A mis padres y hermanos:

Arturo y Diana – Jano y Anaid

QUIENES FORJARON UNA FAMILIA SOLIDA
BAŞADA EN EL AMOR Y EL CARIÑO.
QUIEN SOY Y QUIEN LLEGARÉ A SER SERÁ
GRACIAS A UDS.

A mis viejos y nuevos amigos:

QUIENES COMPARTEN SUS VIDAS Y ASI
ENRIQUECEN LA MIA.

INDICE

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	7
Capítulo I: GENERALIDADES	9
1.1 PROBLEMA A INVESTIGAR.....	9
1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	9
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	9
1.4 OBJETIVO	10
1.5 METODOLOGÍA	11
Capítulo II: MARCO TEÓRICO	14
2.1 MARCO TEÓRICO.....	14
2.2 MARCO REFERENCIAL	15
2.3 MARCO CONCEPTUAL.....	18
Capítulo III: EL RIESGO POR TSUNAMI	20
3.1 ANÁLISIS DEL RIESGO POR TSUNAMI.....	20
3.2 LA GESTIÓN DEL RIESGO POR TSUNAMI EN EL PERÚ	21
Capítulo IV: EFECTOS DE TSUNAMIS	25
4.1 TSUNAMI DE CAMANÁ – AREQUIPA 2001.....	25
4.2 TSUNAMI DEL OCÉANO ÍNDICO – SUMATRA 2004	34
4.3 TSUNAMI DE PISCO – SAN ANDRÉS/LAGUNILLAS 2007	47
4.4 OBSERVACIONES	54
Capítulo V: CRITERIOS PARA EL PLANEAMIENTO	58
5.1 PRINCIPIOS PARA LA PLANIFICACIÓN	59
Capítulo VI: CRITERIOS EN LA ARQUITECTURA	64
6.1 EJEMPLO DE ESTRUCTURA CON CARACTERÍSTICAS TSUNAMI-RESISTENTES	65
Capítulo VII: CRITERIOS EN LA INGENIERIA	70
7.1 DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	71
7.2 APLICACION EN EL DISEÑO Y COMBINACIÓN DE FUERZAS ..	81

7.3 CIMENTACIONES	85
CONCLUSIONES	92
RECOMENDACIONES.....	96
BIBLIOGRAFÍA.....	98
LISTADO DE FIGURAS	101
LISTADO DE CUADROS	107
ANEXO A	108
ANEXO B	118
ANEXO C	127

**“ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO TSUNAMI-
SISMORRESISTENTES BASADAS EN EXPERIENCIAS DE LOS
TSUNAMIS EN EL OCÉANO INDICO (2004) Y CAMANÁ (2001)”**

Autor: Ing. Erick Arturo Mas Samané

Asesor: Ing. Julio Kuroiwa Horiuchi

RESUMEN

La tesis titulada ***“Estructuras de Concreto Armado Tsunami-Sismorresistentes basadas en experiencias de los Tsunamis en El Océano Índico (2004) Y Camaná (2001)”***, ha sido elaborada bajo el auspicio del **CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA (CONCYTEC)**, en el marco del apoyo a estudiantes de posgrado a través del financiamiento de la tesis de investigación.

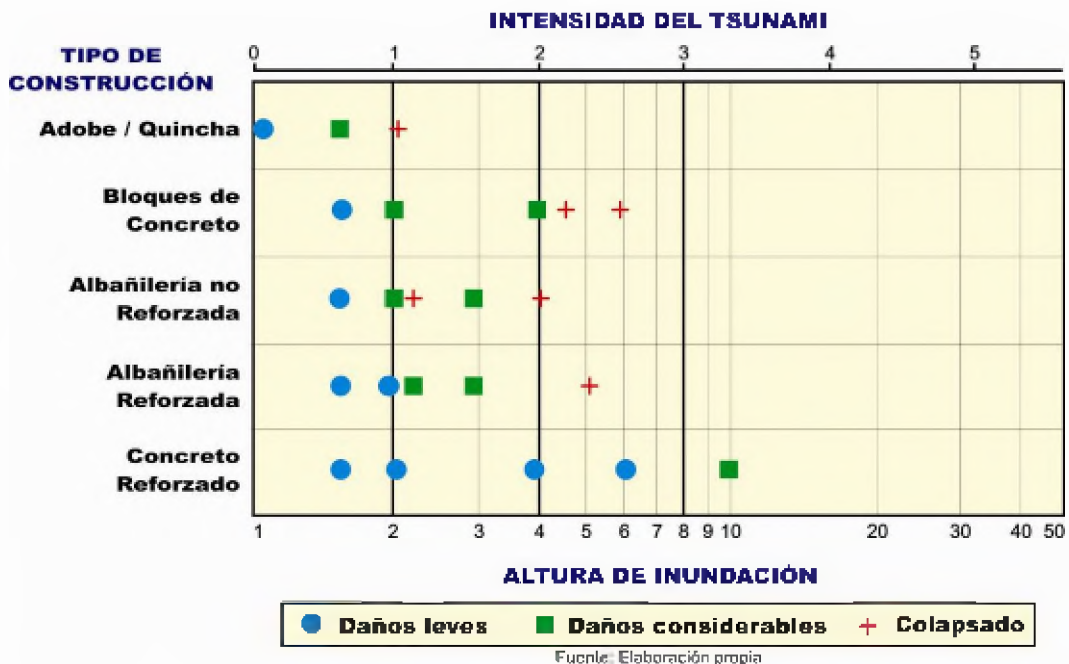
El objetivo de este trabajo es el de identificar las características de estructuras que hayan resistido a los tsunamis ocurridos en el Perú (Camaná, 2001; Pisco, 2007) y en el Océano Índico (Sumatra, 2004), para mejorar los criterios de diseño de edificaciones en zonas inundables por tsunami.

Para el cumplimiento del objetivo trazado se revisaron los avances y trabajos realizados en el Perú en lo que corresponde a la gestión del riesgo por tsunami, con especial atención en las estructuras tsunami-resistentes. Posteriormente enfocándonos en la vulnerabilidad física – componente de la Gestión de Riesgos y el Análisis de Riesgo –

encontramos el objeto de la investigación propiamente dicha, las estructuras tsunami resistentes.

En seguida, para establecer la posibilidad de una estructura tsunami-resistente recurrimos a datos recopilados a modo de imágenes, videos, publicaciones, entrevistas y consultas a expertos, normas vigentes y libros de consulta básica y de esta manera identificar los efectos de las olas de tsunami sobre las estructuras.

Con el análisis de las imágenes y los efectos del tsunami en las estructuras, determinamos en primer lugar el tipo de estructura más adecuada según la tipología de materiales observados proponiendo el siguiente gráfico (R.1) de aplicación para el Perú.



R.1 Daños observados por tsunami según tipo de construcción. (Shuto, 2005).

(Ver F4.4.1)

En R.1 se puede apreciar que las estructuras de concreto armado poseen un mejor comportamiento frente a las acciones del tsunami – en ese sentido el título de la investigación identifica exclusivamente esta tipología de material.

Luego, hemos catalogado los efectos del tsunami en la estructura, en tres categorías

CATEGORÍA	SUB-CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
PLANEAMIENTO URBANO	Ubicación	Gran parte de las estructuras que han presentado daños leves se encuentran ubicadas detrás de otras edificaciones que las protegen de las olas y el impacto del tsunami, además la presencia de vegetación contribuye a disminuir la energía del tsunami, provocando menores daños.
ARQUITECTURA	Espacios libres y orientación	La arquitectura con espacios libres y orientación de muros en el primer nivel tal que permitan el libre flujo de las aguas, aligerando la presión ejercida sobre la tabiquería y elementos estructurales resultan convenientes.
INGENIERIA	Material (calidad y construcción) Diseño (fuerzas inducidas)	Materiales como los bloques de concreto y las cañas guayaquil fueron arrasados por las olas, en cambio, estructuras de concreto armado mostraron un mejor comportamiento., El diseño estructural debe contemplar las fuerzas inducidas por el tsunami.
	Impacto	Elementos de arrastre del tsunami se convierten en proyectiles que impactan en las viviendas.
	Suelo-Estructura	El suelo alrededor de la cimentación puede presentar erosión.

R.2 Cuadro resumen de observaciones a las imágenes de los tsunamis de Camaná, Indonesia y Pisco. (Ver C4.4.1)

Estas categorías son analizadas exhaustivamente en los siguientes capítulos comentándose los efectos encontrados y los criterios necesarios

para contribuir a la construcción de estructuras tsunami-resistentes, siendo estos:

CRITERIOS PARA EL PLANEAMIENTO URBANO DE ESTRUCTURAS TSUNAMI-RESISTENTES

- Ubicación con respecto a otras edificaciones
- Presencia de vegetación y *colchones verdes* como protección
- Estructuras construidas sobre el nivel de inundación
- Distribución de usos con respecto a la distancia al litoral (usos recreativos cerca al mar y usos urbanos fuera de la zona inundable, con el *colchón verde* frente a estas zonas. (Ver F5.1.2)

CRITERIOS PARA EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

- Espacios libres y aberturas al flujo en niveles inferiores
- Orientación de elementos estructurales paralelos al flujo e impacto proyectado de olas.
- Posibilidad de orientación de elementos no estructurales (no integrados al sistema estructural) perpendicular al flujo.

CRITERIOS PARA LA INGENIERÍA DEL PROYECTO

- Diseño de elementos estructurales y no estructurales
- Consideración de los niveles de erosión en cimentaciones
- Calidad de los materiales y procesos de construcción

Adicionalmente se describen las fuerzas inducidas por el tsunami (hidrostáticas, de empuje, hidrodinámicas, de impulso, de impacto, de embalse, verticales, de sobrecarga) a fin de contribuir a las metodologías requeridas para el diseño de estructuras tsunami-resistentes, presentándolas en una estructura desarrollada de Propuesta a la Norma Sismorresistente E030.

INTRODUCCIÓN

Los diseños sismorresistentes generalmente dependen de la flexibilidad, ductilidad y redundancia en el sistema estructural y los materiales, mientras que para el caso de los efectos por tsunami, las exigencias son principalmente de resistencia y rigidez, particularmente en los primeros niveles. Estos requerimientos no deben ser contradictorios, sino más bien considerados a la vez, siendo esa la principal dificultad en los diseños de estructuras tsunami-sismorresistentes.

En el caso de un tsunami, los niveles de agua fluctúan rápidamente, con amplitudes de varios metros, en períodos mucho más cortos que los que presentan una inundación y algo más extensos que los que ocurren en tormentas. Esta escala intermedia de variación brinda al tsunami características y comportamiento diferente a los otros peligros mencionados, y por lo tanto los efectos no pueden ser inferidos directamente a partir de estos otros fenómenos.

Cuando una edificación se interpone en el paso de una ola, el muro encarando la ola tiende a bloquear el paso de la misma, y la presión en este punto se incrementa. Esto puede derribar muros, ventanas, puertas, columnas o sistemas de apoyo e incluso arrasar con la edificación por completo. Sólo 2 metros de profundidad de agua tendría aproximadamente 20 kN/m^2 , más de lo que una estructura normal esperaría resistir. (Angel Luque, 1998).

Por otro lado, mientras el agua fluye, ésta se acelera alrededor de las edificaciones creando una serie de pequeños vórtices con gran fuerza de succión, al mismo tiempo, los escombros atacan otras edificaciones y son un peligro para quienes se encuentren atrapados entre las aguas.

Estos aspectos, entre otros, son parte del comportamiento del tsunami en la costa y sus efectos en las edificaciones, tema principal de esta tesis y que el autor considera importante dar a conocer para su consideración en próximos códigos, normas o exigencias constructivas para ciudades en costa, permitiendo gestionar el riesgo al cual nos enfrentamos.

El tema es abordado en los 7 capítulos siguientes:

Capítulo I.- Se exponen los objetivos y la metodología llevada a cabo para la ejecución de la investigación.

Capítulo II.- El Marco Teórico presenta investigaciones previas realizadas en el campo de la gestión del riesgo de tsunami y conceptos relacionados al tema de investigación.

Capítulo III.- Se descubren los avances y estado del arte en la gestión del riesgo de tsunami en el Perú, producto de diversas investigaciones y proyectos ejecutados en la costa peruana.

Capítulo IV.- Contiene algunas imágenes comentadas y recopiladas por el autor acerca de los tsunamis de Camaná, Sumatra y Pisco y se resumen los efectos encontrados sobre las edificaciones en general.

Capítulo V.- Se explican los criterios de prevención de tsunamis aplicados a la planificación y el planeamiento de las ciudades costeras.

Capítulo VI.- Se exponen los criterios arquitectónicos que favorecen a la resistencia de estructuras frente a tsunamis.

Capítulo VII.- Contiene los criterios en la ingeniería y el diseño de una estructura en costa que considere las fuerzas inducidas por el tsunami.

Capítulo I: GENERALIDADES

1.1 PROBLEMA A INVESTIGAR

Se requiere conocer y sistematizar las características que brindan resistencia a una estructura frente a un tsunami.

1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

En el proceso de la investigación buscaremos responder a la siguiente pregunta: ¿Qué características tienen las edificaciones resistentes a tsunami?.

En tal sentido, será necesario responder en primer lugar a ciertas interrogantes que nos acercarán al conocimiento de las características tsunami-resistentes que buscamos.

Algunas de estas interrogantes son: ¿Existen estructuras que hayan resistido a tsunamis anteriormente?, ¿Qué material de construcción resistió mejor al impacto de tsunamis?, ¿Qué distribución y configuración arquitectónica poseen tales estructuras?, ¿Cómo se orientan y ubican estas en el entorno urbano?, ¿Qué fuerzas produce el tsunami sobre las estructuras?, entre otras. Gran parte de ellas son posibles de responder a partir de la experiencia de eventos anteriores y estudios e investigaciones a nivel mundial sobre el efecto de los tsunamis sobre las edificaciones.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Según la base de datos de tsunamis ocurridos en el Perú desde el año 1500, han ocurrido 123 tsunamis que han afectado las costas peruanas, de los cuales 117 deben su origen a sismos (Tavera & Carpio, 2002), esto demuestra un alto riesgo por tsunami en diversas ciudades costeras del Perú.

Además, la presencia de estándares normativos que consideran ampliamente las sollicitaciones sísmicas en nuestro país, más no las

fuerzas producidas por el impacto de tsunamis en las estructuras y edificaciones costeras permanece aún en nuestro medio como un vacío en los procesos de planeamiento y diseño para estructuras en costa.

El estudio de nuevas recomendaciones de diseño para edificaciones en zonas costeras persigue un fin social de prevención y protección de la vida humana y que a la vez contribuirá en la reducción de gastos por atención a damnificados y reconstrucción de daños post-tsunami.

1.4 OBJETIVO

Identificar las características de estructuras que hayan resistido a los tsunamis ocurridos en el Perú (Camaná, 2001; Pisco, 2007) y en el Océano Índico (Sumatra, 2004), para mejorar los criterios de diseño de edificaciones en zonas inundables por tsunami.

1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisar los avances en la gestión del riesgo por tsunami en el Perú en lo que respecta a resistencia de estructuras en costa.
2. Recopilar imágenes de estructuras afectadas por los tsunamis de Camaná, Sumatra y Pisco.
3. Identificar el efecto de las olas de tsunami sobre las estructuras en costa.
4. Investigar las características de edificaciones resistentes a tsunami
5. Establecer el tipo de material de construcción que resistió mejor al impacto de tsunamis
6. Investigar los criterios a tomarse en el planeamiento, arquitectura y diseño estructural de estructuras tsunami-resistentes.

1.5 METODOLOGÍA

La figura **F1.5.1** resume el diseño de la investigación, se observa el alcance, los objetivos, aplicaciones y la visión.

Se revisaron los avances y trabajos realizados en el Perú en lo que corresponde a la gestión del riesgo por tsunamis, con especial atención en las estructuras tsunami-resistentes.

Las fuentes de información para este paso fueron provistas por:

- Metodologías para el Análisis y Estimación de Riesgo en el Perú recomendadas por el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI).
- Conceptos aplicados en el Perú propuestos por la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD).
- Los logros y cumplimientos de los diferentes Comités de Defensa Civil, ubicados en la costa y que forman parte del Sistema Nacional de Defensa Civil (SINADECI)
- El Programa de Ciudades Sostenibles – Primera Etapa dirigido por el INDECI con apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)
- Los trabajos e investigaciones de centros como el Instituto Geofísico del Perú y la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú.
- Las tesis universitarias relacionadas al tema de tsunamis.
- Los registros y experiencias de respuesta y atención de tsunamis y evaluación post-tsunami en el Perú (Camaná y Pisco)

Posteriormente enfocándonos en la vulnerabilidad física – componente de la Gestión de Riesgos y el Análisis de Riesgo – encontramos el objeto de la investigación propiamente dicha, las estructuras tsunami resistentes.

Para establecer la posibilidad de una estructura tsunami-resistente recurrimos a datos recopilados a modo de imagen, video, publicaciones, entrevistas y consultas a expertos, normas vigentes y libros de consulta básica y de esta manera identificar los efectos de las olas de tsunami sobre las estructuras.

Las fuentes recurridas en este paso son:

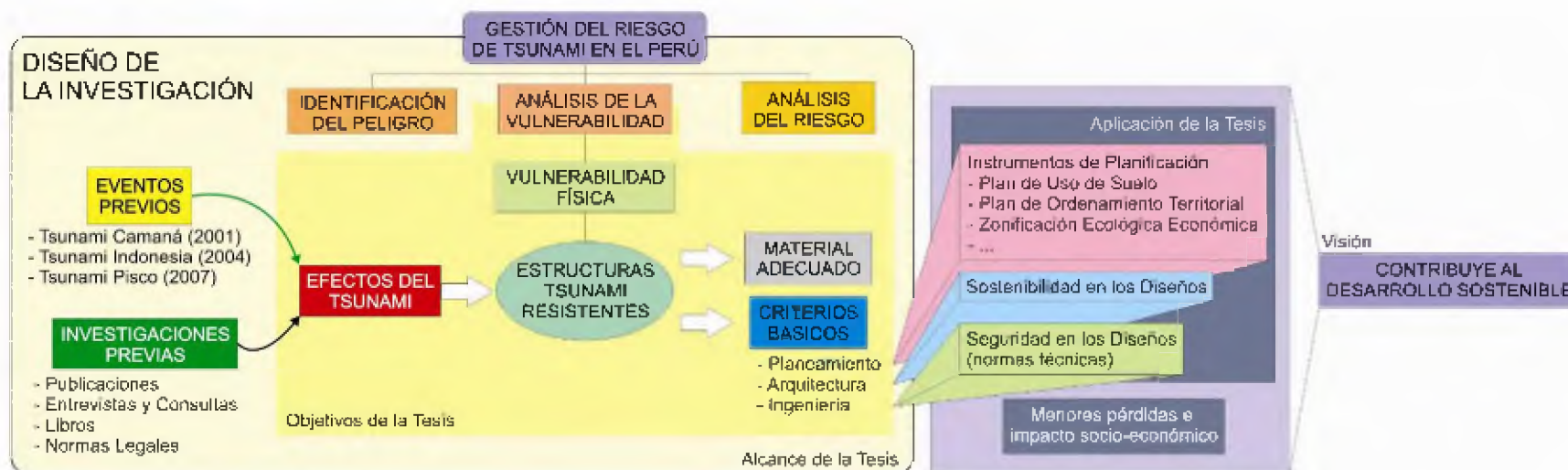
- Imágenes y videos publicados en internet (revistas, diarios, blogs, etc)
- Imágenes extraídas de publicaciones científicas, evaluaciones post desastre y textos publicados.
- Imágenes tomadas en visitas de campo conducidas por el autor (Camaná y Pisco).
- Asesoramiento y consulta vía e-mail a expertos en el tema de tsunamis:
 - o Prof. Julio Kuroiwa (Universidad Nacional de Ingeniería - Perú)
 - o Dr. Anat Ruangrassamee (Universidad de Chulalongkorn – Tailandia)
 - o Prof. Fumihiko Imamura (Universidad de Tohoku – Japón)
 - o Arq. Benny Kuriakose (Universidad de York, Reino Unido)

Con el análisis de las imágenes y los efectos del tsunami en las estructuras, determinamos en primer lugar el tipo de estructura más adecuada según la tipología de materiales observados y posteriormente hemos catalogado los efectos del tsunami en la estructura, en tres categorías (Ver **C4.4.1**):

- Las que conciernen al Planeamiento
- Las que conciernen a la Arquitectura del Proyecto
- Las que conciernen a la Ingeniería del Proyecto

Estas categorías son analizadas exhaustivamente en los siguientes capítulos comentándose los efectos encontrados y los criterios necesarios para contribuir a la construcción de estructuras tsunami resistentes.

Con esto, finalmente cumplimos el objetivo de *“Identificar las características de estructuras que hayan resistido a los tsunamis ocurridos en el Perú (Camaná, 2001; Pisco, 2007) y en el Océano Índico (Sumatra, 2004), para mejorar los criterios de diseño de edificaciones en zonas inundables por tsunami.”*



F1.5.1 Esquema del Diseño de la Investigación

Capítulo II: MARCO TEÓRICO

2.1 MARCO TEÓRICO

A lo largo de los años se han tomado diversas medidas para gestionar el riesgo por tsunamis en sectores costeros de varios países, las alternativas ideales son, en orden de prioridad, los **planes de uso de suelo**, que evitan la localización de nuevas poblaciones en zonas inundables; sin embargo en muchos países ya existen áreas urbanizadas en zonas cercanas al litoral frente a lo cual la **reubicación** a espacios seguros se convierte en la segunda alternativa de mitigación.

La reubicación tiene un costo social, cultural, ambiental y económico alto, de tal manera que son pocas las experiencias registradas, algunas en Japón, Colombia y la India recientemente.

Frente a esta realidad se tiene como alternativa la organización y ejecución de **planes de evacuación** para casos de emergencia. Aun así, en muchos casos la llegada de las olas del tsunami no brinda el tiempo necesario para la correcta reacción y evacuación horizontal del poblador, es por ello que se plantean los **refugios temporales** en zonas inundables como alternativa de protección para quienes no logren una evacuación veloz, tal es el caso de niños, discapacitados y mayores de edad, quienes permanecerían en sus hogares o de lo contrario evacuarían a edificaciones cercanas refugiándose en pisos superiores, para lo cual la estructura debe brindar seguridad y condiciones estructurales adecuadas para resistir la fuerza de impacto de olas, escombros, etc.

De los eventos ocurridos, tanto en el sur del Perú (Camaná, 2001) como en el Océano Índico (Sumatra, 2004), podemos extraer diversas

lecciones para la consideración en los diseños, orientación, y reglamentación de la construcción de estructuras en costa.

2.2 MARCO REFERENCIAL

Antecedentes de investigación, artículos, publicaciones y esfuerzos de aplicación relacionados al tema de tesis son:

1.- *“Designing for Tsunamis: Seven Principles for Planning and Designing for Tsunami Hazards” (NTHMP, 2001)*

Su objetivo es desarrollar una guía para la mitigación de tsunamis, relacionándolo con el uso de suelo y la ubicación, diseño y construcción de edificaciones. Los siete principios para el planeamiento y diseño ante el peligro por tsunami son presentado y comentados en el Capítulo VI.

2.- *“Coastal Construction Manual” (FEMA 55, 2005)*

Manual para el diseño de estructuras en costa en los Estados Unidos. Entre los procedimientos para el diseño de estructuras en costa, considera, aunque no profundiza, las cargas por tsunami, las cuales son tomadas similarmente a otras cargas propias del flujo pero a mayor escala de acuerdo a la velocidad del flujo.

3.- *“Evaluación del efecto de tsunami sobre edificios” (A. Verdugo y J. Lizana. Chile, 2005)*

Evalúa un edificio de 10 pisos, considerando como parámetros de diseño la altura de oleaje y la velocidad de la corriente.

El análisis se realiza sobre una edificación convencional, diseñada bajo los criterios sismorresistentes de la zona y la arquitectura convencional, se concluye que la sollicitación de tsunami puede exceder de manera importante los esfuerzos sísmicos que establece la normativa y por lo tanto se requiere el reforzamiento de elementos paralelos y perpendiculares al flujo en los dos primeros pisos de la estructura.

4.- Proyecto “Tsunami-safe(r) house” para la India (Prajnopaya Foundation, 2005)

Se basa en el concepto de menor área de oposición al flujo, con el uso de los mismos materiales constructivos utilizados en la India (cobertura de lata, estructuras de techo de bambú, muros de bloques de concreto), pero además con el nivel de plataforma elevada, se ejecuta el proyecto de reconstrucción de 1000 viviendas en la India como una solución práctica en respuesta a una necesidad inmediata; sin embargo la consideración de los mismos materiales constructivos que fueron arrasados por el tsunami del 2004 es un factor que aún aporta vulnerabilidad física a las viviendas.

