

DEMANDAS DE RESISTENCIA PARA EDIFICIOS DE ALBAÑILERÍA EN EL PERÚ

Alejandro Muñoz ¹, Angel San Bartolomé ¹, Carlos Rodríguez ²

¹ Profesor del Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, PERÚ

² Egresado de la Maestría en Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, PERÚ

RESUMEN

En este trabajo se estableció la resistencia lateral necesaria para que las edificaciones de albañilería tengan un comportamiento adecuado en los terremotos de subducción en el Perú. El estudio se orientó a establecer un valor para el coeficiente de reducción de fuerza sísmica con el fin de lograr que las demandas de ductilidad de los sismos severos no superen los límites tolerables para estas edificaciones y que la resistencia no sea superada por las demandas de los sismos frecuentes. Los resultados del estudio indican que, para lograr un comportamiento adecuado, la resistencia lateral necesaria se puede obtener usando la demanda elástica de los sismos severos con un factor de reducción igual a 2.5.

SUMMARY

In this paper the lateral strength required for Peruvian masonry buildings in order to behave adequately during subduction earthquakes was determined. The study consisted of establishing a value for the seismic reduction factor, which would result in acceptable ductility demands during severe earthquakes, and in demands lower than the strength of the buildings due to frequent earthquakes. The results of the study indicate that, to attain an adequate behavior, the required lateral strength can be estimated using the elastic demand for severe earthquakes with a reduction factor of 2.5.

ANTECEDENTES

Los edificios de albañilería constituyen una buena alternativa de solución al problema de la vivienda en países en vías de desarrollo, tanto por su menor costo como por su buen comportamiento durante los sismos.

A la fecha el diseño de estos edificios, se desarrolla empleando los procedimientos basados en esfuerzos admisibles que establece el código peruano de Albañilería (Ref. 1) y el sistema de fuerzas que establece la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente (Ref.2).

A pesar que al determinar las fuerzas de diseño, se emplea un factor de reducción, que presupone incursiones inelásticas durante sismos severos, el código de Albañilería no indica como garantizar un comportamiento post-elástico adecuado en sismos severos, ni tampoco como garantizar el buen comportamiento de estas edificaciones en sismos menores pero más frecuentes.

Gracias a los estudios que desarrolla la Pontificia Universidad Católica del Perú desde 1979 (Refs. 3, 4), se han cuantificado los parámetros globales de comportamiento de las edificaciones de albañilería y gracias a muchos trabajos en el área de sismología y peligro sísmico, desarrollados por instituciones peruanas, se ha mejorado el conocimiento de la sismicidad del país en términos de probabilidad y riesgo. De este modo, hoy es posible orientar el diseño de las edificaciones de albañilería teniendo en cuenta su desempeño para diferentes niveles de severidad a los que pueden estar expuestas.

En este trabajo se trató de establecer un valor adecuado del factor de reducción de fuerza sísmica para asegurar un comportamiento satisfactorio de las edificaciones de albañilería tanto en sismos importantes como en sismos moderados.

Sismos de Diseño y Criterios de Comportamiento

En los últimos años se ha hecho necesario precisar los objetivos del diseño sismorresistente tanto en lo referente a la sobrevivencia de las estructuras durante grandes sismos, como en lo concerniente al comportamiento de éstas frente a sismos menos importantes pero más frecuentes. Así, para el diseño de las edificaciones se establecen cuatro niveles de severidad en las solicitaciones sísmicas, cada uno de los cuales queda definido por un “sismo de diseño”, que se define en función de los periodos medios de retorno, o de la probabilidad de excedencia durante un tiempo de exposición, que para edificaciones comunes se considera de 50 años. Para cada uno de estos sismos de diseño, se espera un cierto tipo de comportamiento en las edificaciones.

La tabla que sigue muestra los periodos medio de retorno para los sismos de diseño sugeridos por el Comité Visión 2000 del SEAOC (Ref. 5). La segunda columna indica las aceleraciones pico asociadas a estos cuatro niveles de solicitaciones para la costa del Perú (Refs. 6, 7). La tercera columna indica el tipo de comportamiento esperado.

