

REVISTA DE LA SECCIÓN
INGENIERÍA CIVIL - PUCP

Edificios peruanos con muros de concreto de ductilidad limitada

DI-SIC-2010- 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07
LIMA, JUNIO 2010

Alfonso de la Piedra, Juan Pablo Herrera, Enrique Pasquel, Ángel San Bartolomé,
Richard Klingner, Adolfo Gálvez, Alejandro Muñoz.



Arquitectura y construcción
Tecnología del concreto
Investigaciones experimentales
Normas internacionales de diseño
Comportamiento sísmico esperado

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS ANTISISMICAS

El Laboratorio de Estructuras Antisísmicas del Departamento de Ingeniería, con más de 30 años de experiencia, cuenta con equipos e instalaciones que permiten la ejecución de ensayos estáticos y dinámicos en especímenes a escala natural o reducida. Se dispone de equipos 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 Pregrado y Postgrado.
- Investigación en materiales locales para mejorar su comportamiento sísmico.
- Servicio técnico para la industria de la construcción, ejecutando ensayos e investigaciones experimentales para evaluar las características del comportamiento de materiales, estructuras y/o de sus componentes.



Los ensayos que habitualmente se realizan son:

- Ensayos mecánicos: compresión, tracción, flexión, compresión diagonal, corte e impacto en distintos materiales y elementos estructurales.
- Carga horizontal monotónica y cíclica en sistemas y componentes estructurales.
- Simulación sísmica en modelos a escala natural y reducida.
- Verificación de equipo de aplicación de carga. Se cuenta con celdas de carga patrón calibradas en el National Standard Testing Laboratory, USA.
- Dosificaciones de mezclas de concreto con y sin aditivo.
- Compresión en probetas estándar de concreto.
- Determinación de la calidad del concreto fresco in-situ.
- Determinación de la calidad y uniformidad del concreto endurecido in-situ mediante probetas diamantinas y esclerometría.
- Evaluación de la capacidad de estructuras mediante pruebas de carga.
- Consultoría en temas de estructuras y de patología estructural en general.

Desde Octubre del 2003 a la fecha, el laboratorio cuenta con Acreditación ISO/IEC 17025 otorgada por el INDECOPI en los siguientes métodos de ensayo:

- Compresión en probetas estándar de concreto (NTP 339.034)
- Extracción y ensayo de testigos diamantinos (NTP 339.059)
- Flexión en vigas estándar de concreto (ASTM C78)
- Resistencia al tránsito en tapas de concreto (NTP 339.111)
- Tracción en varillas corrugadas de acero de refuerzo (ASTM A370)
- Compresión en ladrillos de arcilla (NTP 399.613)

Jefe de Laboratorio: Ing. Ing. Gladys Villa García Medina

Informes

Teléfono: 626-2000 anexo 4640

Fax: 629-2089

e-mail: ledi@pucp.edu.pe

PRESENTACIÓN

Los Edificios de Ductilidad Limitada Peruanos

El sistema estructural de muros de concreto armado, es probablemente el más empleado en los últimos años para la construcción de edificios de vivienda en el Perú. En los edificios de baja altura, hasta 7 pisos, los muros se construyen con características peculiares y se denominan Edificios de Muros de Ductilidad Limitada, EMDL. Debido a su menor tiempo de construcción y a su menor costo, los EMDL se han convertido en una real alternativa de solución al problema de vivienda en el país.

Los edificios de muros de concreto armado permiten reducir el tiempo de construcción gracias al empleo de concreto premezclado, encofrados metálicos y mallas para el acero de refuerzo. La velocidad de construcción, generalmente de 1 departamento por día, junto a la optimización en el uso de recursos y mano de obra, constituyen una clara contribución a la industrialización de la construcción en el país.

Desde la perspectiva de los códigos internacionales, los EMDL son en cierta forma singulares debido al menor ancho de sus muros, a las características de las mallas y hasta la disposición misma del refuerzo. Sin embargo, en opinión de muchos expertos, estos edificios tendrían un desempeño sismorresistente comparable al de los edificios de muros y pórticos que siguen las recomendaciones internacionales.

Esta publicación muestra los aspectos arquitectónicos de los EMDL, presenta temas técnicos relacionados con el proceso constructivo y la tecnología del concreto, además muestra los resultados de investigaciones experimentales y analíticas relacionadas al desempeño sísmico esperado.

Alejandro Muñoz
Coordinador
Sección Ingeniería Civil

CONTENIDO

Presentación	1
Contenido	3
1. Arquitectura	5
2. Construcción	15
3. Tecnología del Concreto	31
4. Investigaciones Experimentales	41
5. Investigaciones teóricas	57
6. Desde la Perspectiva de las Normas Internacionales: USA	79
7. Desempeño Sismorresistente	91



6 DESDE LA PERSPECTIVA DE LAS NORMAS INTERNACIONALES

- **FACTORES DE DISEÑO SÍSMICO
PARA LOS EDIFICIOS DE
DUCTILIDAD LIMITADA**

DI-SIC-2010-06

**Richard Klingner
EE.UU.**

FACTORES DE DISEÑO SÍSMICO PARA LOS EDIFICIOS DE DUCTILIDAD LIMITADA

Por: Richard E. Klingner¹

1. INTRODUCCION

En los últimos años, los llamados “edificios de ductilidad limitada” se han ido construyendo con más frecuencia en la ciudad Lima y sus alrededores. Como se muestra en la Figura 1, tales edificios innovadores se caracterizan por muros continuos de concreto armado; una alta densidad de muros; y por muros delgados (10cm), con una sola capa de refuerzo. Sus ventajas potenciales incluyen economía y rapidez de construcción. Sus diferencias con las construcciones tradicionales han dado a que unos cuestionan su seguridad, en especial contra sismos.