5.- “Lessons in Engineering from the Tsunami in Thailand” (Dalrymple, Robert A., Kriebel, David L., 2005)

Se hace referencia a que los diseños de estructuras con plataformas elevadas deben considerarse tanto en estructuras frente al litoral como en las ubicadas detrás de ellas.

Por otro lado, en cuanto a la erosión, producto del flujo y reflujos de las olas del tsunami, se observa que la fuerza erosiva de reflujos es mayor a la producida en la penetración de olas.

Así mismo la orientación de la edificación contribuye en aerodinamizar la estructura y por lo tanto reducir la posibilidad de daños severos por el impacto de olas.

6.- “Development of Design Guidelines for Structures that Serve as Tsunami Vertical Evacuation Sites” (Harry Yeh, Ian Robertson, and Jane Preuss, 2005)

Mencionan los trabajos de Shuto (1994) que resume el grado de daños a edificaciones por el tsunami de 1993 en Okushiri, donde se observó que las estructuras de concreto armado poseen mayor resistencia al fenómeno marítimo.

Además, establecen como factores para considerar una edificación como refugio en caso de tsunami, las siguientes consideraciones:

- El refugio debe resistir la acción sísmica que precede al tsunami.
- El refugio debe proveer suficiente área en pisos superiores, para albergar aquellos que evacúan.
- El refugio debe resistir las fuerzas inducidas por el tsunami.
- Protección en caso de incendios.

7.- "Evacuation Shelter Building Planning for Tsunami-prone Area; a Case Study of Melauboh City, Indonesia" (Armin Budiarjo, 2006)

En esta investigación se busca una metodología para ubicar edificaciones con carácter de refugio vertical de emergencia (ESB)¹ como parte del proceso de reconstrucción de la ciudad de Melauboh. Entre los objetivos específicos planteados, identifica la ubicación y características de diseño de edificaciones que sobrevivieron al tsunami del 26 de Diciembre del 2004, y según su relación con el espacio y entorno analizado, haciendo uso de los sistemas de información geográfica (SIG), establece la metodología para ubicar nuevos ESB.

8.- "Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis" (FEMA P646, 2008)

Describe las solicitudes y características que se requieren para la Evacuación Vertical en caso de Tsunami y resume las cargas y criterios de diseño estructural para Edificaciones con carácter de Refugio Vertical de Emergencia (ESB).

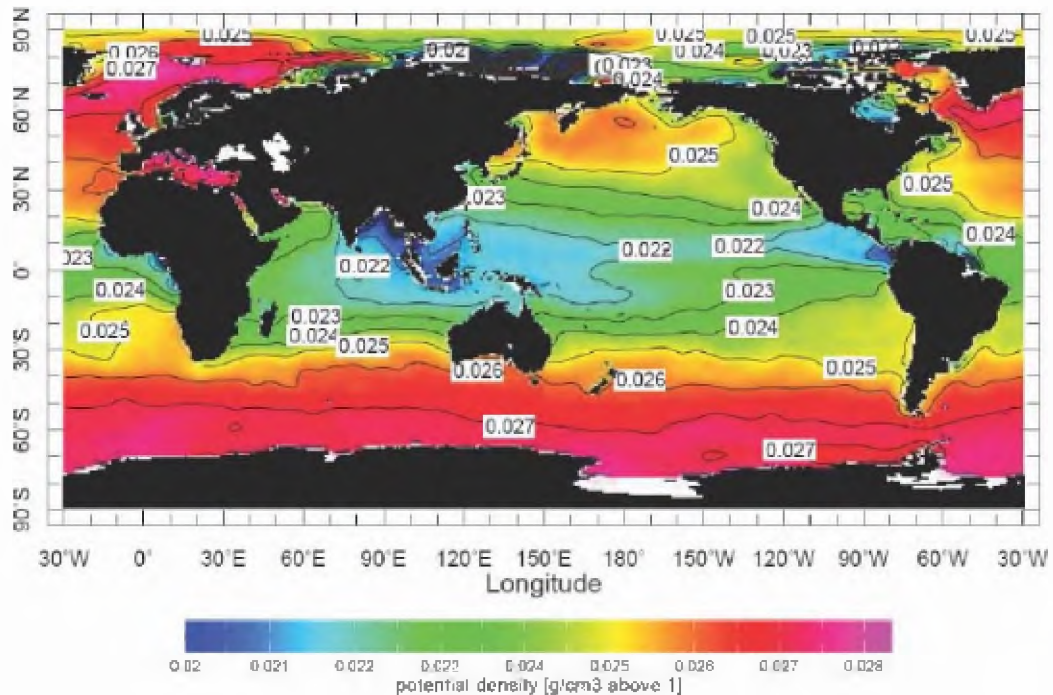
¹ Siglas en ingles. Evacuation Shelter Building

2.3 MARCO CONCEPTUAL

Para efectos de esta investigación los conceptos a utilizar son los siguientes:

1. **Densidad del mar con sedimentos (ρ_s)** .- En el caso de la densidad del mar con sedimento, en esta investigación se considera un 10% de concentración de sedimentos y la densidad se tomará como 1.2 veces la densidad del agua (1000 kg/m^3), es decir $\rho_s = 1200 \text{ kg/m}^3$.

La densidad denominada en ocasiones masa específica, es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, y puede utilizarse en términos absolutos o relativos. En el caso del agua de mar, esta es equivalente a 1028 kg/m^3 , sin embargo depende de la salinidad y temperatura de la zona, según como se aprecia en la figura F2.3.1.



F2.3.1 Densidad del mar. Multiplicar los valores por 1000 y sumar 1000 para obtener en unidades de kg/m^3

2. **Erosión regresiva.-** Acción erosiva o de socavación en las bases de una estructura luego del ingreso del tsunami y durante el retorno de las aguas del mar al océano.
3. **Refugio Vertical de Emergencia.-** en inglés Evacuation Shelter Building (ESB), es una estructura o edificación diseñada para albergar a la población en una situación de emergencia, cuando no se cuente con la posibilidad de evacuar horizontalmente fuera de la zona en riesgo.
4. **Run-up.-** Es el nivel máximo de inundación marcado en el terreno.
5. **Tsunami.-** El fenómeno llamado tsunami consiste en una serie de ondas marinas de gran longitud que se generan usualmente por movimientos tectónicos mar adentro, ocasionalmente por deslizamientos submarinos, en algunas oportunidades por la erupción de volcanes submarinos o muy raramente por el impacto de meteoritos en el océano.
6. **Tsunami de Diseño (TD).-** Tsunami con características de tiempo de llegada, altura de ola, inundación máxima, velocidades, asumidas de registros previos o simulaciones numéricas con la finalidad de contar con los parámetros de diseño de una estructura expuesta a este fenómeno.
7. **Tsunami-resistente.-** Concepto que describe una condición resistente y favorable de una estructura o edificación frente a las fuerzas inducidas y otros efectos que produzca un tsunami.
8. **Zona Inundable por Tsunami (ZIT).-** Área o espacio de terreno cerca al mar que se pueda ver afectado por la intrusión marina producto de un tsunami.

Capítulo III: EL RIESGO POR TSUNAMI

3.1 ANÁLISIS DEL RIESGO POR TSUNAMI

El Riesgo constituye la evaluación esperada de los daños y pérdidas en un espacio determinado, este escenario es estudiado mediante la identificación y caracterización de los Peligros (ej. Sismos, tsunamis, etc.) y el análisis de las Vulnerabilidades que presenta un elemento (ej. Población, infraestructura, comunidad, etc.).

En el caso particular del Tsunami, el análisis del riesgo comprende los siguientes pasos:

- a. Identificación del Peligro.- Se verifica la existencia real o probable de la amenaza de tsunamis en el entorno de interés, a través de registros históricos, memoria de la localidad, depósitos de eventos previos² o condiciones geológicas de la zona.
- b. Caracterización del Peligro.- Se considera el *Tsunami de Diseño (TD)* que se puede esperar de acuerdo a los datos de tiempo, altura de ola, nivel de inundación, velocidad de flujo, etc. que se obtienen de la identificación (paso a.).
- c. Identificación de Elementos Expuestos.- Según las características del TD se identifican los elementos contenidos en el polígono conformado por la línea de costa, los límites del área en estudio y el límite máximo de inundación, conocido como Zona Inundable por Tsunami (ZIT). Estos elementos pueden ser: población, animales, vegetación, infraestructura, etc.

² Eventos previos de tsunamis se conoce como *Paleotsunamis* y se estudia su presencia y características a través de los depósitos de arena y rastros de vegetación en zonas costeras.

- d. Caracterización de los Elementos Expuestos.- Las características de los elementos contenidos en la ZIT son estudiados, cuantificados y cualificados a fin de conocer ampliamente sus fortalezas y debilidades y su participación en los procesos de desarrollo interno y externo al área de estudio.
- e. Análisis de la Vulnerabilidad.- En este punto se categorizan las debilidades de los elementos, resaltando su cuantificación o cualificación y otorgándoles un grado de vulnerabilidad frente al TD.
- f. Análisis del Riesgo por Tsunami.- Frente al escenario de un TD y los grados de vulnerabilidad analizado, se “calcula” de forma numérica, cuando sea posible, de manera probabilística o simplemente por calificación de riesgo alto, medio y bajo, los daños y pérdidas esperadas bajo estas condiciones.

Es conveniente que el proceso sea plasmado en lo que se conoce como Mapas de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo a fin de constituirse en instrumentos de fácil y rápida aplicación para autoridades responsables en la toma de decisiones y posteriormente integrados a otros mapas de peligro producto de otros fenómenos locales y constituir el mapa multipeligro de uso en el planeamiento de ciudades.

3.2 LA GESTIÓN DEL RIESGO POR TSUNAMI EN EL PERÚ

Según la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD) de las Naciones Unidas, la Gestión del Riesgo de Desastre se entiende como el *“Conjunto de decisiones administrativas, de organización y conocimientos operacionales desarrollados por sociedades y comunidades para implementar políticas, estrategias y fortalecer sus capacidades a fin de reducir el impacto de amenazas naturales y de desastres ambientales y tecnológicos consecuentes.*

Esto involucra todo tipo de actividades, incluyendo medidas estructurales y no-estructurales para evitar (prevención) o limitar (mitigación y preparación) los efectos adversos de los desastres.”³

En este contexto, en el Perú y en lo que respecta a la *amenaza natural* que nos interesa – tsunami – las decisiones administrativas y de organización desarrolladas en las diferentes comunidades costeras carecen en su mayoría de políticas estables y estrategias sólidas orientadas a fortalecer sus capacidades para reducir el impacto del tsunami. De las 12 principales ciudades costeras del Perú, el SINADeci⁴ reporta sólo 02 Planes de Evacuación en caso de Tsunami⁵ (Callao y Tacna).

Un ejemplo exitoso de la gestión del riesgo de desastre en el Perú, es el Programa de Ciudades Sostenibles – Primera Etapa (PCS-1E) ejecutado por el INDECI⁶ que hasta Abril del 2008 contaba con 134 ciudades y localidades de diferentes regiones del Perú estudiadas, 48 de las cuales cuentan con estudios de Mapa de Peligros y 80 con Planes de Uso de Suelo y Medidas de Mitigación ante Desastres culminados, 74 municipalidades han aprobado los estudios por Ordenanza Municipal y se encuentran en proceso de implementación por los respectivos Gobiernos Locales (INDECI, 2008), los Mapas de Peligros desarrollados, consideran el riesgo de impacto del tsunami mostrando los límites de inundación y recomendando en los informes la restricción de uso con fines urbanos en las zonas inundables por tsunami.

³ <http://www.eird.org/esp/terminologia-esp.htm>

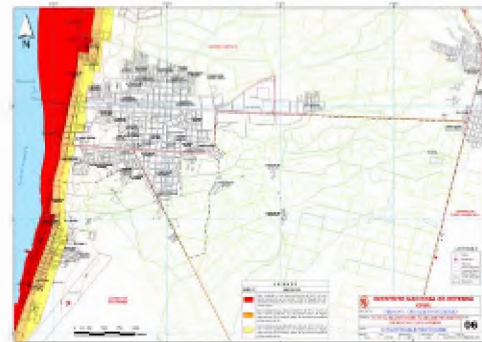
⁴ Sistema Nacional de Defensa Civil

⁵ http://www.sinadeci.gob.pe/planes/planes_oper.htm

⁶ Instituto Nacional de Defensa Civil



(a)



(b)

F3.2.1

- (a) Localidades estudiadas PCS-1E
- (b) Ejemplo de Mapa de Peligro por

Adicionalmente a los trabajos realizados por el INDECI, la Dirección de Hidrografía y Navegación desarrolla los estudios oceanográficos y las cartas de inundación por tsunami para toda la costa peruana, sin embargo estos productos son ignorados por gran parte de las autoridades locales en riesgo.

Así mismo, existen trabajos científicos sobre tsunamis desarrollados por el Instituto Geofísico del Perú, en el que se indican las características de eventos tsunamigénicos pasados y sus efectos en las costas del Perú.

Un gran numero de investigaciones académicas se han desarrollado en las universidades peruanas acerca del riesgo por tsunami, siendo una de ellas la tesis de pregrado del autor en la Universidad Nacional de Ingeniería (Mas Samané & Jácome Fernández, 2008), trabajo que presenta los parámetros del TD en el Callao,

recomendaciones para la evacuación y propuestas de señalización e implementación del sistema de alarma; aspectos actualmente incorporados con éxito en la política de la defensa civil desarrollada por el Gobierno Regional del Callao.

Las experiencias previas en el Perú, principalmente las de los tsunamis de Camaná (23.06.2001) y Pisco (15.07.2007), han despertado en los últimos años el interés de la comunidad científica peruana y aún más importante el de autoridades locales que derivan esfuerzos en una mayor comprensión del fenómeno probable en sus zonas, así como en la educación del poblador en riesgo.

Sin embargo, a pesar de todos los esfuerzos, estudios, investigaciones y proyectos que se desarrollan en el Perú frente a este riesgo, aún no se cuenta con instrumentos normativos que orienten a los profesionales de la planificación y construcción en el planeamiento y diseño de estructuras resistentes a tsunamis. Nuestras normas consideran ampliamente las solicitaciones sísmicas debido a nuestra ubicación en el Círculo de Fuego del Pacífico. Pero, ¿y el riesgo por tsunami?, siendo un país altamente sísmico y bañado por el Océano Pacífico donde ocurren el 80% de los tsunamis en el mundo, es importante en la Gestión del Riesgo por Tsunami en el Perú, considerar los aspectos tsunami-resistentes (Ver Anexo A).

Capítulo IV: EFECTOS DE TSUNAMIS

En este capítulo describiremos los eventos de tsunami del 23 de Junio del 2001 en Camaná, Perú; el 26 de Diciembre del 2004 en Sumatra, Indonesia y el 15 de Agosto del 2007 en Pisco, Perú y se pondrá especial énfasis en los daños provocados por el impacto del tsunami en las edificaciones.

4.1 TSUNAMI DE CAMANÁ – AREQUIPA 2001

El sábado 23 de junio del 2001 a horas 15:35 (Hora Local), la costa sur del Perú fue sacudida por un violento terremoto que alcanzó una intensidad máxima de VIII grados en la escala Modificada de Mercalli y una magnitud de 7.9 Ms., causando muerte y destrucción en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna.



F4.1.1 Tsunami 23.06.2001 – Camaná, Arequipa

El epicentro se localizó a 190 Km, al oeste sur oeste de la ciudad de Arequipa, entre coordenadas 16.15° de latitud Sur y 73.40° de longitud Oeste, y es considerado como un sismo de profundidad superficial (33km.).

El efecto más devastador en Camaná fue el tsunami, ocasionando serios daños en las zonas de playa, destruyendo estructuras de material noble, adobe y otros. Asimismo la inundación de cultivos en Camaná y Pucchun (Minaya Lizarraga, 2001).

En Camaná, se registraron dos grandes olas sísmicas, la primera se produjo a los 23 minutos de ocurrido el sismo, alcanzando una altura de 6m, la segunda fue seguida después de 15 minutos con una altura menor a la primera, provocando 1,256 viviendas afectadas y 3,730 destruidas.⁷

Características Constructivas de las Zona

Las viviendas en la zona de Camaná en su mayoría son a base de bloques de cemento (75%) y en menor porcentaje encontramos viviendas de adobe (6%) y quincha (5%), el resto se constituyen de sillar u otros materiales de la zona.

⁷ INDECI-Dirección de operaciones TRDC, al 04 de Setiembre del 2001

Evaluación de Daños



F4.1.2 Vivienda en La Punta, Camaná – Impacto directo en tabiquería



F4.1.3 Vivienda en Los Cerrillos, Camaná – Bloques de cemento, baja resistencia de los materiales



F4.1.4 Socavación en suelo arenoso. Obsérvese la profundidad de cimentación



F4.1.5 Viviendas de un nivel de bloques de cemento en Los Cerrillos, Camaná



F4.1.6 Muros frontales derribados por el impacto de olas. Sin embargo, viviendas en la parte posterior no presentan mayores daños. Los Cerrillos, Camaná



F4.1.7 Viviendas de quincha y muros de bloque de concreto, Los Cerrillos, Camaná. Obsérvese el muro frontal en pie y las marcas del nivel de inundación



F4.1.8 Ingreso del tsunami hasta la carretera, sin embargo una vivienda protegida detrás de otra no presenta mayores daños.



F4.1.9 Licuación de suelos y deficiencias constructivas. Obsérvese la vivienda de la derecha que no presenta daños en la fachada pero si la marca de agua al nivel inferior de las ventanas. La Punta, Camaná.



F4.1.10 Efectos de erosión por regresión de olas. Obsérvese las viviendas de la imagen anterior.



F4.1.11 Dirección de las olas. Se observa que la primera vivienda de la derecha recibe el impacto directo y protege a las viviendas posteriores.

Foto: <http://www.geocities.com/caniraus/tsunami.html>



F4.1.12 Vivienda con muros de albañilería arrasados, sin embargo la estructura de concreto armado permanece en pie sin mayores daños estructurales. Playa El Chorro. Camaná



F4.1.13 Efectos de la erosión regresiva del tsunami. La Punta, Camaná



F4.1.14 Impacto de olas en viviendas.

La estructura marcada presenta menor nivel de daño.

Foto: <http://walrus.wr.usgs.gov/peru2/damage.html>

4.2 TSUNAMI DEL OCEANO ÍNDICO – SUMATRA 2004

El 26 de Diciembre del 2004 uno de los eventos sísmicos más fuertes en las últimas décadas, el 4to desde 1900, se libera en la costa oeste de Sumatra, en Indonesia. La magnitud del sismo se reporta en 9.0 según el USGS, y el hipocentro ubicado a 3.316° N, 95.854° E, 160 km al oeste de Sumatra a una profundidad de 30km.



F4.2.1 Mapa de zonas afectadas por el Tsunami del 26 de Diciembre del 2004 en Indonesia y alrededores. Fuente: UNOSAT

Se registró más de 300,000 fallecidos, una gran cantidad de desaparecidos y miles de residentes damnificados. Los principales daños se observaron en Indonesia, Sri Lanka, India, Tailandia, Las Maldivas, entre otras islas ubicadas en los alrededores. Los daños a la infraestructura son incalculables y se tiene una gran cantidad de informes de evaluación de daños, imágenes y datos disponibles en la web que hacen de este uno de los desastres más registrados en los últimos tiempos.

Características constructivas de la Zona

En las zonas más afectadas de Indonesia, como Banda Aceh, las características constructivas se dividen en 3 grupos: (BAPPENAS, 2005)

- Estructura Moderna (3%)
- Estructura Semi-moderna (90%)
- Estructura Tradicional (7%)

Entendiéndose por *Estructura Moderna*, aquellas construidas de concreto armado, con vigas, columnas y tabiquería reforzada. La mayoría de estas estructuras están destinadas a alojamientos turísticos u Hoteles.

En el caso de *Estructura Semi-moderna*, clasificación que presenta el porcentaje más alto, corresponde a las viviendas de albañilería reforzada y no reforzada y en menor cantidad a las de estructura de concreto armado con rellenos de ladrillo no reforzados.

En cuanto a la *Estructura Tradicional*, se observan con mayor presencia en las zonas más pobres y relacionadas a las actividades de pesca artesanal, aunque también se encuentran algunas en áreas turísticas. Estas viviendas son de madera con techos livianos.

Evaluación de Daños en Estructuras



F4.2.2 Kaholak Laguna Resort. Kaho Lak, Phang Nga. Hotel de concreto reforzado. Posee columnas de 30x30cm sin presencia de daños, sin embargo se observa la erosión en la base. Run-up 5.6m.

Fuente: Anat Ruangrassamee. Universidad de Chulalongkorn. Tailandia



F4.2.3 y F4.2.4 Se observan la cimentación con pilares en una parte del hotel de concreto reforzado ubicado en la isla de Kor Khao en Phang Nga. Run-up 2.0m

Fuente: Universidad Sripatum. Tailandia



F4.2.5 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en las islas Phi Phi, Krabi. Obsérvese el recorrido directo del tsunami hacia las edificaciones posteriores atravesando el primer nivel por los espacios libres sin generar mayor daño a la parte estructural. Run-up 10.0m

Fuente: Universidad Prince of Songkla



F4.2.6 Escombros de una vivienda de concreto reforzado, con elementos estructurales que no consideraron las cargas por tsunami, ubicado a 170m de la playa en King Amphoe Suk-Samran, Ranong. Run-up 3.0m

Fuente: Universidad Mahidol



F4.2.7 El Centro de Investigación de Recursos Naturales en King Amphoe. Suk-Samran, Ranong. Tailandia. Ubicado a 170m del litoral. A pesar de los daños en el tejado, la estructura permanece sin daño considerable en elementos principales. Obsérvese su ubicación unos centímetros sobre el nivel de suelo. Run-up 3.0m

Fuente: Universidad Mahidol



F4.2.8 A 50m del litoral, conjunto de viviendas de estructuración mixta (columnas y vigas con muros de albañilería). Se aprecia el nivel de erosión y la efectividad de la losa de cimentación y la distribución de módulos de vivienda.

Run-up 3.0m

Fuente: Universidad Mahidol



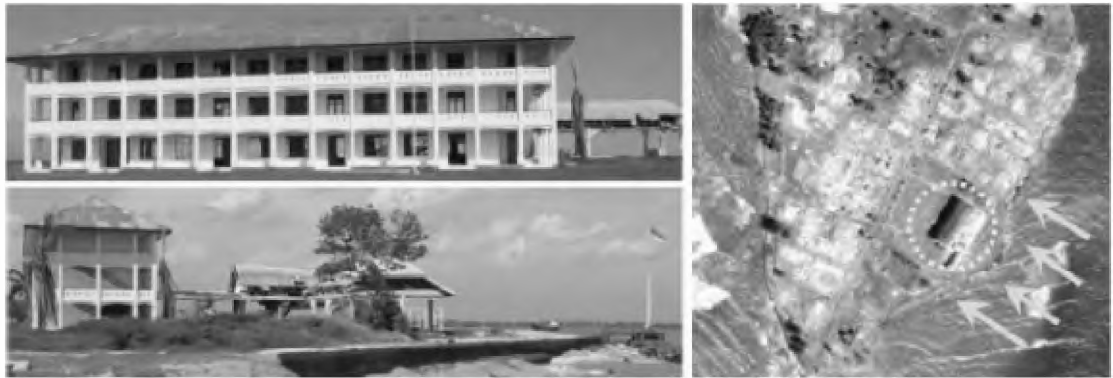
F4.2.9 Vivienda en Ban-Nam-Kem, Phang Nga. Tailandia. Se aprecia la estructura sin daños y los espacios libres en el primer nivel que permiten el paso de las aguas a través del predio.

Fuente: Universidad Kasetsart



F4.2.10 Hotel sin daño considerable y ubicado a pocos metros de la playa

Fuente: Universidad Mahidol



F4.2.11 Melauboh, Sumatra, edificación a pocos metros con corredores y espacios abiertos que permiten el paso de las aguas con mayor facilidad.

Fuente: Evacuation Shelter Building Planning for Tsunami-prone Area. Amin Budiarto. 2006



ANTES

DIRECCION DEL TSUNAMI

DESPUES

F4.2.12 Banda Aceh, Indonesia. Mezquita antes y después del impacto del tsunami. Obsérvese la orientación de los espacios abiertos con respecto al océano y la dirección de olas.