| Tabla 1. Sismos de Diseño, aceleraciones máximas en la roca para la Costa del Perú y comportamiento estructural deseado para edificios comunes. | | |
|--|-----------------|--|
| Sismo de Diseño | Aceleración (g) | Comportamiento Estructural |
| Sismos Frecuentes (43 años) | 0.2 | Perfectamente elástico |
| Sismos Ocasionales (72 años) | 0.25 | Prácticamente elástico |
| Sismos raros (475 años) | 0.40 | Importantes incursiones inelásticas con pérdida de resistencia y rigidez. La estructura puede repararse. |
| Sismos muy raros (970 años) | 0.5 | Severas incursiones inelásticas, pérdida casi total de rigidez y resistencia. No resulta práctico reparar la estructura. |

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA ALBAÑILERÍA EN EL PERU

Es conocido que los parámetros más importantes que influyen en el comportamiento sísmico de las edificaciones son la rigidez y resistencia lateral, así como la ductilidad que pueden desarrollar (Ref. 8). La figura que sigue muestra esquemáticamente el comportamiento típico de un muro de albañilería confinada adecuadamente diseñado y construido.

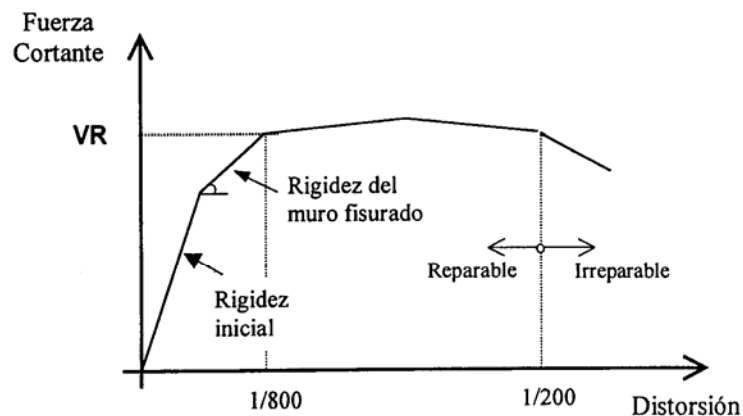


Figura 1. Resistencia Rigidez y Ductilidad de la albañilería confinada

Se ha podido establecer (Refs. 3 y 9) que la resistencia lateral de la albañilería confinada a fuerza cortante (V_R) depende del nivel de carga axial (P), del momento flector (M), de la fuerza cortante (V), de las dimensiones de muro ($L \times t$), así como de la resistencia a compresión diagonal $v'm$ y del factor de reducción por esbeltez α tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$V_R = 0.5 v'm \alpha t L + 0.23 P$$

el factor de esbeltez $\alpha = V L / M$, tiene como límites $1/3$ y 1 (Ref. 3)

De acuerdo a los resultados de los experimentos desarrollados en el país (Ref 3, 4), la resistencia (VR) se alcanza para una distorsión angular de aproximadamente 1/800 y se mantiene constante hasta una distorsión de 1/200, la cual constituye el límite hasta el cual el sistema es reparable. Posteriormente, el sistema degrada su resistencia y al fallar las columnas de confinamiento ocurre el colapso.

El cociente entre la distorsión máxima hasta la cual es posible la reparación y la distorsión de agrietamiento diagonal, constituye una medida de la ductilidad que la estructura puede desarrollar. De acuerdo a los resultados experimentales, las edificaciones de albañilería en el Perú debidamente proyectadas y construidas pueden desarrollar ductilidades de desplazamientos cercanas a 4 manteniendo la posibilidad de reparación y la ductilidad máxima sin peligro de colapso puede estimarse en 5.

Es posible lograr el comportamiento dúctil descrito, cuando el esfuerzo de compresión por carga axial está por debajo de $0.15 f'm$, ($f'm$ es la resistencia a compresión axial de las pilas) y cuando además los elementos de confinamiento son diseñados para soportar la carga de agrietamiento diagonal VR. Adicionalmente en el caso de muros cuyos esfuerzos axiales de compresión superen el valor de $0.05 f'm$, deberá agregarse refuerzo horizontal continuo, anclado en las columnas, en una cuantía de 0.1% como mínimo (Ref. 3).

DEMANDAS DE DUCTILIDAD DE SISMOS SEVEROS

Para estimar las demandas de ductilidad de los sismos severos, se emplearon modelos de un grado de libertad y 14 acelerogramas peruanos escalados a 0.4 g. Se calcularon espectros inelásticos de ductilidad constante para las 14 señales y luego se obtuvieron los espectros promedio para ductilidades entre 1 y 10 (Ref. 10).

La figura 2 muestra las demandas promedio de resistencia (en términos de pseudo aceleración) para el rango de ductilidades indicado.