El propósito fundamental de este artículo es plantear un contexto fundamental para juzgar sobre la seguridad y diseño contra sismos de cualquier sistema estructural, incluyendo los edificios de ductilidad limitada. Para este propósito, debemos repasar brevemente el diseño sísmico de estructuras en general.

2. EL DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS

El diseño sísmico de edificios, y la norma vigente de diseño y construcciones que incorpora los criterios mínimos del diseño en un contexto legal, puede destilarse hacia una simple comparación entre la demanda del edificio y su capacidad, donde tanto “demanda” como “capacidad” puede referirse a fuerzas, desplazamientos, deformaciones, u otros índices de respuesta estructural. La norma le dice al calculista cómo calcular la demanda, cómo calcular la capacidad, y bajo cuáles criterios comparar las dos. Además, puede imponer requisitos mínimos de detallado sísmico.

Bajo esta premisa, la lógica nos invita a repasar el estado actual del diseño sísmico de sistemas y materiales establecidos, para luego aplicar criterios consistentes a sistemas y materiales innovadores. Los procedimientos establecidos del cálculo de demanda abarcan la clasificación de la estructura en cierta categoría de diseño (por su ubicación geográfica y uso), que conlleva un espectro de diseño, junto con un factor de reducción de fuerzas elásticas (por la ductilidad y otras características), y con un factor correspondiente de amplificación de desplazamientos elásticos. Los procedimientos establecidos del cálculo de resistencia abarcan la resistencia de los elementos que pertenezcan al sistema bajo consideración (vigas, columnas, muros, conexiones), en los modos de resistencia que sean aplicables a la respuesta estructural (momento, corte, torsión). Los requisitos mínimos de detallado dúctil pueden incluir, por ejemplo, razones de esbeltez locales para secciones de acero, o confinamiento mínimo para elementos de concreto armado, o detalles estándar para la mampostería confinada.

Hoy en día, el mercado constructivo peruano se ocupa de sistemas y materiales que en general cuentan con una historia conocida de comportamiento sísmico, y también con sus normas establecidas de diseño y construcción. Ejemplos incluyen los pórticos de concreto armado o de acero estructural, y los edificios tipo muro de concreto armado o de mampostería confinada. Para tales sistemas, en lo general, los requisitos actuales sobre el cálculo de demanda se basan en una combinación de experiencia, tradición y comparación con otros sistemas conocidos, y los requisitos actuales sobre el cálculo de resistencias y sobre el detallado mínimo se basan en los resultados de ensayos casi-estáticos más la experiencia. Evidentemente, para los materiales conocidos, las normas de diseño son hasta cierto punto un raciocinio circular, cuyos detalles se actualizan por una combinación de ciencia y juicio.

En visto de este trasfondo, uno se puede preguntar, “¿Cuándo se debe considerar un sistema particular como una variante de un sistema históricamente conocido, y cuándo se debe considerar como un sistema nuevo?” Esta pregunta es legítima, pues se debe tener un campo de juego a nivel para todo sistema y material. Entonces, se debe explorar un poco más el concepto de un “campo de juego a nivel”. Los resultados se pueden usar tanto para proponer

¹ **Richard E. Klingner PhD.** Profesor de la Universidad de Texas en Austin. El Dr. Klingner ha realizado investigaciones en respuesta dinámica de estructuras y diseño resistente a los terremotos de albañilería y estructuras de hormigón armado.

normas de diseño para sistemas innovadores, como para variantes a sistemas actuales, y hasta para ver los cambios sobre el tiempo en los sistemas tradicionales.

3. ¿CÓMO LOGRAR UN “CAMPO DE JUEGO A NIVEL”?

En términos del diseño sísmico de estructuras, un campo de juego a nivel se logra con normas sísmicas que conducen a más o menos el mismo grado de seguridad contra pérdida de vida, con más o menos la misma confianza, frente a sismos determinados, para todo sistema y material. En los EEUU, en los últimos años, este requisito implícito se ha traducido en el siguiente requisito explícito:

Las normas de diseño y construcción deben conducir a sistemas estructurales con una probabilidad del colapso, frente al sismo máximo considerado, de menos del 10%.

Esta probabilidad se muestra en forma gráfica en la Figura 2.

Esto implica la siguiente serie de pasos: a.

- a. Establecer los sismos determinados de comparación, y desarrollar juegos idóneos de registros para aquellos sismos.**
- b. Identificar para el sistema estructural bajo consideración las posibles estructuras “arquetípicas”** y colocarlas en forma hipotética en diferentes zonas geográficas del país.
- c. Evaluar mediante ensayos de laboratorio,** la respuesta de los elementos esenciales de las estructuras arquetípicas, y de las estructuras mismas.
- d. Diseñar las estructuras arquetípicas** usando diferentes valores de tanteo del factor de reducción de la respuesta elástica (R), y evaluar sus respuestas.

Con base en las repuestas en función de R proponer valores de diseño, incluyendo los efectos de la sobrerresistencia; de la confiabilidad del juego de sismos de entrada; de la confiabilidad de los resultados de laboratorio; de la confiabilidad de los resultados analíticos; de la confiabilidad constructiva; y de la confiabilidad histórica.

Este enfoque se ha usado en los EEUU para el concreto celular curado en autoclave (Tanner et al. 2005a,b; Varela et al. 2006). En forma más sofisticada, representa el consenso del Proyecto ATC-63 de los EEUU, cuyo informe final se ha publicado en un “borrador del 90%” (ATC-63 2008).

