



**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**Tesis de Grado:**

**“Rehabilitación Sísmica de Pórticos de Acero  
Resistentes a Momento con Conexiones  
Postensadas y Elementos de Fricción”**

**Presentada por:**

**Martha Caballero Vinueza**

# Contenido

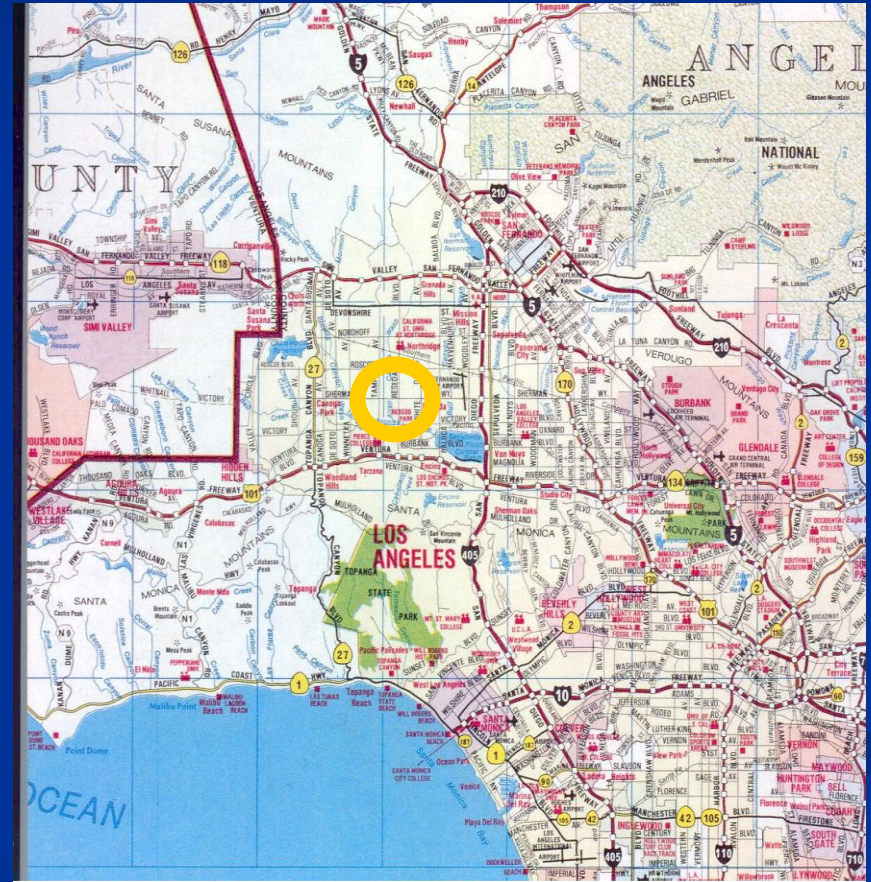
- **Introducción**
- **Objetivos**
- **Conexiones Postensadas con Elementos de Fricción (CPEF)**
- **Investigación Previa**
- **Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes**
- **Modelo Analítico**
- **Diseño por Desempeño**
- **Evaluación Sísmica de Edificios Existentes**
- **Conclusiones**

# Contenido

- **Introducción**
- Objetivos
- Conexiones Postensadas con Elementos de Fricción (CPEF)
- Investigación Previa
- Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes
- Modelo Analítico
- Diseño por Desempeño
- Evaluación Sísmica de Edificios Existentes
- Conclusiones