Fuente: Artículo BBC Mundo



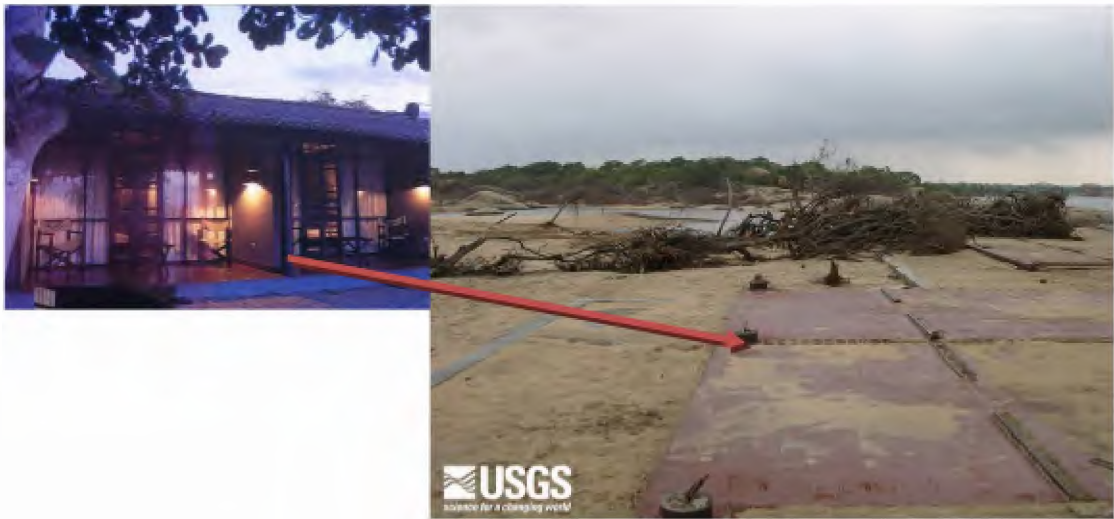
F4.2.13

(Izq.) Mezquita. La única edificación en esta zona sin daños estructurales de consideración luego del tsunami.

Fuente: Buscador Google.com

(Der.) Mezquita en Uleele, Banda Aceh. Inundación de 10m, justo debajo del techo.

Fuente: Foto J. Borrero (FEMA, 2008)



F4.2.14 Yala Safari Resort arrasado por el tsunami. A pesar de que el piso y la cimentación resistieron la fuerza de erosión, la estructura superior no era la adecuada. Obsérvese en la columna el poco acero de refuerzo.

Fuente: USGS



F4.2.15 Distrito de Kalmunai en la provincia Este de Sri Lanka. Vivienda de material de ladrillo de baja calidad con graves daños, excepto el lado con espacios abiertos que permitieron reducir la presión ejercida sobre el muro.

Fuente: USGS & Universidad Cornell. Phillip Liu.



F4.2.16

(Izq.) Phuket, erosión en arena. Se aprecian los daños a las uniones y la necesidad de mayor profundidad de cimentación

Fuente: Anat Ruangrassamee. Universidad de Chulalongkorn

(Der.) Khao Lak, Erosión en cimentación superficial. La máxima profundidad de erosión fue de 3m en esta zona.

Fuente: Foto Dalrymple & Kriebel. (FEMA, 2008)



30 de Dic 2004



30 Ene 2005

F4.2.17 Luego de la erosión la cimentación se vuelve inestable.

Fuente: Anat Ruangrassamee. Universidad de Chulalongkorn



F4.2.18 En algunos casos los muros están anclados a las columnas. Elementos secundarios fijados a los principales generan esfuerzos mayores en columnas.

Fuente: Anat Ruangrassamee. Universidad de Chulalongkorn

F4.2.19 Si la altura de inundación proyectada alcanza a cubrir los primeros niveles, las vigas que se oponen al flujo merecen refuerzo en su dirección transversal. Nótese los daños a vigas.

Fuente: Anat Ruangrassamee. Universidad de Chulalongkorn





F4.2.20 Vivienda parcialmente dañada localizada a 0.9km de la costa en Banda Aceh.
Las alturas son respecto al nivel medio del mar.

Fuente: Reporte Tsunami Asia FEMA. Pág. 24



F4.2.21 Estructura de concreto armado ubicada en Paiyagala a 48km al norte de Kahawa con niveles de inundación de 4.2m en tierra. Se aprecia los daños a puertas y ventanas y la resistencia de elementos de concreto.

Fuente: Reporte Tsunami Asia FEMA. Pág. 42



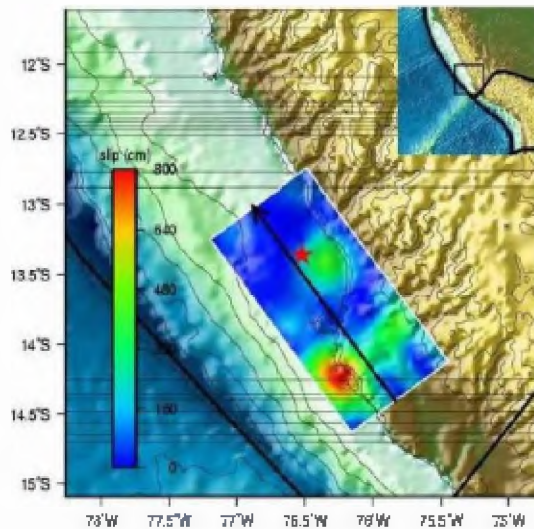
F4.2.22 Khao Lak, Phangaa. Tailandia. Estructura de concreto armado a menos de 100m del litoral con daños a elementos secundarios y a cimentaciones. Nótese las columnas en buenas condiciones y la profundidad de cimentación que en estas condiciones compromete la estabilidad de la estructura. Runup: 12m

Fuente: Buscador Google. Superior Derecha: Francis – FEMA 2006

4.3 TSUNAMI DE PISCO – SAN ANDRÉS/LAGUNILLAS 2007

(Kuroiwa Horiuchi & Mas Samané, 2007)

El 15 de agosto de 2007, a las **23:41 GMT (18:41 hora local)** ocurrió un fuerte sismo frente a las costas de la ciudad de Pisco, en el departamento de Ica, en Perú. El sismo tuvo una duración promedio de **2 minutos**.



F4.3.2 Balneario de San Andrés. Pisco-Perú

F4.3.1 Epicentro del Terremoto de Pisco y sus alrededores. Ica, Pisco, Chincha y Cañete fueron las ciudades más afectadas.

Las magnitudes finales reportadas por las agencias sísmicas fueron:

- **7.0 magnitud Richter** del Instituto Geofísico del Perú
- **8.0 magnitud momento** del Servicio Geológico de EE.UU.

Las coordenadas del epicentro según el IGP (F-3.1) son:

Latitud S : 13.67°

Longitud W : 76.76°

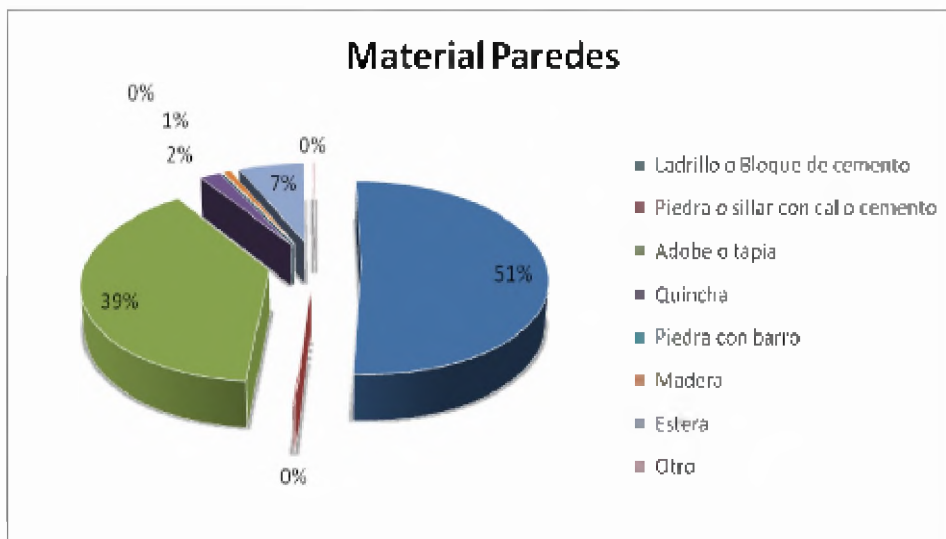
Profundidad : 33 km

4.3.1 Características constructivas de la Zona

Las viviendas en Pisco son en su mayoría de paredes de ladrillo o bloques de cemento, con techos de caña en mayor proporción, seguidos por viviendas con losa armada y en general pisos de cemento pulido, según muestran los cuadros y gráficos correspondientes.

Material Paredes		
Categorías	Casos	%
Ladrillo o Bloque de cemento	12,927	51.13
Piedra o sillar con cal o cemento	36	0.14
Adobe o tapia	9,886	39.10
Quincha	515	2.04
Piedra con barro	11	0.04
Madera	188	0.74
Estera	1,679	6.64
Otro	43	0.17
Total	25,285	100.00

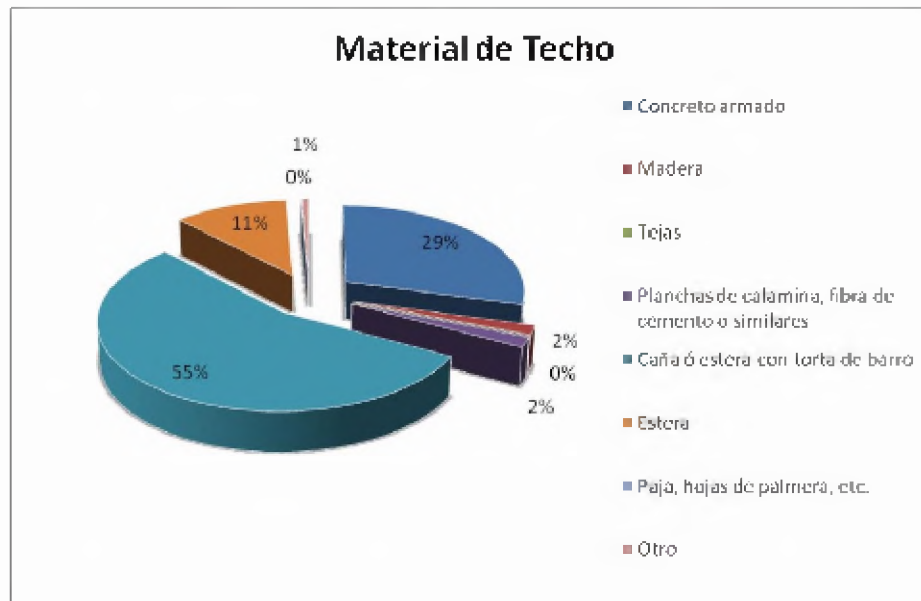
C4.3.1 Tipo de Material de Pared. Viviendas Pisco. Fuente: INEI, 2005



F4.3.3 Porcentaje de Tipo de Material de Pared. Viviendas Pisco. Fuente: INEI, 2005

Material de Techo		
Categorías	Casos	%
Concreto armado	7,402	29.27
Madera	437	1.73
Tejas	4	0.02
Planchas de calamina, fibra de cemento o similares	459	1.82
Caña ó estera con torta de barro	13,907	55.00
Estera	2,887	11.42
Paja, hojas de palmera, etc.	20	0.08
Otro	169	0.67
Total	25,285	100.00

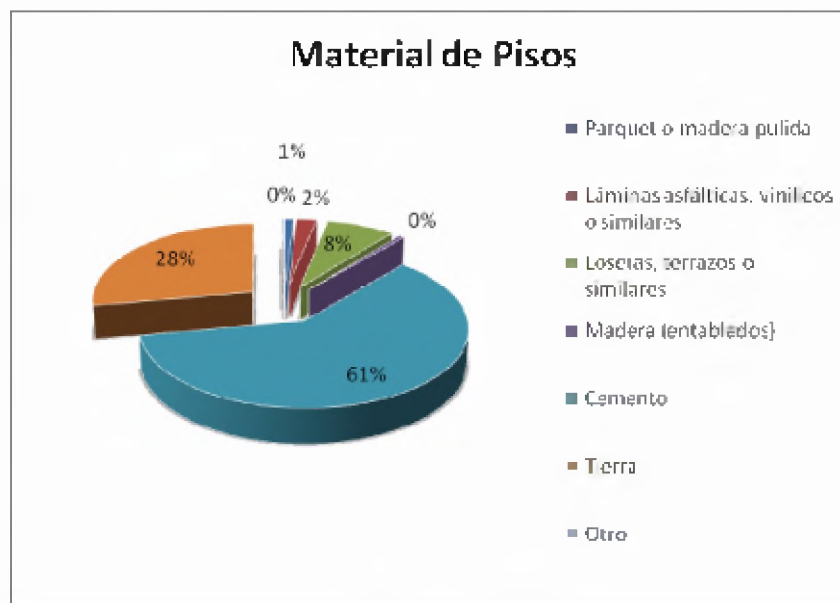
C4.3.2 Tipo de Material de Techo. Viviendas Pisco. Fuente: INEI, 2005



F4.3.4 Porcentaje de Tipo de Material de Techo. Viviendas Pisco. Fuente: INEI, 2005

Material de Pisos		
Categorías	Casos	%
Parquet o madera pulida	238	0.94
Láminas asfálticas, vinílicos o similares	558	2.21
Losetas, terrazos o similares	1,917	7.58
Madera (entablados)	143	0.57
Cemento	15,400	60.91
Tierra	6,989	27.64
Otro	40	0.16
Total	25,285	100.00

C4.3.3 Tipo de Material de Piso. Viviendas Pisco. Fuente: INEI, 2005



F4.3.5 Porcentaje de Tipo de Material de Piso. Viviendas Pisco. Fuente: INEI, 2005

La técnica de construcción que se utiliza en Pisco es híbrida entre la albañilería confinada y los sistemas aporticados con tabiques de relleno. En primer lugar construyen las columnas, para después levantar la albañilería y finalmente vaciar la losa de techo en conjunto con las vigas, por lo cual, los muros son portantes de carga vertical, pero se encuentran desintegrados de las columnas (como si existiese una junta vertical lisa y a ras entre ambos materiales).

Este tipo de construcción no es permitida por la Norma E.070, donde se especifica que para que un muro sea confinado, la albañilería debe construirse en primer lugar, para después vaciar el concreto de las columnas, permitiéndose una conexión dentada o a ras, pero, agregando mechas de anclaje. La técnica usada en Pisco no permite arriostrar verticalmente a la albañilería ante acciones sísmicas transversales a su plano, por ello, después del sismo se notó numerosos casos donde la albañilería se volcó, especialmente en los pisos altos. (San Bartolomé, 2007)

4.3.2 Evaluación de Daños

El informe de la visita de campo realizado por el autor y revisado por el asesor, se puede observar en el Anexo B. (Kuroiwa Horiuchi & Mas Samanéz, 2007)



F4.3.6. Restaurante en Lagunillas de albañilería confinada y techo de caña guayaquil. La tabiquería es derribada por la ola y con la pérdida del muro la consecuente caída del techo.



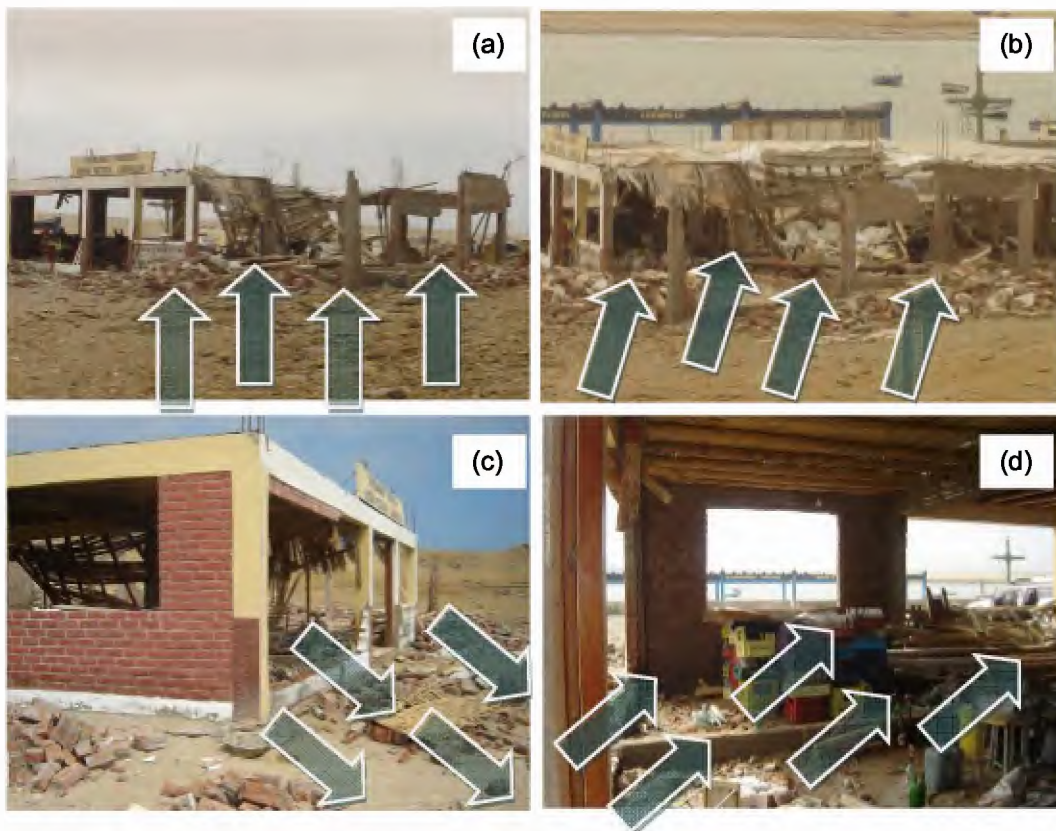
F4.3.7. El poste muestra el esfuerzo realizado producto del arrastre del tsunami, el cual también puede observarse en la inclinación de las palmeras.



F4.3.8. El ordenamiento en el colapso del muro de bloques de concreto es producto de las fuerzas hidrodinámicas que actúan perpendicularmente al plano del muro.



F4.3.9. La forma triangular de la columna contribuye al flujo libre alrededor del elemento, sin embargo se requiere mayor refuerzo en la base para evitar el volteo.



F4.3.10. El restaurante en Lagunillas se encuentra frente a una bahía y de espaldas al mar (ver Anexo B). En las fotos se muestra la dirección de

ataque de las primeras olas que destruyen el lado derecho (a) y la parte posterior del restaurante (b), sin embargo, el frente (c) y (d) poseen los muros al extremo sin daño. El flujo liberó la presión sobre los muros pasando por los laterales y el frente-centro del restaurante.



F4.3.11. Impacto de elementos y escombros en viviendas.

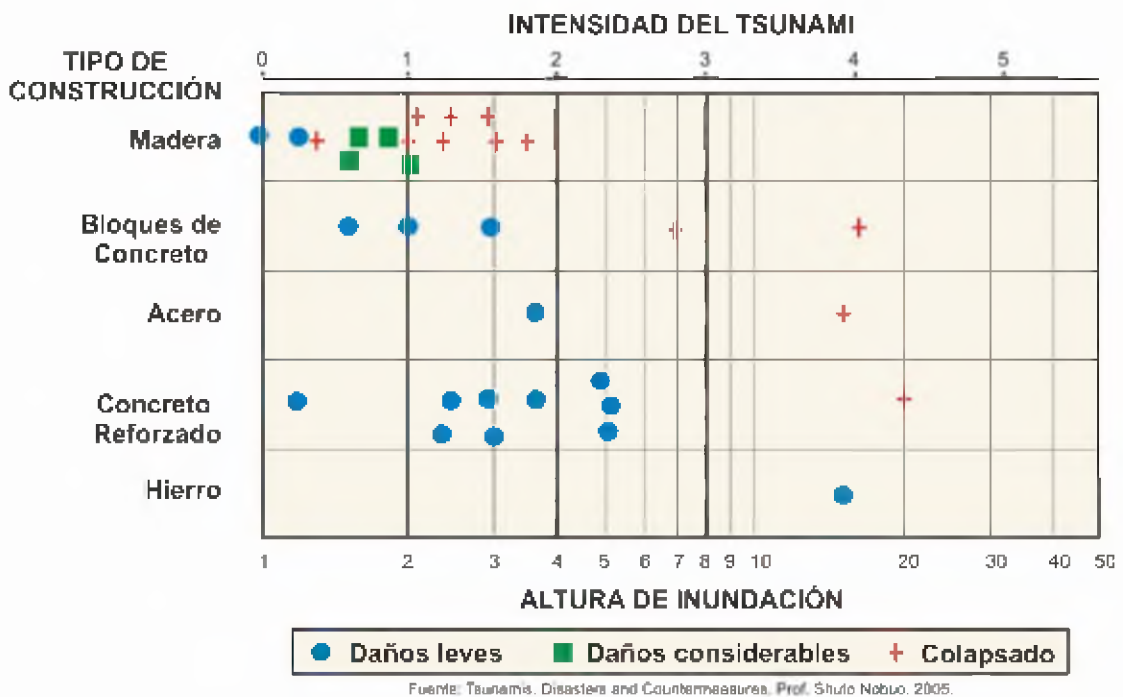
4.4 OBSERVACIONES

Luego de observar los efectos de tsunamis en estructuras en costa a través de los principales tsunamis en el Perú y el Mundo en la última década (Camaná, Indonesia, Pisco), podemos resumir las características encontradas en el cuadro (C4.4.1) de la siguiente página.

C4.4.1. Cuadro resumen de observaciones a las imágenes de los tsunamis de Camaná, Indonesia y Pisco.

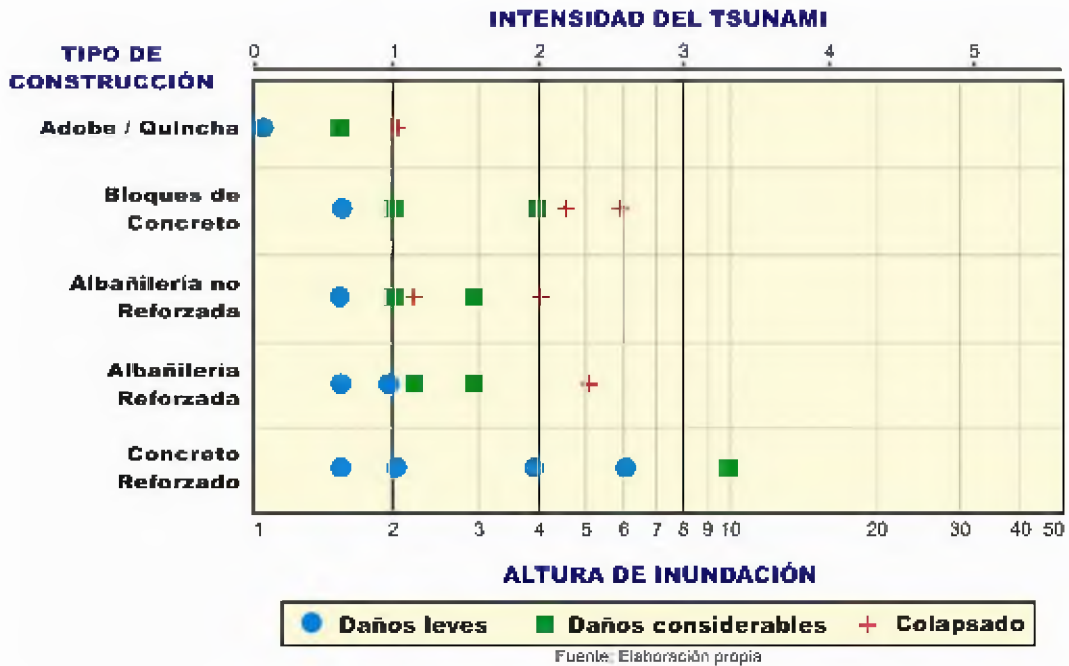
CATEGORÍA	SUB-CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FOTO
PLANEAMIENTO URBANO	Ubicación	Gran parte de las estructuras que han presentado daños leves se encuentran ubicadas detrás de otras edificaciones que las protegen de las olas y el impacto del tsunami, además la presencia de vegetación contribuye a disminuir la energía del tsunami, provocando menores daños.	F4.1.8; F4.1.9; F4.1.10; F4.1.11; F4.1.14; F4.2.7; F4.2.8; F4.3.7; F4.3.10
	Arquitectura	La arquitectura con espacios libres y orientación de muros en el primer nivel tal que permitan el libre flujo de las aguas, aligerando la presión ejercida sobre la tabiquería y elementos estructurales resultan convenientes.	F4.1.6; F4.1.7; F4.2.5; F4.2.9; F4.2.10; F4.2.11, F4.2.12; F4.2.15; F4.2.20; F4.2.21
INGENIERIA	Material (calidad y construcción) Diseño (fuerzas inducidas)	Materiales como los bloques de concreto y las cañas guayaquil fueron arrasados por las olas, en cambio, estructuras de concreto armado mostraron un mejor comportamiento., El diseño estructural debe contemplar las fuerzas inducidas por el tsunami.	F4.1.3; F4.1.5; F4.1.12; F4.2.2; F4.2.6; F4.2.13; F4.2.14; F4.2.15; F4.2.18; F4.2.19; F4.2.21; F4.3.6; F4.3.8; F4.3.9
	Impacto	Elementos de arrastre del tsunami se convierten en proyectiles que impactan en las viviendas.	F4.1.2; F4.3.11
	Suelo-Estructura	El suelo alrededor de la cimentación puede presentar erosión.	F4.1.4; F4.1.9; F4.1.10; F4.1.13; F4.2.2; F4.2.3; F4.2.8; F4.2.16; F4.2.17; F4.2.22

De lo observado en las fotos podemos concluir que existen estructuras que han respondido satisfactoriamente a las exigencias de tsunamis previos, a pesar, de no haber sido exclusivamente diseñadas para tal fin. Sin embargo, es importante notar que el comportamiento más adecuado se ha observado en las estructuras de concreto armado, confirmando los estudios de tsunamis en las costas de Japón (Shuto, 2005) resumidas en el siguiente gráfico.



