# REHABILITACIÓN SÍSMICA DE PÓRTICOS DE ACERO RESISTENTES A MOMENTO CON CONEXIONES POSTENSADAS Y ELEMENTOS DE FRICCIÓN

Martha Caballero[1], Pedro Rojas C. [2], James M. Ricles[3], and Richard Sause[3]

[1]Ingeniero Civil 2005, Escuela Superior Politécnica del Litoral.
[2]Director de Tesis, Ingeniero Civil, Universidad Católica Santiago de Guayaquil, 1989, Doctorado USA, Lehigh University, Bethlehem-PA, 2003. Profesor de ESPOL desde 2004, e-mail: per2@ecua.net.ec
[3]Lehigh University, Bethlehem-PA, USA.

## ABSTRACT

This paper describes the use of a post-tensioned friction damped connection for the seismic retrofit of existing steel moment resisting frames. The connection features post-tensioned (PT) high strength strands running parallel to the beam with friction dampers located on the beam flanges. The connection minimizes inelastic deformation to the components of the connection as well as the beams, columns, and panel zones, and requires only fillet field welding for renovating existing construction.

## RESUMEN

El presente artículo describe el uso de una conexión postensada con elementos de fricción (CPEF) para la rehabilitación sísmica de pórticos de acero resistentes a momento (PARM). La conexión utiliza torones postensados (PT) de alta resistencia ubicados en forma paralela a la viga, los cuales son postensados después de que los elementos de fricción son instalados en las alas de la viga. La conexión minimiza la deformación inelástica a las componentes de la conexión así como las vigas, columnas y zonas de panel y no requiere soldadura de campo en el caso de edificios nuevos.

## INTRODUCCIÓN

El desempeño inadecuado de pórticos de acero resistentes a momento (PARM) en recientes terremotos ha causado mucha preocupación. Durante el Terremoto de Northridge de 1994, muchos edificios con pórticos de acero sufrieron fracturas prematuras inesperadas en sus conexiones soldadas. La ocurrencia de estas fracturas prematuras originó la revisión de la práctica del diseño y la construcción para edificios con PARM. La investigación reciente en esta área ha proporcionado nuevos detalles para la construcción de PARM, pero estos nuevos detalles son muy costosos de fabricar. Adicionalmente, el uso de la conexión estándar para PARM normalmente resulta en daño y deriva permanente en el PARM luego de un sismo severo.

Como una alternativa para edificios con conexiones soldadas, Rojas (2003) desarrolló una conexión postensada con elementos de fricción (CPEF) para el uso en PARM. La conexión utiliza torones postensados (PT) de alta resistencia (Figura 1(a)) ubicados en forma paralela a la viga, los cuales son postensados después de que los elementos de fricción son instalados en las alas de la viga (Figura 1(b)).

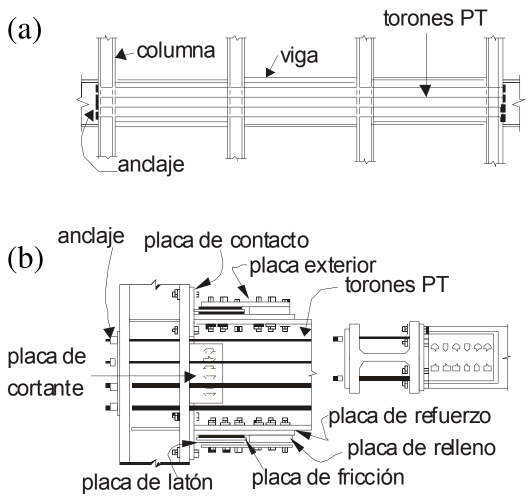


Figura 1. Elevación típica de (a) un piso de un PARM con CPEF y (b) detalles de conexión.