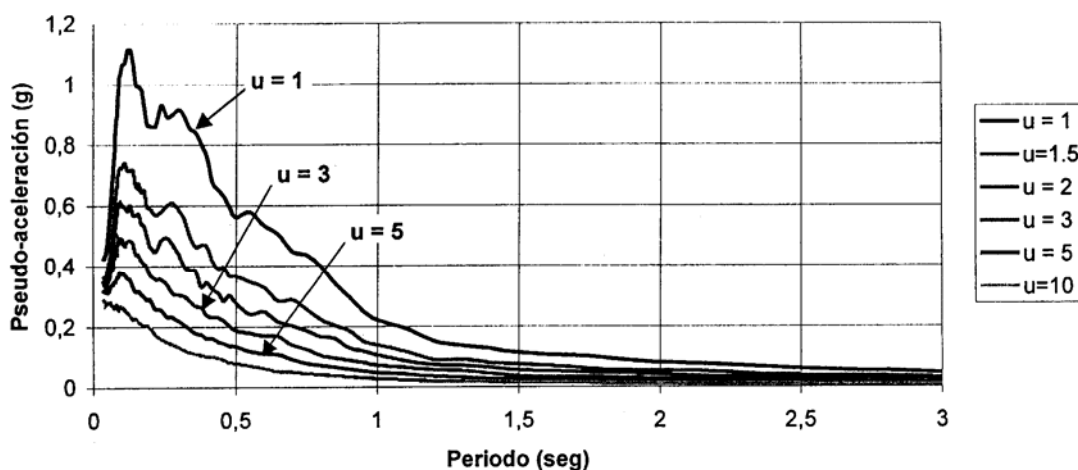


Figura 2. Espectro de pseudo-aceleración para valores de ductilidad de desplazamiento de 1 a 10.

En base a estas curvas se determinó el factor de reducción de fuerza sísmica (R) asociado a cada ductilidad, como el cociente entre la curva correspondiente a comportamiento elástico ($u=1$) y la curva de ductilidad definida. La figura 3 muestra estos resultados para la zona de interés de los edificios de albañilería (periodos menores a 0.4 seg)

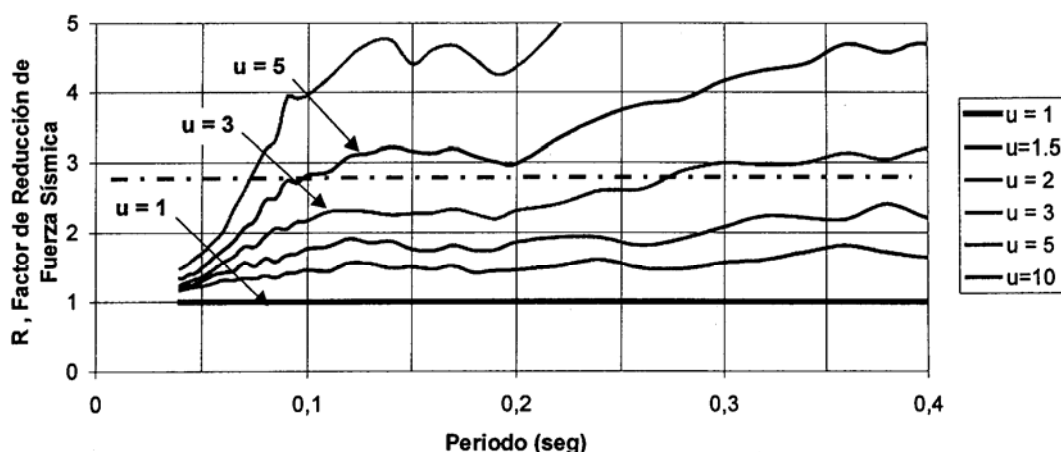


Figura 3. Factores de Reducción de Fuerza Sísmica para valores de ductilidad predefinidos

Como se puede apreciar, para ductilidades entre tres y cinco, el factor de reducción de fuerza sísmica promedio en la zona de interés, varía entre 2 y 4. La línea punteada sugiere el valor $R=3$ como valor representativo de esta zona. De este modo, para las estructuras de albañilería cuya resistencia se obtenga con un valor de $R \approx 3$, se podría garantizar en promedio que no serán expuestas a ductilidades mayores a las que pueden desarrollar.