A continuación, se elabora sobre cada paso, en términos generales.

a. Establecer los sismos determinados de comparación.

En los EEUU, el sismo máximo considerado tiene una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años (período de retorno de unos 2,500 años). El sismo de diseño tiene una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años (período de retorno de unos 500 años), y tiene ordenadas espectrales que son dos tercios de las ordenadas del sismo máximo considerado. Utilizando una base de datos de sismos mundiales, hay que escoger un juego amplio de registros que representen la gama eventos, de mecanismos de falla, de distancias focales, y de suelos. Ejemplos de tal base de datos existen ya (PEER 2006), y pueden modificarse según la experiencia local. La selección del juego de registros no depende del sistema estructural bajo consideración. Dentro de cada juego, los registros deben normalizarse para coincidir con las ordenadas espectrales del sismo máximo considerado, en el rango probable de períodos fundamentales de las estructuras arquetípicas que se consideren.

b. Identificar, para el sistema estructural bajo consideración las posibles estructuras “arquetípicas”.

Para un sistema estructural determinado, las posibles estructuras arquetípicas dependen de las características del sistema. Si el sistema es un pórtico, se puede pensar en edificios con diferentes números de pisos, con diferentes niveles de detallado dúctil, con diferentes niveles de carga por gravedad, con diferentes configuraciones en planta y elevación. Las configuraciones en planta y elevación pueden mostrar distribuciones no uniformes de rigidez y resistencia, pero siempre dentro de la gama aceptable, pues las estructuras con grandes disparidades en rigidez y resistencia se castigan en forma separada en las normas. Puesto que casi todo el análisis no lineal actualmente se hace con modelos en el plano, es difícil incluir la presencia de núcleos de ascensores en los pórticos. Generalmente los muros se desprecian en la identificación de estructuras arquetípicas, pero este tema no se ha resuelto todavía.

Para edificios de ductilidad limitada, las estructuras arquetípicas deben simplificarse en líneas de resistencia, transversales y longitudinales, de varios números de pisos. En la dirección transversal, una línea típica de resistencia sería un muro transversal perforado. En la dirección longitudinal, una línea típica de resistencia sería un muro longitudinal (espinal) perforado. Las configuraciones típicas se muestran en la Figura 3.

c. Evaluar, mediante ensayos de laboratorio, la respuesta de los elementos esenciales de las estructuras arquetípicas, y de las estructuras mismas.

Para cada estructura arquetípica, es necesario identificar los elementos esenciales. Para estructuras tipo pórtico, los elementos esenciales son vigas, columnas y nudos viga-columna. Para estructuras tipo muro, y para los llamados “edificios de ductilidad limitada,” los elementos esenciales son muros, de varios aspectos (razones de altura sobre largo en planta), y posiblemente de varias configuraciones de perforaciones en elevación. Hay que ensayar los elementos en laboratorio, bajo combinaciones de carga y protocolos de aplicación de cargas laterales cíclicas alternantes representativas a los vigentes en el mundo real.

- Por ejemplo, para un sistema estructural tipo pórtico, hay que ensayar vigas, columnas, conexiones viga-columna, y pórticos completos. Hay que conocer el comportamiento y la capacidad de deformación inelástica de las rótulas plásticas bajo combinaciones de momento, carga axial y corte. Con base en los resultados, hay que tantear reglas de diseño y detallado para elementos y para sistemas (incluyendo los diafragmas de entrepiso), y reglas de construcción de los mismos.
- Por otro ejemplo, para un sistema estructural tipo muro, hay que ensayar muros bajo combinaciones de carga por gravedad y corte cíclico alternante en el plano del muro. Hay que conocer el comportamiento de muros gobernados por flexión versus muros gobernados por corte. Para aquellos, hay que conocer la capacidad de deformación inelástica de sus rótulas plásticas. Con base en los resultados, hay que tantear reglas de diseño y detallado para elementos y para sistemas (incluyendo los diafragmas de entrepiso), y reglas de construcción de los mismos.
- Por último ejemplo, para un llamado “sistema de ductilidad limitada,” hay que ensayar segmentos de muros y muros enteros perforados bajo combinaciones de carga por gravedad y corte cíclico alternante en el plano del muro. Las probetas que se ensayan tienen que incluir configuraciones representativas de muros transversales y muros longitudinales. Hay que conocer el comportamiento de segmentos y de muros gobernados por flexión versus muros gobernados por corte. Para aquellos, hay que conocer la capacidad de deformación inelástica de sus rótulas plásticas. Con base en los resultados, hay que tantear reglas de diseño y detallado para elementos y para sistemas (incluyendo los diafragmas de entrepiso), y reglas de construcción de los mismos. Un arreglo posible de ensayo para un muro típico de una estructura de ductilidad limitada se muestra en la **Figura 4**.

En cada caso, la identificación de las probetas de interés tiene que informarse por el conocimiento previo sobre elementos y sistemas semejantes. Por ejemplo, en el caso de un llamado “sistema de ductilidad limitada,” es de suponerse los siguientes:

