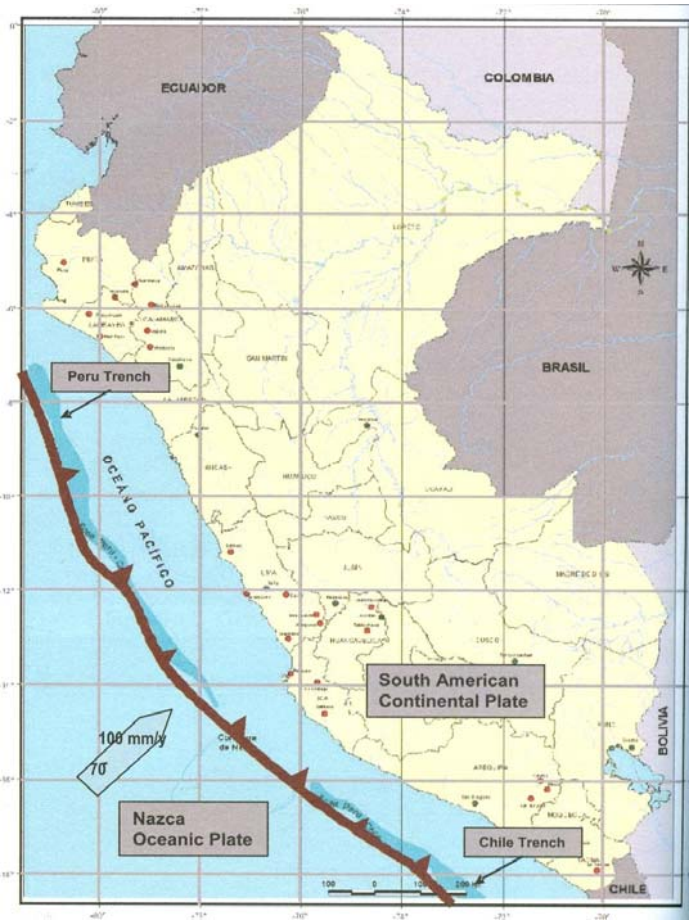
INFORME DEL MID-AMERICA EARTHQUAKE CENTER SOBRE EL SISMO DE PISCO-CHINCHA, 15/08/07
Resumen de las Observaciones y Recomendaciones

Reproducimos las conclusiones y el análisis previo que sobre el sismo Pisco Chincha del 15 de agosto del 2007 ha editado el Mid-America Earthquake Center de la University of Illinois at Urbana. Han participado en este trabajo los siguientes profesionales Amr. S. Elnashai; Jorge Alva-Hurtado; Omar Pineda; Oh Sung Kwon; Luis Moran-Yanez; Guillermo Huaco y Gregorio Pluta.

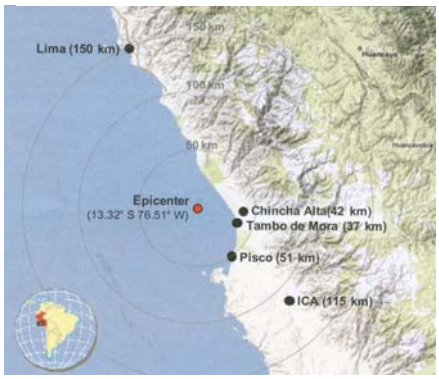
GEOLOGÍA Y TECTÓNICA LOCAL

La sismología de Perú está dominada por la convergencia de la placa oceánica de Nazca y el borde continental occidental de las placas sudamericanas (Barazangi e Isacks, 1976; Leffler y al., 1977) Los componentes de las regiones de subducción de las placas están descritas en la Figura 2.1. La convergencia de las dos placas se da en la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa sudamericana. Un rasgo característico del régimen es que la inclinación es de aproximadamente 30 grados en el segmento sur y cambia a un segmento mucho menor, casi horizontal (<10 grados) más al norte, lo que tiende hacia



Macro tectónica del Perú

Mapa PGA Clase B
(V_{s30}=1070 m/s)