Los elementos de fricción consisten en una placa de fricción intercalada entre dos placas de latón, las que a su vez se insertan entre la placa de refuerzo y exterior. Agujeros de ranura larga son taladrados en la placa de fricción. Todas las placas están empernadas a las alas de las vigas. La placa de fricción está adherida al ala de una Te estructural que también sirve como placa de relleno. La fricción se genera cuando las alas de la viga y de la placa exterior se deslizan contra la placa de fricción estacionaria cuando la viga rota alrededor de su centro de rotación situado a la mitad del espesor de las placas de refuerzo (ver Figura 2).

Una CPEF diseñada apropiadamente tiene varias ventajas: (1) no es necesaria la soldadura de campo (para el caso de edificaciones nuevas); (2) la conexión es ejecutada con materiales convencionales; (3) la conexión tiene una rigidez inicial similar a aquella de una conexión soldada; (4) la conexión es auto-centrante sin deformación permanente; y (5) los elementos de fricción disipan la energía proveniente del sismo por lo que las columnas y las vigas permanecen prácticamente elásticas.

## Comportamiento a Flexión de una CPEF

La Figura 2 muestra la curva idealizada momento-rotación relativa (M-$\theta_r$) para una CPEF cuando está sujeta a carga cíclica. El comportamiento está caracterizado por la apertura y cierre de una abertura en la entrecara viga-columna. Ante la aplicación de un momento, la conexión inicialmente se comporta como una conexión totalmente restringida (TR), en donde la rigidez inicial es similar a aquella de una conexión a momento soldada totalmente restringida cuando $\theta_r$ es igual a cero (eventos 0 a 2 en la Figura 2). El momento aplicado que origina la abertura de la conexión (evento 2) es resistido por el momento producido por la fuerza inicial de postensado en los torones y la componente de la fricción desarrollada en el ala a tensión de la viga. La rigidez de la conexión después de la abertura está asociada con la rigidez axial elástica de los torones PT. Con un aumento de carga, los torones se alargan, produciendo una fuerza adicional, la cual contribuye a resistir el momento total aplicado.

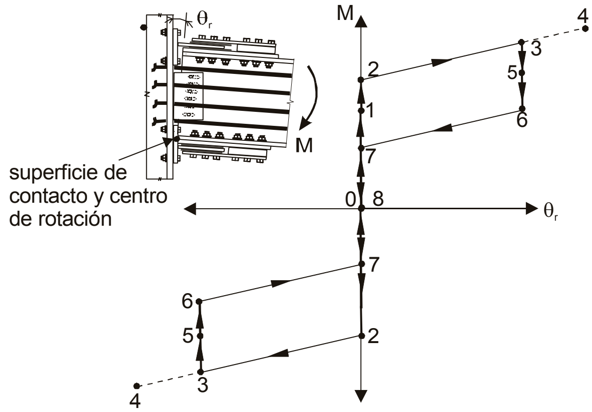


Figura 2. Comportamiento idealizado momento-rotación relativa de una CPEF.

Al descargar, $\theta_r$ permanece constante entre los eventos 3 y 6. Entre los eventos 6 y 7, la viga rota hasta que el ala a tensión de la viga esté nuevamente en contacto con la placa de relleno. Entre los eventos 7 y 8 la viga es comprimida contra las placas de relleno. Una inversión completa del momento aplicado resultará en un comportamiento similar de la conexión, la misma que ocurre en la dirección opuesta de carga, tal como se observa en la Figura 2. Si los torones permanecen elásticos y siempre que no ocurra una fluencia apreciable en la viga, la fuerza de postensado se conserva y la conexión se auto-centra al ser descargada. La disipación de energía de la conexión está relacionada a la fuerza de fricción.

## REHABILITACIÓN SÍSMICA DE PARM CON CPEF

Para el estudio de rehabilitación sísmica, un PARM de seis pisos con conexiones soldadas totalmente restringidas (PARM-TR) fue diseñado utilizando los requerimientos del IBC 2000. Este pórtico fue posteriormente rehabilitado mediante la adición de CPEF, utilizando un procedimiento basado en desempeño desarrollado por Rojas (2003) para PARM-CPEF. Los perfiles W y los valores de diseño de la fuerza inicial de postensado ($T_o$) y de fricción ($F_f$) para las CPEF se presentan en la Figura 3 (Rojas 2004).