DEMANDAS DE RESISTENCIA ELÁSTICA EN SISMOS FRECUENTES

La resistencia lateral de las edificaciones de albañilería debe ser tal que garantice el comportamiento elástico frente a sismos frecuentes con la posibilidad de pequeñas incursiones inelásticas durante sismos ocasionales.

Se calcularon espectros elásticos para los 14 acelerogramas escalados a 0.2 y 0.25 g. y luego se obtuvieron los respectivos espectros promedio.

La figura 4 muestra la resistencia lateral promedio requerida según el espectro elástico de la norma Peruana de Diseño Sismorresistente para edificaciones comunes ubicadas sobre suelo duro en la zona 3, empleando valores de $R=2, 2.5$ y 3 . En línea discontinua se muestran las demandas promedio de resistencia de los 14 acelerogramas para valores pico de 0.2 g y 0.25 g.

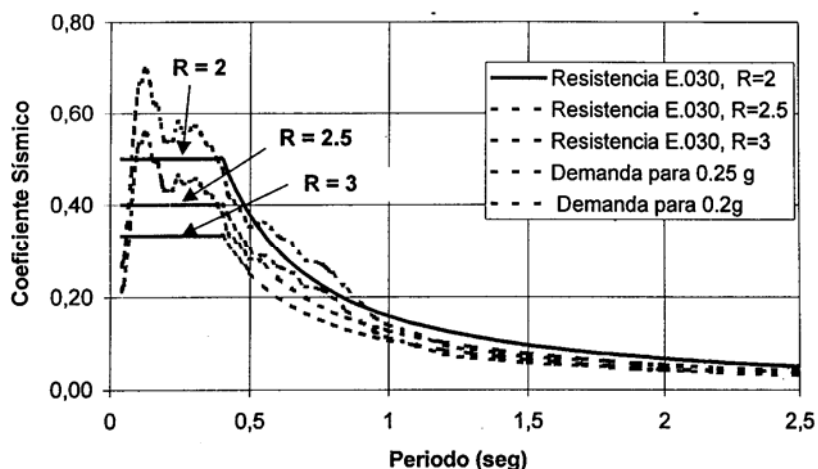


Figura 4. Resistencia de diseño y demandas de resistencia para sismos frecuentes

Como se aprecia, para valores de $R = 2.5$ y $R = 3$ en toda la zona de interés ($T < 0.4$ seg.), las demandas superan la resistencia suministrada. Por otro lado para $R=2$, en casi toda la zona referida, la resistencia suministrada supera la resistencia demandada para un pico de 0.2 g. Por tanto el factor de reducción que garantice un adecuado comportamiento durante los sismos frecuentes debería ser un valor entre 2 y 2.5.

FACTOR DE REDUCCIÓN DE FUERZA SÍSMICA

Como se vio, para limitar las demandas de ductilidad en las edificaciones de albañilería durante sismos severos, bastaría con emplear factores de reducción de $R \approx 3$.

Sin embargo para garantizar que las edificaciones se mantengan “cuasi” elásticas en sismos frecuentes y ocasionales, es necesario emplear valores de R entre 2.0 y 2.5. La figura 5 muestra las demandas de resistencia durante estos sismos junto a la resistencia que se debería suministrar empleando el espectro elástico de la Norma E.030 y un factor de reducción de $R=2.25$.

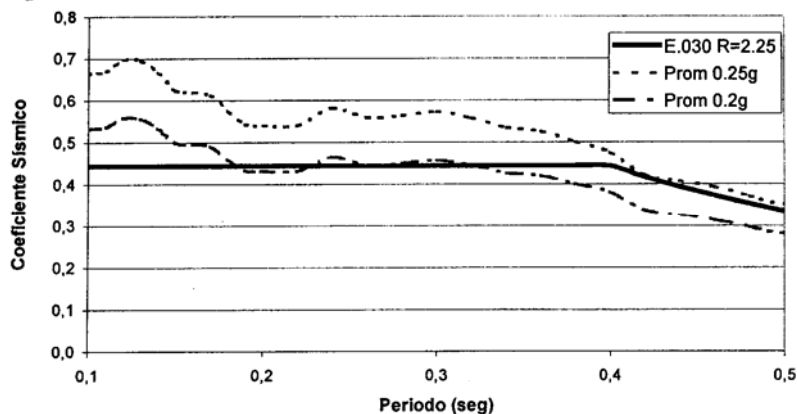


Figura 5. Resistencia de diseño para $R=2.25$ y resistencia requerida por sismos frecuentes

Como se aprecia, al emplear el espectro elástico del código y un factor de reducción de resistencia de 2.25, se pueden obtener estructuras que podrán comportarse elásticamente (en promedio) en sismos con aceleraciones pico de 0.2 g y tendrán pequeñas incursiones inelásticas para aceleraciones pico de 0.25 g.

RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICIOS TÍPICOS DE ALBAÑILERÍA EN EL PERÚ

Se seleccionaron 4 edificios de albañilería confinada de 2 a 5 pisos. Todos los casos corresponden a edificios de vivienda, típicos de la ciudad de Lima. Para el cálculo de la resistencia y rigidez se emplearon los valores indicados en la tabla 2.

| Tabla 2 Propiedades de albañilería confinada en el Perú | |
|--|--------------------------------|
| | VALOR (kg/cm ²) |
| Resistencia característica a compresión axial de pilas f'm | 65 |
| Resistencia característica de muretes en a compresión diagonal v'm | 8.5 |
| Módulo de elasticidad de la albañilería Ea= 500 f'm | 32,500 |
| Módulo de corte de la albañilería Ga= 0.4 Ea | 13,000 |
| Concreto | |
| Resistencia a la compresión f'c | 175 |
| Módulo de elasticidad Ec=15000 ☆f'c | 2.0E5 |

La resistencia lateral del primer entrepiso (VR) de todas estas edificaciones, fue aproximadamente igual al valor de la fuerza cortante elástica según la Norma Peruana Sismorresistente E.030 dividida entre 2.5. La tabla 3 resume las principales características de los edificios, para la dirección analizada. El factor de reducción de fuerza sísmica indicado (R) corresponde al cociente entre demanda elástica de resistencia según la Norma Sismorresistente E.030 y la resistencia lateral del edificio $R = ZUSC P / VR = 0.4 * 1 * 1 * 2.5 P / VR$

| Tabla 3 Características globales de los edificios analizados | | | | | | | |
|---|-------------|---------------------|------------------|-----------------------|----------------------|----------|-------------------------|
| Estructura | Nº de Pisos | Area en Planta (m2) | Peso Total (Ton) | Densidad de muros (%) | Periodo de Vibración | VR (Ton) | R : Factor de Reducción |
| E-2 | 2 | 77 | 151 | 1.9 | 0.14 | 61 | 2.5 |
| E-3 | 3 | 242 | 726 | 3.2 | 0.20 | 304 | 2.4 |
| E-4 | 4 | 166 | 662 | 3.1 | 0.21 | 236 | 2.8 |
| E-5 | 5 | 447 | 2235 | 4.7 | 0.23 | 807 | 2.8 |

Empleando un modelo traslacional de corte, se calculó la respuesta de estas edificaciones usando los acelerogramas de los terremotos de 1966, 1970 y 1974. Como representación de los sismos moderados y severos, estas señales se escalaron a 0.2 g y 0.4 g. respectivamente, se usó en cada caso 5 % y 7 % de amortiguamiento.

En la figura 6 se muestran el coeficientes sísmico obtenido como respuesta elástica de estas edificaciones a las señales sísmicas escaladas a 0.2g.

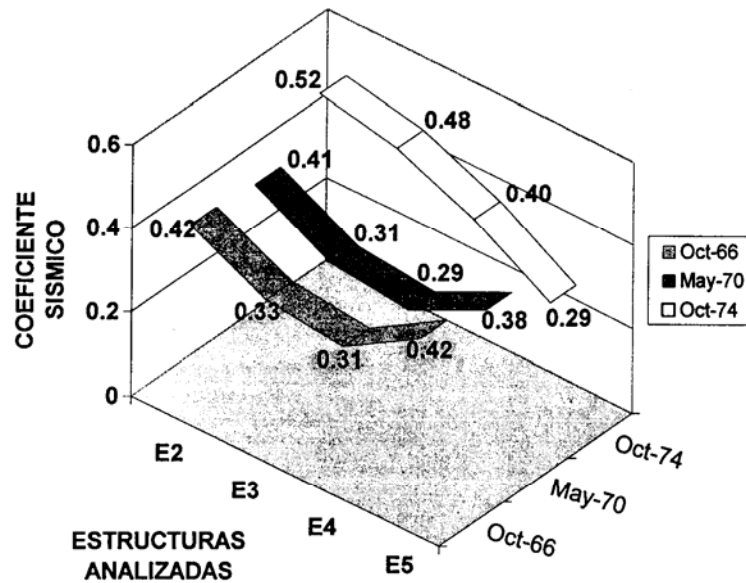


Figura 6. Coeficiente sísmico para sismos frecuentes, aceleración pico del suelo=0.2g

Se observa que en la mayoría de los casos, los valores del coeficiente sísmico son cercanos a 0.4, valor que se obtiene empleando el espectro elástico de la Norma sismorresistente y un factor de reducción de 2.5. Sin embargo para el registro de Octubre de 1974 se aprecian valores mayores (0.48 y 0.52), lo cual sugiere el empleo para R de un valor menor que 2.5.