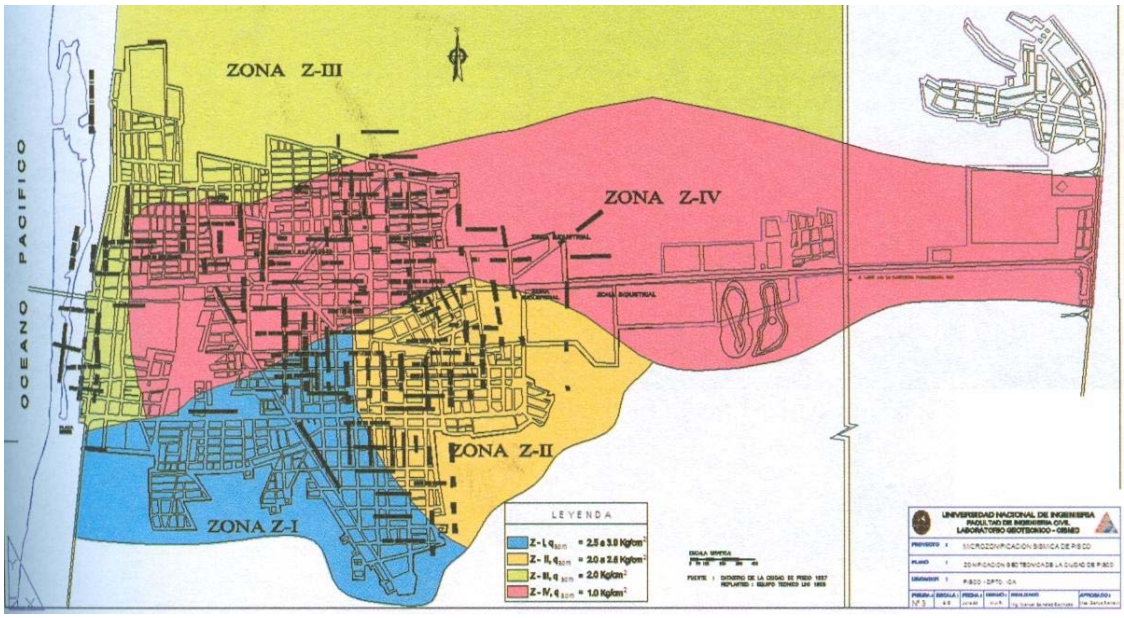
Epicentro del sismo Pisco Chincha y ciudades afectadas.

un régimen de casi compresión (Tavera y Buforn, 2001) Para acomodar la gran diferencia en la inclinación, se postula que existe una ruptura mayor en la placa de Nazca (Baranzagi e Isacks, 1976.) Mayores detalles de la sismología de placas se presentan en la Sección 2.2. La región de subducción se manifiesta en parte a orillas de la depresión Perú-Chile. La Figura 2.2 describe la composición macro-tectónica del Perú. El principal mecanismo de subducción ha sido asociado con los terremotos históricos y contemporáneos conforme se discute en las secciones siguientes.

El principal mecanismo de subducción da como resultado alta flexión y tensión por fricción en la placa sudamericana que se encuentra encima de la placa de Nazca, lo que lleva a la sismología observada tierra adentro en la Cordillera Occidental. La altamente estresada placa de Nazca también es responsable por los dañinos terremotos que son de poca profundidad en alta mar y en partes de la costa. Ambos mecanismos resultantes de las interplacas han dado como resultado actividad sísmica significativa (Tavera y el., 2006.)

Breve Historia de los Terremotos en la Región

Un estudio de los hipocentros de los terremotos peruanos (Barazangi e Isacks, 1976) concluyó que la subducción de la placa de Nazca debajo del plano sudamericano explican completamente la actividad sísmica en Perú. Existen cinco segmentos de zonas sísmicas inclinadas. La inclinación en cada zona es muy uniforme. El segmento bajo el norte y el centro de Perú y aquel debajo del centro de Chile tienen una inclinación poco profunda de aproximadamente 10°, mientras que los segmentos bajo el sur de Ecuador, el sur de Perú y el norte de Chile tienen inclinaciones más agudas de 20° - 30°. Existen implicaciones interesantes para esta observación con respecto a la distribución de los temblores sobre la profundidad en la región de subducción. Si los segmentos de