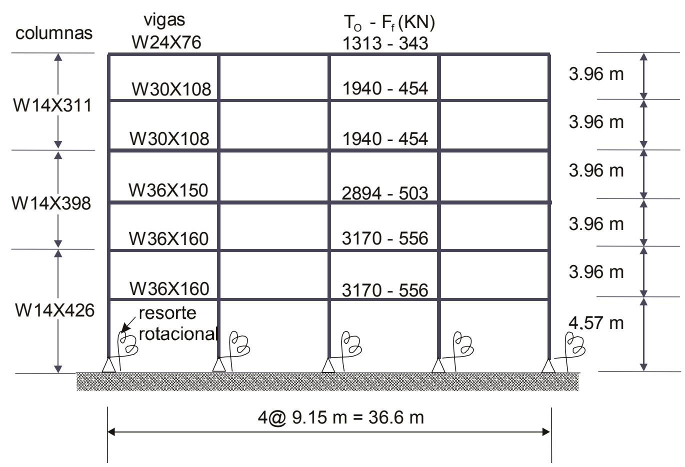


Figura 3. Modelo analítico de PARM-TR Rehabilitado con CPEF.

A fin de investigar el desempeño sísmico de los PARM-TR y el PARM–TR Rehabilitado, dos modelos analíticos fueron creados con la ayuda del programa DRAIN – 2DX. El primer modelo tenía conexiones totalmente restringidas mientras que el segundo modelo tenía CPEF. La Figura 4 muestra el modelo analítico para el pórtico rehabilitado en la región de las conexiones. Las vigas y columnas fueron modeladas usando elementos tipo fibra divididos en un número de segmentos a lo largo de la longitud del elemento. Los elementos fibra de las vigas adyacentes a la columna fueron usados para modelar la abertura de la conexión. Como se observa en la Figura 4, la región de la zona de panel fue modelada usando un grupo de nudos maestros y esclavos. La flexibilidad de la zona de panel es modelada colocando dos resortes rotacionales. Los torones y elementos de fricción fueron modelados usando elementos armadura y elementos resorte con relaciones fuerza deformación rígido-plástica, respectivamente.

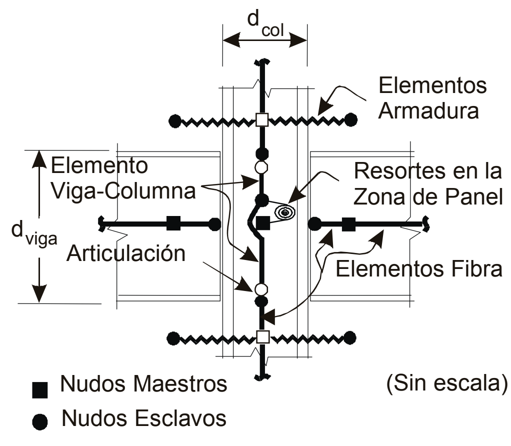


Figura 4. Modelo Analítico de una CPEF.

## Resultados de Análisis Estáticos Laterales

En cada pórtico se realizó análisis estáticos laterales. Las cargas laterales fueron distribuidas en los pórticos de acuerdo a los requerimientos del IBC 2000 y fueron aplicadas en las masas de ambos pórticos. La Figura 5 presenta la relación entre el cortante basal normalizado (cortante basal dividido para el peso del edificio, W=47150 KN) y la deriva total (desplazamiento de último piso dividido para la altura total del pórtico), $\theta_{total}$, para ambos pórticos. Los resultados de los análisis para el PARM-TR muestran que la primera fluencia ocurre cuando el cortante basal es 0.13W ($\theta_{total}$=0.95%). La sobrerresistencia máxima, $\Omega o$, del PARM-TR es 3.14 (equivalente a 0.21W) correspondiente a $\theta_{total}$ de 2.50%. La sobrerresistencia está definida como el cortante basal dividido para el cortante de diseño del IBC 2000. A una deriva total, $\theta_{total}$, de 5%, la deriva máxima de entrepiso, $\theta$, es 5.99% y ocurre en el primer entrepiso. El comportamiento inelástico ocurre en las vigas de todos los pisos, en las columnas de la planta baja al nivel del suelo y en la mayoría de las zonas de panel de las columnas interiores.