F4.4.1 Daños observados por tsunami según tipo de construcción. (Shuto, 2005)

Valiéndonos de la metodología utilizada por el Dr. Shuto en el cuadro F4.4.1 y resumiendo las imágenes observadas en los tsunamis de Camaná y Pisco, para el Perú, proponemos el siguiente cuadro de daños de acuerdo a la tipología constructiva de nuestra zona.



F4.4.2 Daños observados por tsunami según tipo de construcción. (Elaboración propia)

Así mismo, la siguiente tabla elaborada por Iizuka y Matsutomi (2000) señala que estructuras de concreto reforzado ofrecen mayor resistencia frente a alturas de inundación menores a 7m, confirmando los cuadros presentados anteriormente.

Tipo de edificación y vivienda	Parcialmente destruidas			Completamente destruidas		
	Hf(m)	u(m/s)	Fd(KN/m)	Hf(m)	u(m/s)	Fd(KN/m)
Concreto reforzado	-	-	-	> 7.0	>9.1	>332 a 603
Bloques de concreto	3	6	60.7 a 111	7	9.1	332 a 603
Viviendas de madera	1.5	4.2	15.6 a 27.4	2	4.9	27.4 a 49

Fuente: Estimation of damage due to tsunami. Iizuka H. y Matsutomi H. 2000

C4.4.2 Estimación de daños por tsunami. (Iizuka & Matsutomi, 2000)

En la tabla:

Hf: altura de inundación; u: velocidad del flujo; Fd: fuerza hidrodinámica

Por lo tanto, ya que el comportamiento más adecuado frente a un tsunami está dado por edificaciones de concreto armado; en adelante describiremos las características observadas según las categorías presentadas en el Cuadro C4.4.1.

Capítulo V: CRITERIOS PARA EL PLANEAMIENTO

En la gestión del riesgo de desastres por tsunamis, se puede reducir drásticamente la vulnerabilidad mediante la aplicación del planeamiento urbano, entendido como un plan inteligente de ocupación del territorio, sobre la base de la calificación de riesgo del suelo ante las diversas amenazas naturales.

Las herramientas ideales para este fin son los **planes de uso de suelo**, que evitan la localización de nuevas poblaciones en áreas inundables y la **reubicación** a espacios seguros, de asentamientos ubicados en zonas de riesgo.

En situaciones complejas donde la población se encuentra consolidada o semi-consolidada y además las actividades económicas para el desarrollo local obligan a la cercanía al mar, se tiene como alternativa la organización y ejecución de **planes de evacuación** para casos de emergencia.

Aun así, en muchos casos la llegada de las olas del tsunami no brinda el tiempo necesario para la correcta reacción y evacuación horizontal del poblador, es por ello que se plantean los **refugios temporales** en zonas inundables como alternativa de protección para quienes no logren una evacuación veloz, tal es el caso de niños, discapacitados y mayores de edad, quienes permanecerían en sus hogares o de lo contrario evacuarían a edificaciones cercanas refugiándose en pisos superiores, para lo cual la estructura debe brindar seguridad y condiciones estructurales adecuadas para resistir la fuerza de impacto de olas, escombros, etc.

En palabras de O'Connor (O'Connor Salmón, 2008), en *el desarrollo demográfico del Perú, se aprecia que el fenómeno de la migración del campo a la ciudad ha devenido en un crecimiento caótico y vertiginoso de las capitales, especialmente de la Costa y la formación de asentamientos marginales sin mediar ninguna evaluación de riesgo a desastres*. Este proceso desordenado e improvisado en muchos casos, sumado al fenómeno de la auto-construcción sin supervisión, la pobreza que lleva al uso de materiales débiles por costos menores, reemplazando seguridad por ahorro, ha incrementado el riesgo en la población costera.

Por lo tanto, la alternativa de refugio y evacuación en edificaciones tsunami-resistentes no ha logrado desarrollarse en el Perú ni tampoco integrarse a los instrumentos legales como normas u ordenanzas que regulen las condiciones de seguridad para edificaciones en zona inundable.

5.1 PRINCIPIOS PARA LA PLANIFICACIÓN

Los principios para la planificación y diseño considerando el riesgo por tsunami, proporcionados por la National Tsunami Hazard Mitigation Program⁸, comentados y agrupados a criterio propio del autor son básicos para la discusión de este punto:

“Conocer el riesgo de la comunidad, así como el peligro, vulnerabilidad y exposición a la que se encuentra”

En todo proceso de desarrollo es importante considerar la variable de reducción del riesgo ante desastres, en el caso de un fenómeno natural como el tsunami, el riesgo y la evidencia del mismo es estudiado a través de simulaciones, trabajos de campo en busca de indicios de eventos previos (paleo tsunamis) e investigaciones de campo post desastre.

⁸ La NTHMP se formó en 1995 dirigido por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos de Norte América.

En el Perú, previo al 2001 (Tsunami en Camaná) los estudios por riesgo de tsunami son muy escasos, sin embargo, a raíz del impacto y difusión del evento asiático (2004), en nuestro medio éste fenómeno está cobrando, cada vez, mayor interés en el ámbito científico y académico.

En los últimos años, el desarrollo de Mapas de Peligros a través de Programas como el de Ciudades Sostenibles (INDECI), Tsunami Ready (Gobierno Regional del Callao) u otros similares, aportan una herramienta valiosa para la caracterización del medio físico y los peligros que pueden afectar al ser humano en sus medios racionalizados.

Distritos como La Punta, en el Callao, son conocedores del alto riesgo que poseen frente a este evento, conscientes de su vulnerabilidad para la ejecución de evacuaciones fuera del distrito, han ido buscando y aprendiendo nuevas formas de enfrentar el riesgo y procurar salvaguardar la vida de sus habitantes, como por ejemplo la evacuación vertical y el uso de refugios verticales de emergencia.

“Evitar nuevos desarrollos en áreas de riesgo por tsunami para minimizar las futuras pérdidas”

“Localizar y configurar nuevos desarrollos que ocurran en áreas de riesgo de tsunami orientadas a minimizar pérdidas futuras”

“Proteger el desarrollo existente de las pérdidas por tsunami a través de replanteamiento, retroalimentación y el uso del suelo en planes y proyectos”

Los procesos de urbanización y conurbación requieren de instrumentos normativos, de control y de supervisión que aseguren el desarrollo de áreas seguras y eviten la conglomeración de residentes en áreas de riesgo cercanas al litoral en zonas inundables por tsunami.

Los planes de uso de suelo y la zonificación permiten orientar y dirigir estos procesos urbanos hacia un crecimiento sostenible y el objetivo de minimizar pérdidas futuras.

Es recomendable que en el planeamiento urbano y el trazo de nuevos asentamientos se considere el riesgo por tsunami, procurando el máximo espaciamiento entre edificaciones, construcciones elevadas por sobre el nivel de inundación, vegetación que ofrezca fricción a la energía de las olas, vías de acceso principales lejos del área inundable y las secundarias perpendiculares al litoral para facilitar la evacuación.

A nivel comercial, los complejos industriales con actividades cercanas al mar pueden optar por alternativas de protección de la inversión y reducción de pérdidas a través de una adecuada distribución de zonas de uso internas, como se muestra en el gráfico.



F5.1.1 Distribución del uso interno en comercio industrial. (Kuroiwa Horiuchi, 2002)

“Planes de evacuación”

La elaboración de estos documentos posee una importancia vital para la mejor respuesta a nivel comunitario.

Es inevitable el uso de espacios en el litoral en algunas zonas debido a las actividades económicas y de producción desarrolladas mediante la explotación de los recursos marinos; por lo tanto se hace aún más necesario proteger a quienes contribuyen al desarrollo local y nacional y permanecen en zonas posibles de afectación.

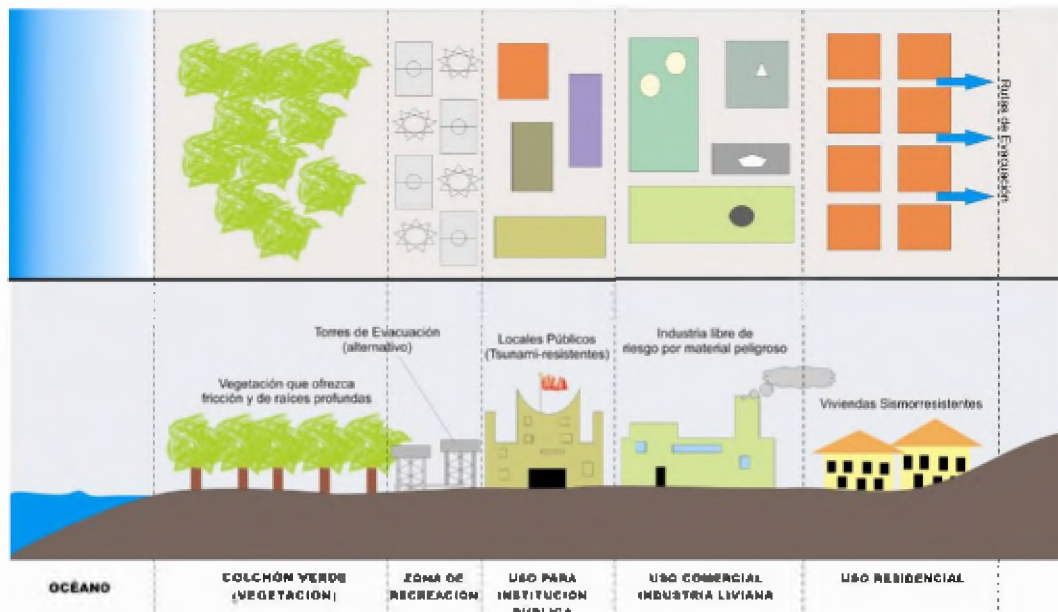
“Diseñar y construir nuevas edificaciones para minimizar los daños por tsunami”

“Tomar especial precaución en la ubicación y diseño de las infraestructuras e instalaciones críticas para minimizar los daños por tsunami”

Se requiere tomaren cuenta ciertos criterios que favorecen al comportamiento de las estructuras frente al tsunami, algunos de ellos que se aprecian en las imágenes del capítulo anterior y en el **C4.4.1**;

**CRITERIOS PARA EL PLANEAMIENTO URBANO DE
ESTRUCTURAS TSUNAMI-RESISTENTES**

- Ubicación con respecto a otras edificaciones
- Presencia de vegetación y *colchones verdes* como protección
- Estructuras construidas sobre el nivel de inundación
- Distribución de usos con respecto a la distancia al litoral (usos recreativos cerca al mar y usos urbanos fuera de la zona inundable, con el *colchón verde* frente a estas zonas. **F5.1.2**)



F5.1.2 Elaboración propia, basado en ideas vertidas por el Dr. Budi Faisal del Departamento de Arquitectura de Tecnología de Bandung. (Budiarjo, 2006)

Tal y como se observa en el gráfico, en el planeamiento urbano es necesario conciliar los requerimientos de desarrollo urbano con las enseñanzas que ha brindado la naturaleza.

Una de las herramientas implementadas en el Perú que conforman la base para la preparación de los planes de uso de suelo son los estudios de microzonificación.

Capítulo VI: CRITERIOS EN LA ARQUITECTURA

En la formulación de los proyectos, la arquitectura toma en cuenta el uso destinado, la cultura y el entorno para elaborar propuestas de diseño que logren satisfacer las necesidades y comodidades del usuario a través de la funcionalidad de un sistema integrado de espacios construidos sobre la base de materiales y acabados que conceptualicen las ideas del profesional.

De acuerdo a lo observado en el Capítulo IV, sobre el efecto de los tsunamis en las edificaciones, el proyecto arquitectónico debe considerar brindar a la estructura la capacidad de enfrentarse al fenómeno natural de tal manera que sea lo menos afectado posible, a nivel estructural y de uso.

En tal sentido, la edificación es preparada para permitir el paso de las aguas mediante el rompimiento de las fachadas o muros no estructurales al nivel del primer piso. Para este propósito un gran porcentaje de aberturas o “espacios libres” tales como puertas, ventanas, arcos, ventilaciones, corredores, etc, son proyectados en el primer nivel. Las aberturas pueden localizarse adyacentes a las columnas u otros elementos estructurales.

De la misma manera que el profesional en el programa arquitectónico toma en consideración la orientación de la estructura con respecto al viento, luz natural y paisaje, también es importante considerar la orientación de los elementos expuestos al impacto de las olas. En ese sentido, y en concordancia con el criterio previo de “espacios libres” el anteproyecto debe reflejar la orientación de muros paralelos al flujo esperado del oleaje de tsunami Además, si se proyecta la fachada con muros no estructurales que serán derribados por las olas del tsunami, se

debe evitar las uniones rígidas al sistema principal de la estructura, llámese columnas, vigas, etc. (Ver F4.2.11).

CRITERIOS PARA EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

- Espacios libres y aberturas al flujo en niveles inferiores
- Orientación de elementos estructurales paralelos al flujo e impacto proyectado de olas.
- Posibilidad de orientación de elementos no estructurales (no integrados al sistema estructural) perpendicular al flujo.

6.1 EJEMPLO DE ESTRUCTURA CON CARACTERÍSTICAS TSUNAMI-RESISTENTES

En este ejemplo se presenta una estructura con características arquitectónicas adecuadas, sin embargo la resistencia estructural no ha sido evaluada bajo los criterios que se presentarán en el Capítulo VII.

El Edificio Grau de la Escuela Naval de la Marina de Guerra del Perú (F6.1.1; F6.1.2)., ubicado precisamente en el extremo del Distrito de La Punta-Callao, en el punto más expuesto al impacto de olas, posee las características mencionadas de orientación de elementos resistentes paralelos al flujo e impacto esperado de olas, en su interior la arquitectura posee desniveles y espacios abiertos que permiten el flujo a través de la edificación, además de una estructuración trapezoidal en altura, en donde el primer nivel posee mayor masa y elementos estructurales resistentes.

Además por la altura superior al nivel de inundación proyectado es considerado en el Plan de Evacuación del Distrito de La Punta como un refugio vertical de emergencia y una estructura que calificaría como tsunami-resistente en el entorno localizado.



F6.1.1; F6.1.2 Edificio Grau de la Escuela Naval en La Punta - Callao. Posee las características en forma, orientación, arquitectura y estructuración que lo posibilitan como una edificación tsunami resistente. Fuente: Elaboración propia

6.1.1 CARACTERISTICAS DEL EDIFICIO GRAU

Construcción de concreto armado de 04 niveles y 01 sótano, presenta 05 accesos (F6.1.4) y 06 escaleras internas hasta el último nivel (F6.1.5), sin embargo sólo 01 ingreso a la azotea, cercano a la escalera N° 4.



- Ingresos al edificio
- Escaleras
- Acceso a la azotea

F6.1.3 Planta del Edificio Grau – Escuela Naval MGP. La Punta – Callao.



F6.1.4 Accesos al Edificio Grau. Vista interior: Accesos N°2, N°3 y N°5. Vista Exterior: Acceso N°4.



F6.1.5 Escaleras interiores. Ancho: 1.20m. Descanso a mitad de tramos y barandas.

6.1.2 RECORRIDO DE EVACUACIÓN

Si realizamos el recorrido para el caso de una evacuación y analizando cada punto tenemos: **(F6.1.6)**

1.- Accesos: Se tienen 5 accesos, con el ancho y el mantenimiento adecuado para permitir el acceso de gran cantidad de personas.

2.- Escaleras: Los anchos de escaleras son de aproximadamente 1.20m lo cual cumple con las normas de seguridad en Defensa Civil para el caso de evacuaciones, permitiendo el uso en dos filas. Además cuenta con descansos a mitad de tramos entre pisos, una ventaja en el caso de uso por parte de personas mayores de edad.

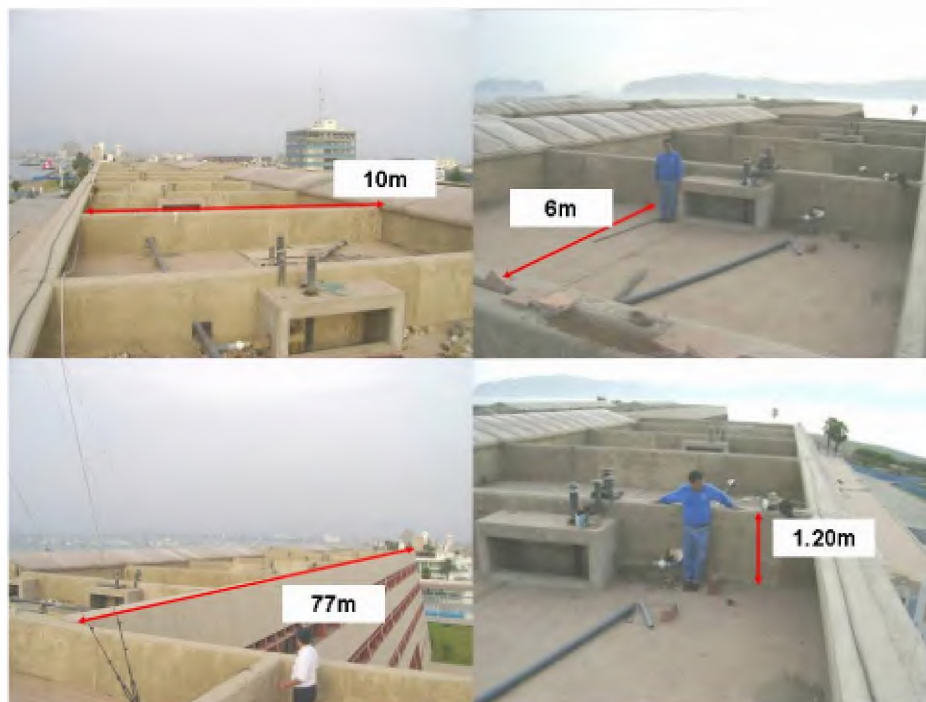
3.- Pasadizos: Los pasadizos son más estrechos que las escaleras lo cual ocasionaría un poco de congestión, sin embargo los niveles cuentan con un hall amplio al final de las escaleras.

4.- Ingreso: El ingreso a la azotea es a través de una puerta de 70cm y una escalera de apenas 80cm con contrapasos que exceden las medidas de acuerdo a la normatividad. Es recomendable en este punto habilitar el ingreso a la azotea a través de las escaleras N° 1 y N° 6 **(F6.1.3)** mediante la continuación de las mismas hacia la claraboya.

5.- Azotea: Posee un área efectiva aproximada de 3600m² disponible para refugio, dividido por vigas invertidas de 1.20m formando celdas de 10m x 6m cada una. Es necesario realizar trabajos previos para facilitar el flujo en la azotea. **(F6.1.7)**



F6.1.6 Recorrido de Evacuación en Edificio Grau.



F6.1.7 Azotea de Edificio Grau.

Capítulo VII: CRITERIOS EN LA INGENIERIA

Según los efectos de tsunamis pasados, se ha observado que en la mayoría de los casos las estructuras de concreto armado poseen un mejor comportamiento frente a las fuerzas inducidas por el tsunami (F4.4.2). Sin embargo, en lo que respecta al diseño por tsunami, es necesario aclarar los efectos que produce sobre las edificaciones y de qué manera se pueden mejorar los diseños estructurales tomando en consideración las sollicitaciones de este fenómeno natural tan devastador.

En el cuadro C4.4.1, se precisan las observaciones realizadas a través de las imágenes recopiladas de los diferentes tsunamis en la última década, éstas han sido catalogadas para desarrollar los Criterios en el Planeamiento Urbano (Capítulo V) y en la Arquitectura (Capítulo VI).

En cuanto a los criterios que contemplan los proyectos de ingeniería se debe poner especial atención a los elementos estructurales que soportan fuerzas de impacto de escombros y las inducidas por el flujo; en la cimentación considerar la erosión, procesos de licuación y otros; y finalmente la calidad de los materiales y los procesos de construcción

CRITERIOS PARA LA INGENIERÍA DEL PROYECTO

- Diseño de elementos estructurales y no estructurales
- Consideración de los niveles de erosión en cimentaciones
- Calidad de los materiales y procesos de construcción

En el diseño estructural frente a tsunamis en el Perú, no existen normas técnicas, metodologías desarrolladas o criterios específicos para a tomar en cuenta en la ingeniería del proyecto.

El Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) en la Norma E030. Artículo 6: Condiciones Locales. 6.1.a. Microzonificación Sísmica menciona que la microzonificación sísmica *son estudios multidisciplinarios, que investigan los efectos de sismos y fenómenos asociados como licuefacción de suelos, deslizamientos, tsunamis y otros, sobre el área de interés.* (RNE, 2006). Sin embargo, este instrumento es utilizado para el desarrollo de los Mapas de Microzonificación y a modo simplificado los Mapas de Peligro que por sus características son aplicables al planeamiento urbano y uso de suelo, ya que se basan en los datos de (1) tiempo de llegada de la primera ola; (2) estimación de la altura de ola en costa; y la (3) delimitación de la zona de inundación; dejando de lado los parámetros exclusivos para el diseño estructural como son: (a) altura de inundación; (b) velocidad de flujo; (c) aceleración del flujo; (d) momento o impulso del flujo. (FEMA, 2008)

Debido a este vacío en el proceso de diseño estructural y con el fin de brindarle mayor seguridad y comportamiento adecuado a las estructuras de concreto armado ubicadas en la costa peruana, desarrollaremos el criterio de diseño de elementos estructurales frente a tsunamis.

7.1 DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Los daños a las estructuras producto de los tsunamis se pueden atribuir a fuerzas identificadas como (FEMA, 2008):

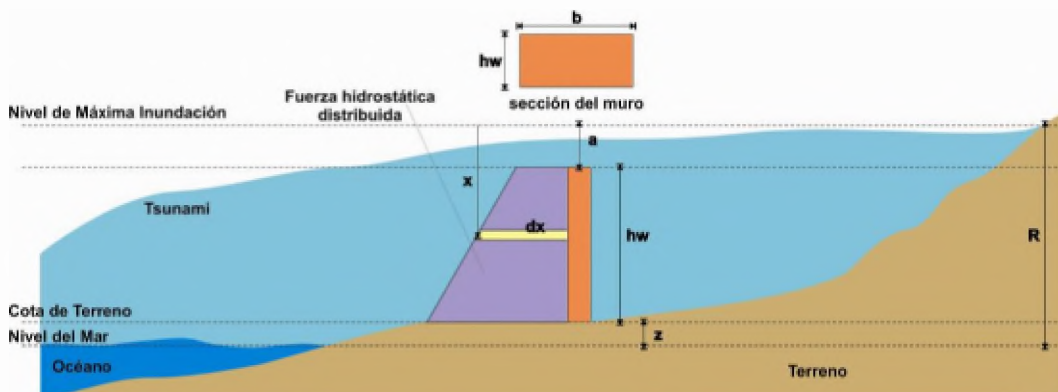
1. Fuerzas hidrostáticas, causadas por el sumergimiento parcial o total de las estructuras;

2. Fuerzas de Empuje o *boyantes*, causados por el parcial o total sumergimiento;
3. Fuerzas hidrodinámicas, causadas por la velocidad del flujo;
4. Fuerzas de impulso, causadas por la llegada del flujo;
5. Fuerzas del impacto de escombros;
6. Fuerzas de embalse, producto de la acumulación de escombros;
7. Fuerzas verticales, producto de la fluctuación de la marea;
8. Sobrecarga por acumulación de agua en los primeros niveles.

