

# Comportamiento y mejoramiento sísmico en zonas de ladera

*Introducción. Comportamiento y rehabilitación en zonas escarpadas. Vistas de fallas en edificaciones en ladera.*

## Introducción

### Referencia

Wikipedia. *Seismic retrofit*. The page was last modified on 13 September 2009.

### Mejoramiento sísmico

Propiamente se trata de los cambios en las estructuras existentes destinados a mejorar su desempeño frente a acciones sísmicas. Los cambios pueden aplicarse también a movimientos y fallas de suelos derivadas de la actividad sísmica. La necesidad de tal mejoramiento se justifica por el mayor conocimiento que se tiene de las solicitaciones sísmicas y el comportamiento de las estructuras, lo cual puede convertir en inadecuados los códigos pasados y los diseños basados en éstos.

### Estrategias de mejora



**EJEMPLOS DE MEJORAMIENTO SÍSMICO**

- Incremento de la capacidad global de la estructura.
- Reducción de la solicitación sísmica que llega a la estructura al adicionarle sistemas de aislamiento o de amortiguación.
- Incremento de la capacidad local y seleccionada de elementos de la estructura.
- Introducción de un cambio de estrategia especialmente referida a la mayor ductilidad de la estructura. O mejoramiento de la distribución de elementos resistentes al corte.

## Objetivos de desempeño para la mejora

- Seguridad del público. La estructura no colapsará y puede ser evacuada con seguridad.
- Supervivencia de la estructura. Además de no colapsar y permitir su evacuación, la estructura quedará en una situación en que podrá ser reparada (esto es, no necesariamente reemplazada).
- Funcionalidad de la estructura. Es el caso típico de hospitales, cuya estructura debe permanecer sin dañar, excepto por daños menores que incluso no impiden su funcionalidad primaria.
- Estructura sin afectar. Es el caso de estructuras de alto significado histórico y cultural.

## Comportamiento y rehabilitación en zonas escarpadas

### Referencia

Drianfel E. Vásquez, Ricardo R. López y Luis E. Suárez (Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico). *Comportamiento sísmico y rehabilitación de residencias soportadas en columnas y localizadas en terrenos escarpados*. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Abril, 2003.

La investigación a que se refiere el artículo está destinada a estudiar el comportamiento y la rehabilitación sísmica de residencias típicas localizadas en laderas o terrenos escarpados y soportadas por columnas gravitatorias en Puerto Rico. La geometría típica para el análisis se obtuvo por muestreo de datos levantados a través de la isla. Debido a la topografía irregular en donde están localizadas las viviendas, el análisis sísmico fue efectuado tanto con parámetros estándares de diseño como con la inclusión de la amplificación sísmica provocada por la irregularidad de la topografía. Se efectuaron análisis no lineales mono-tónicos y dinámicos transitorios. Se emplearon varios indicadores de falla. Además, se proporcionan recomendaciones mínimas para una rehabilitación sísmica confiable.



**RESIDENCIAS TÍPICAS CONSIDERADAS EN EL ESTUDIO**

### Introducción

Los estudios sísmicos previos en Puerto Rico indican que las irregularidades en la topografía aumentan y amplifican considerablemente las ondas sísmicas. Esta topografía se expresa en laderas, escarpados y colinas o promontorios que ocasionan alteración y difracción de las ondas lo cual provoca una amplificación en la aceleración del suelo. Esta situación se

complica porque las residencias están construidas sobre columnas muy esbeltas. Pese a ello, el código de Puerto Rico (1997), adoptado del de Estados Unidos, no considera estos efectos. Es más, la mayoría de estas edificaciones fueron construidas antes de 1980, en las cuales la acción sísmica no fue considerada en el diseño.

La investigación desarrolló una metodología para determinar las posibles formas de falla o colapso, la misma que considera diferentes criterios de falla (como formación de mecanismos de colapso, excedencia de desplazamientos entre pisos, máxima capacidad estructural de los elementos, máxima rotación de los elementos, y cambios en las propiedades dinámicas). Se desarrollaron dos criterios nuevos: cambios en la matriz de rigideces y en el periodo fundamental de la estructura.

También la investigación examina posibles métodos para la rehabilitación. Verificada su efectividad, se elaboraron tablas basadas en el tamaño de los elementos, el largo libre entre columnas, y la altura de entre piso, como base para elegir el sistema correcto de rehabilitación.

### Visitas de campo



**SISTEMA TÍPICO DE RESIDENCIAS EN LADERA Y COLUMNAS ESBELTAS**

#### ◆ Características de las viviendas

Se visitaron 24 residencias localizadas en diferentes zonas de la isla. Se midieron: los largos libres entre columnas, el número de vanos, el número de pisos, la altura de las columnas, las secciones transversales de columnas y vigas incluyendo las configuraciones de varillas longitudinales y transversales. El resumen es el siguiente.