Aunque ambos pórticos tienen las mismas secciones de vigas y columnas, la Figura 5 muestra que el pórtico rehabilitado posee una rigidez inicial mayor que el pórtico original soldado debido a la adición de las placas de refuerzo. Además, el PARM-TR Rehabilitado tiene una menor resistencia debido al inicio de la abertura en la mayoría de las conexiones. La primera abertura de la conexión ocurre cuando el cortante basal es de 0.048W ($\theta_{total}$=0.23%). El inicio de una reducción significativa en la rigidez lateral del PARM-TR Rehabilitado ocurre cuando el cortante basal es de

0.091W ($\theta_{total}$=0.52%) debido a la abertura en varias conexiones. La primera fluencia ocurre en las columnas de la planta baja al nivel del suelo cuando el cortante basal es 0.12W y $\theta_{total}$ es 1.35%. La sobrerresistencia máxima del PARM-TR Rehabilitado es 2.43 (0.16W) cuando $\theta_{total}$ es igual al 5%. El pórtico original PARM-TR tiene un 26% más de resistencia que el PARM-TR Rehabilitado a este nivel de deriva total. A una deriva total, $\theta_{total}$, de 5%, la deriva máxima de entrepiso es 5.34% y ocurre en el segundo y tercer entrepisos. Las zonas de panel permanecen esencialmente elásticas y no ocurre comportamiento inelástico en los torones.

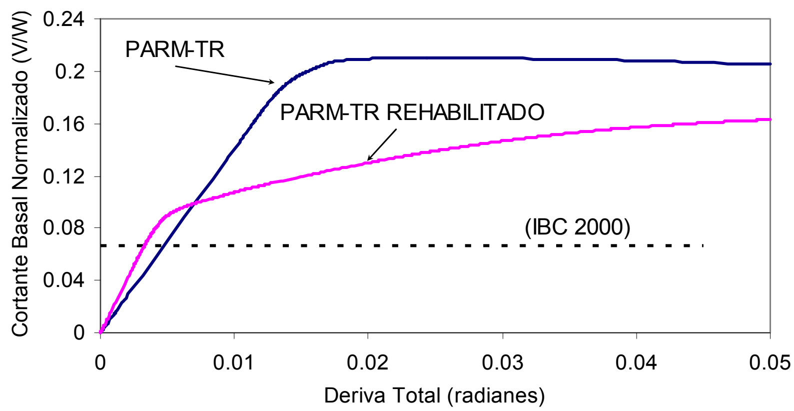


Figura 5. Resultados del Análisis Lateral Estático.