Microzonificación de Pisco. (Murrugarra et al., 1999)

inclinación menos profunda están en contacto con la placa continental (sudamericana), entonces el grosor de esta última es menor a 130 Km, contrario a los reportes de Brazangi e Isacks (1976), donde se postulaba que la placa sudamericana tiene 300 Km de grosor. Además de la actividad sísmica en las superficies inclinadas de la subducción, existe considerable actividad sísmica en los 50 Km. superiores de la placa superior. Por último, los investigadores antes mencionados reportan que existe una brecha sísmica entre las profundidades de 320 y 525 Km. La Tabla 2.1 enumera la actividad sísmica conocida en Perú y las regiones vecinas desde el siglo 17 hasta el presente. Se han registrado 24 terremotos dañinos desde el año 1900, por lo tanto se especula que han habido muchos terremotos no registrados antes de 1900. El terremoto más mortal en la historia de Perú antes de 1900 fue en Lima en Octubre de 1746. Por lo menos 5,000 personas murieron, muchas de ellas cuando una ola oceánica sísmica (tsunami) barrió la costa. El 31 de mayo de 1970 un terremoto y sus réplicas mataron a más de 66,000, y causaron enormes deslizamientos de tierra (USGS, 2007.)

Como se menciona, la actividad sísmica en la Costa del Pacífico de América del Sur se observa desde la superficie hasta una profundidad de aproximadamente 700 Km. Las investigaciones geofísicas han identificado seis capas de actividad sísmica (IGP, 2001) relacionadas con la energía liberada por los terremotos, Tabla 2.2. Las capas son:

Falla típica en el refuerzo y adobe de casas de habitación

Colapso de una estructura de albañilería

Estructura de concreto armado colapsada

Estructura de concreto armado colapsada

Superficial, para profundidades entre 0-32 Km.; Intermedia superficial, 33-70 Km.; Intermedia, 71-150 Km.; Intermedia Profunda, 151-300; Media Profunda, 301-540 Km.; y Profunda, 541-667 Km. Según varias fuentes, el terremoto Pisco-Chincha tuvo su núcleo a una profundidad que osciló entre los 26 y 39 Km. Este rango cae en el borde entre las capas Superficial e Intermedia-superficial +/- 6 Km. La zona Sísmica Superficial comprende terremotos a profundidades por debajo de los 32 Km. en un ambiente sísmico/tectónico caracterizado por eventos de colisión y re-acomodamiento en la superficie de contacto de las placas de Nazca y Sudamérica, como se describe en la Sección 2.1. Casi el 30% de la energía liberada por los terremotos en el período 1900-2001 se generó en esta capa sísmica. La zona Sísmica Superficial-Intermedia (SIS, por sus siglas en inglés) del sistema de la falla de Nazca se caracteriza por una alta concentración de terremotos y consiste en el re-acomodamiento y subducción de las placas sísmicas. El complejo ambiente sísmico-tectónico produce un comportamiento elástico-plástico del material de la corteza. Esta zona liberó aproximadamente el 43% de la energía relacionada con los terremotos en el período 1900-2001.

Las capas sísmicas intermedia-superficial son importantes para comprender la actividad sísmica de Perú puesto que más del 70% de la energía liberada por todos los terremotos y más del 50% de la energía de los terremotos grandes (M_b>6) se libera en estas dos zonas. En la Figura 2.3, se puede observar la historia sísmica del Perú para los terremotos generados en todas las capas; en las Figuras 2.4 y 2.5 se muestran la historia de los epicentros de los terremotos superficiales e intermedio-superficiales, respectivamente.

El Terremoto Pisco-Chincha
Información General y Modelos de Ruptura

Varias fuentes de información se consultaron en el terremoto Pisco-Chincha. Estas son: (i) el reporte USGS, que proporciona la información general sobre el evento; (ii) reportes sobre el análisis telesísmico publicado por Konca, Vallée y Yagi (todos 2007), donde se propusieron tres diferentes modelos de ruptura; y (iii) un reporte comprensivo publicado por el Instituto Geológico del Perú (IGP.) En adelante solo se presenta una breve descripción de cada documento. Según el USGP, el terremoto se produjo el 15 de agosto, 2007 a las 6:40 p.m. hora local (UTC/GMT: 11:40 p.m.), con un epicentro que se ubico a 40 Km. ONO de la ciudad de Chincha, 105 Km. NO de la ciudad de Ica, y a 150 Km. SSE de la ciudad de Lima. Se proporcionaron las coordenadas aproximadas de 13.354° S, 76.509° O. La magnitud de momento estimada para este evento fue de M=8.0 y la profundidad del hipocentro H fue 39 Km. El modelo propuesto por Konca (2007) se basa en los registros telesísmicos de 18 P-wave y 19 SH-wave e indica que la magnitud del momento es también 8.0. El epicentro se da como 13.354° S, 76.509° O (adoptado del reporte de USGS) y la profundidad del hipocentro es 39 Km. El proceso de ruptura se caracteriza por ángulo de deslizamiento variable, un acimut del plano de ruptura de 324° y una inclinación de 27°. La velocidad estimada de ruptura es de 1.5 km/seg. Por otro lado, el modelo de Vallée (2007), basado en registros telesísmicos de