7.1.1 FUERZAS HIDROSTÁTICAS

Estas fuerzas ocurren cuando el flujo se mueve lentamente o permanece cuasi-estático alrededor de una estructura o un componente específico. Son causadas por un desbalance de presiones debido a la diferencia de profundidad de agua en lados opuestos de un miembro estructural y actúan perpendicularmente al elemento. (F7.1.1)

Si el elemento posee ancho relativamente corto, las fuerzas hidrostáticas son despreciables ya que el flujo recorre alrededor del elemento (ej. columnas) en cambio para elementos como muros individuales, estas cargas deben ser consideradas.



F7.1.1 Grafico de la Fuerza hidrostática inducida por tsunami

$$\int_0^{Fh} \partial F = \int_a^{a+hw} \rho_s \cdot g \cdot b \cdot x \cdot \partial x \quad (1)$$

Luego:

$$F_h = \frac{1}{2} \rho_s g b [(a + h_w)^2 - a^2] \quad (2)$$

$$F_h = \frac{1}{2} \rho_s g b h_w (2a + h_w) \quad (3)$$

Si:

$$a = R - h_w - z \quad (4) \quad h_{\max} = R - z \quad (5)$$

Entonces:

$$F_h = \frac{1}{2} \rho_s g b h_w \left(h_{\max} - \frac{h_w}{2} \right) \quad (6)$$

Donde: F_h = Fuerza hidrostática en un muro (N)

ρ_s = densidad del agua de mar con sedimento (kg/m^3)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

b = ancho del muro (m)

h_w = altura del muro (m)

h_{\max} = altura de inundación en metros o el valor del run-up estimado de diseño (R) menos la cota en el punto a evaluar (z)

La fuerza resultante actuara horizontalmente a una distancia desde la base del elemento igual a:

$$\frac{h_w (3h_{\max} - 2h_w)}{3 (2h_{\max} - h_w)} \quad (7)$$

7.1.2 FUERZAS DE EMPUJE O BOYANTES

Conocida también como la fuerza hidrostática vertical que actúa sobre un elemento sumergido o parcialmente sumergido, en oposición a su peso y en el centroide del volumen desplazado.

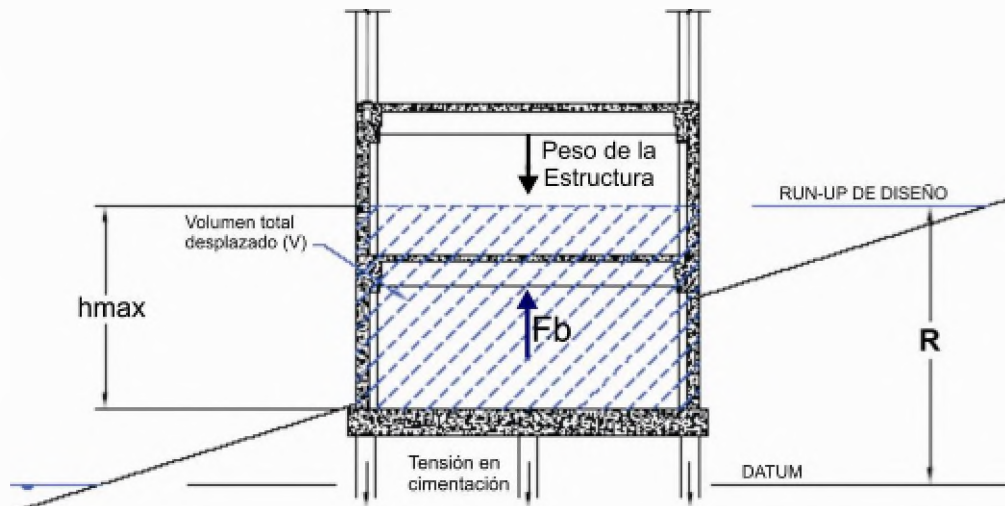
Esta fuerza debe ser contrarrestada con el peso de los componentes u otras fuerzas resistentes a la flotación.

Del Principio de Arquímedes se sabe que:

$$F_b = \rho_s g V \quad (8)$$

- Donde:
- F_b = Fuerza de Empuje o boyante (N)
 - ρ_s = densidad del agua de mar con sedimento (kg/m^3)
 - g = aceleración de la gravedad (m/s^2)
 - V = Volumen de agua desplazada (m^3)

El caso de una edificación sumergida se aprecia en la figura F7.1.2



F7.1.2 Adaptado de FEMA P646. (FEMA, 2008)

7.1.3 FUERZAS HIDRODINÁMICAS

Conocida también como fuerza de arrastre, se producen a causa de las fuerzas laterales sobre el cuerpo sumergido y la fuerza de inercia producto del avance del fluido alrededor de la estructura.

La fuerza hidrodinámica en un fluido sobre un cuerpo sumergido puede deducirse utilizando el análisis dimensional y las pruebas experimentales.

En este caso el parámetro adimensional a utilizar es el Coeficiente de Arrastre que se interpreta así:

$$C_d = \frac{F_d}{F_i} = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho_s \mu^2 A} \quad (9)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_s B h \mu^2 \quad (10)$$

Ya que el flujo varía de $h = 0$ a $h = h_{\max}$ y la velocidad de $\mu = 0$ a $\mu = \mu_{\max}$ pero no necesariamente ocurren al mismo tiempo, para efectos de diseño se requiere el mayor valor de $(h \mu^2)$ consideraremos la siguiente ecuación:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_s B (h \mu^2)_{\max} \quad (11)$$

Donde:

- F_d = Fuerza Hidrodinámica de arrastre (drag) (N)
- C_d = Coeficiente de arrastre (se asume 2.0)
- ρ_s = Densidad del agua de mar con sedimento (kg/m^3)
- B = Ancho del elemento (muro, columna, etc) (m)
- h = Altura de inundación (m)
- μ = velocidad del flujo (m/s)

Nota: El producto $(h\mu^2)$ es conocido como el momento o impulso de flujo y puede estimarse según la siguiente ecuación (FEMA, 2008):

$$(h\mu^2)_{\max} = gR^2 \left(0.125 - 0.235 \frac{z}{R} + 0.11 \left(\frac{z}{R} \right)^2 \right) \quad (12)$$

Donde:

- g = aceleración de la gravedad (m/s^2)
- R = Elevación del Run-up de diseño (m)
- z = cota en la base de la estructura (m)

La resultante de las fuerzas hidrodinámicas actúa a la mitad de la altura inundada del elemento. (h_{\max}).

7.1.4 FUERZAS DE IMPULSO

Producto de los primeros impactos del oleaje de tsunami en la estructura. De acuerdo con datos de laboratorio (Yeh, 2007), se recomienda tomar las fuerzas de impulso como un 50% más al valor de las fuerzas hidrodinámicas.

$$F_s = 1.5F_d \quad (13)$$

- Donde:
- F_s = Fuerza de Impulso por oleaje (surge)
 - F_d = Fuerza hidrodinámica o de arrastre (drag)

Las fuerzas de impulso son aplicadas en los elementos ubicados en el borde inicial de la ola, mientras que las hidrodinámicas en las posteriores inundadas por donde ya ha pasado el tsunami.

7.1.5 FUERZAS DE IMPACTO

Resulta difícil estimar con precisión la fuerza resultante producto del impacto de escombros, elementos flotantes como barcas, vehículos u otros, ya que esto depende del entorno y los elementos que pueden ocasionar daño a la estructura en una situación de tsunami.

A comparación de las otras fuerzas, esta actúa en un punto específico de la estructura – se asume que al nivel de la inundación – y durante períodos cortos de tiempo.

Por la complejidad de la interacción fluido – objeto – estructura, no existe una fórmula específica para determinar el valor de esta fuerza, sin embargo por motivos de diseño y para considerar la participación de esta eventualidad se puede estimar utilizando la siguiente ecuación:

$$F_i = C_m \mu_{\max} \sqrt{k \cdot m} \quad (14)$$

Donde:

- F_i = Fuerza de impacto de escombros
- C_m = Coeficiente de masa (igual a 2.0) (FEMA, 2008)
- μ_{\max} = velocidad máxima del flujo (m/s)
- k = rigidez del objeto que impacta
- m = masa del objeto que impacta

La línea de acción de la resultante de esta fuerza varía según el nivel de inundación o run-up de diseño, pero como se observa en la ecuación el valor de la fuerza considera el μ_{\max} , momento en el cual se tiene una altura de inundación h que se asume como la línea de acción de la fuerza. Los valores de h y μ_{\max} pueden obtenerse de modelos de simulación numérica.

7.1.6 FUERZAS DE EMBALSE

Esta fuerza es producida por la acumulación de objetos y escombros frente a un elemento de la estructura, generando sobre este una mayor carga hidrodinámica.

Por lo tanto puede tratarse como una fuerza hidrodinámica con una ligera corrección en el ancho B de cálculo.

$$F_{dm} = \frac{1}{2} C_d \rho_s B_d (h\mu^2)_{\max} \quad (15)$$

Donde:

- F_{dm} = Fuerza de embalse (dam) (N)
- C_d = Coeficiente de arrastre (se asume 2.0)
- ρ_s = Densidad del agua de mar con sedimento (kg/m³)
- B_d = Ancho del aglomerado de objetos embalsados (m)
- h = Altura de inundación (m)
- μ = velocidad del flujo (m/s)

Se debe evaluar sus efectos en diferentes lugares de la estructura y determinar el más crítico, actuando como una fuerza distribuida a lo largo del ancho B_d .

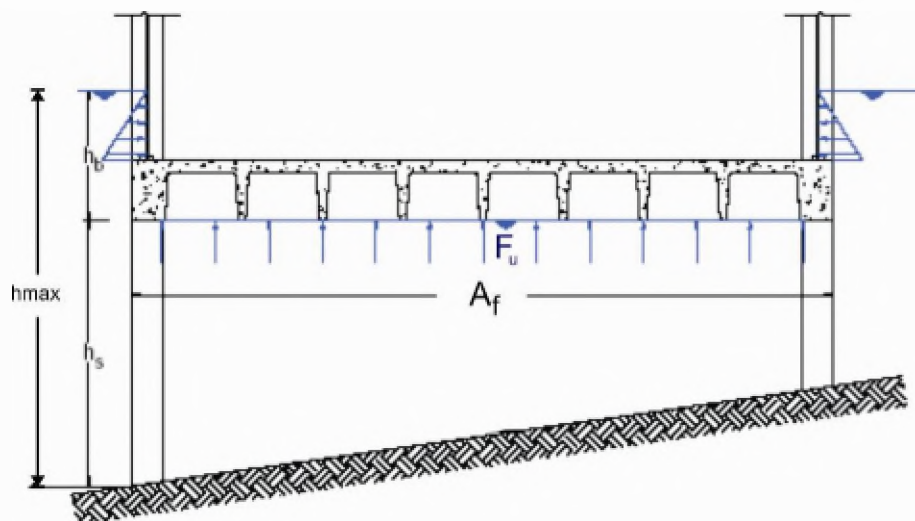
7.1.7 FUERZAS VERTICALES

Cuando la estructura se encuentra sumergida por la inundación del tsunami, esfuerzos verticales son exigidos en componentes como las losas de piso y deben ser aplicadas como fuerzas distribuidas en toda su área.

$$F_u = \frac{1}{2} C_u \rho_s A_f \mu_v^2 \quad (16)$$

Donde:

- F_u = Fuerza Vertical (N)
- C_u = Coeficiente (se asume 3.0)
- ρ_s = Densidad del agua de mar con sedimento (kg/m^3)
- A_f = Área de la losa de piso (m^2)
- μ_v = velocidad del flujo (m/s) cuando la altura de inundación está al nivel de la losa (h_s)

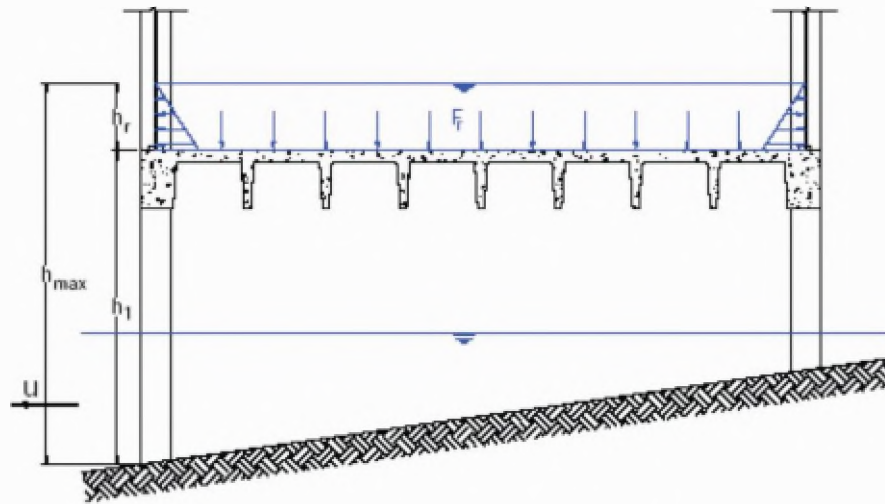


F7.1.3 Adaptado de FEMA P646 (FEMA, 2008)

7.1.8 SOBRECARGA

Cuando la estructura se ha visto inundada en sus primeros niveles y se produce el receso de las aguas, la acumulación de agua en los niveles superiores produce una sobrecarga que podría exceder las cargas del diseño original.

La altura de agua retenida (h_r) dependerá de la altura de inundación máxima en la estructura (h_{max})



F7.1.4 Adaptado de FEMA P646 (FEMA, 2008)

En el Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma E.020 Cargas – Capítulo 7 - El Artículo 26 Acumulación de agua, se hace referencia a una situación similar exclusivamente en techos en donde se debe procurar la pendiente de drenaje y menciona literalmente que *alternativamente serán diseñados para soportar adicionalmente la posible acumulación de agua debida a la deflexión*, según la Tabla N°6 del Artículo 25 que también limita la flecha máxima en pisos.

Por lo tanto, esta situación debe ser considerada frente al riesgo de tsunami y en concordancia con el RNE.

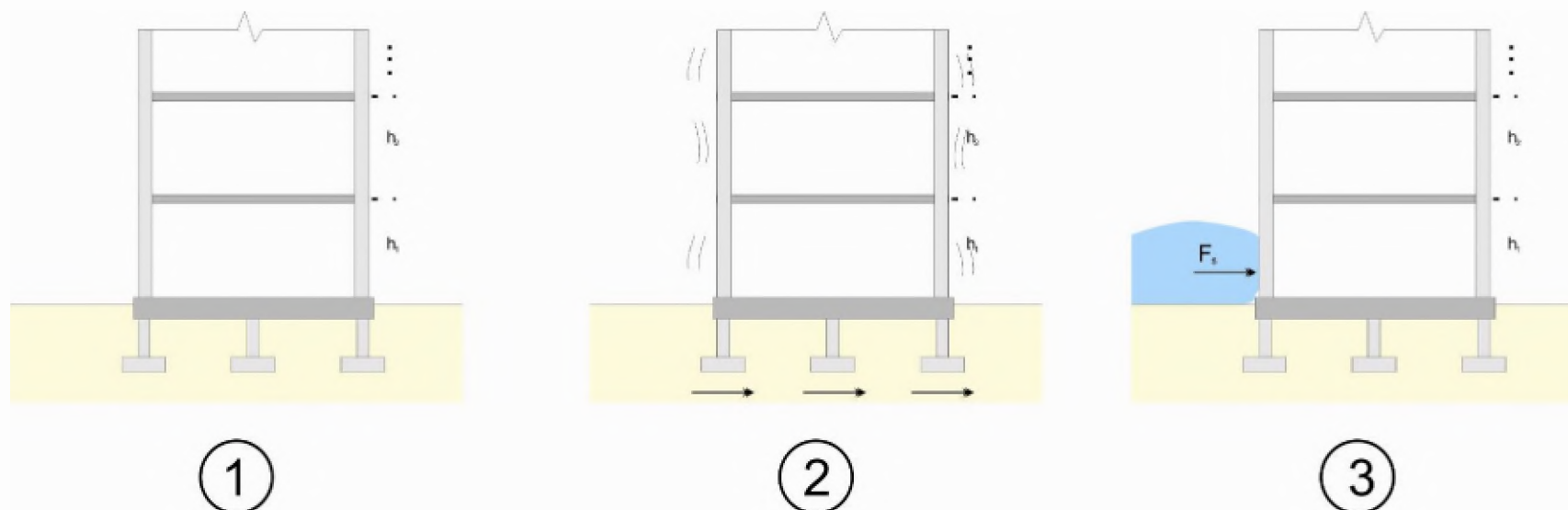
7.2 APLICACION EN EL DISEÑO Y COMBINACIÓN DE FUERZAS

El análisis por tsunami resistencia se aplica en dos casos:

- A construcciones nuevas: se utilizan las fórmulas de fuerzas producto de los tsunamis, combinadas con las fuerzas producidas por sismo, de acuerdo a las normas vigentes.
- A estructuras existentes: se debe en primer lugar evaluar la sismorresistencia aplicando modelos que permitan verificar el cumplimiento de los códigos actuales de diseño. Luego en el análisis de solicitaciones por acción del tsunami se procede al reforzamiento de los elementos principales expuestos en los primeros niveles.

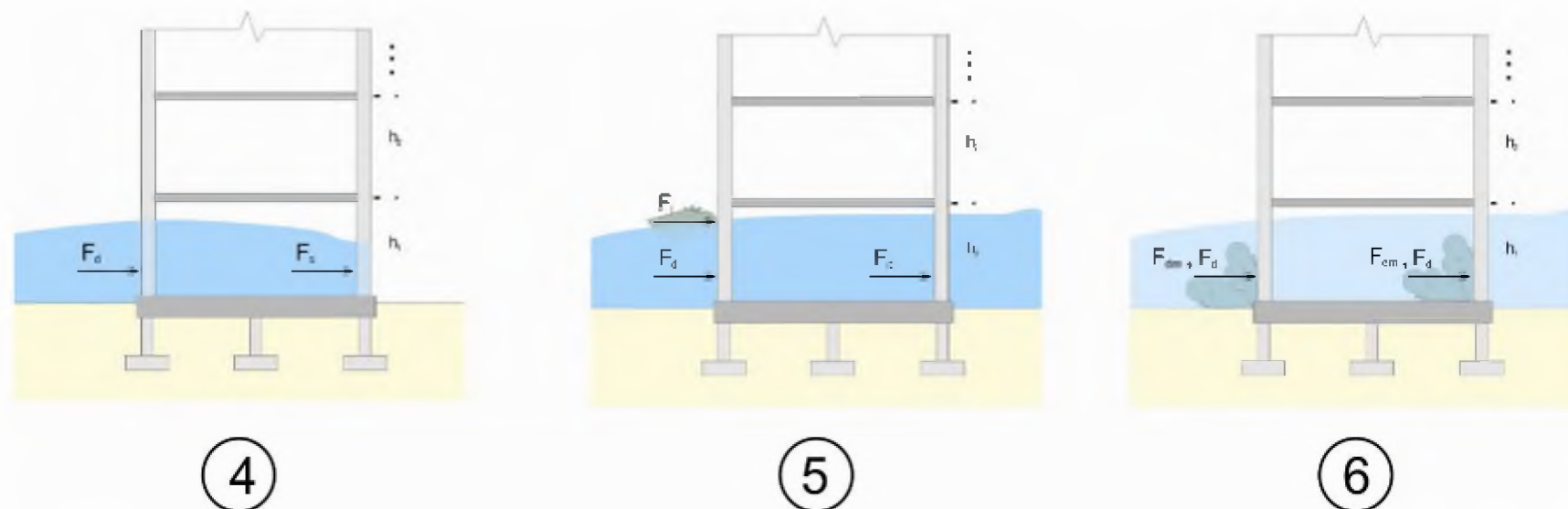
En el análisis estructural, el tratamiento de cargas y esfuerzos por tsunami es similar al de cargas de sismo, sin embargo como se observa en las fórmulas, la altura de inundación y la velocidad del flujo son factores que influyen directamente en el valor de la carga.

No todas las cargas y fuerzas inducidas por el tsunami ocurren simultáneamente, para comprender mejor el proceso se presentan los siguientes gráficos ilustrativos **F7.2.1, F7.2.2, F7.2.3**.



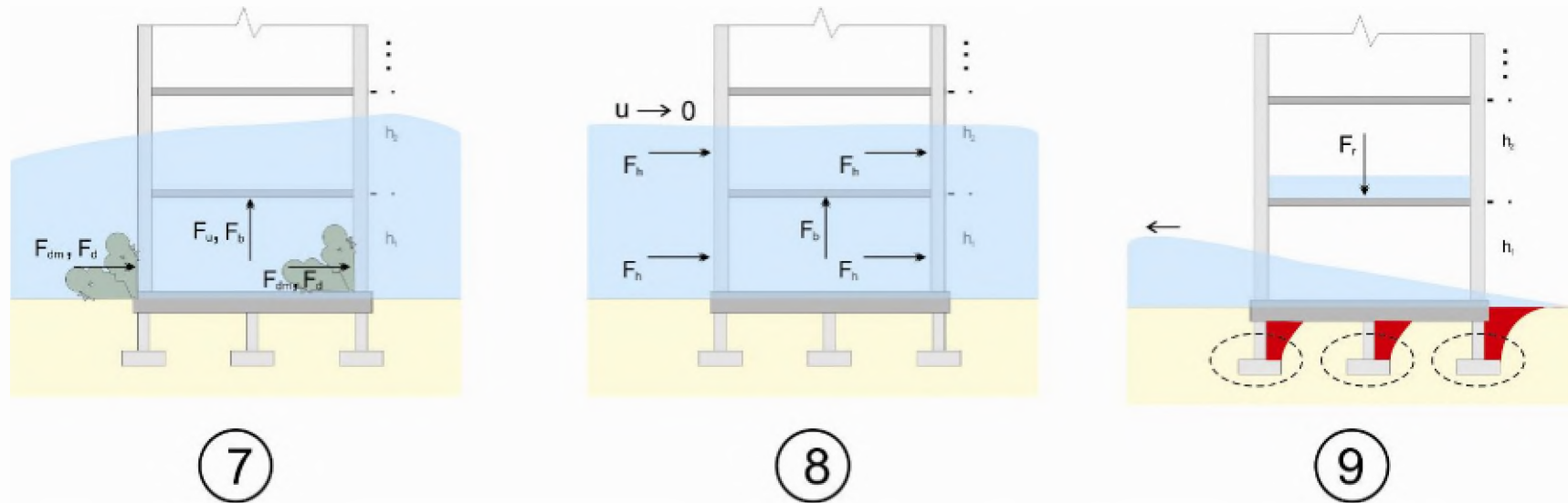
F7.2.1 Esquema de fuerzas inducidas por tsunamis (1-3). Elaboración propia

1. **Situación Normal:** Estructura de Concreto Armado de n pisos, h_i de altura de entrepiso.
2. **Evento Sísmico:** La estructura es sometida a las acciones sísmicas. Requiere diseño sismorresistente.
3. **Tsunami:** A la llegada del tsunami se produce el impacto de ola. Se considera la fuerza de impulso F_s .



F7.2.2 Esquema de fuerzas inducidas por tsunami (4-6). Elaboración propia

4. **Tsunami:** El borde de la ola avanza produciendo fuerzas de impulso F_s a su paso y fuerzas hidrodinámicas F_d en los elementos anteriores.
5. **Tsunami:** Se producen impactos de escombros y material en flotación F_i
6. **Tsunami:** Los escombros se acumulan en los elementos estructurales produciendo fuerzas de embalse F_{dm}



F7.2.3 Esquema de fuerzas inducidas por tsunamis (7-9). Elaboración propia

7. **Tsunami:** La altura de inundación aumenta cubriendo los primeros niveles y generando fuerzas de empuje y verticales por la marea (F_b ; F_u)
8. **Tsunami:** Cuando el flujo se vuelve estacionario, la velocidad es constante o aproximadamente a cero. Entonces se consideran fuerzas hidrostáticas y de empuje por el sumergimiento de los componentes. (F_h ; F_b)
9. **Tsunami:** Cuando se produce el receso, generalmente las acciones de erosión y licuefacción se hacen evidentes, además de la posibilidad de acumulación de agua en pisos superiores. Considerar sobrecarga (F_r).

7.3 CIMENTACIONES

Adicionalmente a las cargas y fuerzas que actúan sobre la edificación producto del sismo y del tsunami, la profundidad de cimentación y las características del suelo que la rodea determinan la estabilidad de la edificación.

En el caso del tsunami de Sumatra, la mayoría de los hoteles o mezquitas resistieron al paso de olas y el receso del mar. (**F4.2.3, F4.2.8, F4.2.12, F4.2.13, F4.2.16**). Aún así, algunas evidenciaron la presencia e importancia de los procesos de *erosión* alrededor de las edificaciones.