- Las cuantías de refuerzo vertical en los elementos se gobiernan por solicitaciones fuera de plano. En este aspecto, los muros trabajan como losas de dos direcciones, y se pueden simplificar para propósitos de diseño como muros de una dirección, simplemente apoyadas en niveles de entrepiso. La capacidad fuera de plano, bajo combinaciones de momento y carga axial, puede expresarse en términos de un diagrama de interacción, desarrollado con base en la resistencia. Hay que verificar la validez de modelos actuales para este comportamiento. Aspectos de interés son el control constructivo sobre la ubicación (en el peralte fuera del plano de muro) de la única capa de refuerzo.
- La capacidad en el plano de los segmentos y de los muros puede gobernarse o por flexión o por corte. Si es por flexión, se describe mediante el mismo tipo de diagrama de interacción. Si es por corte, se describe mediante ecuaciones que reconocen las contribuciones tanto del concreto como del refuerzo cortante. Aspectos de interés son la deformación disponible del acero cortante (ver abajo).
- La capacidad de deformación inelástica en el plano de los segmentos y de los muros enteros depende de la capacidad de deformación de las rótulas plásticas. Tal capacidad tiene que expresarse analíticamente y comprobarse experimentalmente. Primero, hay que desarrollar enfoques de diseño que aseguran que la sección se domine por tracción, evitando fallas por aplastamiento del talón compresivo. Luego, hay que investigar la deformación inelástica disponible con base en la deformación máxima del acero en tracción. Este último depende de la máxima deformación unitaria disponible del acero, multiplicada por su longitud de desarrollo en los dos lados de una grieta por flexión, pues esta longitud de desarrollo es la longitud efectiva sobre la cual se podrá experimentar la máxima deformación unitaria disponible. Usando, por ejemplo, alambre con una determinada máxima deformación unitaria disponible, entre menor sea el diámetro, menor será la longitud efectiva. Este raciocinio argumenta en contra del uso de alambre de pequeño diámetro como refuerzo, pues su longitud efectiva es muy corta. Para los alambres trefilados (estirados en frío), la combinación de diámetro

pequeño y máxima deformación unitaria pequeña conduce a muy poca deformación disponible, y por lo tanto, a muy poca capacidad de deformación de rótulas plásticas.

- Como se muestra en la Figura 5, siendo la capacidad de deformación unitaria del alambre trefilado el 20% de la del refuerzo corrugado convencional, y siendo su longitud efectiva el 30%, su capacidad de deformación es el producto de estos cuocientes, es decir, alrededor del 6% de la de una varilla convencional.
- La capacidad del sistema completo (conjunto de elementos tipo muro) depende de la habilidad de los diafragmas de entrepiso de transferir sus cargas a los muros. Esto depende del espesor y calidad de la interfase entre diafragma y muro. Aspectos de interés son la limpieza de la interfase, la rugosidad (asperidad) de ella, y su capacidad en cizalle.

Para cada uno de estos aspectos de interés, hay que o desarrollar y verificar modelos de diseño, o adaptar y verificar modelos de diseño actual.

d. Diseñar las estructuras arquetípicas usando diferentes valores de tanteo del factor de reducción de la respuesta elástica (R), y evaluar sus respuestas.

Luego de averiguar la capacidad de los elementos y del sistema que integran, hay que diseñar, en forma hipotética, estructuras que representan las estructuras arquetípicas de arriba. Hay que desarrollar modelos analíticos capaces de reproducir la gama de comportamientos observados experimentalmente.

- Por ejemplo, para un sistema estructural tipo pórtico, hay que tener modelos inelásticas de vigas, columnas, conexiones viga-columna, y pórticos completos. Los modelos tienen que ser capaces de reproducir el comportamiento histerético de cada elemento, con rigidez inicial, envolvente, rama descendiente, y estrangulamiento de lazos. Los modelos tienen que ser capaces de reproducir la degradación por corte.
- Por otro ejemplo, para un sistema estructural tipo muro, hay que tener modelos inelásticas de muros en el plano, capaces de reproducir el comportamiento histerético de cada muro, con rigidez inicial, envolvente, rama descendiente, y estrangulamiento de lazos. Los modelos tienen que ser capaces de reproducir la degradación por corte.
- Por último ejemplo, para un llamado "sistema de ductilidad limitada," hay que tener modelos inelásticas de muros perforados en el plano, capaces de reproducir el comportamiento histerético de cada muro, con rigidez inicial, envolvente, rama descendiente, y estrangulamiento de lazos. Los modelos tienen que ser capaces de reproducir la degradación por corte.

Una vez desarrollados los modelos, hay que usarlos para modelar cada estructura arquetípica. Al principio, las estructuras arquetípicas se diseñan elásticamente, con un factor R igual a la unidad (despreciando la sobre-resistencia). Se diseñan contra el sismo de diseño (período de retorno de 500 años), usando los factores de mayoración de carga y reducción de capacidad. Los modelos analíticos se someten a los juegos de registros previamente seleccionados, y sus respuestas se sintetizan en términos de derivas máximas y deformaciones máximas locales. Comparando estas índices de respuesta con las capacidades máximas de deformación previamente establecidas, se estima el porcentaje de estructuras colapsadas. Este porcentaje es la probabilidad de colapso del sistema, correspondiente a R igual al 1.0. Es de suponerse que los diseños elásticos ($R = 1.0$) van a tener muy poca probabilidad de colapso.

Luego se procede, aumentando el valor supuesto de R. Entre mayor sea R, mayor será el porcentaje de estructuras colapsadas, y también la probabilidad del colapso. Eventualmente, se llega al valor de R que resulta en probabilidades del colapso de unos 10%, frente al sismo máximo considerado. Esto es el valor inicial de R. El valor inicial de R es esencialmente la ductilidad requerida (y disponible) del sistema. Este proceso se indica gráficamente en la Figura 6.

e. Con base en las repuestas en función de R, proponer valores de diseño, incluyendo los efectos de la sobre-resistencia; de la confiabilidad del juego de sismos de entrada; de la confiabilidad de los resultados de laboratorio; de la confiabilidad de los resultados analíticos; de la confiabilidad constructiva; y de la confiabilidad histórica.

