

- **ASPECTOS GEOTÉCNICOS DEL SISMO DEL 15 DE AGOSTO EN PISCO**

Manuel A. Olcese Franzero
Jorge Zegarra Pellanne

- **DEFECTOS QUE INCIDIERON EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS CONSTRUCCIONES DE ALBAÑILERÍA EN EL SISMO DE PISCO DEL 15-08-2007**

Ángel San Bartolomé

- **COMPORTAMIENTO DE LAS VIVIENDAS DE ADOBE REFORZADAS ANTE EL SISMO DE PISCO.**

Daniel Quiun
Angel San Bartolomé
Luis Zegarra
Alberto Giesecke

- **CARACTERIZACIÓN DE DAÑOS, REPARACIÓN Y REFUERZO EN CONSTRUCCIONES DE ADOBE**

Daniel Torrealva Dávila

- **ENSEÑANZAS DEL SISMO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007**

Antonio Blanco

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS ANTISISMICAS

El laboratorio de estructuras antisísmicas del departamento de ingeniería, con más de 28 años de experiencia, cuenta con equipo e instalaciones que permiten la ejecución de ensayos estáticos y dinámicos en especímenes a escala natural o reducida. Se dispone de equipo para construcción y traslado de especímenes, montaje de dispositivos, aplicación de carga, medición, adquisición y procesamiento de datos.

En el laboratorio se desarrollan tres tipos de actividades:

- Apoyo a los cursos de Pre-Grado y Maestría.
- Investigación en materiales locales para mejorar su comportamiento sísmico.
- Servicio técnico a la industria de la construcción.

Los ensayos que habitualmente se realizan son:

- I. Ensayos mecánicos: compresión, tracción, flexión, compresión diagonal, corte, impacto, etc. en distintos materiales y elementos estructurales.
- II. Carga horizontal monótonica y cíclica en sistemas y componentes estructurales.
- III. Simulación sísmica en modelos a escala natural y reducida.
- IV. Verificación de equipo de aplicación de carga. Se cuenta con celdas de carga patrón calibradas en el National Standard Testing Laboratory, U.S.A.
- V. Compresión en probetas estándar de concreto.
- VI. Determinación de la calidad del concreto fresco in-situ.
- VII. Determinación de la calidad y uniformidad del concreto endurecido in-situ mediante probetas diamantinas y esclerometría.
- VIII. Evaluación de la capacidad de estructuras mediante pruebas de carga.
- IX. Consultoría en temas de estructuras y de hepatología estructural en general.



Informes

Jefe de Laboratorio: Ing. Gladys Villa García Medina

Teléfono: 626-2000 anexo 4640,

Fax: 629-2089

E-mail: ledi@pucp.edu.pe

PRESENTACIÓN

Grandes terremotos ocurridos en nuestro país, siempre han generado pérdidas de vidas humanas, serios daños materiales incluso de monumentos históricos, redes viales y de la infraestructura industrial de la zona afectada, provocando retrasos en su desarrollo. Sin embargo, estos sismos nos proporcionaron también lecciones que aprender.

El denominado “Sismo de Pisco” ocurrido el 15 de agosto del 2007 no fue la excepción, a pesar que poco antes, en el llamado “Sismo del Sur” del 2001, se había comprobado, por ejemplo, la efectividad de ciertas técnicas de refuerzo aplicadas previamente en viviendas de adobe. Pese a su sencillez y economía, estas técnicas no se aplicaron, excepto en 3 viviendas piloto, y el daño en las viviendas de adobe fue masivo en la zona afectada por el sismo de Pisco, volviéndose a repetir la historia.

De este modo, con el objetivo principal de que se adopte una política preventiva ante los sismos futuros, la Sección Ingeniería Civil del Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, difunde en esta edición cinco artículos relacionados al “Sismo de Pisco”, donde los profesores de esta Sección han volcado sus experiencias y conocimientos productos de muchas investigaciones.

Ángel San Bartolomé

Coordinador de Investigaciones

Sección Ingeniería Civil



- **DEFECTOS QUE INCIDIERON EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS CONSTRUCCIONES DE ALBAÑILERÍA EN EL SISMO DE PISCO DEL 15-08-2007**

Ángel San Bartolomé

DEFECTOS QUE INCIDIERON EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS CONSTRUCCIONES DE ALBAÑILERÍA EN EL SISMO DE PISCO DEL 15-08-2007

Ángel San Bartolomé (Profesor Principal PUCP)

RESUMEN

El objetivo de este artículo es indicar los errores cometidos en las construcciones de albañilería, debido a los cuales se produjeron daños catalogados desde leves hasta estados de colapso total, cuando estas edificaciones fueron sometidas a la acción del sismo de Pisco ($M_s = 7.0$, $M_w = 8.0$), ocurrido el 15 de agosto de 2007.