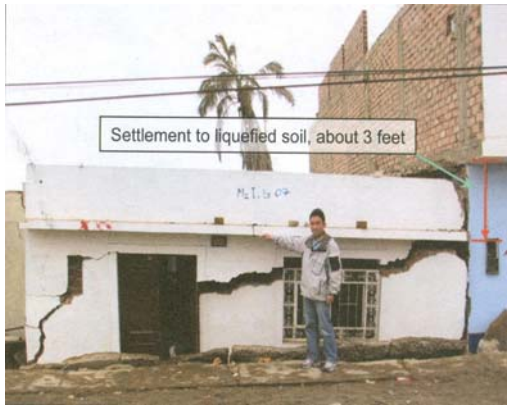
15 P-wave, calcula la magnitud de momento en M=7.9, acimut en 318°, inclinación en 20° y ángulo de deslizamiento variable. La caracterización de la fuente consta de dos procesos de ruptura o zonas de desplazamiento máximo (asperities) separadas por 60 segundos, con velocidad de ruptura de 1.3 km/seg. El tercer modelo presentado aquí es el de Yagi (2007), basado en el análisis de los registros telesísmicos 15 P-wave, propone una magnitud de momento de 8.1, acimut de 320°, inclinación de 18° y ángulo de deslizamiento variable. El modelo fuente describe dos procesos de ruptura con una duración total de ruptura de 180 segundos y una velocidad promedio de ruptura de 1.75 km/seg.

El Instituto Geológico de Perú reporta que el terremoto Pisco-Chincha tuvo su núcleo a 74 km al Este de la ciudad de Pisco con coordinadas aproximadas del epicentro de 13.49°S, 76.85°O. La profundidad aproximada del hipocentro es de 26 km. La solución de plano de falla propuesto por Harvard y verificado por IGP (2001), muestra un mecanismo inverso con planos nodales casi horizontales y verticales; ambos orientados NNW-SSE (Figura 2.6.) A partir de las características del proceso de subducción, el plano casi horizontal es la superficie de la falla, lo que se caracteriza por una inclinación

Columna con falla de corte

Falla de columna en edificio

Unidad habitacional con adobe reforzado



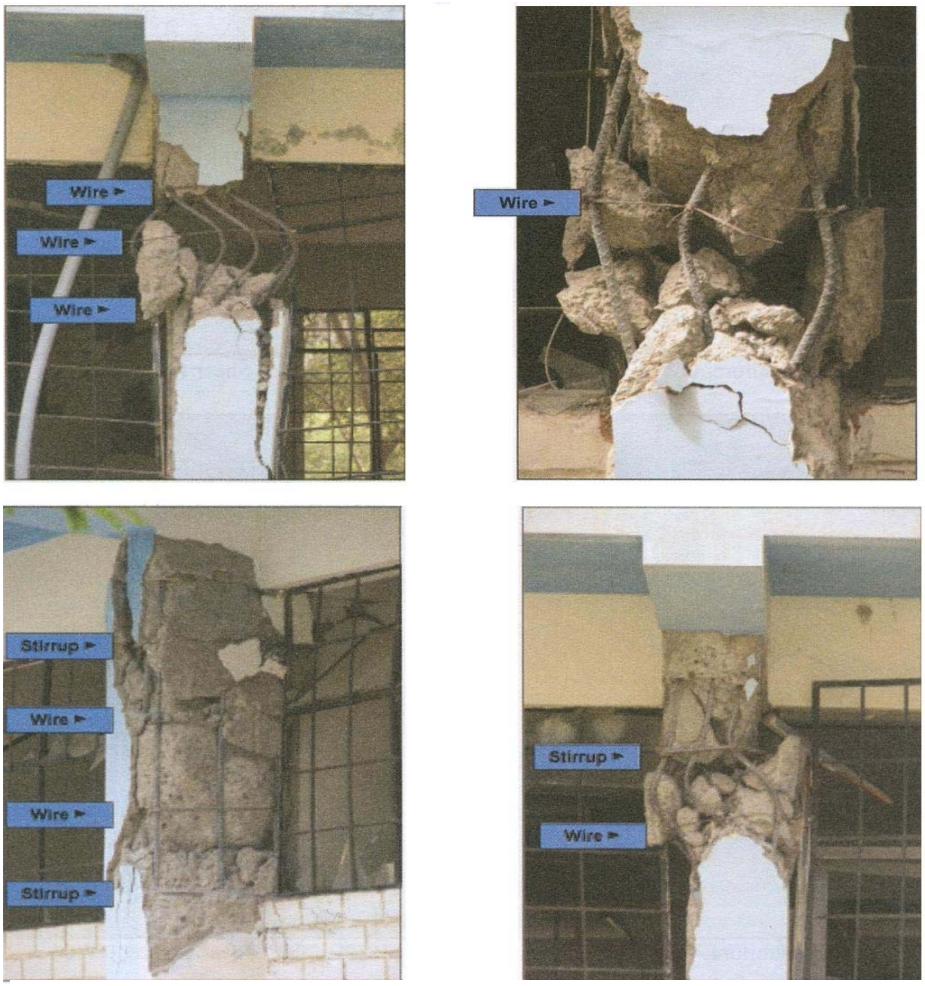
Edificio de albañilería colapso por licuefacción