Finalmente, el valor inicial de R tiene que modificarse por la sobre-resistencia y la incertidumbre. La modificación por sobre-resistencia es más fácil. La sobre-resistencia de elementos viene de una combinación de sobre-resistencia a nivel de los materiales; de endurecimiento por deformación del acero; de aproximaciones en las ecuaciones de diseño; y de los factores de reducción de capacidad. Normalmente, estos factores, multiplicándose en cadena, igualan a unos 1.5. El valor inicial de R se debe multiplicar por este factor. Por ejemplo, con un valor inicial de R igual a 2.0, el valor modificado sería R igual a 3.0.

Las modificaciones por incertidumbre son más cualitativas.

- Si el proceso anterior se ha llevado a cabo con una base de datos sísmicos muy confiables, no habrá modificación. Si la base es menos confiable, se reduce el valor de R, tal vez dividiéndole por 1.3.
- Si los resultados de laboratorio vienen de una amplia historia de ensayos, no habrá modificación. Si los resultados de laboratorio son más estrechos, o no llegan al mero estado de colapso, se reduce nuevamente el valor de R, tal vez dividiéndole por 1.3.
- Si los modelos analíticos son muy robustos, no habrá modificación. Si son menos robustos, se reduce nuevamente el valor de R, tal vez dividiéndole por 1.3.
- Si la calidad constructiva se asegura mediante normas de construcción y aseguramiento de calidad, no habrá modificación. Si la calidad constructiva es menos segura, se reduce nuevamente el valor de R, tal vez dividiéndole por 1.3.
- Si el record histórico de comportamiento es largo, no habrá modificación. Si el record histórico es corto, se reduce nuevamente el valor de R, tal vez dividiéndole por 1.3.

Así finalmente se llega al valor de R. Se actualiza según la experiencia.

4. ACTUALIZACIONES DESDE HACE UN AÑO

Comenzando hace más de un año, varios colegas peruanos han tomado el reto incorporado en el enfoque arriba planteado, y han propuesto valores de R para los llamados “edificios de ductilidad limitada”²

Estas propuestas han dado lugar a un diálogo técnico de alto orden. Luego de revisar ese diálogo, se sugieren las siguientes preguntas.

- 1) ¿Está el gremio de calculistas de acuerdo sobre la validez general del enfoque planteado en este artículo y seguido por el Ing. Gálvez y otros colegas? Si la respuesta es “Sí,” entonces vale la pena seguir con las demás preguntas. Caso contrario, no podemos proceder hasta no dar con un enfoque de consenso.
- 2) ¿Está el gremio de acuerdo sobre la selección del banco de sismos de “Dios mío,” y sobre la normalización de ellos con base en ordenadas espectrales en el rango probable de períodos fundamentales de cada estructura arquetípica? Si la respuesta es “Sí,” entonces vale la pena seguir con las demás preguntas. Caso contrario, no podemos proceder hasta no dar con una selección de consenso.
- 3) ¿Está el gremio de acuerdo sobre la selección de las estructuras arquetípicas? Si la respuesta es “Sí,” entonces vale la pena seguir con las demás preguntas. Caso contrario, no podemos proceder hasta no dar con una selección de consenso.
- 4) ¿Está el gremio de acuerdo sobre la modelación analítica de cada estructura arquetípica? En esta modelación, creo que los puntos más importantes son la identificación de los elementos principales, y la caracterización fiel de los lazos histeréticos de cada elemento principal bajo las acciones y deformaciones esperadas. En mi parecer, los elementos principales son muros portantes, ligeramente acoplados por diafragmas de entrepiso. Las idealizaciones deben ser capaces de reproducir el comportamiento dominado por flexión, el comportamiento dominado por corte. Las idealizaciones también deben ser capaces de reproducir o por lo menos indicar el deslizamiento. Los valores de amortiguamiento viscoso equivalente no son tan importantes, y pueden tomarse como el 5% en el período fundamental de la estructura. Si la respuesta es “Sí,” entonces vale la pena seguir con las demás preguntas. Caso contrario, no podemos proceder hasta no dar con una modelación de consenso.
- 5) ¿Existen datos experimentales suficientes para justificar la caracterización de los lazos histeréticos de los muros en flexión y en corte? ¿Son las probetas anteriormente ensayadas esencialmente idénticas a los muros que se pretenden construir? ¿Fueron los estados de carga y las condiciones de borde adecuados para provocar los diferentes modos de falla (flexión, corte, deslizamiento) que se esperan en el mundo real? ¿Fueron las historias de cargamento adecuadas para representar los efectos de sismos, y adecuadas para indicar la máxima capacidad de deriva? ¿Fueron los ensayos suficientes para mostrar cada posible modo de falla importante del sistema entero? Si la respuesta es “Sí,” entonces vale la pena seguir con las demás

² **Gálvez Villacorta**, Adolfo Guillermo, “Propuesta del Factor de Reducción de Fuerza Sísmica para Sistemas Estructurales en Concreto Armado con Muros Reforzados por Barras Dúctiles y Mallas Electro-soldadas,” Lima, Perú, 2008.

preguntas. Caso contrario, no podemos proceder hasta no desarrollar una lista específica de los ensayos necesarios. No podemos decir solamente, "Necesitamos más ensayos." Siempre puede haber más ensayos, pero la exigencia de un número semi-infinito de ellos es una barrera infranqueable.