# Introducción

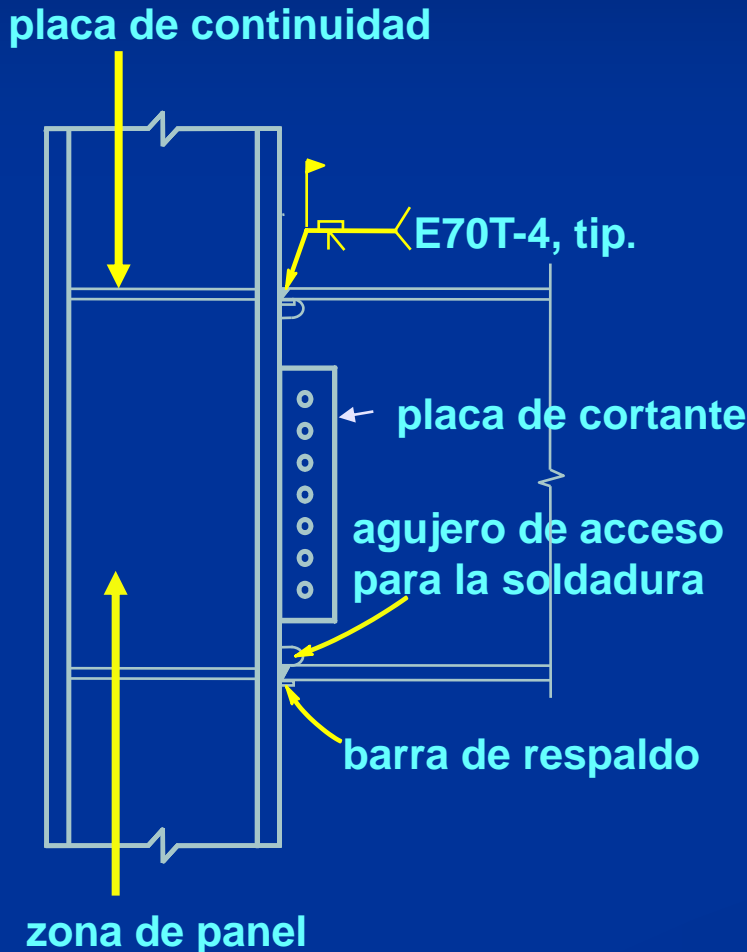
- Enero 17 de 1994; 4:30am
- Sismo de Northridge (Valle de San Fernando)
- 32 km. NO del centro de LA
- $M = 6.7$
- US\$ > 20 billones en daño (Bruneau et al. 1998)
- Uno de los desastres más costosos en EE.UU.
- 61 muertes y 9000 heridos



# Introducción

## Conexión Pre-Northridge

### Viga con alas soldadas y alma empernada

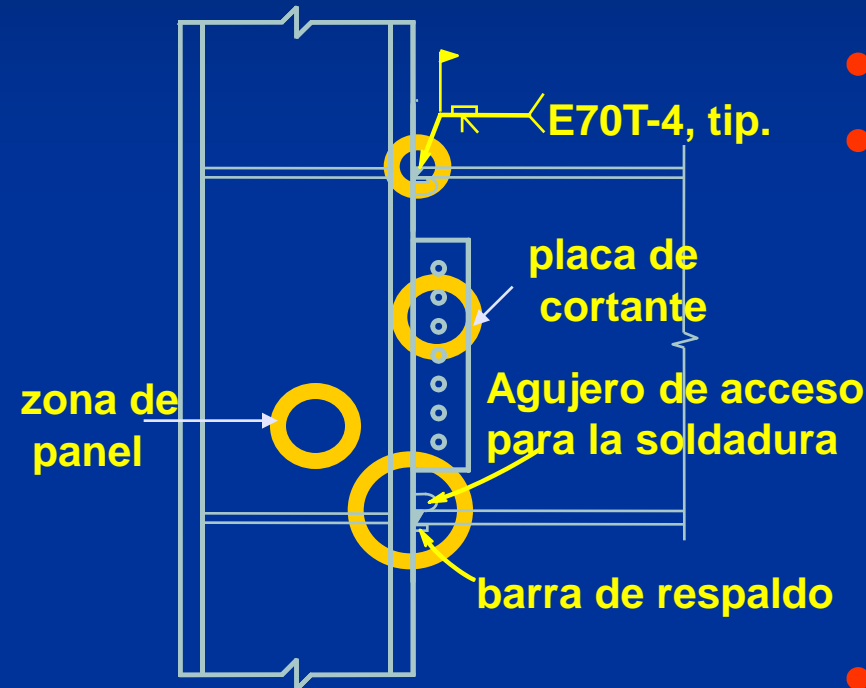


- 1965-1994
- Soldadura de arco con núcleo fundente
- Popular en EE.UU. y en muchos países
- Se creía que era dúctil
- Capaz de resistir los ciclos repetidos a grandes niveles de deformación inelástica