De acuerdo a los estudios del Dr. Anat Ruangrassamee, profesor de la Universidad de Chulalongkorn en Tailandia (Ruangrassamee, 2006), para el caso de las estructuras edificadas en la costa, los procesos de erosión producto de un tsunami, obligan a la proyección de cimentación a profundidades mayores que las recomendadas actualmente en las normas de edificación de diversos países.

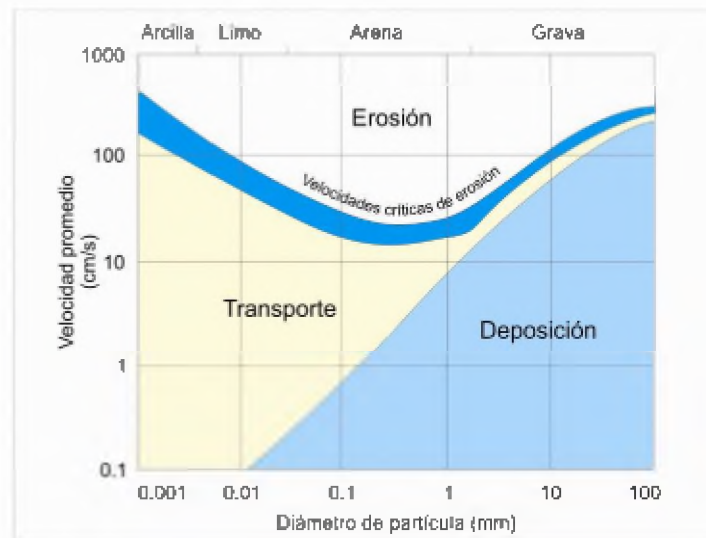
7.3.1 EROSIÓN POR TSUNAMI

La erosión por tsunami se basa en la interacción *agua - suelo - estructura*.

Cuando el tsunami encuentra una estructura que impide su paso, éste se acelera alrededor de las edificaciones y aumenta la velocidad de flujo creando una serie de pequeños vórtices con gran fuerza de succión que erosionan las partículas del suelo.

El estudio de éste fenómeno es una evolución de las investigaciones de erosión fluvial, en donde la evaluación del nivel de erosión utiliza diagramas como el de Hjulstrom (**F7.3.1**), ecuaciones como las de Einstein o Shields (FEMA, 2006), a fin de identificar las velocidades críticas de erosión según el tipo de suelo, la profundidad del flujo, la

duración del proceso y las formas geométricas de los elementos expuestos. Sin embargo, la erosión por tsunami, a comparación de la fluvial, actúa en tiempos cortos y con patrones de flujo más complejos.



F7.3.1 Diagrama de Hjulstrom. Velocidades de erosión según tipo de suelo.

Fuente: (FEMA, 2006)

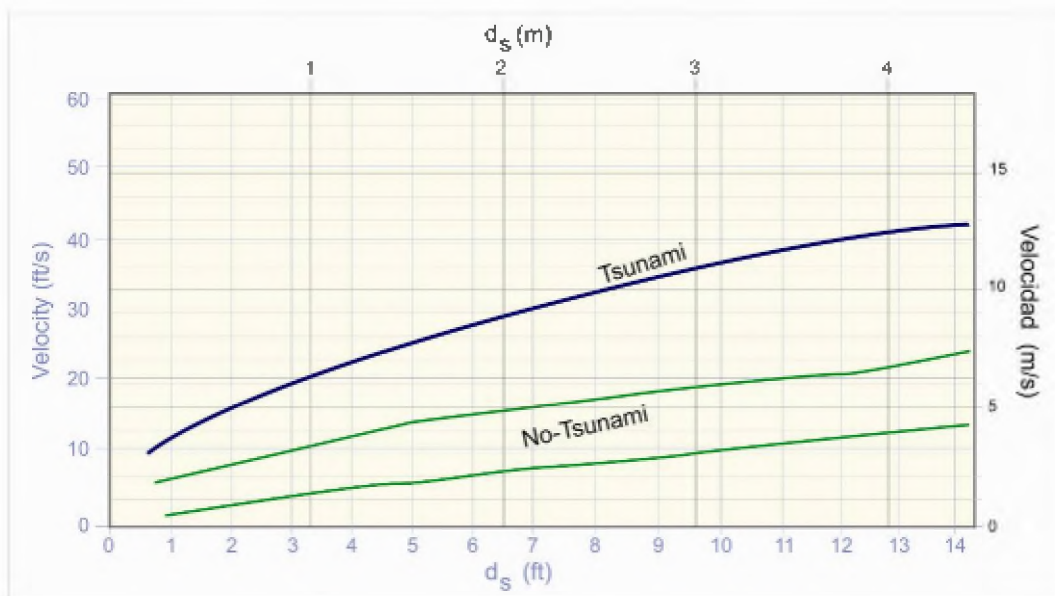
La complejidad del proceso de erosión producto de un tsunami proporciona escasos métodos para el cálculo de profundidades de erosión máxima.

El Método adoptado por el Coastal Construction Manual (FEMA 55) proviene del Código de Edificación de Honolulu de 1980, en donde la profundidad de erosión es un porcentaje (5-80%) de la altura de inundación según el tipo de suelo (arena o arcilla) y la proximidad al litoral. **(C7.3.1).**

Profundidad de Erosión aproximada con el porcentaje de la altura de inundación (h_{max}) - (Dames & Moore, 1980)		
Tipo de Suelo	% h_{max}	% h_{max}
	Distancia al litoral menor a 100m	Distancia al litoral mayor a 100m
Arena suelta	80	60
Arena compacta	50	35
Limo blando	50	25
Limo duro	25	15
Arcilla blanda	25	15
Arcilla dura	10	5

C7.3.1 Profundidad de erosión estimada

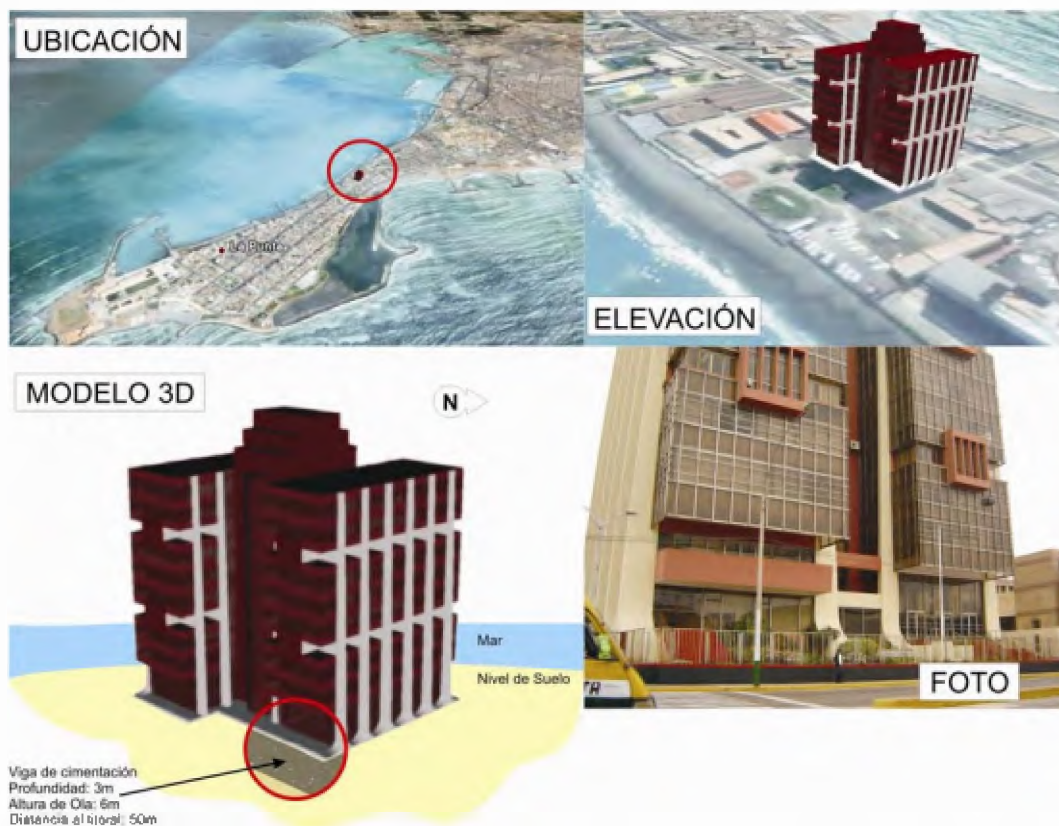
Además se considera el criterio de velocidad de inundación vs. profundidad de erosión, lo cual según especialistas es considerado un criterio conservador. (Yeh & Robertson, 2005).



F7.3.2 Velocidad vs profundidad de erosión. Fuente: (FEMA, 2005)

Se aprecia que el C7.3.1 se concentra en el potencial de erosión del suelo, mientras que la F7.3.2 lo hace en la velocidad del flujo, por ello en el diseño debería tomarse el valor más desfavorable como valor para el pre dimensionamiento de la profundidad de cimentación.

En el Perú la erosión por tsunami se consideró por primera vez en la década del 70 en el diseño y construcción del edificio de la SUNAD⁹ ubicado en Chucuito – Callao, elaborado por KUKOVA INGENIEROS S.A.C. El edificio ubicado a 50m del litoral en suelo de canto rodado posee vigas que rodean la cimentación a una profundidad de 3m, es decir el 50% de la altura h_{max} (6.0m) estimada para esa zona. (F7.3.3)



F7.3.3 Edificio Sunad. Chucuito – Callao, Perú. Consideró en la década del 70 la erosión por tsunami en su diseño. **Fuente:** Elaboración propia

⁹ Superintendencia Nacional de Aduanas

Por otro lado, la foto **F7.3.4** muestra la cimentación y la *erosión* de **1.70m** producida en una edificación de vivienda de concreto armado ubicada en suelo arenoso a menos de 100m del litoral, en donde la altura de inundación llegó a los 3.00 m y la velocidad de flujo fue en promedio de 9m/s. Según el cuadro **C7.3.1** la profundidad de erosión estimada debía ser de 50% de 3m, es decir, **1.50m** y según la **F7.3.2** la profundidad de erosión es de aproximadamente **2.10m**.



F7.3.4 Profundidad de Erosión. Indonesia (2004).
Fuente: Dr. Anat Ruangrassamee

Un segundo ejemplo es la **F7.3.5** (Yeh, 2007) en las mismas condiciones de suelo y distancia que la **F7.3.4**, y en una zona dónde se registro 4.1m de runup, 0.95m de altura de inundación sobre el nivel de piso y **1.20m** de *erosión* medida en campo.



F7.3.5 Erosión. Tsunami Indonesia 2004. **Fuente:** (Yeh, 2007)

Entonces, según **C7.3.1** la profundidad de erosión es del 50% de 0.95m, es decir, un poco menos de **0.50m**; luego calculamos la velocidad según (FEMA, 2008).

$$\mu_{\max} = \sqrt{2gR \left(1 - \frac{z}{R}\right)} \quad ; \quad h_{\max} = R - z$$

Donde:

- g** Aceleración de la gravedad (m/s²)
- h_{max}** Altura máxima de inundación (m)
- z** Cota topográfica en la base de la estructura (m)
- μ_{max}** Velocidad máxima del flujo (m/s)
- R** Run-up de Diseño

Por lo tanto, la velocidad máxima es aproximadamente 4.5m/s y de acuerdo con **F7.3.2**, la profundidad de erosión sería de **0.50m**

Imagen	Erosión	Dames & Moore (1980)	FEMA (2005)
F7.3.4	1.70m	1.50m	2.10m
F7.3.5	1.20m	0.50m	0.50m

C7.3.2 Niveles de erosión calculados Fuente: (FEMA, 2005)

Los resultados (C7.3.2) muestran la incertidumbre en el cálculo de este parámetro. Mayores investigaciones se requieren en este campo específico.

Aún así, el método difundido por FEMA se basa principalmente en observaciones post-evento, lo cual probablemente no refleje el nivel de erosión máximo ya que las olas de tsunami poseen periodos de longitud largos y procesos en dos direcciones (flujo y refluo) creando condiciones de erosión y sedimentación.

CONCLUSIONES

La tesis de investigación cumple los objetivos trazados, identificando las características de estructuras que resistieron a tsunamis, según las evaluaciones de imágenes, artículos, publicaciones y entrevistas con expertos que registraron los sucesos de tsunamis ocurridos el 23 de Junio del 2001 en Camaná, Perú; el 26 de Diciembre del 2004 en Sumatra, Indonesia y el 15 de Agosto del 2007 en Pisco, Perú.

Así mismo, se brinda respuesta a las interrogantes planteadas y los objetivos específicos del Capítulo I, en relación a las cuales se puede concluir:

1.- Revisar los avances en la gestión del riesgo por tsunami en el Perú en lo que respecta a resistencia de estructuras en costa.

El interés por la gestión del riesgo de tsunami en el Perú es un tema que en los últimos 5 años ha crecido considerablemente, desde el tsunami en el Océano Índico y los trabajos realizados en el Gobierno Regional del Callao y el Programa Tsunami Ready, hasta los satisfactorios resultados brindados por el INDECI a través del Programa de Ciudades Sostenibles – Primera Etapa. Sin embargo, se aprecia que estos esfuerzos aun no terminan por ser integrados efectivamente a los instrumentos de gestión local y al control y orientación de la población para evitar estos riesgos.

2.- Recopilar imágenes de estructuras afectadas por los tsunamis de Camaná, Sumatra y Pisco.

(Ver Capítulo IV)

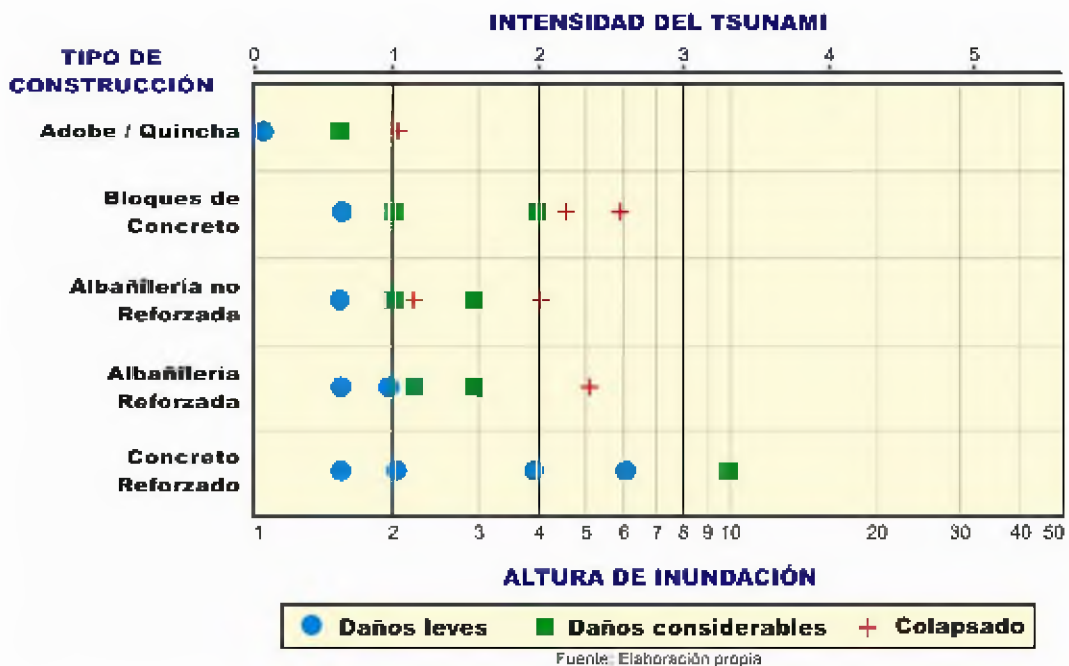
3.- Identificar el efecto de las olas de tsunami sobre las estructuras en costa

4. Investigar las características de edificaciones resistentes a tsunami

El Cuadro C4.4.1 resume los efectos identificados en las estructuras producto de los tsunamis, además las características de las edificaciones tsunami-resistentes se han categorizado bajo 3 aspectos: Planeamiento Urbano, Arquitectura e Ingeniería y desarrollado en los Capítulos V, VI y VII.

5.- Establecer el tipo de material de construcción que resistió mejor al impacto de tsunamis

A través de la evaluaciones de las imágenes, videos e inspecciones de campo y basado en la metodología aplicada por el Dr. Shuto (1994) luego de sus observaciones del tsunami de Okushiri de 1993 en estructuras japonesas; el autor ha elaborado la figura F4.4.2 sobre daños observados por tsunami según tipo de construcción, para el Perú y las tipologías de construcción más comunes en nuestra zona.



Se concluye pues, que las estructuras de concreto armado presentan un comportamiento favorable frente a las solicitaciones del tsunami y lograrían mejorar al considerarse específicamente las fuerzas inducidas en el diseño estructural.

6.- Investigar los criterios a tomarse en el planeamiento, arquitectura y diseño estructural de estructuras tsunami-resistentes.

De los capítulos V, VI y VII se concluye que el buen comportamiento de una estructura frente a un tsunami se basa en los siguientes criterios:

CRITERIOS PARA EL PLANEAMIENTO URBANO DE ESTRUCTURAS TSUNAMI-RESISTENTES

- Ubicación con respecto a otras edificaciones
- Presencia de vegetación y *colchones verdes* como protección
- Estructuras construidas sobre el nivel de inundación
- Distribución de usos con respecto a la distancia al litoral (usos recreativos cerca al mar y usos urbanos fuera de la zona inundable, con el *colchón verde* frente a estas zonas. (Ver F5.1.2)

CRITERIOS PARA EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

- Espacios libres y aberturas al flujo en niveles inferiores
- Orientación de elementos estructurales paralelos al flujo e impacto proyectado de olas.
- Posibilidad de orientación de elementos no estructurales (no integrados al sistema estructural) perpendicular al flujo.

CRITERIOS PARA LA INGENIERÍA DEL PROYECTO

- Diseño de elementos estructurales y no estructurales
- Consideración de los niveles de erosión en cimentaciones
- Calidad de los materiales y procesos de construcción

Conclusiones adicionales:

1. La sismorresistencia es una característica que esta investigación ya considera contemplada según la Norma E.030 en nuestro país y a pesar que mencionan la consideración al riesgo de tsunami, no especifican las exigencias de tal riesgo.
2. Se observó en las imágenes que las estructuras de concreto armado con mejor comportamiento eran de uso turístico, llamese hoteles o restaurantes y también destacaron las mezquitas
3. En el diseño tsunami-resistente se deben contemplar las siguientes fuerzas inducidas por el fenómeno:
 - **Fuerzas hidrostáticas**, causadas por el sumergimiento parcial o total de las estructuras;
 - **Fuerzas de Empuje o boyantes**, causados por el parcial o total sumergimiento;
 - **Fuerzas hidrodinámicas**, causadas por la velocidad del flujo;
 - **Fuerzas de impulso**, causadas por la llegada del flujo;
 - **Fuerzas del impacto** de escombros;
 - **Fuerzas de embalse**, producto de la acumulación de escombros;
 - **Fuerzas verticales**, producto de la fluctuación de la marea;
 - **Sobrecarga** por acumulación de agua en los primeros niveles.
 - **Erosión**, producto del flujo y reflujo
4. La implementación de la mitigación de los efectos del tsunami en el diseño de edificaciones y construcción de las mismas está relacionada al fortalecimiento de los códigos y normas de edificación nacional y las exigencias municipales, entendiéndose que toda norma es aplicada a nuevas edificaciones y sirve como herramienta para la corrección de antiguas edificaciones. Por ello se propone el Anexo A: Propuesta a la Norma E.030.

RECOMENDACIONES

1. Las autoridades responsables de la defensa civil en localidades expuesta a tsunami, deben identificar las áreas en riesgo y las edificaciones vulnerables a tsunami de acuerdo a los criterios explicados en la investigación y promover su reubicación, reforzamiento o cambio de uso.
2. Se recomienda que los criterios vertidos en esta investigación sean llevados a la aplicación en los procesos de planificación del territorio en las diferentes regiones costeras del Perú, así mismo, sean difundidos entre los profesionales de la arquitectura y la ingeniería que contribuyen con sus labores al crecimiento de las ciudades, a fin de que sus aportes posean una visión de Desarrollo Sostenible.
3. Considerar el Anexo A: Propuesta a la Norma E.030 como una primera herramienta indispensable en el proceso del diseño y que debe ser implementada pero a la vez continuamente mejorada para evitar el sobredimensionamiento o la omisión de estos factores.
4. Actualizar las Cartas de Inundación proporcionadas por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú, a través de simulaciones numéricas y establecer zonas inundables, alturas y velocidades para escenarios de alto riesgo en la costa peruana, proporcionando a los ingenieros el Tsunami de Diseño (TD) con los parámetros adecuados a cada zona.

5. Se recomienda orientar las próximas investigaciones en lo que corresponde al modelamiento numérico de tsunamis para la determinación de parámetros para el diseño en costa y a la erosión por tsunami a fin de buscar nuevos métodos de cálculos que integren las condiciones del flujo, características del suelo y requerimientos estructurales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Angel Luque, R. E. (1998). *Evaluación de la resistencia transversal de muros de relleno de mampostería en edificios*. Brasil: Congreso Latino Americano.
2. BAPPENAS. (2005). *Indonesia: Preliminary Damage and Loss Assessment. The December 26, 2004 Natural Disaster*. Indonesia: Bappenas.
3. Barrientos, S. E. (2007). *Informe sobre las alturas de "Run-up" alcanzadas por el tsunami asociado al sismo Mw=8.0 del 15 de Agosto de 2007 en la zona de Pisco, Perú*. Lima, Perú: Dirección de Sismología - CNDG/IGP.
4. Budiarto, A. (2006). *Evacuation Shelter Building Planning for Tsunami-prone Area; a Case Study of Melauboh City, Indonesia*. Meulaoh: Indonesia.
5. Cárdenas García, C. A. (1997). *Estudio de las Causas y Efectos del Tsunami del 21 de Febrero de 1996 en la costa norte del Perú*. Lima, Perú: Tesis FIC/UNI.
6. Dalrymple, R. A., & Kriebel, D. L. (2005). *Lessons in Engineering from the Tsunami in Thailand*. USA: National Academy of Engineering. Vol. 35, N°2.
7. Department of Planning and Permitting, H. H. (2000). *City and County of Honolulu Building Code Section 16, Article 11*. Honolulu.
8. DHN. (2007). *Informe Post Tsunami*. Lima, Perú: Ministerio de Defensa, Marina de Guerra del Perú - Dirección de Hidrografía y Navegación.
9. FEMA. (2005). *Coastal Construction Manual*. USA: FEMA 55.
10. FEMA. (2006). *Tsunami Inundation Scour of Roadways, Bridges and Foundations*. USA: EERI/FEMA.
11. FEMA. (2008). *Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis*. USA: FEMA P646.

12. Grundy, P., Thurai raja, A., & Walker, G. (2006). *Some reflections on the structural engineering aspects of tsunami damage*. Australia.
13. Hiraishi, T. (2007). *Greenbelt Tsunami Mitigation tool*. Japón.
14. Iizuka, H., & Matsutomi, H. (2000). *Estimation of damage due to tsunami*. Japón.
15. INDECI, I. N. (2008). *Programa de Ciudades Sostenibles - Primera Etapa*. Perú: INDECI.
16. Kuroiwa Horiuchi, J. (2002). *Reducción de Desastres. Viviendo en Armonía con la Naturaleza*. Lima, Perú: Quebecor World Perú.
17. Kuroiwa Horiuchi, J. (1983). *Tsunamis, efectos sobre las costas de Lima metropolitana*. Lima, Perú.
18. Kuroiwa Horiuchi, J., & Mas Samané z, E. (2007). *Evaluación del Tsunami de Lagunillas asociado con el Terremoto de Pisco del 15 de Agosto del 2007*. Lima, Perú.
19. Mas Samané z, E. A., & Jácome Fernández, V. L. (2008). *Estudio de Tsunamis de Origen Cercano en el Callao Centro-Norte, Planes de Evacuación y Uso de Suelo*. Lima, Perú: Tesis FIC/UNI.
20. Minaya Lizarraga, A. (2001). *Evaluación del terremoto del Sur del Perú del 23 de Junio del 2001*. Arequipa, Perú: Universidad Nacional de San Agustín.
21. Mizutani, S., & Imamura, F. (2005). *Dynamic wave force of tsunamis acting on structure*. Japón: Universidad de Tohoku.
22. NSF. (1982). *Land Management Guidelines in Tsunami Hazard Zones*. Virginia, EU: National Science Foundation.
23. NTHMP, N. T. (2001). *Designing for Tsunamis. Seven Principles for Planning and Designing for Tsunami Hazards*. USA: NTHMP.
24. O'Connor Salmón, H. (2008). *Planeamiento Urbano para la Prevención de Desastres Naturales en el Perú. Un Asunto Territorial*. Lima: Revista URBANO.
25. Okada, T., Sugano, T., Ishikawa, T., Takai, S., & Tateno, T. (2006). *Tsunami loads and structural design of tsunami refuge buildings*. Japón.
26. Reglamento Nacional de Edificaciones - RNE. (2006). Perú: Ministerio de Vivienda.