- 6) ¿Está el gremio de acuerdo que la modelación de los elementos principales representa fielmente sus características experimentalmente determinadas (rigidez, envolvente de capacidades, rama descendiente, estrangulamiento, deformación máxima)? Si la respuesta es "Sí," entonces vale la pena seguir con las demás preguntas. Caso contrario, no podemos proceder hasta no modificar los modelos analíticos en forma apropiada. Este paso es muy penoso, pues exige meterse en los detalles de la modelación.
- 7) ¿Está el gremio de acuerdo sobre el valor inicial de R que se obtiene mediante el enfoque de arriba, despreciando la sobre-resistencia y las incertidumbres? En un sentido, este paso podría considerarse una formalidad, pues habiendo sido satisfecho cada punto anterior, uno no pensaría tener problema aquí. Sin embargo, es importante considerar la robustez global del análisis. ¿Qué tan sensible son los resultados analíticos a cambios razonables en las propiedades supuestas de los elementos? ¿Qué tan capaz es el análisis de reproducir los probables o concebibles modos de falla del sistema entero? En términos laicos, este paso puede describirse como una "prueba de olfato." Si la respuesta es "Sí," entonces vale la pena seguir con las demás preguntas. Caso contrario, no podemos proceder hasta no identificar precisamente los puntos de desacuerdo.
- 8) ¿Está el gremio de acuerdo sobre la probable sobre-resistencia de sistema? Este punto no es muy difícil, pero vale la pena averiguar. Si la respuesta es "Sí," entonces vale la pena seguir con las demás preguntas. Caso contrario, no podemos proceder hasta no estar de acuerdo sobre una sobre-resistencia apropiada.
- 9) ¿Está el gremio de acuerdo sobre las probables incertidumbres de entrada sísmica, de modelación, y de variaciones constructivas? Si la respuesta es "Sí," entonces vale la pena seguir con la última pregunta. Caso contrario, no podemos proceder hasta no esclarecer y resolver los puntos de desacuerdo.
- 10) Finalmente, ¿qué tal coincide el valor final de R con los valores actuales para construcciones similares? Desajustes muy grandes pueden implicar fallas en el valor derivado mediante este enfoque, o fallas en los demás valores. Sea cual sea la causa, vale la pena averiguar.

5. COMENTARIOS DE CIERRE

En este artículo, se ha procurado poner el tema de los llamados "edificios de ductilidad limitada" en un contexto global idóneo. En realidad, todo sistema estructural tiene ductilidad limitada por uno u otro motivo. Las normas apropiadas y factores apropiados de diseño sísmico deben desarrollarse de una manera uniforme para todo sistema estructural, con el fin de tener probabilidades aceptables de colapso y más o menos uniformes frente al sismo máximo considerado. Estos comentarios representan una síntesis del actual estado del arte en los EEUU, referente al tema y se les ofrece a la consideración y juicio sano de mis colegas peruanos.

REFERENCIAS

ATC-63: <http://www.atccouncil.org/atc63.shtml>. (2008)

MSJC: MSJC Code and Specification: ACI 530-05 / ASCE 5-05 / TMS 402-05 (Building Code Requirements for Masonry Structures) and ACI 530.1-05 / ASCE 6-05 / TMS 602-05 (Specifications for Masonry Structures), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan; American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia; and The Masonry Society, Boulder, Colorado. 2005.

MSJC: MSJC Code and Specification: TMS 402-08 / ACI 530-08 / ASCE 5-08 (Building Code Requirements for Masonry Structures) and TMS 602-08 / ACI 530.1-08 / ASCE 6-08 (Specifications for Masonry Structures), The Masonry Society, Boulder, Colorado; American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan; and American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia. 2008.

PEER: PEER NGA Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, <http://peer.berkeley.edu/nga/>. 2006.

Tanner et al. (a): Tanner, J.E., Varela, J.L., Klingner, R.E., "Design and Seismic Testing of a Two-story Full-scale Auto-claved Aerated Concrete (AAC) Assemblage Specimen," Structures Journal, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, vol. 102, no. 1, January - February 2005, pp. 114-119. 2005.

Tanner et al. (b): Tanner, J.E., Varela, J.L., Klingner, R.E., Brightman M. J. and Cancino, U., "Seismic Testing of Auto-claved Aerated Concrete (AAC) Shear Walls: A Comprehensive Review," Structures Journal, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, vol. 102, no. 3, May - June 2005, pp. 374-382. 2005.

Varela et al.: Varela, J. L., Tanner, J. E. and Klingner, R. E., "Development of Seismic Force-Reduction and Displacement Amplification Factors for AAC Structures," EERI Spectra, vol. 22, no. 1, February 2006, pp. 267-286. 2006.



Figural. Fachada típica de un edificio de ductilidad limitada

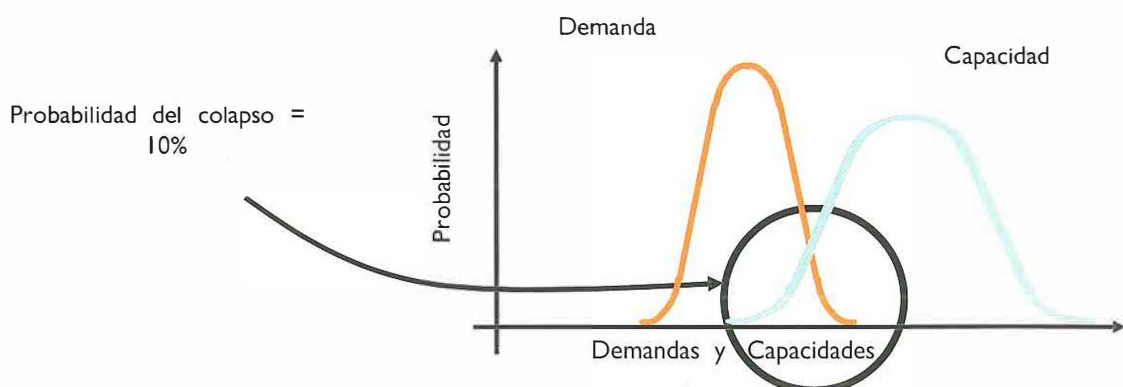


Figura 2. Representación gráfica de una probabilidad del colapso del 10%

Figura 4. Arreglo posible de ensayo para un muro típico de una estructura de ductilidad limitada