1. INTRODUCCIÓN

A las 6:40 p.m. (hora local) del 15 de agosto de 2007, se produjo un terremoto de magnitud de momento $M_w = 8.0$, cuyo epicentro se localizó a 50 km al oeste de Chíncha Alta (150 km al sur este de Lima y 110 km al nor oeste de Ica, Fig.1), con un foco a 39 km de profundidad. La información numérica indicada en este párrafo proviene de la Ref.1.



Fig. 1. Epicentro y ciudades afectadas. Ref.1.

Este sismo produjo daños desde leves hasta severos en diversos tipos de estructuras localizadas en los departamentos de Ica, Lima y Huancavelica. En este artículo, se describe los daños producidos en las edificaciones de albañilería poniendo énfasis en los errores cometidos, con la finalidad de aprender de esta lección dejada por el terremoto.

2. CALIFICACIÓN DEL SISMO DESDE EL PUNTO DE VISTA ESTRUCTURAL

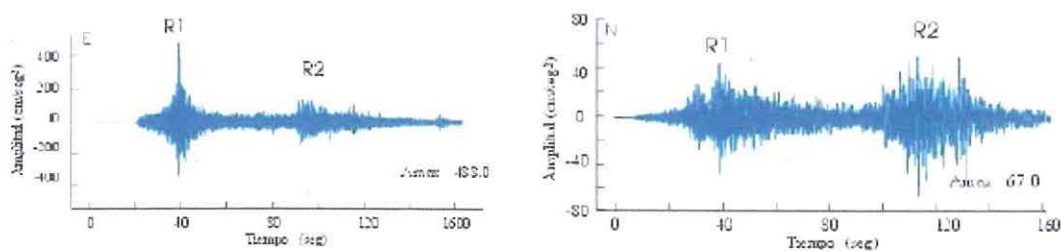
Desde el punto de vista estructural, interesa la aceleración en el lugar de la obra; para ello, en la Norma Sísmica E.030 (Ref.3), se especifica una aceleración máxima de $0.4g$, asociada al sismo “severo” de diseño para la zona de suelo duro en la costa (Z3) y se proporcionan factores de amplificación (S) por efectos locales del suelo de cimentación.

El sismo de Pisco fue captado por 15 instrumentos (Ref.2), 14 de los cuales estuvieron ubicados en la provincia de Lima y el restante en Parcona, a 122 km al sur este del epicentro. Este sismo se caracterizó por tener dos frentes de ruptura (R1 y R2 en la Fig.2) de la placa tectónica.

En la estación de la Universidad Católica (PUCP), ubicada sobre terreno duro, se captó una aceleración horizontal máxima de 0.07g en la ruptura R2, que correspondió aproximadamente al promedio de las 14 estaciones limeñas, con lo cual, para la provincia de Lima, el sismo puede ser calificado como “leve” en comparación con el sismo severo de la Norma Sísmica E.030.

En la estación de Parcona, ubicada sobre un suelo sedimentario, se registró una aceleración máxima de 0.5g para la ruptura R1, que disminuye sustancialmente para la ruptura R2, lo que resulta discutible, ya que en las 14 estaciones limeñas, la máxima aceleración se alcanzó para la ruptura R2. Cabe anotar que cualquier impacto cercano al instrumento (por ejemplo, el colapso de alguna edificación) puede afectar la lectura del acelerómetro.

Otros indicios de que en la zona afectada (Chincha, Pisco, etc.) el sismo debe haber adquirido la categoría de “moderado”, la dan las pistas y postes que fueron afectados solo en la zona de los humedales, y las estructuras prácticamente inestables que no sufrieron ningún daño (Fig.3). Es decir, los daños ocurridos en las estructuras se debieron a varios factores: 1) la baja calidad del suelo donde estaban ubicadas, 2) cimentaciones no adecuadas, 3) la calidad de los materiales empleados, 4) técnicas constructivas inadecuadas, y 5) deficiencias en la estructuración y en el diseño.



Parcona, 0.5g en R1

PUCP, 0.07g en R2

Fig.2. Acelerogramas de la Ref.2.