promedio de 14°. El proceso de ruptura del terremoto Pisco-Chincha, ubicado en la superficie de contacto interplaca de las Placas de Nazca y Sudamérica, es complicado e incluye dos rupturas; siendo la segunda más fuerte que la primera.

A partir de un análisis de las replicas realizado por Tavera y Al. (2007), se identificaron tres nubes de epicentro, referidas como G1, G2 y G3 en la Figura 2.6. De acuerdo a los autores, la distribución de las replicas confirma la complexidad del proceso de ruptura. La flecha indica la propagación de la ruptura a través del plano de falla. La distribución de las replicas delimita el plano de falla propuesto por los autores, el cual es consistente con los modelos de Vallée (2007) y Yagi (2007.) Las dimensiones de la ruptura de falla propuesta son 160 km x 125 km.

Comparación de la Intensidad Resultante con Terremotos Previos

Las ciudades mas afectadas por el terremoto fueron Pisco con una Intensidad Modificada de Mercalli (MMI) de VIII, seguida por Chincha VII, Ica VI y Lima V. Los registros históricos de terremotos que afectaron a estas ciudades describen impactos similares a aquellos observados después del terremoto Pisco-Chincha. Extractos de reportes sobre terremotos en los siglos 17 y 18 se reproducen a continuación. En estos



Estribos en columnas dañadas

eventos, la magnitud de momento M se estimó empleando datos macrosísmicos (IGP, 2001.)

El 12 de mayo de 1664, en la Ciudad de Ica, un terremoto de magnitud 7.37 generó una intensidad de X dejando 400 fallecidos. El reporte describe el terremoto como sigue: *el suelo se quebró en muchos lugares. El agua de varios pozos de la ciudad salió a borbotones. Muchos árboles enormes fueron arrancados de raíz*. El 20 de octubre de 1687, en la ciudad de Cañete (Lima), un terremoto de magnitud 9 con una intensidad de IX dejó 100 victimas en Lima, 500 en Callao y las áreas adyacentes. El terremoto fue descrito en un viejo reporte como sigue: *El ruido fue estruendoso. Hubo "olas en el suelo. Grandes grietas de varios kilómetros entre Ica y Cañete. La ciudad fue muy afectada. Un maremoto destruyó el puerto de Pisco*. El 10 de febrero de 1716, en la ciudad de Pisco (Ica), un terremoto de magnitud de 8.64, con una intensidad de IX, causó bastante daño en la ciudad. Los locales describieron los eventos como sigue: *El suelo se abrió; salieron corrientes de polvo y agua con un ruido terrible. Todas las casas fueron destruidas*.

Las descripciones anteriores están en línea con las observaciones de la misión de reconocimiento del Centro MAE e indican que los efectos de los terremotos históricos y contemporáneos en el Perú Central son muy similares.