## Resultados de Análisis Dinámicos No-lineales

Para la realización de análisis dinámicos no-lineales, se utilizaron ocho registros de aceleraciones, escalados a niveles de sismo de diseño (DBE) y de sismo considerado máximo (MCE). Las Tablas 1(a) y 1(b) presentan las magnitudes máximas de desplazamiento total ($\Delta_{total}$), deriva total ($\theta_{total}$), deriva de entrepiso ($\theta$), deriva residual de entrepiso ($\theta_{res}$), cortante basal normalizado (V/W), y la sobrerresistencia dinámica ($\Omega_o$) para cada análisis del PARM-TR y el PARM-TR Rehabilitado escalado a los niveles DBE y MCE, respectivamente. $\theta_{total}$ se expresa como un porcentaje de la altura del pórtico ($h_f$), $\theta$ y $\theta_{res}$ se expresan como un porcentaje de la altura de entrepiso ($h_x$). Se puede observar que los valores máximos de $\Delta_{total}$, $\theta_{total}$ y $\theta$ son mayores en muchos de los casos para el PARM-TR Rehabilitado que para el PARM-TR. Este comportamiento se debe a que después de ocurrir la abertura de las conexiones en algunos niveles de piso del pórtico rehabilitado, el pórtico pierde rigidez y como resultado tiende a deformarse más que el pórtico original PARM-TR. Las Figuras 6(a) y 6(b) presentan los valores estadísticos de *m* y $m+\sigma$ de las derivas máximas de entrepiso para los PARM-TR y PARM-TR Rehabilitado del análisis de registros de aceleraciones escalado a los niveles DBE y MCE, respectivamente. Se puede observar que el comportamiento de ambos pórticos es muy similar para ambos niveles sísmicos. El PARM-TR Rehabilitado posee derivas de entrepiso mayores que las del PARM-TR desde el segundo entrepiso hasta el último. También puede observarse que las derivas de entrepiso del PARM-TR Rehabilitado son aproximadamente constantes para ambos niveles de sismicidad. La Tabla 1 muestra los valores máximos de *m* y *m*+σ de las derivas máximas de entrepiso para el PARM-TR Rehabilitado al nivel DBE, las cuales son 2.75% y 3.60%, respectivamente y para el nivel MCE son 4.24% y 5.35%, respectivamente; mientras que para el PARM-TR al nivel DBE son 2.52% y 2.95%, respectivamente y para el nivel MCE son 3.10% y 3.94%, respectivamente. En ambos niveles DBE y MCE, se puede observar que los valores máximos de *m* y *m*+σ para el PARM-TR Rehabilitado son superiores a los obtenidos para el PARM-TR.

Tabla 1. Magnitudes Máximas de Respuesta del Análisis del Registro de Aceleraciones para los PARM-TR y PARM-TR Rehabilitado.

| Análisis | | Sismos DBE | | | | | | Sismos MCE | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\Delta_{total}$ (mm) | $\theta_{total}$ (%$h_f$) | $\theta$ (%$h_x$) | $\theta_{res}$ (%$h_x$) | $\frac{V}{W}$ (*) | $\Omega_o$ | $\Delta_{total}$ (mm) | $\theta_{total}$ (%$h_f$) | $\theta$ (%$h_x$) | $\theta_{res}$ (%$h_x$) | $\frac{V}{W}$ (*) | $\Omega_o$ |
| PARM-TR REHABILITADO | Chi-Chi | 295 | 1.21 | 1.85 | 0.08 | 0.17 | 2.54 | 409 | 1.68 | 2.57 | 0.34 | 0.14 | 2.09 |
| | Bolu | 561 | 2.31 | 3.29 | 0.07 | 0.21 | 3.13 | 798 | 3.27 | 4.65 | 0.17 | 0.24 | 2.58 |
| | Gilroy | 648 | 2.66 | 3.19 | 0.19 | 0.17 | 2.54 | 947 | 3.88 | 5.40 | 0.09 | 0.19 | 2.84 |
| | Canoga | 605 | 2.48 | 2.88 | 0.17 | 0.17 | 2.54 | 1011 | 4.14 | 4.79 | 0.15 | 0.19 | 2.84 |
| | Tarzana | 462 | 1.89 | 2.58 | 0.12 | 0.21 | 3.13 | 592 | 2.42 | 4.12 | 0.18 | 0.24 | 3.58 |
| | Kobe | 368 | 1.51 | 3.33 | 0.03 | 0.18 | 2.69 | 549 | 2.25 | 4.68 | 0.08 | 0.23 | 3.43 |
| | Miyagi | 439 | 1.80 | 4.17 | 0.09 | 0.21 | 3.13 | 653 | 2.68 | 5.37 | 0.22 | 0.25 | 3.73 |
| | Artificial | 465 | 1.90 | 2.29 | 0.17 | 0.18 | 2.69 | 709 | 2.91 | 3.24 | 0.33 | 0.21 | 3.13 |
| | *m* | *480* | *1.97* | *2.75** | *0.09** | *0.19* | *2.84* | *708* | *2.91* | *4.24** | *0.13** | *0.21* | *3.13* |
| | $m+\sigma$ | *599* | *2.46* | *3.60** | *0.16** | *0.21* | *3.13* | *911* | *3.74* | *5.35** | *0.25** | *0.25* | *3.73* |
| PARM-TR | Chi-Chi | 447 | 1.84 | 2.85 | 0.40 | 0.23 | 3.43 | 467 | 1.92 | 3.25 | 0.38 | 0.24 | 3.58 |
| | Bolu | 389 | 1.59 | 2.27 | 0.09 | 0.24 | 3.58 | 483 | 1.98 | 3.06 | 0.59 | 0.24 | 3.58 |
| | Gilroy | 554 | 2.27 | 3.03 | 0.33 | 0.24 | 3.58 | 709 | 2.91 | 4.02 | 0.69 | 0.24 | 3.58 |
| | Canoga | 572 | 2.34 | 3.11 | 0.69 | 0.23 | 3.43 | 859 | 3.52 | 4.62 | 2.00 | 0.24 | 3.58 |
| | Tarzana | 399 | 1.63 | 2.82 | 0.54 | 0.27 | 4.03 | 671 | 2.75 | 3.65 | 1.00 | 0.28 | 4.18 |
| | Kobe | 462 | 1.90 | 2.92 | 0.34 | 0.22 | 3.28 | 572 | 2.35 | 3.35 | 0.56 | 0.25 | 3.73 |
| | Miyagi | 488 | 2.00 | 3.03 | 0.71 | 0.20 | 2.99 | 594 | 2.44 | 3.97 | 0.46 | 0.23 | 3.43 |
| | Artificial | 406 | 1.67 | 2.39 | 0.21 | 0.23 | 3.43 | 462 | 1.89 | 2.70 | 0.48 | 0.26 | 3.88 |
| | *m* | *465* | *1.91* | *2.52** | *0.30* | *0.23* | *3.43* | *602* | *2.47* | *3.10** | *0.68* | *0.25* | *3.73* |
| | $m+\sigma$ | *534* | *2.19* | *2.95** | *0.52* | *0.25* | *3.73* | *741* | *3.04* | *3.94** | *1.27* | *0.26* | *3.88* |