Fig.3. Indicios de que en Pisco el sismo fue de categoría “moderado” para suelo duro.

3. LICUACIÓN EN EL HUMEDAL DE TAMBO DE MORA (CHINCHA BAJA)

El error más grave fue el de edificar y permitir estas construcciones en un terreno de alto riesgo sísmico, como es el de arena suelta, con napa freática elevada en una zona de Tambo de Mora. El sismo originó la licuación del terreno, lo que generó asentamientos diferenciales y grandes hundimientos de las viviendas (Fig.4). Al respecto, el autor de este artículo propuso al alcalde de Tambo de Mora convertir la zona licuada en un museo, que sirva de ejemplo de lo que no debió hacerse, para que este error no vuelva a repetirse.

Cabe indicar que el colegio Tambo de Mora (Fig.5) queda en un lugar muy cercano a la zona licuada, pero sobre un suelo estable. Este colegio presentó algunas fisuras finas en sus muros de albañilería. La arquitectura de este colegio de tres pisos data de la década de los 90 y es muy similar a la de otros colegios que sufrieron fuertes daños ante los terremotos de Nazca-1996 y Arequipa-2001, por lo que se desprende que las aceleraciones en la zona de suelo estable deben haber sido las correspondientes a un sismo moderado.



Fig.4. Licuación en el humedal de Tambo de Mora.



Fig.5. Colegio Tambo de Mora.

Los problemas de licuación del suelo arenoso también se presentaron en zonas cercanas a Lima, donde la aceleración máxima en suelo duro fue 0.07g (estación PUCP), como en Puerto Viejo (Fig.6). Pero, como se esperan sismos con aceleraciones 6 veces mayores (0.4g, Ref.3), es urgente revisar la posibilidad de reubicar las edificaciones que existen en los pantanos de Villa, donde también hubo indicios de licuación.



Fig.6. Puerto Viejo.

4. CIMENTACIONES

Las estructuras de albañilería y las compuestas por muros de concreto armado son muy frágiles; basta una distorsión angular de 1/800 para que se fracturen. Por eso, en suelos de baja calidad, como el de la zona central de Pisco (arcilla arenosa con napa freática a 1.5m de profundidad, Ref.4), debió emplearse cimentaciones rígidas de concreto armado. Un caso lo da el comportamiento elástico de un pabellón nuevo del hospital de Pisco (Fig.7), donde se observó vigas de cimentación, mientras que los pabellones antiguos quedaron inutilizados.



Fig.7. Pabellón nuevo y antiguo del hospital de Pisco.

5. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En Pisco, Chincha e Ica, se utilizan ladrillos artesanales de arcilla, pandereta y bloques de concreto vacíos para la construcción de los muros portantes en edificios de hasta 5 pisos. De acuerdo con la Norma E.070 (Ref.5), estas unidades de albañilería están prohibidas porque se trituran (Fig.8), lo que implica que se pierdan drásticamente la resistencia y rigidez de los muros (Ref.6).

De acuerdo con la Ref.5, los ladrillos artesanales de arcilla pueden emplearse para la construcción de viviendas de hasta 2 pisos, y cualquiera de las unidades mencionadas puede ser utilizada para una mayor cantidad de pisos, siempre y cuando el ingeniero estructural demuestre que el comportamiento de todos los muros será elástico (sin ninguna fisura) ante la acción del **sismo severo**, lo cual podría lograrse mediante la adición de algunos muros de concreto armado.