RESUMEN DE LAS OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES DEL INFORME DEL MID-AMERICA EARTHQUAKE CENTER

Se han sacado conclusiones en los diferentes capítulos anteriores sobre ingeniería de la sismología, Ingeniería geotécnica y sísmica estructural. A continuación, se reitera un resumen de las conclusiones principales a fin de que se aprendan las lecciones importantes que se sacaron a partir de este terremoto, con el objetivo de reducir el impacto de terremotos futuros en Perú y en cualquier otro lugar.

- El terremoto ocurrió en un área que ha sido bien estudiada y comprendida, a lo largo de una brecha sísmica identificada de aproximadamente 150 Km. paralela a la costa del centro de Perú. La magnitud del terremoto es similar a terremotos anteriores confirmados en la sección de subducción definida por la placa oceánica de Nazca y la placa continental Sudamericana.
- Hubo dos eventos principales separados por aproximadamente 60 segundos, el segundo evento parece haber sido algo más fuerte que la primera ruptura.
- Las actividades de replica están agrupadas en tres regiones lo que indica que este terremoto fue el resultado de un proceso complejo de ruptura múltiple.
- El movimiento fuerte disponible para el equipo de reconocimiento, parámetros de desplazamiento de 16 estaciones y un registro de alta calidad de la estación ICA2 en la ciudad de Ica, indican la liberación extremadamente alta de energía.

- El único registro de movimiento fuerte analizado tiene algunas características interesantes en términos de duración, flujo de energía y RMS de aceleración, velocidad y desplazamiento.
- El registro fue comparado con registros de Loma Prieta (USA, 1989), Northridge (USA, 1994), Hyogo-ken Nanbu (Japón, 1995) y Kocaeli (Turquía, 1999) con el mismo pga. El registro del terremoto Pisco-Chincha de la estación ICA2 tiene más del doble de la Intensidad Arias, 8 a 30 veces el flujo de energía, 2-4 veces la duración y más del doble de RMS de parámetros de movimiento del suelo. La única excepción es el record Kocaeli (Duzce) que muestra tendencias similares pero es menor en todos los parámetros de comparación.
- La comparación anterior indica que el zarandeo impuesto en las estructuras de la región costera del Perú central fue significativamente más intensa que muchos o la mayoría de los terremotos recientes.
- El espectro elástico e inelástico del registro indica que el componente E-W tuvo un contenido de frecuencia mucho más amplio correspondiente a amplificaciones altas, mientras que el componente N-S tuvo amplificación más alta pero en un rango de frecuencia relativamente más estrecho.

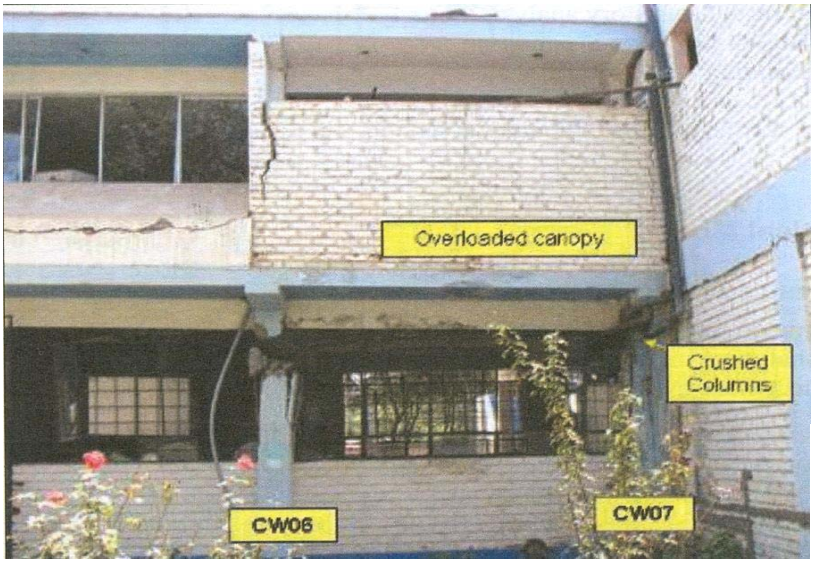
Falla de un edificio de tres pisos en Chincha Alta