(*) W = 47150 KN

La Figuras 7(a) y 7(b) presentan los valores estadísticos de $m$ y $m+\sigma$ de las derivas residuales de entrepiso de ambos pórticos del análisis de registro de aceleraciones escalado a los niveles DBE y MCE, respectivamente. Se puede apreciar que el pórtico rehabilitado posee una deriva residual de entrepiso despreciable mientras que el PARM-TR presenta una mayor deriva residual de entrepiso para ambos niveles sísmicos. La Tabla 1 muestra los valores máximos de $m$ y $m+\sigma$ de deriva residual de entrepiso para el PARM-TR Rehabilitado para el nivel DBE, las cuales son 0.09% y 0.16%, respectivamente, y para el nivel MCE de 0.13% y 0.25%, respectivamente. Por el contrario, el PARM-TR muestra derivas residuales de piso considerables, cuyos valores máximos de $m$ y $m+\sigma$ de deriva residual de entrepiso para el nivel DBE son de 0.30% y 0.52%, respectivamente para el nivel MCE y de 0.68% y 1.27%, respectivamente. Esto indica que el PARM-TR desarrolla deformación inelástica considerable, lo cual resulta en grandes derivas residuales; mientras que por el contrario, el PARM-TR Rehabilitado desarrolla deformación inelástica mínima, por consiguiente la deriva residual de entrepiso es despreciable, tal como se observa en las Figuras 7(a) y 7(b).

Las Figuras 8(a) y 8(b) se presentan los desplazamientos del último piso del PARM-TR Rehabilitado sujeto al registro de aceleración Canoga escalado a los niveles DBE y MCE, se puede observar que éste oscila alrededor de su configuración no deformada al final del análisis dinámico, mientras que el PARM-TR oscila alrededor de su configuración deformada durante la mayor parte del registro. Se puede apreciar que el pórtico rehabilitado prácticamente no tiene desplazamiento residual (y por lo tanto no hay deriva residual); mientras que por el contrario, el PARM-TR desarrolla desplazamientos residuales de piso mayores que el PARM-TR Rehabilitado. La capacidad auto-centrante del sistema rehabilitado se puede ver en estas figuras y en las Tablas 1(a) y 1(b).