# Introducción

## Identificación de los Daños

(FEMA 351)



- Fallas frágiles
- Inspección en 250 edificios
  - 1/3: No daños
  - 1/3: defectos constructivos.  
En la raíz de soldadura  
Inicialmente fueron reportadas como daño
  - 1/3: Daños relacionados al sismo
- Edificios bajos y medianos (1 a 27 pisos)
- No hubo colapsos

# Introducción

## Causas de los Daños (FEMA-352)

- Baja tenacidad de la soldadura
- Elevados esfuerzos de fluencia en vigas
- Concentraciones de esfuerzos
- Poca redundancia
- Zonas de panel extremadamente débil
- Presencia de la losa compuesta
- Detallamiento pobre
- Pobre mano de obra e inspección

# Introducción

## ¿Porqué Rehabilitar PARM con CPEF?

- Hay miles de edificios con conexiones Pre-Northridge
- Dar solución a estructuras que pudieran fallar en forma frágil.



# Introducción

## Conexión Soldada a Momento

(U. Lehigh, Ricles et al. 2002)



**Daño estructural** es necesario para disipar la energía del sismo

# Introducción

## Rehabilitación sísmica de pórticos de acero resistentes a momento

### Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)

- Daño estructural no es necesario para disipar energía
- Sistema desarrollado para edificios nuevos: Universidad Lehigh y Centro ATLSS, PA-USA
- Sistema desarrollado para la rehabilitación sísmica de edificios existentes: ESPOLE

# Contenido

- Introducción
- **Objetivos**
- Conexiones Postensadas con Elementos de Fricción (CPEF)
- Investigación Previa
- Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes
- Diseño por Desempeño
- Modelo Analítico
- Evaluación Sísmica de Edificios Existentes
- Conclusiones

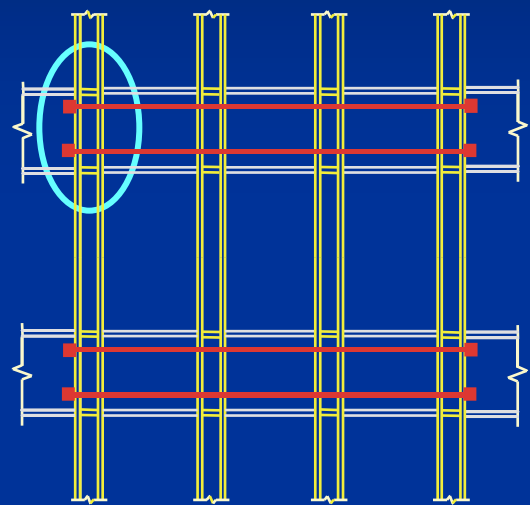
# Objetivos

- **Evaluar el desempeño sísmico** de pórticos de acero resistentes a momento con CPEF en edificios existentes.
- **Comparar el desempeño sísmico** entre pórticos de acero resistentes a momento rehabilitados con CPEF y conexiones soldadas convencionales en edificios existentes.