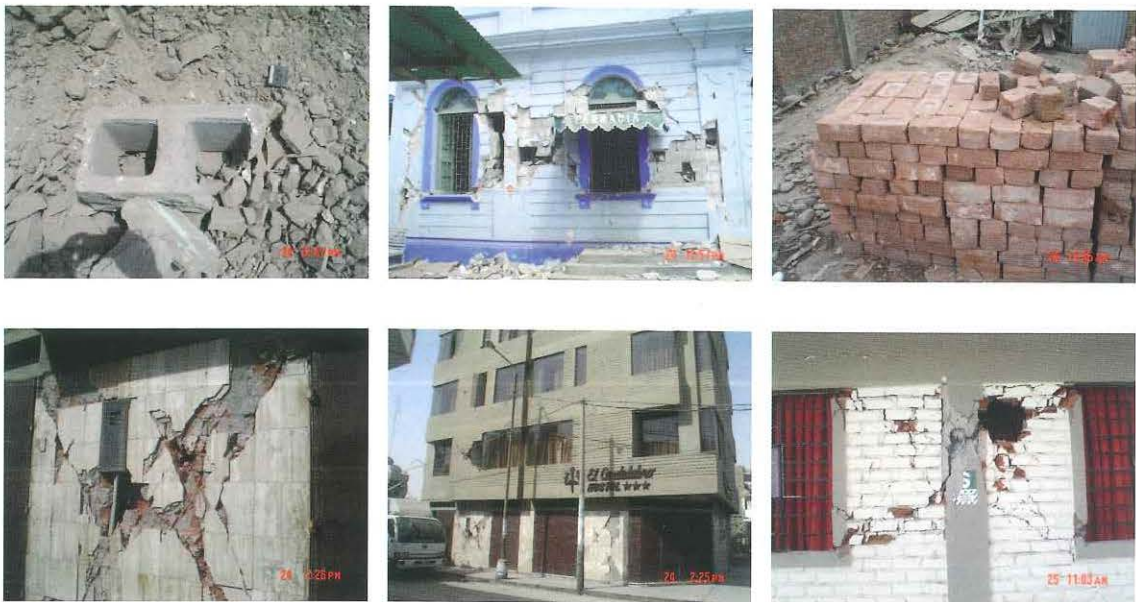


Fig.8A. Uso de unidades inadecuadas en edificios de Pisco e Ica.



Fig.8B. Ladrillo pandereta en Pisco.

6. TÉCNICA CONSTRUCTIVA

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, se construye las columnas, después se levanta la albañilería y, finalmente, se vacía 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 (Ref.5), 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, lo que permite una conexión dentada o a ras, pero agregando mechas de anclaje. La técnica usada en Pisco no permite arristrar 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 (Fig.9), donde las aceleraciones son máximas y la carga de gravedad es pequeña. Por eso, es necesario amarrar la albañilería a las columnas, por ejemplo, mediante mallas electrosoldadas (Ref.6).



Fig.9. Volcamiento de muros con junta a ras con las columnas. Inadecuadamente las columnas fueron construidas primero y después se levantó la albañilería. Pisco.

7. ARQUITECTURA

Templos carentes de refuerzo como el de Hagia Sofía (532 d.C.), en Turquía, basan su buen comportamiento sísmico en su disposición arquitectónica, pero cuando esta no es correcta, las edificaciones modernas reforzadas pueden incluso llegar a colapsar ante los terremotos.

7.1. Piso blando y torsión. El problema del piso blando se produce cuando hay un cambio muy brusco de rigidez entre los pisos consecutivos. Por ejemplo, en la dirección corta del edificio de la Fig. 10, los muros del primer piso fueron discontinuados para transformar el primer piso en cochera, lo que dejó en la dirección corta solo los muros del perímetro, hechos con ladrillos de baja calidad, y un gran muro longitudinal que no aporta resistencia en la dirección corta, sino más bien genera torsión en planta. Al fallar los muros de la dirección corta, se formó el problema de piso blando, que produjo la volcadura del edificio.



Fig. 10. Piso blando y torsión.

7.2. Falta de Densidad de Muros. En la Norma E.070 (Ref.5), se obliga a que los edificios tengan, por lo menos, una densidad mínima de muros en cada dirección y a verificar que la resistencia que aportan estos muros sea, por lo menos, igual a la fuerza cortante que imprime el sismo severo en el piso en análisis. A simple vista, el edificio de la Fig. 11, construido con ladrillos de baja calidad, no debe haber cumplido en su dirección corta con la disposición reglamentaria.



Fig. 11.

7.3. Tabiques en voladizos de fachadas. Para ganar espacio en los pisos superiores, se recurre a voladizos en las fachadas de los edificios, lo que cierra el ambiente con tabiques de ladrillo pandereta. La conexión dentada entre los tabiques transversales es insuficiente como para soportar las acciones sísmicas perpendiculares al plano y terminan volcándose (Fig. 12), con el riesgo de aniquilar a las personas que escapan por el primer piso. Estos tabiques deben arriostrarse, por ejemplo, usando mallas electrosoldadas (Ref.6).



Fig. 12. Tabiques sobre voladizos en Pisco y Chincha.