Falla de un edificio de tres pisos en Chincha Alta

Colapso en casa en Pisco

Colapso de edificio en Pisco Playa

- La amplificación promedio para ambos es de aproximadamente 2.5-2.7 en la dirección E-O (casi normal a la falla) y hasta de 4.0-4.2 en la dirección N-S (paralelo a la falla.) La amplificación E-O es normal, mientras que la amplificación N-S es aproximadamente 80% más alta que la amplificación promedia observada en muchos registros de temblores.
- De las 16 series de parámetros de desplazamiento máximo de suelo, 10 dieron un componente E-O más alto que el N-S, 2 dieron valores iguales y 4 dieron valores menores. Se puede concluir que el componente E-O probablemente infligió más daño que el componente N-S, debido a su contenido de valores más altos y frecuencias más amplias.
- La comparación detallada entre los valores disponibles de los parámetros de desplazamiento máximo y los cálculos de las relaciones de atenuación más recientes y aceptadas ampliamente dieron una mezcla de resultado. En algunos casos, se observó una buena correlación. En otras, la relación de atenuación sobreestimó la aceleración de suelo observada por grandes márgenes.
- En su totalidad, la relación de atenuación dio resultados razonables, aunque el modelo fue derivado sin tomar en consideración los regímenes de subducción.
- Los efectos geotécnicos fueron sobrecogedores en este terremoto. Un porcentaje muy substancial de edificaciones colapsadas y estructuralmente dañadas son una consecuencia directa de los efectos geotécnicos no estructurales.
- Licuefacción, tanto bajo las estructuras o en campo abierto ocurrió en masa. El equipo de reconocimiento observó varios sand boils (arenas hirvientes/arenas movedizas???), algunos de varios metros de diámetro.
- La licuefacción en Tambo de Mora causó enorme daño y el colapso de casi todos las edificaciones en dos calles, ambos paralelos a la orilla del mar.



Falla en vivienda de concreto armado y albañilería

- El complejo turístico Las Lagunas, cerca de Lima fue golpeado fuerte con decenas de las lujosas villas hundidas en el suelo. Esta observación sirve como recordatorio de los peligros de construir en suelo suave cerca de lagos naturales o artificiales que reducen la presión lateral del suelo que de otra forma hubiera reducido la extensión lateral.
- Pocas estructuras de transporte sufrieron daño, sin embargo, las que tuvieron mayor daño, aunque fueron pocas, son componentes principales del sistema de transporte. El daño al puente Huamaní y varios sectores de la Carretera Panamericana paralizaron la comunicación por tierra entre Lima y las áreas más golpeadas por varios días.
- Hubo gran daño en cierto número de segmentos de carretera Panamericana, principalmente debido a expansión lateral y otras formas de desplazamiento permanente del suelo.
- El puerto en San Martín sufrió mucho daño debido a asentamiento y una gran deformación permanente del suelo.
- La red de transmisión eléctrica fue uno de los servicios, si no es el único servicio, que sufrió más. Decenas de postes de transmisión eléctrica fallaron, casi exclusivamente debido a falla de suelo y cimientos, y no a vibración estructural.

Fallas visibles en la carretera

Grietas en el camino en San Clemente

Fallas visibles en la carretera

Colapso de la fundación de una línea de transmisión

- Las estructuras de albañilería se comportaron muy pobremente. Se observaron cientos de casos de colapso de esquinas, agrietamiento diagonal y falla de rotura por corte en puertas y aberturas.
- El uso de albañilería confinada fue escaso. Donde se utilizó, se comportó bien.
- Las estructuras de concreto reforzado bien diseñadas, el principal tipo de construcción en años recientes en Perú, se comportaron bien.
- Se observaron numerosos casos de daño severo y colapso de estructuras de concreto reforzado debido a lo siguiente: piso blando, columnas sin confinar, conexión débil entre columna y viga, columna corta, patrón discontinuo de carga y diseño arquitectónico inferior que impone demandas variables a miembros estructurales adyacentes.

La mayoría de las lecciones aprendidas a partir de este terremoto es una repetición de las lecciones que debieron aprenderse de terremotos anteriores, tanto en Perú como en el mundo entero. Por lo tanto, se enfatiza que las estructuras, sus cimientos y el suelo que rodea a estos cimientos son un solo sistema que interactúan entre si y deberían diseñarse y construirse como tal. En este terremoto, las estructuras perfectamente adecuadas sufrieron gran daño o colapsaron debido a la falla en el suelo y/o cimientos. El reto que lleva a tales fallas es el diálogo interdisciplinario que se requiere entre los grupos quienes tienen que establecer aun un vocabulario común. Quizás esta sea la lección más importante, aunque repetitiva, del terremoto Pisco-Chincha.