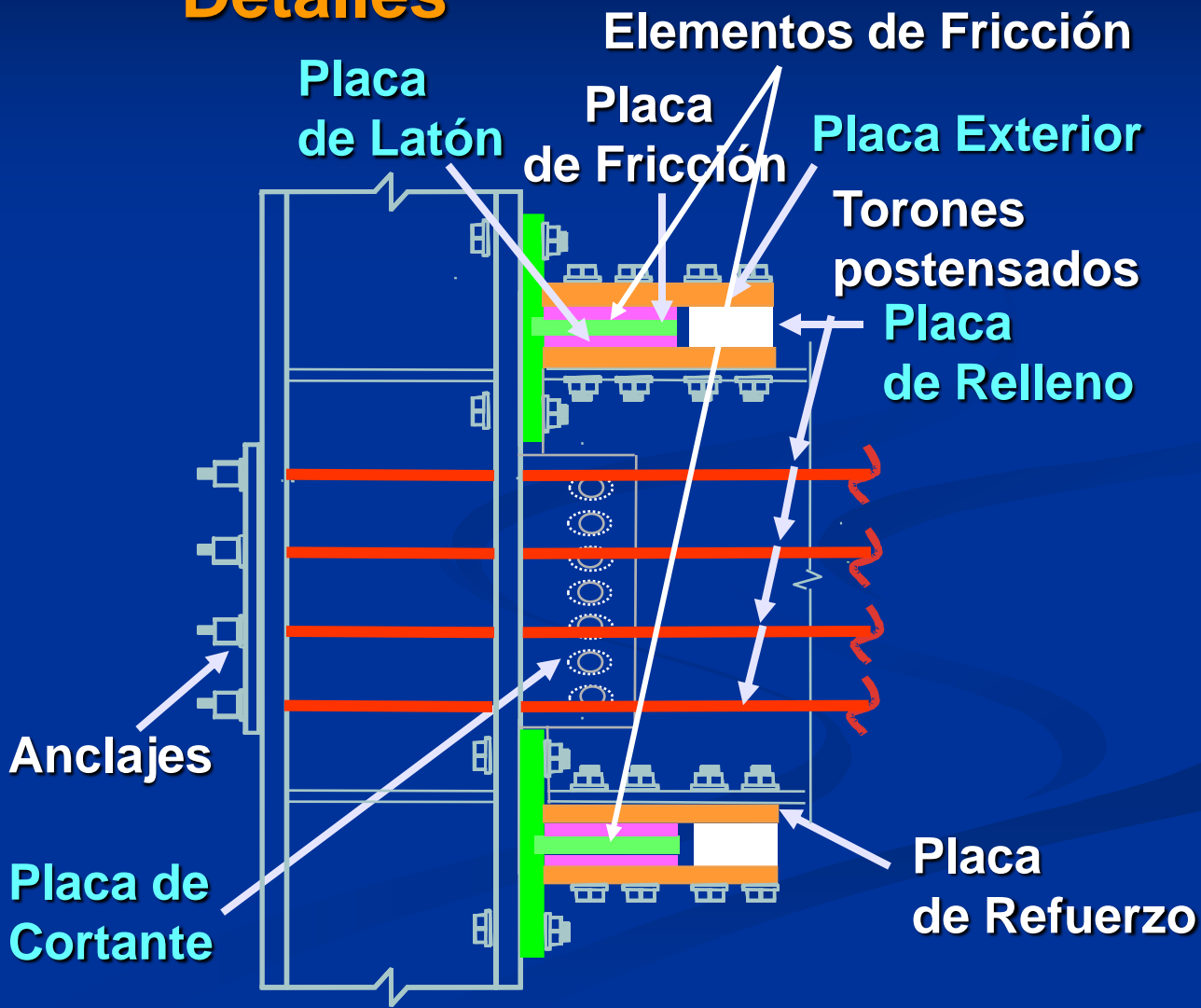
# Contenido

- Introducción
- Objetivos
- **Conexiones Postensadas con Elementos de Fricción (CPEF)**
- Investigación Previa
- Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes
- Modelo Analítico
- Diseño por Desempeño
- Evaluación Sísmica de Edificios Existentes
- Conclusiones

# Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF) Detalles



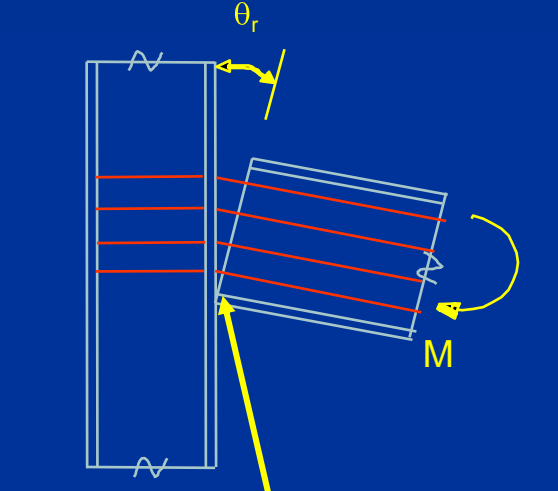
Elevación



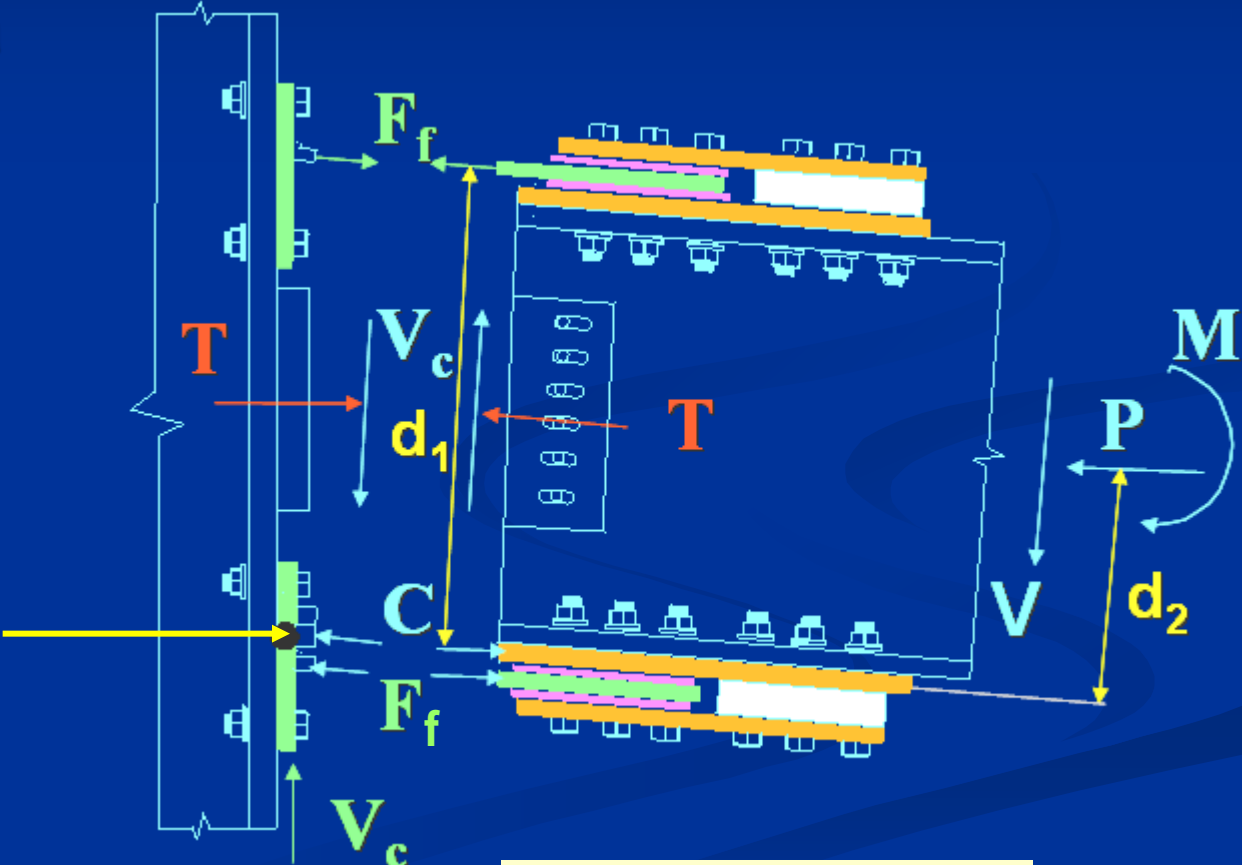
# Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)