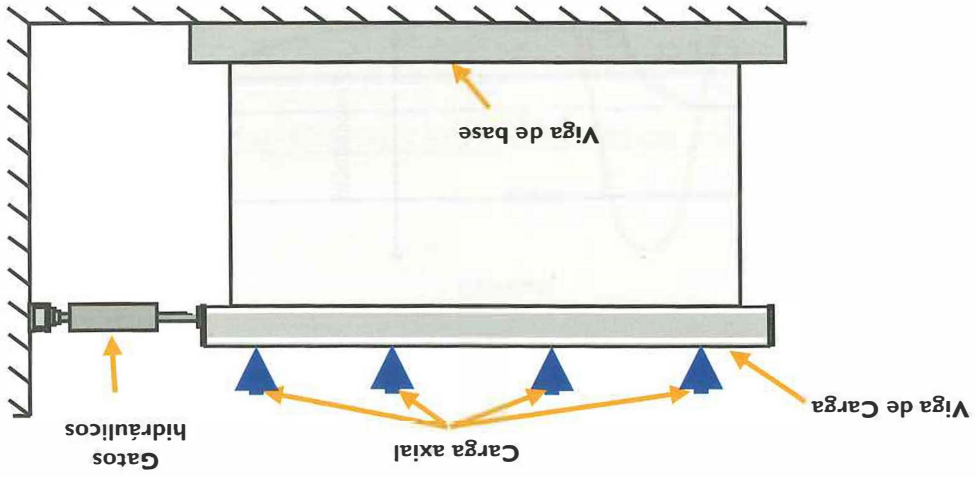
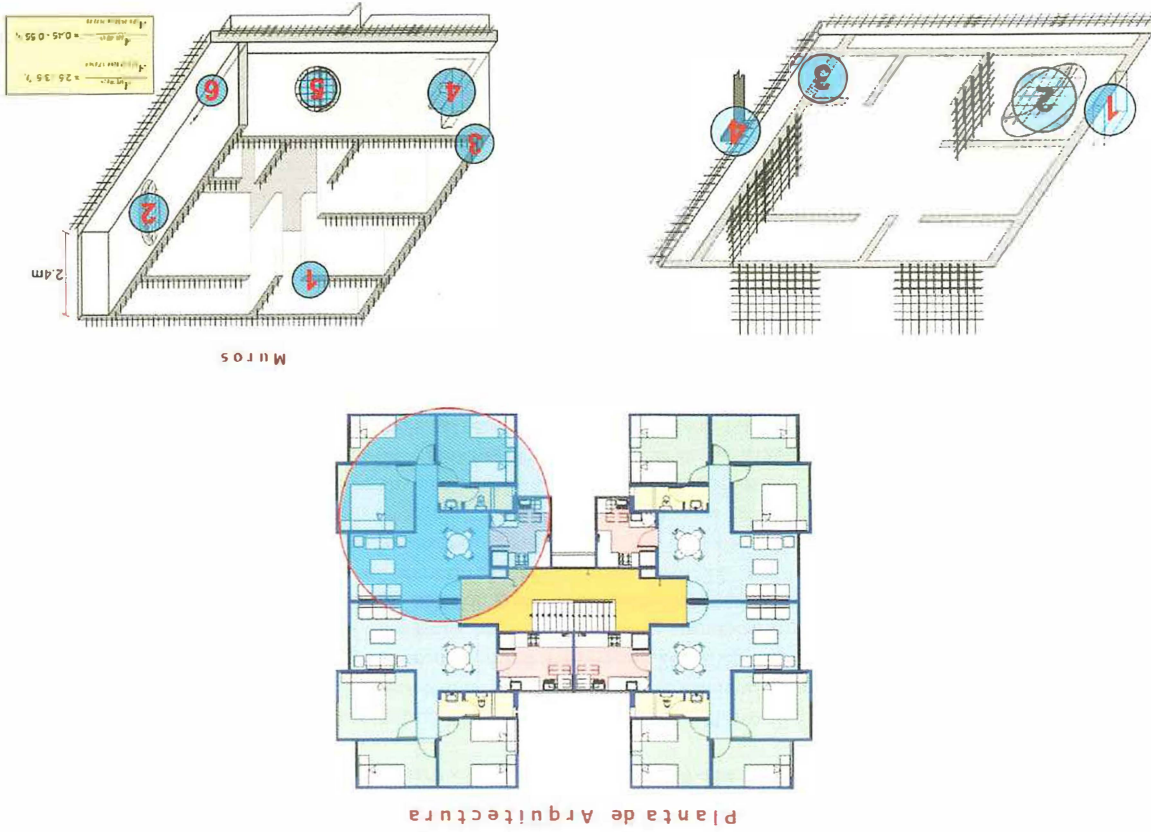