27. Ruangrassamee, A. (2006). *Effect of Tsunamis on Structures*. Tailandia: Universidad de Chulalongkorn.
28. San Bartolomé, A. (2007). *Defectos que incidieron en el comportamiento de las construcciones de albañilería en el sismo de Pisco del 15-08-2007*. Lima, Perú: PUCP.
29. Shuto, N. (2005). *Tsunamis, disasters and countermeasures*. Japón.
30. Tavera, H., & Carpio, J. (2002). *Estructura de un Catálogo de Tsunamis para el Perú basado en el catálogo de Gusiakov, 2002*. Lima, Perú: Boletín de la Sociedad Geológica del Perú N° 94.
31. UNESCO. (2006). *Tsunami Teacher - Resource kit*. UNESCO.
32. Woodman Pollit, R. (2007). *Observaciones del Tsunami asociado con el terremoto de Pisco del 15 de Agosto del 2007*. Lima, Perú: IGP.
33. Yauri, S., Tavera, H., Moncca, G., & Herrera, B. (2007). *Características Generales del Tsunami del 15 de Agosto de 2007*. Lima, Perú: Dirección de Sismología, CNDG-IGP.
34. Yeh, H., Robertson, I., & Preuss, J. (2005). *Development of design guidelines for structures that serve as Tsunami Vertical Evacuation Sites*. Washiington, EU: State Department of Natural Resource.
35. Yeh, H. (2007). *Design Tsunami Forces for Onshore Structures*. USA: Journal of Disaster Research.
36. Yeh, H. (2007). *On Tsunami Scour*. USA.

LISTADO DE FIGURAS

F1.5.1 Esquema del Diseño de la Investigación

F2.3.1 Densidad del mar. Multiplicar los valores por 1000 y sumar 1000 para obtener en unidades de kg/m^3

F3.2.1 Localidades estudiadas PCS-1E; Ejemplo de Mapa de Peligro por

F4.1.1 Tsunami 23.06.2001 – Camaná, Arequipa

F4.1.2 Vivienda en La Punta, Camaná – Impacto directo en tabiquería

F4.1.3 Vivienda en Los Cerrillos, Camaná – Bloques de cemento, baja resistencia de los materiales

F4.1.4 Socavación en suelo arenoso. Obsérvese la profundidad de cimentación

F4.1.5 Viviendas de un nivel de bloques de cemento en Los Cerrillos, Camaná

F4.1.6 Muros frontales derribados por el impacto de olas. Sin embargo, viviendas en la parte posterior no presentan mayores daños. Los Cerrillos, Camaná

F4.1.7 Viviendas de quincha y muros de bloque de concreto, Los Cerrillos, Camaná. Obsérvese el muro frontal en pie y las marcas del nivel de inundación

F4.1.8 Ingreso del tsunami hasta la carretera, sin embargo una vivienda protegida detrás de otra no presenta mayores daños.

F4.1.9 Licuación de suelos y deficiencias constructivas. Obsérvese la vivienda de la derecha que no presenta daños en la fachada pero si la marca de agua al nivel inferior de las ventanas. La Punta, Camaná.

F4.1.10 Efectos de erosión por regresión de olas. Obsérvese las viviendas de la imagen anterior.

F4.1.11 Dirección de las olas. Se observa que la primera vivienda de la derecha recibe el impacto directo y protege a las viviendas posteriores.

Foto: <http://www.geocities.com/caniraus/tsunami.htm>

F4.1.12 Vivienda con muros de albañilería arrasados, sin embargo la estructura de concreto armado permanece en pie sin mayores daños estructurales. Playa El Chorro. Camaná

F4.1.13 Efectos de la erosión regresiva del tsunami. La Punta, Camaná

F4.1.14 Impacto de olas en viviendas.

La estructura marcada presenta menor nivel de daño.

Foto: <http://walrus.wr.usgs.gov/peru2/damage.html>

F4.2.1 Mapa de zonas afectadas por el Tsunami del 26 de Diciembre del 2004 en Indonesia y alrededores. Fuente: UNOSAT

F4.2.2 Kaholak Laguna Resort. Kaho Lak, Phang Nga. Hotel de concreto reforzado. Posee columnas de 30x30cm sin presencia de daños, sin embargo se observa la erosión en la base. Run-up 5.6m.

Fuente: Anat Ruangrassamee. Universidad de Chulalongkorn. Tailandia

F4.2.3 y F4.2.4 Se observan la cimentación con pilares en una parte del hotel de concreto reforzado ubicado en la isla de Kor Khao en Phang Nga. Run-up 2.0m

Fuente: Universidad Sripatum. Tailandia

F4.2.5 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en las islas Phi Phi, Krabi. Obsérvese el recorrido directo del tsunami hacia las edificaciones posteriores atravesando el primer nivel por los espacios libres sin generar mayor daño a la parte estructural. Run-up 10.0m

Fuente: Universidad Prince of Songkla

F4.2.6 Escombros de una vivienda de concreto reforzado, con elementos estructurales que no consideraron las cargas por tsunami, ubicado a 170m de la playa en King Amphoe Suk-Samran, Ranong. Run-up 3.0m

Fuente: Universidad Mahidol

F4.2.7 El Centro de Investigación de Recursos Naturales en King Amphoe. Suk-Samran, Ranong. Tailandia. Ubicado a 170m del litoral. A pesar de los daños en el tejado, la estructura permanece sin daño considerable en elementos principales. Obsérvese su ubicación unos centímetros sobre el nivel de suelo. Run-up 3.0m

Fuente: Universidad Mahidol

F4.2.8 A 50m del litoral, conjunto de viviendas de estructuración mixta (columnas y vigas con muros de albañilería). Se aprecia el nivel de erosión y la efectividad de la losa de cimentación y la distribución de módulos de vivienda.

Run-up 3.0m

Fuente: Universidad Mahidol

F4.2.9 Vivienda en Ban-Nam-Kem, Phang Nga. Tailandia. Se aprecia la estructura sin daños y los espacios libres en el primer nivel que permiten el paso de las aguas a través del predio.

Fuente: Universidad Kasetsart

F4.2.10 Hotel sin daño considerable y ubicado a pocos metros de la playa

Fuente: Universidad Mahidol

F4.2.11 Melauboh, Sumatra, edificación a pocos metros con corredores y espacios abiertos que permiten el paso de las aguas con mayor facilidad.

Fuente: Evacuation Shelter Building Planning for Tsunami-prone Area. Amin Budiarjo. 2006

F4.2.12 Banda Aceh, Indonesia. Mezquita antes y después del impacto del tsunami. Obsérvese la orientación de los espacios abiertos con respecto al océano y la dirección de olas.

Fuente: Artículo BBC Mundo

F4.2.13

(Izq.) Mezquita. La única edificación en esta zona sin daños estructurales de consideración luego del tsunami.

Fuente: Buscador Google.com

(Der.) Mezquita en Uleele, Banda Aceh. Inundación de 10m, justo debajo del techo.

Fuente: Foto J. Barrero (FEMA, 2008)

F4.2.14 Yala Safari Resort arrasado por el tsunami. A pesar de que el piso y la cimentación resistieron la fuerza de erosión, la estructura superior no era la adecuada. Obsérvese en la columna el poco acero de refuerzo.

Fuente: USGS

F4.2.15 Distrito de Kalmunai en la provincia Este de Sri Lanka. Vivienda de material de ladrillo de baja calidad con graves daños, excepto el lado con espacios abiertos que permitieron reducir la presión ejercida sobre el muro.

Fuente: USGS & Universidad Cornell. Phillip Liu.

F4.2.16

(Izq.) Phuket, erosión en arena. Se aprecian los daños a las uniones y la necesidad de mayor profundidad de cimentación

Fuente: Anat Ruangrassamee. Universidad de Chulalongkorn

(Der.) Khao Lak, Erosión en cimentación superficial. La máxima profundidad de erosión fue de 3m en esta zona.

Fuente: Foto Dalrymple & Kriebel. (FEMA, 2008)

F4.2.17 Luego de la erosión la cimentación se vuelve inestable.

Fuente: Anat Ruangrassamee. Universidad de Chulalongkorn

F4.2.18 En algunos casos los muros están anclados a las columnas. Elementos secundarios fijos a los principales generan esfuerzos mayores en columnas.

Fuente: Anat Ruangrassamee. Universidad de Chulalongkorn

F4.2.19 Si la altura de inundación proyectada alcanza a cubrir los primeros niveles, las vigas que se oponen al flujo merecen refuerzo en su dirección transversal. Nótese los daños a vigas.

Fuente: Anat Ruangrassamee. Universidad de Chulalongkorn

F4.2.20 Vivienda parcialmente dañada localizada a 0.9km de la costa en Banda Aceh. Las alturas son respecto al nivel medio del mar.

Fuente: Reporte Tsunami Asia FEMA. Pág. 24

F4.2.21 Estructura de concreto armado ubicada en Paiyagala a 48km al norte de Kahawa con niveles de inundación de 4.2m en tierra. Se aprecia los daños a puertas y ventanas y la resistencia de elementos de concreto.

Fuente: Reporte Tsunami Asia FEMA. Pág. 42

F4.2.22 Khao Lak, Phangaa. Tailandia. Estructura de concreto armado a menos de 100m del litoral con daños a elementos secundarios y a cimentaciones. Nótese las columnas en buenas condiciones y la profundidad de cimentación que en estas condiciones compromete la estabilidad de la estructura. Runup: 12m

Fuente: Buscador Google. Superior Derecha: Francis – FEMA 2006

F4.3.1 Epicentro del Terremoto de Pisco y sus alrededores. Ica, Pisco, Chíncha y Cañete fueron las ciudades más afectadas.

F4.3.2 Balneario de San Andrés. Pisco-Perú

F4.3.3 Porcentaje de Tipo de Material de Pared. Viviendas Pisco. Fuente: INEI, 2005

F4.3.4 Porcentaje de Tipo de Material de Techo. Viviendas Pisco. Fuente: INEI, 2005

F4.3.5 Porcentaje de Tipo de Material de Piso. Viviendas Pisco. Fuente: INEI, 2005

F4.3.6. Restaurante en Lagunillas de albañilería confinada y techo de caña guayaquil. La tabiquería es derribada por la ola y con la pérdida del muro la consecuente caída del techo.

F4.3.7. El poste muestra el esfuerzo realizado producto del arrastre del tsunami, el cual también puede observarse en la inclinación de las palmeras.

F4.3.8. El ordenamiento en el colapso del muro de bloques de concreto es producto de las fuerzas hidrodinámicas que actúan perpendicularmente al plano del muro.

F4.3.9. La forma triangular de la columna contribuye al flujo libre alrededor del elemento, sin embargo se requiere mayor refuerzo en la base para evitar el volteo.

F4.3.10. El restaurante en Lagunillas se encuentra frente a una bahía y de espalda al mar (ver Anexo B). En las fotos se muestra la dirección de ataque de las primeras olas que destruyen el lado derecho (a) y la parte posterior del restaurante (b), sin embargo, el frente (c) y (d) poseen los muros al extremo sin daño. El flujo liberó la presión sobre los muros pasando por los laterales y el frente-centro del restaurante.

F4.3.11. Impacto de elementos y escombros en viviendas.

F4.4.1 Daños observados por tsunami según tipo de construcción. (Shuto, 2005)

F4.4.2 Daños observados por tsunami según tipo de construcción. (Elaboración propia)

F5.1.1 Distribución del uso interno en comercio industrial. (Kuroiwa Horiuchi, 2002)

F5.1.2 Elaboración propia, basado en ideas vertidas por el Dr. Budi Faisal del Departamento de Arquitectura de Tecnología de Bandung. (Budiarjo, 2006)

F6.1.1; F6.1.2 Edificio Grau de la Escuela Naval en La Punta - Callao. Posee las características en forma, orientación, arquitectura y estructuración que lo posibilitan como una edificación tsunami resistente.

Fuente: Elaboración propia

F6.1.3 Planta del Edificio Grau – Escuela Naval MGP. La Punta – Callao.

F6.1.4 Accesos al Edificio Grau. Vista interior: Accesos N°2, N°3 y N°5. Vista Exterior: Acceso N°4.

F6.1.5 Escaleras interiores. Ancho: 1.20m. Descanso a mitad de tramos y barandas.

F6.1.6 Recorrido de Evacuación en Edificio Grau.

F6.1.7 Azotea de Edificio Grau.

F7.1.1 Grafico de la Fuerza hidrostática inducida por tsunami

F7.1.2 Adaptado de FEMA P646. (FEMA, 2008)

F7.1.3 Adaptado de FEMA P646 (FEMA, 2008)

F7.1.4 Adaptado de FEMA P646 (FEMA, 2008)

F7.2.1 Esquema de fuerzas inducidas por tsunami (1-3). Elaboración propia

F7.2.2 Esquema de fuerzas inducidas por tsunami (4-6). Elaboración propia

F7.2.3 Esquema de fuerzas inducidas por tsunami (7-9). Elaboración propia

F7.3.1 Diagrama de Hjulstrom. Velocidades de erosión según tipo de SUELO. Fuente: (FEMA, 2006)

F7.3.2 Velocidad vs profundidad de erosión. Fuente: (FEMA, 2005)

F7.3.3 Edificio Sunad. Chucuito – Callao, Perú. Consideró en la década del 70 la erosión por tsunami en su diseño. Fuente: Elaboración propia

F7.3.4 Profundidad de Erosión. Indonesia (2004). Fuente: Dr. Anat Ruangrassamee

F7.3.5 Erosión. Tsunami Indonesia 2004. Fuente: (Yeh, 2007)

LISTADO DE CUADROS

C4.3.1 Tipo de Material de Pared. Viviendas PISCO. Fuente: INEI, 2005

C4.3.2 Tipo de Material de Techo. Viviendas PISCO. Fuente: INEI, 2005

C4.3.3 Tipo de Material de Piso. Viviendas PISCO. Fuente: INEI, 2005

C4.4.1. Cuadro resumen de observaciones a las imágenes de los tsunamis de Camaná, Indonesia y Pisco.

C4.4.2 Estimación de daños por tsunami. (Iizuka & Matsutomi, 2000)

C7.3.1 Profundidad de erosión estimada

C7.3.2 Niveles de erosión calculados Fuente: (FEMA, 2005)

ANEXO A
PROPUESTA A LA
NORMA SISMORRESISTENTE E030

PROPUESTA DE ANEXO A LA NORMA SISMORRESISTENTE E030 DISEÑO TSUNAMI RESISTENTE

CAPITULO I GENERALIDADES

ARTÍCULO 1: NOMENCLATURA

Para efectos de la presente norma, se consideran las siguientes nomenclaturas:

Fs	Fuerza de Impulso por oleaje (surge) (N)
Fd	Fuerza hidrodinámica o de arrastre (drag) (N)
Fi	Fuerza de impacto de escombros (N)
Fdm	Fuerza de embalse (dam) (N)
Fb	Fuerza de Empuje o boyante (N)
Fh	Fuerza hidrostática (N)
Fu	Fuerza Vertical (N)
ρ_s	Densidad del agua de mar con sedimento (kg/m ³)
g	Aceleración de la gravedad (m/s ²)
b	Ancho de sección (m)
h	Altura de inundación (m)
hw	altura del componente (m)
hmax	Altura máxima de inundación o valor del run-up estimado de diseño menos la cota en la base de la estructura (m)
z	Cota topográfica en la base de la estructura (m)
Af	Área de la losa de piso (m ²)
Bd	Ancho del aglomerado de objetos embalsados (m)
Cu	Coefficiente de fuerzas verticales (se asume 3.0)
Cd	Coefficiente de arrastre (se asume 2.0)
Cm	Coefficiente de masa (igual a 2.0)
μ_v	Velocidad del flujo (m/s) cuando la altura de inundación está al nivel de la losa

μ	Velocidad del flujo (m/s)
μ_{max}	Velocidad máxima del flujo (m/s)
k	Rigidez del objeto que impacta (N/m)
m	Masa del objeto que impacta (kg)
D	Dirección de olas de Tsunami con respecto al litoral
H	Altura de Ola en costa
R	Run-up de Diseño

ARTÍCULO 2: ALCANCES

Este anexo está en concordancia con el Art. 2 de la Norma E030 que establece que se *deberá tomar medidas de prevención contra los desastres que puedan producirse como consecuencia del movimiento sísmico*, siendo el caso particular el de la ocurrencia de un tsunami.

Esta Norma establece las condiciones mínimas para que las edificaciones diseñadas según la Norma E030 de Diseño Sismorresistente, cuenten además con características Tsunami-resistentes.

Se aplica el diseño a todas las edificaciones nuevas a construirse en zonas inundables por tsunami.

Para el caso de estructuras especiales tales como reservorios, tanques, silos, puentes, torres de transmisión, muelles, estructuras hidráulicas, plantas nucleares y todas aquellas cuyo comportamiento difiera del de las edificaciones, se requieren consideraciones adicionales que complementen las exigencias aplicables de la presente Norma.

ARTICULO 3: FILOSOFÍA Y PRINCIPIOS DEL DISEÑO TSUNAMIRESISTENTE

Son aplicables la misma filosofía y principios expuestos en la Norma E030 de Diseño Sismorresistente en lo que respecta al comportamiento de la estructura frente al tsunami.

CAPÍTULO II PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO

ARTÍCULO 4: MICROZONIFICACIÓN

De acuerdo al artículo 6.1a de la Norma E030, los estudios de Microzonificación Sísmica deben considerar los efectos del sismo y fenómenos asociados y suministrar la información necesaria para el diseño sismorresistente, así como las limitaciones y consideraciones adicionales frente a otros fenómenos locales.

En el caso del riesgo por tsunamis estos estudios deben proporcionar la siguiente información:

- Dirección de olas de Tsunami con respecto al litoral (D)
- Altura de Ola en costa (H)
- Run-up de Diseño (R)

ARTICULO 5: MÉTODOS ESPECÍFICOS

Para la determinación de los parámetros que van a intervenir en el cálculo de las fuerzas inducidas por tsunamis, es necesario utilizar métodos específicos de cálculo numérico, como el modelamiento o simulación numérica.

Modelos como el TUNAMI-N (Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Near-field Tsunamis) o el MOST (Method Of Splitting Tsunami) permiten encontrar principalmente los parámetros de velocidades de flujo y altura de inundación.

Cuando no se cuente con modelos de simulación numérica, la máxima velocidad de flujo, la altura máxima y el momento o impulso de flujo (hu)² pueden estimarse según (FEMA, 2008)

$$\mu_{mas} = \sqrt{2gR \left(1 - \frac{z}{R}\right)} \quad ; \quad h_{max} = R - z$$

$$(h\mu^2)_{\max} = gR^2 \left(0.125 - 0.235 \frac{z}{R} + 0.11 \left(\frac{z}{R} \right)^2 \right)$$

CAPITULO III REQUISITOS GENERALES

ARTICULO 6: ASPECTOS GENERALES

- Las edificaciones diseñadas deben ser capaces de resistir a las fuerzas descritas en el Artículo 8 de esta norma.
- El factor de seguridad al momento de volteo debe ser mayor o igual a 1.5
- El factor de seguridad por resistencia al flote es de 1.33

ARTICULO 7: CONCEPCIÓN TSUNAMI RESISTENTE

El comportamiento tsunami-resistente de las edificaciones mejora cuando se observan las siguientes condiciones:

- Ubicación de la estructura detrás de otra más resistente
- Presencia de vegetación como protección frente a la estructura
- Estructura construida sobre el nivel de inundación
- Espacios libres y aberturas al flujo en niveles inferiores
- Orientación de elementos estructurales paralelos al flujo e impacto proyectado de olas.
- Posibilidad de orientación de elementos no estructurales (no integrados al sistema estructural) perpendicular al flujo.
- Rigidez y resistencia en los elementos estructurales de los primeros niveles.
- Consideración de los niveles de erosión y potencial de licuación
- Calidad de los materiales y procesos de construcción

CAPITULO IV ANÁLISIS DE EDIFICACIONES

ARTICULO 8: FUERZAS POR TSUNAMI

Los daños a las estructuras producto de los tsunamis se pueden atribuir a fuerzas identificadas como:

1. Fuerzas hidrostáticas, causadas por el sumergimiento parcial o total de las estructuras;
2. Fuerzas de Empuje o *boyantes*, causados por el parcial o total sumergimiento;
3. Fuerzas hidrodinámicas, causadas por la velocidad del flujo;
4. Fuerzas de impulso, causadas por la llegada del flujo;
5. Fuerzas del impacto de escombros;
6. Fuerzas de embalse, producto de la acumulación de escombros;
7. Fuerzas verticales, producto de la fluctuación de la marea;
8. Sobrecarga por acumulación de agua en los primeros niveles.

8.1 FUERZAS HIDROSTÁTICAS

$$F_h = \frac{1}{2} \rho_s g b h_w \left(h_{\max} - \frac{h_w}{2} \right)$$

La fuerza resultante actuara horizontalmente a una distancia desde la base del elemento igual a:

$$\frac{h_w (3h_{\max} - 2h_w)}{3 (2h_{\max} - h_w)}$$

8.2 FUERZAS DE EMPUJE O BOYANTES

Esta fuerza debe ser contrarrestada con el peso de los componentes u otras fuerzas resistentes a la flotación.

$$F_b = \rho_s g V$$

8.3 FUERZAS HIDRODINÁMICAS

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_s B (h \mu^2)_{\max}$$

La resultante de las fuerzas hidrodinámicas actúa a la mitad de la altura inundada del elemento. (h_{\max}).

8.4 FUERZAS DE IMPULSO

Producto de los primeros impactos del oleaje de tsunami en la estructura.

$$F_s = 1.5 F_d$$

Las fuerzas de impulso son aplicadas en los elementos ubicados en el borde inicial de la ola, mientras que las hidrodinámicas en las posteriores inundadas por donde ya ha pasado el tsunami.

8.5 FUERZAS DE IMPACTO

Se puede estimar utilizando la siguiente ecuación:

$$F_i = C_m \mu_{\max} \sqrt{k \cdot m}$$

La línea de acción de la resultante de esta fuerza se asume como la altura de inundación h cuando $\mu = \mu_{\max}$

8.6 FUERZAS DE EMBALSE

Esta fuerza es producida por la acumulación de objetos y escombros frente a un elemento de la estructura, generando sobre este una mayor carga hidrodinámica.

Por lo tanto puede tratarse como una fuerza hidrodinámica con una ligera corrección en el ancho B de cálculo.

$$F_{dm} = \frac{1}{2} C_d \rho_s B_d (h \mu^2)_{\max}$$

Se debe evaluar sus efectos en diferentes lugares de la estructura y determinar el más crítico, actuando como una fuerza distribuida a lo largo del ancho B_d .

8.7 FUERZAS VERTICALES

Cuando la estructura se encuentra sumergida por la inundación del tsunami, esfuerzos verticales son exigidos en componentes como las losas de piso y deben ser aplicadas como fuerzas distribuidas en toda su área.

$$F_u = \frac{1}{2} C_u \rho_s A_f \mu_v^2$$

8.8 SOBRECARGA

Cuando la estructura se ha visto inundada en sus primeros niveles y se produce el receso de las aguas, la acumulación de agua en los niveles superiores produce una sobrecarga que podría exceder las cargas del diseño original.

La altura de agua retenida (h_r) dependerá de la altura de inundación máxima en la estructura (h_{max})

En el Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma E.020 Cargas – Capítulo 7 - El Artículo 26 Acumulación de agua, se hace referencia a una situación similar exclusivamente en techos en donde se debe procurar la pendiente de drenaje y menciona literalmente que *alternativamente serán diseñados para soportar adicionalmente la posible acumulación de agua debida a la deflexión, según la Tabla N°6 del Artículo 25 que también limita la flecha máxima en pisos.*

Por lo tanto, esta situación debe ser considerada frente al riesgo de tsunamis y en concordancia con el RNE.

8.9 CIMENTACIONES

Adicionalmente se debe considerar los niveles de erosión máximo esperados alrededor de la estructura. Se aplica la Tabla N°1 y el Gráfico N°1 y se toma el valor más desfavorable en cualquiera de los casos.