## Modelo Analítico Simplificado

$\theta_r =$  rotación relativa



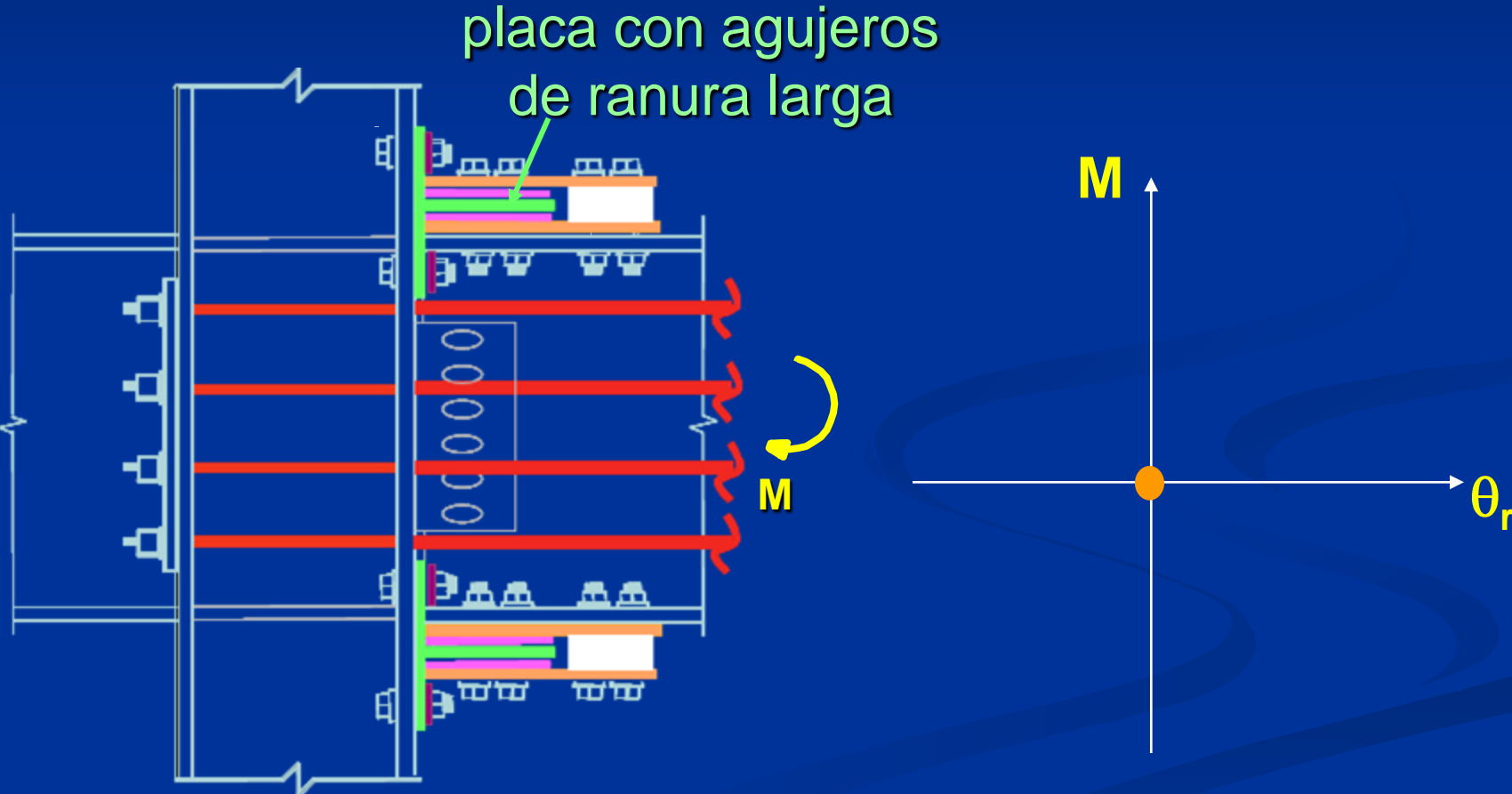
centro de rotación



$$M = Pd_2 + F_f d_1$$

# Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)