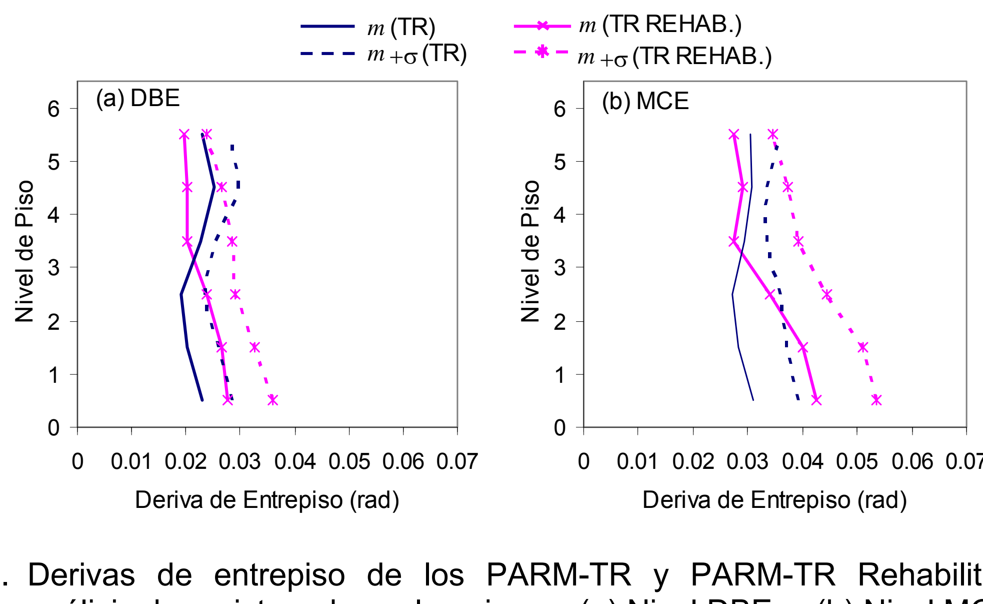


Figura 6. Derivas de entrepiso de los PARM-TR y PARM-TR Rehabilitado del análisis de registros de aceleraciones: (a) Nivel DBE, y (b) Nivel MCE.

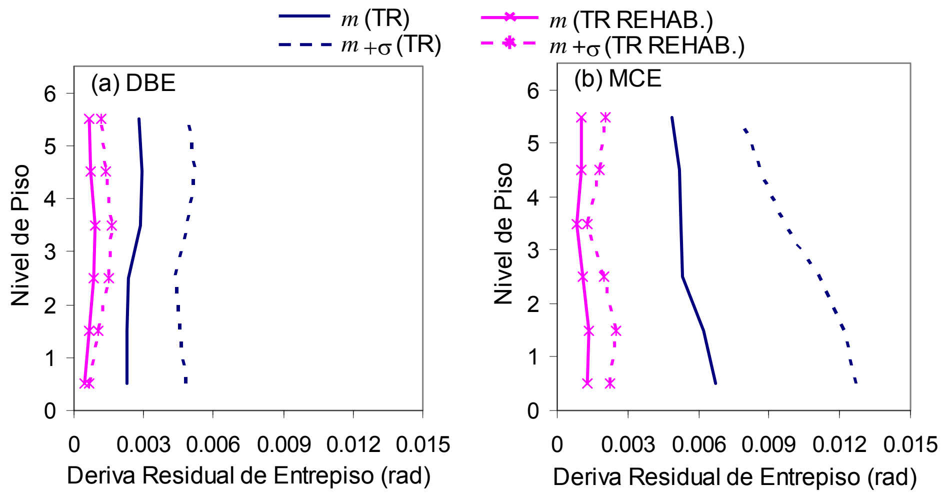


Figura 7. Derivas residuales de entrepiso de los PARM-TR y PARM-TR Rehabilitado del análisis de registros de aceleraciones: (a) Nivel DBE, y (b) Nivel MCE.