7.4. Ampliaciones. Las ampliaciones de las edificaciones hechas sin ningún criterio técnico tuvieron muchos problemas en la zona afectada. Por ejemplo, en Pisco, se construyeron segundos pisos sobre un primer piso hecho de adobe y se empleó pórticos que incluso estaban fuera del plano de los muros de adobe. El estado en que quedaron estas edificaciones después del sismo aparece en la Fig.13. En las figuras 14 (Pisco) y 15 (Guadalupe), aparecen otras ampliaciones.



Fig.13. Primer piso de adobe y segundo piso de albañilería. Pisco.



7.5. Columnas cortas. La arquitectura clásica que se utiliza en los colegios, universidades y hospitales continuó generando el problema de columnas cortas en la zona afectada (Fig.16). En ciertos casos, fue el alféizar de albañilería el que falló debido a la baja calidad de los ladrillos y a la robustez de la columna, que evitó la formación de la columna corta (Fig.17).



Fig.16. Hospital de Ica.

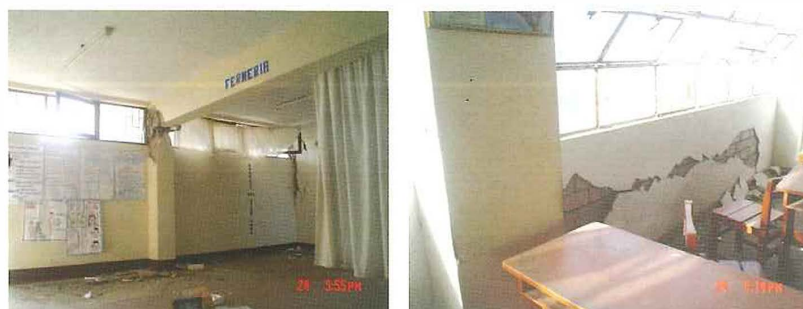


Fig.17. Instituto Tecnológico de Pisco. Pabellón de 2 pisos (izquierda) y Pabellón de 3 pisos, con columnas robustas (derecha).

Un caso especial fue el que ocurrió en la Facultad de Medicina de la Universidad San Luis Gonzaga de Ica, donde, para evitar la interacción alféizar-pórtico (causante de la columna corta), los muros se aislaron de la estructura principal, arriostrándolos con columnetas cuyos refuerzos verticales apenas anclaban en el recubrimiento de la viga de apoyo, por lo que terminaron volcándose ante la acción sísmica transversal al plano del alféizar (Fig.18).



8. DETALLES ESTRUCTURALES

Errores cometidos en los detalles estructurales como inexistencia de soleras, discontinuidad de columnas, nudos sin estribos, etc., se ilustran en las figuras 19 a 22. En todas estas situaciones, se violó la Norma de Albañilería E.070 (Ref.5).



Fig.19. Columna de concreto sin refuerzo.



Fig.20. Muros sin diafragma rígido.



Fig.21. Muros sin solera y con columna discontinua (izquierda), y espaciamiento entre arriostres verticales muy grande (derecha).

Fig.22. Unión columna-viga, nudo sin estribos. La Norma E.070 obliga a colocar por lo menos 2 estribos.

9. CERCOS Y PARAPETOS

Estos elementos trabajan a carga sísmica perpendicular a su plano y necesitan arriostres que eviten su volcamiento (Ref.5). Desde Lima hasta Ica, pudo observarse que aquellos cercos y parapetos carentes de arriostres terminaron volcándose, incluyendo aquellos donde se utilizaron mochetas de albañilería como arriostre. Un caso curioso ocurrió con un cerco no arriostrado de tapial en el trayecto entre Chincha Baja y Tambo de Mora (Fig.24), donde, en la dirección perpendicular al mar, el cerco se mantuvo estable, pero colapsó en la dirección transversal.



Fig.22. Chilca, columna sin refuerzo (izq.) y con mochetas (der.)



Fig.23. Pisco, cerco alto y rótula en la base de la columna de arriostre.



Fig.24. Chincha, cerco de tapial perpendicular al mar (izq.) y paralelo al mar (der.).



Fig.25. Pisco, parapeto sin arriostre (izq.) y arriostrado en el tercer piso (der.).

10. TANQUES DE AGUA

Los tanques de agua generalmente se apoyan sobre 4 columnas, lo que produce un cambio brusco de rigidez entre esos apoyos y el último piso (de albañilería), que genera un efecto de látigo sobre el tanque cuando ocurren los sismos (Fig.26). Para evitar esta situación en tanques existente, es recomendable taponar el espacio entre columnas con tabiques de albañilería.