#### Resumen de las características geométricas estudiadas

Característica	Rango	Número de residencias
Altura de las columnas	De 2.4 a 3.7 m	12
	De 3.7 a 4.9 m	6
	De 4.9 a 6 m	3
	Más de 6 m	3
Largos libres entre columnas	De 2.4 a 3.7 m	12
	De 3.7 a 4.9 m	11
	Mayores de 4.9	1

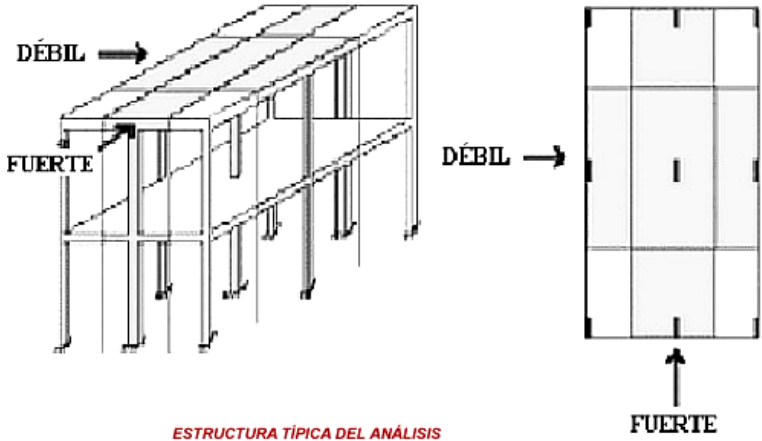
Secciones transversales	De 150 x 300 mm a 150 x 450 mm	7
	De 200 x 300 mm a 250 x 250 mm	8
	De 300 x 300 mm	9

El número de pisos de las residencias es de 2, excepto una que tiene 3 pisos.

En todas las secciones el arreglo del refuerzo es de 6 varillas #4 o #5, y los estribos de tamaño #3 espaciado a 200 mm.

◆ **Pórticos analizados**

En vez de analizar cada vivienda, se crearon 24 modelos de residencias con características extremas (desde las más flexibles a las más rígidas). Así, la estructura más rígida está basada en las propiedades de las viviendas con las secciones más grandes, los largos libres más cortos, y las columnas más cortas. Criterio similar para las estructuras más débiles y para las intermedias.



**Análisis inicial de la vulnerabilidad de la estructura**

El análisis comenzó con el uso del Método del Espectro de Capacidad (ATC-40 *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Seismic Safety Commission. State of California. November 1996), el mismo que utiliza un espectro de demanda y termina en un gráfico de aceleraciones espectrales - desplazamientos espectrales. El análisis permite establecer un *punto de desempeño* de la estructura respecto a la demanda, indicando el caso en que la estructura no es capaz de resistir la demanda del sismo.

Empleado este método para el espectro de diseño empleado en el código de Puerto Rico para suelos rocosos y suelos blandos, se concluyó que *ninguno de los 24 modelos de residencias sería capaz de resistir dicha demanda*. El reporte aclara que el análisis inicial no incluye la amplificación sísmica derivada de la topografía.

**Deficiencias encontradas en las viviendas**

- Las columnas son más débiles que las vigas adyacentes, creando un mecanismo de piso débil en la primera planta de las viviendas.

- El empalme de varillas longitudinales de las columnas ocurre en las zonas potenciales de formación de articulaciones plásticas.
- El refuerzo transversal en las columnas y vigas es poco, disminuyendo la capacidad de deformación de las secciones.
- Poco o ningún acero transversal de refuerzo en las conexiones de viga y columna.
- Discontinuidad del acero longitudinal de las vigas (para el momento positivo en las conexiones de viga y columna).

### **Espectros amplificados**

Para la investigación, y a falta de registros de sismos fuertes en la isla, se generaron cuatro registros artificiales, dos de los cuales permiten la inclusión de amplificación sísmica por condiciones topográficas locales. Un estudio anterior utilizado para este propósito, estableció que el máximo factor de amplificación es de 2.35.

Los análisis efectuados permiten investigar los siguientes indicadores de falla o colapso, a través del tiempo:

- Los desplazamientos de entrepisos.
- La rotación última de los elementos.
- Las fuerzas internas en los elementos.
- Los mecanismos de colapso.

### **Resultados**

Se encontró que todos los modelos presentaron colapso, y que la causa principal en las 24 residencias típicas se debe a que no cumplió el criterio de rotaciones últimas.

### **Sistema de rehabilitación**

Se evaluaron cuatro posibles estrategias de rehabilitación de las residencias, como sigue.