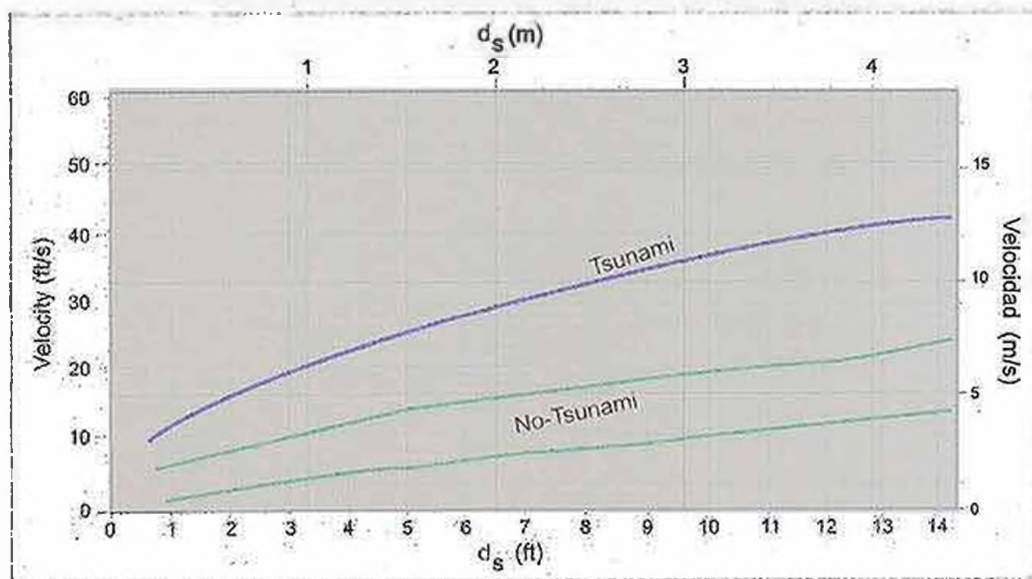
TABLA N°1

Profundidad Estimada de Erosión en cimientos, según la distancia desde el litoral

Tipo	Distancia desde el litoral	
	Hasta 100m	Mayor a 100m
Arena suelta	80% h_{max}	60% h_{max}
Arena compacta	50% h_{max}	35% h_{max}
Limo blando	50% h_{max}	25% h_{max}
Limo duro	25% h_{max}	15% h_{max}
Arcilla blanda	25% h_{max}	15% h_{max}
Arcilla dura	10% h_{max}	5% h_{max}

CUADRO N°1

Profundidad Estimada de Erosión vs Velocidad del flujo



ANEXO B
EVALUACIÓN DEL TSUNAMI DE LAGUNILLAS
ASOCIADO CON EL TERREMOTO DE PISCO DEL
15 DE AGOSTO DEL 2007

El 15 de agosto de 2007, a las **23:41 GMT (18:41 hora local)** ocurrió un fuerte sismo frente a las costas de la ciudad de Pisco, en el departamento de Ica, en Perú. El sismo tuvo una duración promedio de **2 minutos**.

Las magnitudes finales reportadas por las agencias sísmicas fueron:

7.0 magnitud Richter del Instituto Geofísico del Perú (Emitido en 1 hora y media)

8.0 magnitud momento del Servicio Geológico de EE.UU. (Emitido en 10 minutos)

La ubicación del epicentro se muestra en la **Fig. 1**. las coordenadas según el IGP son:

Latitud S : 13.67°

Longitud W : 76.76°

Profundidad : 33 km

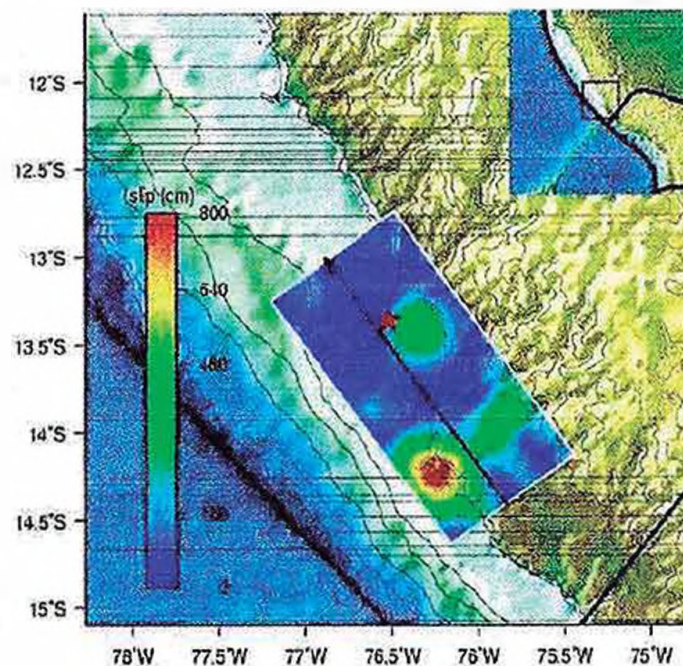


Fig. 1. Epicentro del Terremoto de Pisco y sus alrededores. Ica, Pisco, Chincha y Cañete fueron las ciudades más afectadas.



Fig. 2. Zona evaluada – Lagunillas, San Andrés

Sabemos que el evento sísmico posee las características necesarias para la formación de un tsunami, es decir, magnitudes mayores a 6.5 en la escala de Richter, profundidad del hipocentro a menos de 60km y su ubicación en el mar.

El objetivo de la visita de campo fue la de investigar los daños causados por el tsunami en las localidades mostradas en la Fig. 2 y obtener testimonios acerca de las alturas y tiempos de llegada de olas.

1. Daños por Tsunami

En la primera localidad visitada, Lagunillas, los daños causados por el tsunami fueron severos, además se pudo observar que el ingreso del mar (Fig. 3.) fue de 40m hacia el Norte (Fig. 4.) y aproximadamente 2 km hacia el Nor-oeste (Fig. 5.).

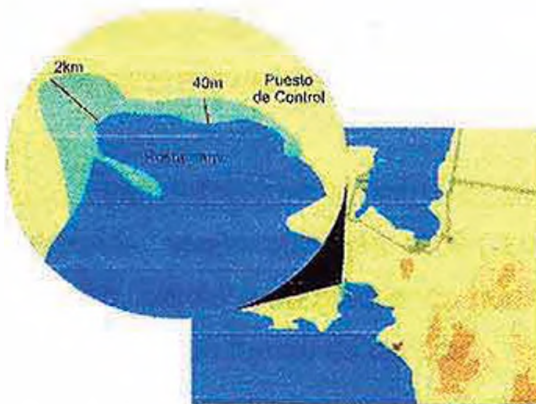


Fig. 3. Detalle de Inundación Lagunillas

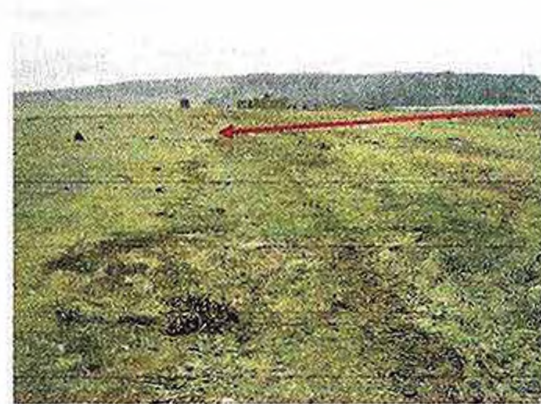


Fig. 4. Costa Norte – 40 m de inundación



Fig. 5. Costa Nor-oeste – 2 km de inundación, se pueden observar los botes y chalanas arrastradas por el tsunami.

La localidad de Lagunillas se encuentra asentada en medio de la Zona de Reserva Nacional de Paracas, en la parte sur de la Península y en terrenos que anteriormente estaban rodeados por el mar, sin embargo posee un suelo rocoso cubierto por partículas limosas que le dan tonalidad amarilla a la bahía. (Fig. 6.)

Se pueden hallar 5 viviendas, 1 restaurante y 1 atracadero artesanal de pescadores.

Entre los daños observados se tienen la destrucción del restaurante turístico, afectación grave de viviendas y pérdida de techo en el atracadero artesanal. La población generalmente es turística y flotante en horarios de mediodía a inicios de la tarde (1pm a 4pm), por lo tanto en

el momento del terremoto sólo se encontraban tanto la población residente como algunos pescadores autorizados.

Lamentablemente entre las pérdidas se tiene el fallecimiento de 3 personas, según comenta el Sr. Luis Muñante, dueño del restaurante turístico, perdió a su madre, su hermana y su sobrina, las cuales fueron vencidas por la fuerza de las olas.



Fig. 6. Se observa Lagunillas desde la orilla norte de la bahía

2. Altura y Tiempo de Llegada de Olas

La altura estimada en esta zona es de aproximadamente **5m** de altura, de acuerdo a los testimonios y a lo observado en campo.

El Sr. Luis nos cuenta que la primera ola llegó a los **10** minutos luego del movimiento sísmico, sin embargo esta intrusión marina sólo inundó

hasta la altura de sus rodillas, por lo cual, y debido a la falta de conocimiento del fenómeno, los dueños del restaurante intentaron evacuar el agua de mar de su local utilizando baldes.

Lamentablemente los residentes pensaron que no sucedería más que una ola, sin embargo, el ataque de la segunda ola no solo se dio por el sur-oeste del restaurante sino también por el nor-este, rodeando a los residentes y haciendo su entrada con tal fuerza y altura que sobrepasó el techo del atracadero artesanal.

Las 4 principales olas destructivas ocurrieron en un lapso de 30 minutos, destruyendo por completo el restaurante turístico, el techo del atracadero y 2 viviendas aledañas, afectando a la vez a las 3 viviendas restantes. (Fig. 6. y Fig. 7.)



Fig. 6. Atracadero artesanal 5m de altura



Fig. 7. restaurante turístico daños por tsunami



Fig. 8. Atracadero artesanal 5m de altura. Techo arrasado por la ola.



Fig. 9. Atracadero artesanal. El desplazamiento de la viga muestra el impacto de ola a dicha altura.

3. Breve visita a la ciudad de San Andrés

Posteriormente a la evaluación en la zona de Lagunillas, se evaluó las características con que se presentó el tsunami en la zona de San Andrés (Fig. 2.).

Por los testimonios y las imágenes a presentarse se estima para San Andrés alturas de olas de máximo **2.50m** (Fig. 10.) y dentro de las viviendas frente al balneario se obtuvieron alturas de inundación de hasta **1.70m** (Fig. 11.) e intrusión marina de hasta **200m** para botes que son arrastrados a través de las calles perpendiculares al litoral.



Fig. 10. Se observa la altura de inundación en balneario San Andrés.



Fig. 11. Se observa la altura de inundación en una vivienda del balneario San Andrés.

Se observaron daños a la infraestructura del balneario, es decir, veredas, autopista, miradores a base de caña guayaquil, postes, entre otros.



Fig. 12. Rotura de seguro superior de la puerta debido a la fuerza de empuje de las olas. (Izq). Arrastre y socavación de veredas del malecón. (Der).

Se observó la presencia de vegetación que brindó mayor fricción a las olas.



Fig. 13. filas de Palmeras – protección natural contra tsunamis

Se puede apreciar en la Fig. 13. las filas de palmeras que han resistido el intento de arranque y arrastre de las olas.

La fila de la derecha, la cual esta más cercana al mar, posee indicios de que las olas recorrieron esa zona.

La segunda fila, la de la izquierda, pertenece a las palmeras que no se encuentran ladeadas y sin embargo a través de ellas recorrió el tsunami.

Estructuras más dúctiles a base de quincha o maderos de guayaquil resistieron al tsunami y a la erosión debido a su configuración que permite el paso de las olas y a la forma de sus columnas y cimientos que no

permite la formación de grandes fuerzas de erosión en las bases. (Fig. 14.).

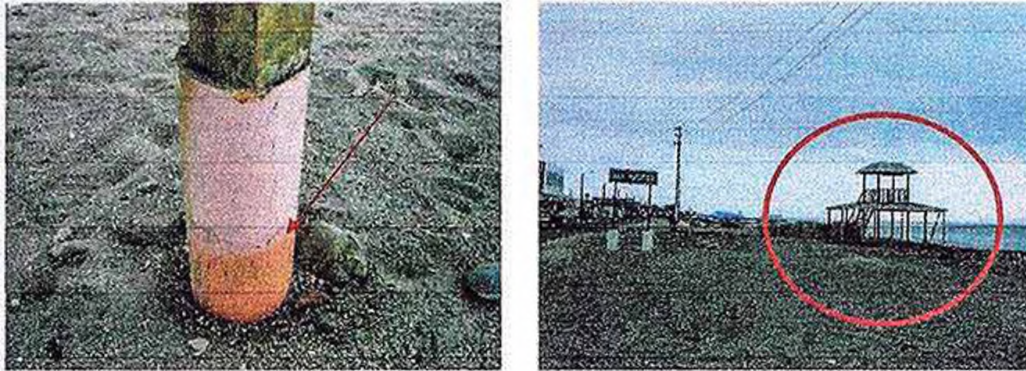


Fig. 14. Columnas con bases especialmente en caso de tsunami, la forma circular permite una baja erosión en la base.

4. Conclusiones

- El tsunami en la zona de Lagunillas se presentó con las siguientes características:
 - o Altura de Inundación: 5m
 - o Tiempo de llegada de la primera ola: 10 min.
 - o Distancia del Run-up: de 40m a 1km en la bahía.
- El tsunami en la zona de San Andrés se presentó con las siguientes características:
 - o Altura de Inundación: 2.5m
 - o Tiempo de llegada de la primera ola, 20min.
 - o Distancia del Run-up: 200m
- Los residentes de Lagunillas no conocían el fenómeno, por ello nunca realizaron una evacuación hacia el cerro ubicado a sus espaldas, el cual hubiese sido una zona de refugio temporal.
- En San Andrés la presencia de palmeras permitió que la primera fila protegiera de alguna forma a la segunda, sin embargo las viviendas si fueron afectadas. Por ello, la colocación de estas palmeras debe realizarse con espaciamientos menores de tal forma que se otorgue mayor superficie de fricción a las olas.

ANEXO C
ALTURAS DE OLA Y RUN-UP DEL TSUNAMI
ASOCIADO CON EL TERREMOTO DE PISCO DEL
15 DE AGOSTO DE 2007

En este anexo se comparan las alturas de olas del tsunami registrado en las zonas visitadas por el autor y el run-up evaluado en los informes de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) y el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

1. INTRODUCCIÓN

El 15 de agosto de 2007, a las **23:40:58 GMT (18:40:58 hora local)** ocurrió un fuerte sismo frente a las costas de la ciudad de Pisco, en el departamento de Ica, en Perú. El sismo tuvo una duración promedio de **2 minutos**. Las magnitudes finales reportadas por las agencias sísmicas fueron:

7.0 magnitud Richter del Instituto Geofísico del Perú.

8.0 magnitud momento del Servicio Geológico de EE.UU.

La ubicación del epicentro se muestra en la **Figura 1** las coordenadas según el IGP son **13.32° S y 76.51°W** con una profundidad de **39 km**.

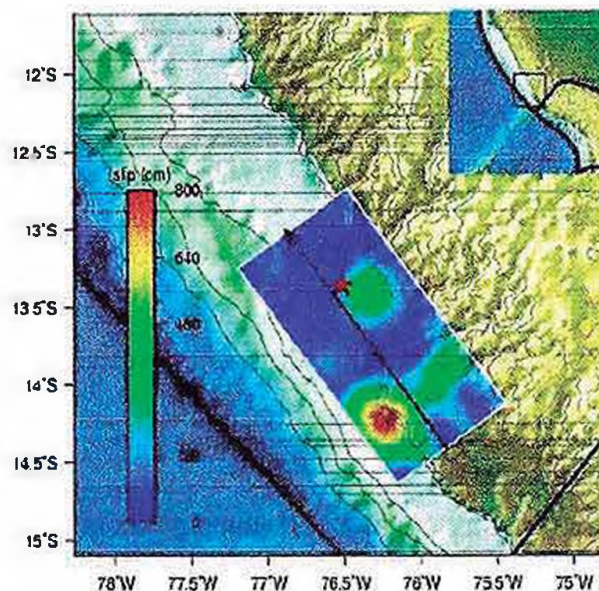


Figura 1.- Epicentro del Terremoto de Pisco y sus alrededores. Ica, Pisco, Chincha y Cañete fueron las ciudades más afectadas.

2. ZONAS EVALUADAS

Las zonas evaluadas de norte a sur son: Tambo de Mora, Playa Pisco, San Andrés, Paracas, Lagunillas y Playa Yumaque, éstas se muestran en la **Figura 2**.



Figura 2.- Zonas evaluadas

3. CÁLCULO DE ALTURAS DE OLA Y RUN-UP

Altura de Ola aplicando la Fórmula empírica de Yamaguchi

$$H = 12.3e^{-0.067D}$$

Donde:

D: Distancia en km desde la costa hasta la isóbata de los 100m

H: Altura de la ola, en m

Este método para estimar la altura de la ola en la entrada de una bahía fue propuesto por Yamaguchi, después de estudiar los efectos del tsunami de Sanriku de 1933. Él encontró que en aguas poco profundas

(menos de 100m), las pérdidas de energía por fricción con el fondo eran muy significativas y que la altura de la ola decrecía al incrementarse la distancia recorrida (D es la distancia en km desde la isóbata de 100m hasta los puntos en estudio). Es posible generalizar la aplicación de la fórmula de Yamaguchi a la entrada de una bahía muy cerrada; al fondo de una bahía muy abierta y la orilla de una larga franja costera.

Run-up evaluado en campo

El "run-up" se define como la diferencia entre la altura que alcanza la máxima penetración del agua (máxima inundación) y el nivel del mar que existe en el momento de producirse el tsunami.

En la metodología utilizada por el IGP y la DHN, se explica lo observado en la **Figura 3**. En esta figura se aprecia el nivel del mar en el presente (a), el nivel de la marea máxima anterior (b) y la línea que demarca la inundación máxima (c). El dato que se adquiere en terreno es la diferencia de altura entre el nivel (c) y el nivel (b) utilizando un instrumento como un nivel convencional (geodésico) o un nivel de mano. Posteriormente, se corrige con respecto al nivel del mar en el momento que el tsunami alcanza la costa. Esto corresponde a un valor del "run-up" para un sitio determinado (Barrientos, 2007), también en algunos casos se efectúa mediciones de las distancias desde el Nivel Medio del Mar (NMM) hasta el límite alcanzado por la inundación, efectuándose las mediciones de alturas y distancias en secciones transversales perpendiculares a la línea de costa en cada una de las áreas de trabajo, mediante el cálculo de la diferencia de elevación a través de un nivel y dos estadías (reglas). (DHN, 2007)



Figura 3.- Conceptos básicos en observación de run-up de tsunamis.

- a) nivel del mar durante la observación
- b) nivel del mar máximo dado por marea alta anterior a la medición
- c) indicación de la máxima penetración del agua (inundación)

Una primera aproximación del nivel de inundación o run-up es el valor de altura de ola calculado con la fórmula de Yamaguchi y luego aplicar algunas correcciones, debido a la topografía del área, disminuyendo o aumentando este valor según la pendiente sea baja o alta respectivamente.

4. RESULTADOS

ALTURAS DE OLA SEGÚN FÓRMULA DE YAMAGUCHI

LUGAR	LATITUD	LONGITUD	D (Km)	H(m)
Tambo de Mora	13°27'08"	76°11'18"	27.2	1.99
Pisco	13°42'36"	76°13'12"	24.2	2.43
San Andres	13°44'01"	76°13'32"	24.1	2.45
Paracas	13°49'48"	76°14'50"	25.7	2.20
Lagunillas	13°53'36"	76°18'50"	14.7	4.59
Yumaque	13°56'54"	76°16'30"	9.5	6.51

MEDICIONES DE RUN-UP Y ALTURA DE OLA PARA EL TSUNAMI DE PISCO

N°	LUGAR	UBICACIÓN		RUN-Up (1)			ALTURA OLA (2)
		LATITUD	LONGITUD	DHN	IGP	KUROIWA, J & MAS, E.	KUROIWA, J & MAS, E.
1	Tambo de Mora	13°26'53"	76°11'18"	1.73	-	-	-
		13°27'08"	76°11'18"	-	-	-	1.99
		13°27'40"	76°11'10"	2.63	-	-	-
		13°28'07"	76°11'24"	-	1.80	-	-
2	Pisco	13°41'51"	76°13'16"	3.33	-	-	-
		13°42'36"	76°13'06"	3.32	-	-	-
		13°42'36"	76°13'12"	-	-	-	2.43
		13°43'04"	76°13'20"	2.62	-	-	-
3	San Andres	13°43'38"	76°13'23"	2.69	-	-	-
		13°43'45"	76°13'23"	-	2.65	-	-
		13°44'01"	76°13'32"	-	-	2.50	2.45
		13°44'10"	76°13'33"	2.25	-	-	-
		13°44'43"	76°13'42"	2.32	-	-	-
4	Paracas	13°49'48"	76°14'50"	-	-	-	2.20
		13°49'56"	76°14'57"	-	1.30	-	-
		13°49'57"	76°14'55"	2.16	-	-	-
		13°50'13"	76°15'27"	1.94	-	-	-
		13°50'20"	76°15'29"	-	1.45	-	-
		13°50'44"	76°15'11"	2.99	-	-	-
5	Lagunillas	13°53'09"	76°19'22"	5.19	-	-	-
		13°53'31"	76°18'43"	5.06	-	-	-
		13°53'34"	76°18'50"	5.60	-	-	-
		13°53'36"	76°18'50"	-	-	5.00	4.59
		13°53'53"	76°18'40"	-	5.84	-	-
		13°53'34"	76°18'30"	-	1.70	-	-
6	Yumaque	13°54'29"	76°17'04"	10.00	-	-	-
		13°54'38"	76°16'56"	7.00	-	-	-
		13°55'00"	76°16'53"	-	8.84	-	-
		13°55'36"	76°16'59"	-	10.49	-	-
		13°56'54"	76°16'30"	-	-	-	6.51

(1) Valor de Run-up tomado en campo entre el 23 y el 31 de Agosto del 2007

(2) Valor de altura de ola en costa calculada con la Fórmula de Yamaguchi

5. DISCUSIÓN

Se observa en el cuadro anterior, que los valores calculados con la fórmula de Yamaguchi se aproximan bastante a los valores observados de run-up.

Si calculamos el promedio de valores observados de run-up en cada zona, se obtiene el siguiente cuadro:

LUGAR	PROM	H (m)
Tambo de Mora	2.05	1.99
Pisco	3.09	2.43
San Andres	2.48	2.45
Paracas	1.97	2.20
Lagunillas	4.68	4.59
Yumaque	9.08	6.51

Lo que refleja +/- 10 cm de diferencia, exceptuando el caso de Yumaque, en donde el valor del run-up excede en 2.57m a la altura de ola calculada, lo que se explica por la configuración de la bahía costera que amplifica las olas, la topografía pronunciada del lado norte de la playa y debido a que la playa de Yumaque se encuentra dentro de la zona de mayor dislocación del terremoto, lo que produce mayor alteración de volúmenes de agua.

Sin embargo, obsérvese el valor de 7m en la parte central de la playa que difiere en tan solo 51cm del cálculo efectuado. **(Figura 4)**

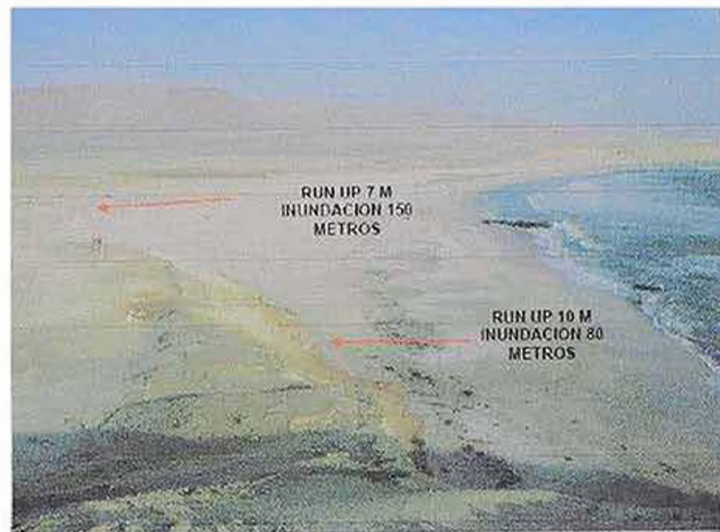


Figura 4.- Playa Yumaque. (DHN, 2007)

6. CONCLUSION

Por los resultados obtenidos en el cálculo de alturas de ola utilizando la fórmula de Yamaguchi y comparándolos con los valores observados por las agencias especializadas, podemos decir que la Fórmula de Yamaguchi brinda una buena aproximación para el cálculo de niveles de inundación máximos en zonas amplias y playas de baja pendiente, como las que presentan las zonas evaluadas.