Fig.26. Pisco, colapso de tanques elevados.

11. TABIQUES EN LIMA

El periodo predominante del acelerograma de la estación PUCP fue 0.77seg, por lo que, a pesar de que el sismo fue "leve" en Lima, los edificios altos y las estructuras flexibles fueron los que más daños tuvieron en sus elementos no estructurales. Se reportaron fisuras en los tabiques no aislados de la estructura principal, hechos con ladrillos pandetera, (Fig.27) y en los construidos con el sistema P-7 (bloques sílico calcáreos, Fig.28). En ambos casos, la deriva elástica de los entrepisos podría haber superado la distorsión angular para la cual la albañilería se fisura (1/800). Cabe indicar que esta verificación no se encuentra especificada en la Ref.3.



Fig.27. Tabique hecho con ladrillo pandetera.



Fig.28. Tabique hecho con el sistema P-7.

12. CONCLUSIONES

1. El sismo del 15-08-2007, calificado desde el punto de vista estructural por el autor como “leve” para Lima y “moderado” para Pisco o Chincha, puso al descubierto una serie de errores que se cometen en las edificaciones de albañilería, principalmente por el aspecto informal con que se construyen estos sistemas, pese a la existencia de normas nacionales de construcción y de diseño estructural (referencias 3 y 5).
2. Ningún tipo de estructura debió (ni debe) construirse en la zona licuada de Tambo de Mora, por lo que se propone la creación de un museo de sitio, para que no repita este error. Especial precaución deberá tomarse con las edificaciones ubicadas en los pantanos de Villa, donde -a pesar de que el sismo fue “leve” en Lima- hubo indicios de licuación.
3. Los daños severos en Pisco se presentaron principalmente en las zonas arenosas con napa freática elevada. Para este tipo de suelo, debe exigirse el empleo de cimentaciones rígidas de concreto armado para todo tipo de edificación.
4. Es necesario que los revisores municipales de los planos de estructuras y de arquitectura sean personas calificadas y entrenadas para detectar problemas que podrían presentarse en las edificaciones ante los sismos, como piso blando, torsión, columnas cortas, escasa densidad de muros, etc. Asimismo, es necesario que las municipalidades, en coordinación con el Colegio de Ingenieros, nombren inspectores que constaten continuamente en la obra el cumplimiento de los planos de estructuras y de las normas nacionales.
5. En la zona afectada, es necesario que se adiestre a los profesionales de la construcción sobre cómo deben construirse los muros de albañilería confinada, ya que la técnica que emplean no permite que las columnas actúen como arriostres ante acciones transversales al plano de los muros. En los pisos altos de las edificaciones existentes, es necesario integrar la unión entre la albañilería y las columnas, por ejemplo, con mallas electrosoldadas (Ref.6).
6. Para epicentros lejanos, el sismo tiene periodos predominantes altos y afectará a la tabiquería integrada a los edificios flexibles, por lo que es necesario especificar en la Norma E.030 (Ref.3) un espectro de respuesta especial asociado a sismos leves, de tal modo que las derivas elásticas no superen a 1/800, que es el valor para el cual fisura la albañilería.

13. REFERENCIAS

1. United States Geological Survey (USGS) <http://earthquake.usgs.gov/>
2. Instituto Geofísico del Perú (IGP) <http://www.igp.gob.pe/> . Informe Preliminar: el sismo de Pisco del 15 de agosto, 2007 (7.9 Mw). Por: Hernando Tavera, Isabel Bernal y Henry Salas.
3. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.030 “Diseño Sismorresistente.
4. Alva Jorge, 2007. Sismo de Pisco-Ica del 15 de agosto 2007. CISMID – Universidad Nacional de Ingeniería. <http://www.cismid-uni.org/>
5. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.070 “Albañilería”.
6. San Bartolomé Ángel, 2007. Blog de Investigaciones en Albañilería: <http://blog.pucp.edu.pe/albanileria>

AGRADECIMIENTO

En las visitas realizadas a las ciudades afectadas por el sismo, tomé 1200 fotos, pero muchas fueron superadas en calidad por las tomadas por mis amigos. Esas fotos fueron seleccionadas para la elaboración de este artículo, por lo que expreso mi mas sincera gratitud a Juan Carlos Dextre, Manuel Olcese, Daniel Quiun, Gianfranco Ottazzi, Victoria Ramirez, César Huapaya, Marcos Rider, Antonio Torres y Fernando Franco.