- **Reducción de la demanda sísmica.** Esta reducción implica el uso de aisladores de base o la incorporación de amortiguadores (viscosos o visco-elásticos). Para la condición económica de los residentes, esta solución fue considerada impráctica.
- **Mejoramiento o aumento de la ductilidad.** Esto implica aumentar o mejorar la ductilidad del sistema, sin necesidad de aumentar significativamente la capacidad de la estructura. Se puede lograr mediante el encapsulamiento o confinamiento de las columnas con diferentes materiales. Como resultado, los elementos son capaces de mantener su capacidad estructural frente a deformaciones últimas mayores. Es útil esta alternativa en la dirección fuerte de las viviendas, pero en la otra dirección, el análisis indica que la demanda de ductilidad es demasiado grande para ser obtenida por este sistema.
- **Rigidización y robustecimiento con aumento de ductilidad.** Este sistema puede obtenerse con el uso de arriostres de acero que rigidizan y robustecen las estructuras. Mientras que el aumento de ductilidad se puede obtener cortando varillas en las vigas, y cambiando así el problema de piso débil. Sin embargo, por las pocas varillas que poseen las secciones (dos arriba, dos en el centro, y dos abajo) no es posible cortar alguna de ellas.

- **Rigidización y robustecimiento.** Esto se puede conseguir con el uso de paredes de carga interiores. Estas aumentan ambos factores y reducen significativamente la demanda de ductilidad (en rotaciones, desplazamientos, y desplazamientos entre pisos).

De las alternativas, fue escogida la última al considerarse viable en términos de costos y facilidad de construcción. Con una o dos paredes de carga agregadas al modelo de la vivienda, se llevaron a cabo los análisis para verificar que no se cumpla ninguno de los indicadores de falla previamente señalados.

El estudio indica que los resultados se aplican de la siguiente manera. Dados el largo libre, la altura de las columnas, y los tamaños de las secciones, se obtiene el tamaño de la pared, y los refuerzos de tipo transversal y longitudinal para la rehabilitación. Además la investigación base del artículo proporciona detalles para: las cimentaciones, las conexiones de la pared con la estructura existente, las especificaciones de materiales, las condiciones del suelo, y las limitaciones que deben considerarse.

## Vistas de fallas de edificaciones en ladera

### Referencia

Howard Cook. *Bay Area Retrofit. Residential and Commercial Seismic Retrofits. Structural Evaluations and Hazard Analysis.*  
<http://www.bayarearetrofit.com/Hillside1/hillside1.html>. Updated: August 24, 2009.



El autor resalta las ventajas visuales o paisajistas que se obtienen por vivir en las partes altas de una colina o ladera. Pero igualmente, enfatiza los riesgos diversos que esta localización ocasiona, especialmente ante eventos sísmicos. En la imagen, se distingue una zona de destrucción de casas. También señala el hecho de que mientras algunas fallan, otras se mantienen en pie ante el mismo evento. Ello, independiente de las fechas de construcción. Esto obligó a la autoridad pertinente de Los Ángeles a emitir *Regulaciones de Emergencia para Nuevas Construcciones en Ladera*.

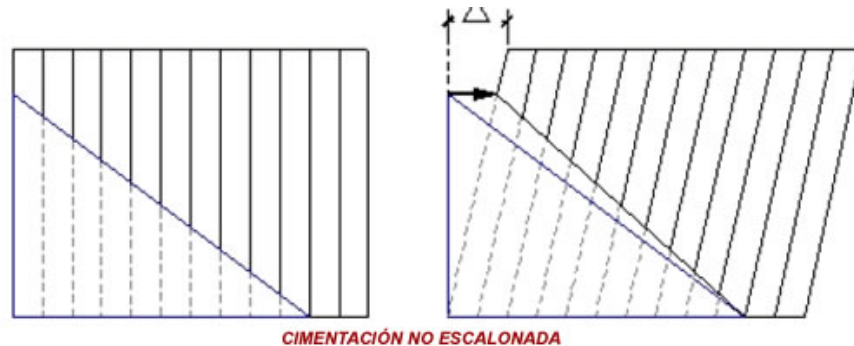
También señala el autor que la forma irregular de la estructura adaptada a la pendiente de la ladera involucra diversidad de rigideces por diferencias de alturas.

◆ **Cimentaciones escalonadas**

Los paneles de menor altura, al ser más rígidos, absorben mayor energía sísmica, lo que ocasiona su falla. De ahí continúa la secuencia progresiva de fallas.



◆ **Cimentaciones sin escalones**



La falla típica corresponde a un giro en el panel tomando como centro la parte más baja. Sin embargo, no es el único tipo de falla.



◆ **Diversas formas de desplazamiento y rotación**

Estas variaciones, según ilustra el autor, dependen del sentido preponderante del movimiento sísmico, y por supuesto de las condiciones de la edificación.