En cuanto al comportamiento de estas edificaciones frente a los sismos severos, la figura 7 muestra las demandas de ductilidad de desplazamientos en estas estructuras como respuesta a los registros de aceleración escalados a 0.4 g (sismos severos).

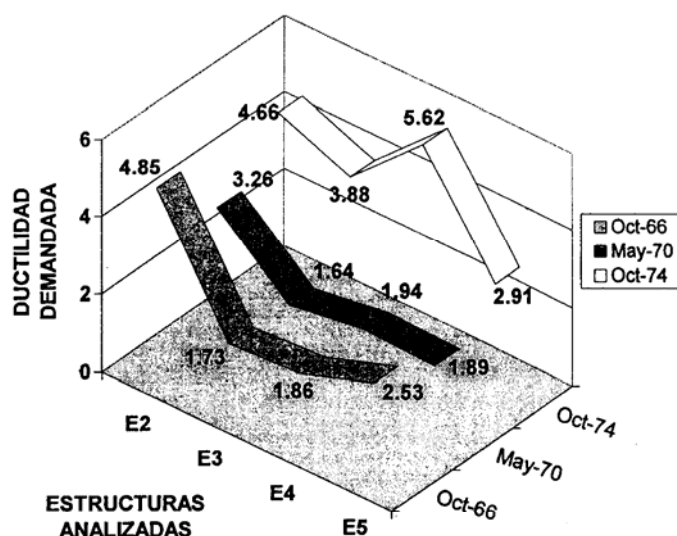


Figura 7. Ductilidad Demandada por sismos severos, $a_{max}=0.4 g$.

Se aprecia que los valores máximos de ductilidad son cercanos a 5, sin embargo en el caso de la estructura de 4 pisos se obtuvo un valor mayor (5.6). Esto se explica por el factor de reducción de fuerza sísmica asociado de $R=2.8$, relativamente elevado.

CONCLUSIONES

- Para controlar las demandas de ductilidad de los sismos severos en edificios peruanos de albañilería, sería suficiente con emplear un factor de reducción del orden de tres, junto a las demandas elásticas de estos eventos.
- La resistencia necesaria para garantizar un comportamiento prácticamente elástico en sismos frecuentes se puede estimar empleando un factor de reducción de fuerza sísmica de 2.3 junto a las demandas elásticas de los eventos severos.
- Para efectos de diseño, la resistencia lateral de las edificaciones de albañilería confinada en el Perú, se puede obtener usando la demanda elástica de los sismos severos junto a un factor de reducción igual a 2.5.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Pontificia Universidad Católica del Perú y al Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción del Perú, SENCICO, por su ayuda en el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

1. Reglamento Nacional de Construcciones, *Norma Técnica de Edificaciones E-070. Albañilería*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Lima, 1997
2. Reglamento Nacional de Construcciones, *Norma Técnica de Edificaciones E-030. Diseño Sismorresistente*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Lima, 1997
3. San Bartolomé Angel “*Construcciones de Albañilería, Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural*”. Fondo Editorial, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, 1999.
4. Gallegos H. “*Albañilería Estructural*”. Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, 1999
5. Structural Engineers Association of California, Vision 2000 Committee, “*A Framework for Performance Based Design*”, SEAOC, California, 1995.
6. Castillo y Alva. “*Peligro Sísmico en el Perú*”. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima 1994.
7. PRISMA INGENIEROS C. A. *Estudios de Riesgo Sísmico*, Archivos, Lima, 1993, 1996, 1997.
8. Muñoz Peláez, Alejandro. “*Ingeniería Sismorresistente*”. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 1999.
9. Takashi Kaminosono. “*Guidelines for Reinforced Masonry Buildings*”, Third Joint Coordinating Committee on Masonry Research , Japón 1987.
10. Muñoz A. y Ledesma M. “*Demandas de Ductilidad y Energía de Terremotos Peruanos*”, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, 1998.