Figura 3. Configuraciones típicas de los edificios de ductilidad limitada



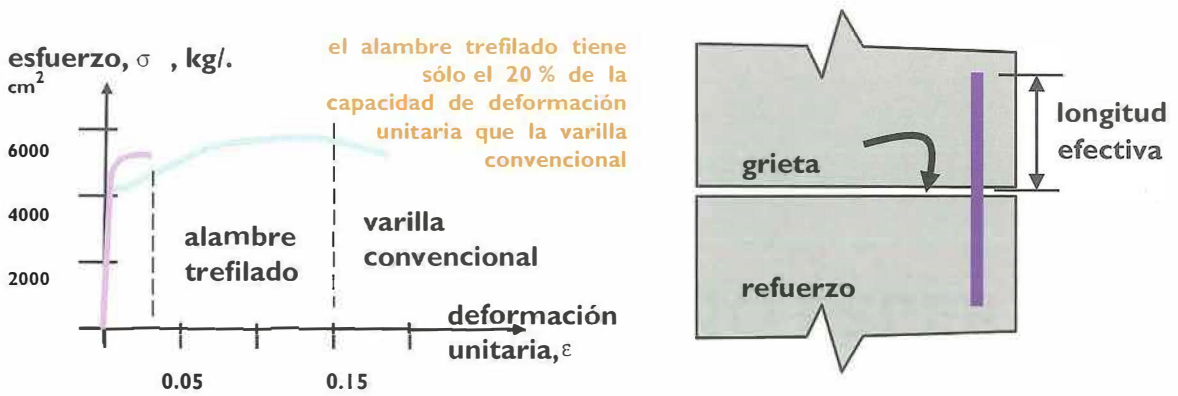


Figura 5. Conceptos de deformación unitaria disponible y longitud efectiva disponible del alambre trefilado

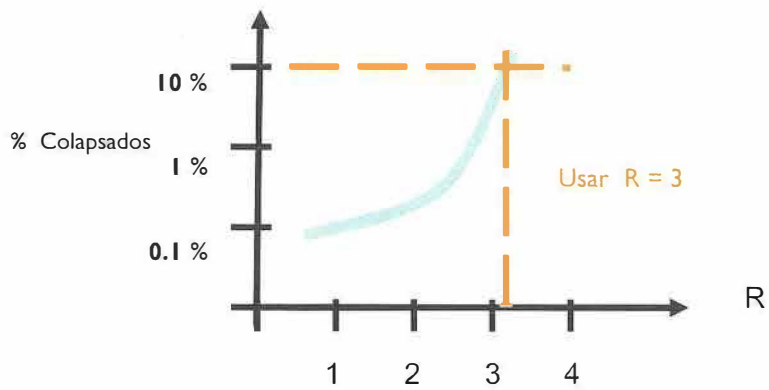


Figura 6 Relación entre valores tanteados de R y la probabilidad de colapso estructural frente al sismo máximo considerado

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

El Laboratorio de Mecánica de Suelos fue creado en el año 1966, a partir de una donación de equipos que hiciera la Dirección de Caminos del entonces Ministerio de Fomento y Obras Públicas a nuestra Universidad. Estos equipos fueron destinados fundamentalmente para la docencia; instalados y calibrados conjuntamente por personal de la Universidad y del Ministerio, con la colaboración de un experto de la Misión Renardet. El área de Laboratorio de Mecánica de Suelos, incluyendo oficinas es de 738m².



de la construcción de edificaciones, presas, carreteras, puertos, aeropuertos, canales, etc.; así como también a los proyectos relacionados con minería en lo referente a obras civiles y relaveras.

Con el transcurrir del tiempo, el laboratorio se fue equipando con recursos propios de la Universidad, con equipos modernos y con tecnología de punta; para realizar actividades docentes; de investigación, y de servicio de apoyo a la industria



Además de los equipos usuales para determinación de las propiedades índice, hidráulicas, de compresibilidad de los suelos, de las propiedades para el diseño de vías de comunicación y de las características de los agregados; el laboratorio cuenta con un equipo triaxial con marco de carga de 50 KN y celdas de 35mm, 50mm, 70mm y 100mm; sistema de aplicación de presión constante, aplicación de contrapresión, medición de cambio de volumen y un equipo para corte directo controlados por un sistema digital de 16 canales con sistema de adquisición de datos electrónico. Todo este sistema se encuentra controlado mediante una microcomputadora; que permite controlar el proceso de los ensayos.

Actualmente, el laboratorio cuenta con 13 celdas para los ensayos triaxiales, que permite trabajar varios especímenes en forma simultánea. Adicionalmente, a los ensayos triaxiales rutinarios No Consolidado No Drenado, Consolidado No Drenado y Consolidado Drenado de compresión, también disponemos de equipos para realizar ensayos de Extensión Triaxial.

Además de ensayos, el laboratorio realiza Estudios de Mecánica de Suelos de acuerdo a la Norma NTE E-050 para el diseño de cimentaciones; y Diseño de Pavimentos, peritajes y evaluaciones forenses geotécnicas.

El personal profesional y técnico del laboratorio cuenta con más de treinta años de experiencia y está capacitado para una rápida respuesta a quienes desarrollan, ejecutan y supervisan proyectos de ingeniería civil, minería y de la industria en general, proporcionando asistencia en el área de geotecnia en forma eficaz, independiente e imparcial.



Los principales servicios que realiza el laboratorio son:

- Ensayos de mecánica de suelos para determinación de propiedades índices
- Ensayos para control de calidad de los materiales que se emplearán para la fabricación de concreto, y materiales para la construcción de pavimentos
- Ensayos para la determinación de las propiedades físico-mecánicas e hidráulica de los suelos
- Estudios de Mecánica de Suelos y Diseño de Pavimentos
- Peritajes y evaluaciones forenses geotécnicas de cimentaciones y en general consultoría relacionada a la especialidad de ingeniería geotécnica.

Jefe de Laboratorio: Ing. Manuel Olcese Franzero

Informes:

Teléfono: 6262000 anexo 4651

Fax: 6262837

e-mail: suelos@pucp.edu.pe