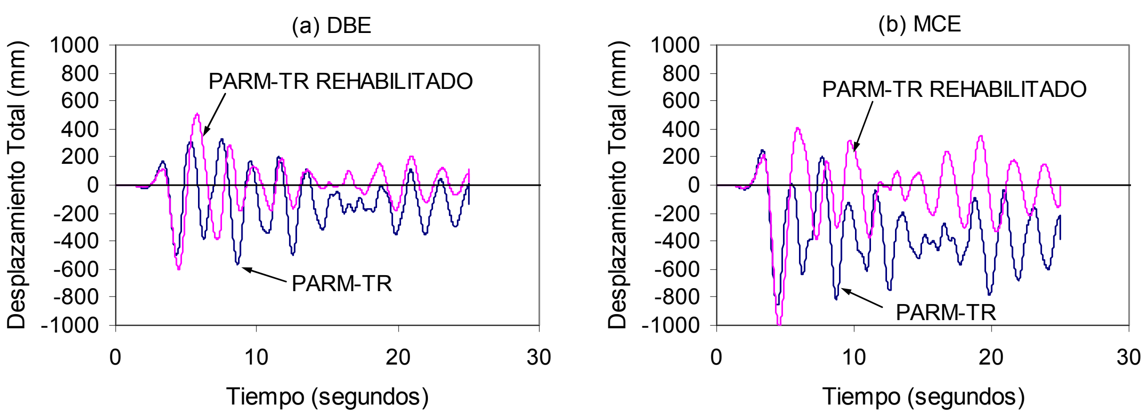


Figura 8. Desplazamiento de último piso de los PARM-TR y PARM-TR Rehabilitado del análisis de registros de aceleraciones: (a) Nivel DBE, y (b) Nivel MCE.

Como se puede ver de la Tabla 1, los valores máximos de V/W para el PARM-TR obtenidos de los registros de aceleraciones Gilroy y Canoga son superiores a los del PARM-TR Rehabilitado para ambos niveles de sismicidad; mientras que los valores máximos de V/W para el PARM-TR obtenidos del registro de aceleración Miyagi son inferiores a los del pórtico rehabilitado para ambos niveles. Si estos valores máximos de V/W son divididos para el cortante basal normalizado (0.067 de acuerdo al Código IBC 2000), los "factores dinámicos de sobrerresistencia" $\Omega_{DBE}$ y $\Omega_{MCE}$ a los niveles DBE y MCE son significativamente mayores que el factor de sobrerresistencia de 2.43 obtenido del Análisis Estático Lateral descrito anteriormente.

## CONCLUSIONES

El uso de CPEF para la rehabilitación de PARM-TR mediante la combinación de torones postensados de acero de alta resistencia con dispositivos de fricción resulta en una conexión con una rigidez inicial que es similar a la de una conexión soldada resistente a momento. La conexión tiene capacidad auto-centrante, por lo que un edificio rehabilitado con CPEF tendrá una mínima deriva de entrepiso permanente ante la acción de un sismo severo. Un diseño adecuado de las placas de refuerzo en las alas de las vigas y de las doble placas en la zona de panel evitarán el daño en estos elementos. Los resultados de estos estudios analíticos indican que el PARM-TR Rehabilitado tiene un mejor desempeño que el PARM-TR, demostrando que el desempeño sísmico del pórtico Rehabilitado con CPEF es satisfactorio en términos de resistencia, disipación de energía, deformación y capacidad auto-centrante para niveles sísmicos DBE y MCE.

## REFERENCIAS

Rojas, P. (2003). "Seismic Analysis, Design, and Evaluation of Post-Tensioned Friction Damped Connections for Steel Moment Resisting Frames." Disertación doctoral, Civil and Environmental Eng. Dept., Lehigh University, Bethlehem, PA., 2003.

Rojas, P. (2004). "Seismic Rehabilitation of Steel Moment Resisting Frames with Post-Tensioned Friction Damped Connections" Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Tlaxcala, 2004.