Recomendaciones

El terremoto Pisco-Chincha golpeó un área que ha mostrado una de las más altas actividades sísmicas del mundo. Se hubiera esperado que la región estuviera mejor preparada que lo que observó el equipo de reconocimiento del Centro MAE. Restricciones económicas y otras consideraciones sociales y políticas permanecen siendo un obstáculo para estar preparados para el siguiente terremoto, lo que es un evento que es inevitable. A continuación se presentan algunas recomendaciones generales y específicas que el Centro MAE y sus socios expresan para su consideración por las autoridades pertinentes en Perú.

Peligro

- Es de suma importancia para el Perú y la comunidad de ingenieros sísmicos del mundo que se expanda y se acelere el programa de instrumentación. Es una oportunidad históricamente perdida para recolectar registros de las locaciones más golpeadas, donde no existían estaciones de registro, para la investigación científica y el mejor entendimiento de una de las regiones sísmicas más activas en el mundo.
- Debería ser obligatorio que las agencias que operan redes de movimiento fuerte publiquen sin restricciones todos los movimientos de tierra registrados, de otra forma el interés internacional disminuye, y se pierde la rara oportunidad para agrupar experiencia para el entendimiento del terremoto y sus efectos.

- Lanzamiento inmediato de esfuerzos extensivos para incrementar substancialmente las actividades de investigación en lugares importantes, tales como estaciones de movimiento fuerte, instalaciones importantes, estructuras arteriales importantes y plantas de energía, a fin de ayudar a desarrollar modelos de movimiento de tierra como se menciona a continuación.
- Requerimiento obligatorio para instrumentar todos los proyectos con un mínimo de estaciones de lectura para la recolección de datos vitales de respuesta.
- Desarrollo de un programa de micro zonificación para áreas con condiciones especiales de suelo tales como la región a orillas del mar, los planos aterrazados al este y las áreas que rodean ríos y lagos tierra adentro.
- Trabajo extensivo en el desarrollo de modelos de movimiento de tierra que son particulares a Perú con un énfasis en respuesta en el lugar y efectos del suelo.

Planeamiento para manejo de riesgo

- Lanzamiento del esfuerzo para recolección de datos para todos los activos expuestos a los terremotos y desarrollo de un programa extensivo para la recolección y el archivo del inventario de GIS.
- Establecimiento de una evaluación regional, mitigación, respuesta y necesidades de recuperación.
- Desarrollo o adopción de una herramienta software de evaluación de pérdidas que se use en escenarios regionales y nacionales con el propósito de planificar la respuesta, la determinación de las medidas de mitigación, almacén de equipo requerido y contratación del personal necesario, articulación de una respuesta detallada y plan de acción para la recuperación.

Diseño y Construcción

- Desarrollo de reglas de fácil cumplimiento que se basen, sin ecuaciones, en estructuras simples en regiones rurales, incluyendo las previsiones para el refuerzo de los cimientos.
- Implementación de procedimientos de autorización de construcción estrictos, auto controlados y jerárquicos, lo cual debe incluir el control continuo de todas las construcciones y las penalidades concurrente con viviendas no conformes y en falta.
- Desarrollo de códigos de resistencia sísmica para infraestructuras y sistemas vitales.

Legislación

- Respaldar todo lo anterior con estructuras legislativas rigurosas y marcos de adherencia claros y monitoreo continuo.
- Legislar para un marco completo y comprensivo de profesionales de manejo de emergencias a nivel local, regional y nacional, y un mecanismo claro de reporte junto con un plan de preparación para emergencias.

- Establecer un “Fondo de desastres” que se use para proporcionar alivio de emergencia regional y que se financie con un impuesto modesto en los proyectos nuevos. Tales fondos tienen prioridad y se debe ganar experiencia de otros países con este problema.

La lista anterior no es comprensiva y está sujeta a mayor perfeccionamiento y articulación conforme se disponga de mayor información y se definan mejor las necesidades.

Area de edificios colapsados por licuefacción

Unidad habitacional con adobe reforzado

Detalle de falla de una columna en edificio de la Universidad

Falla típica de columna corta en edificio de Pisco