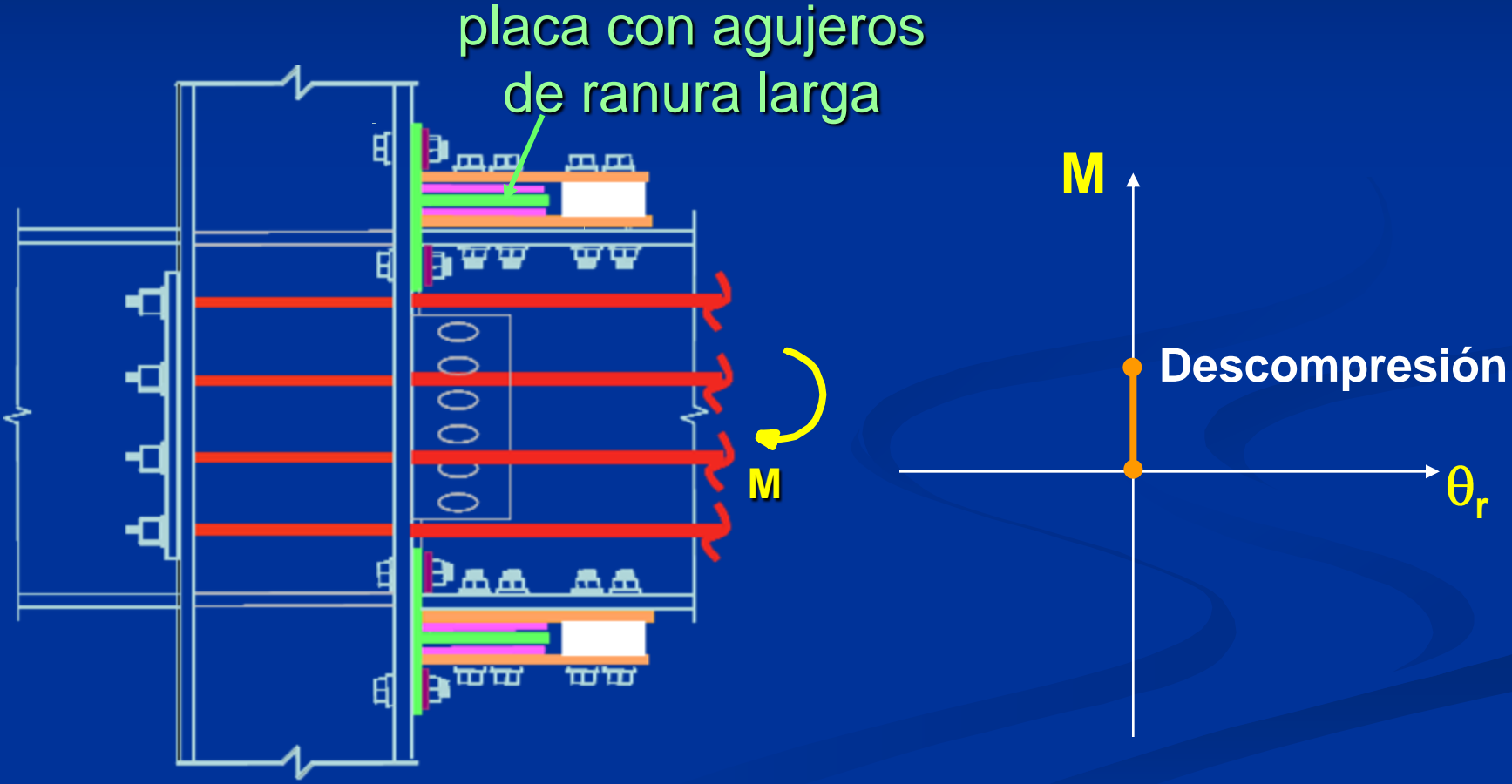
## Comportamiento





# Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)

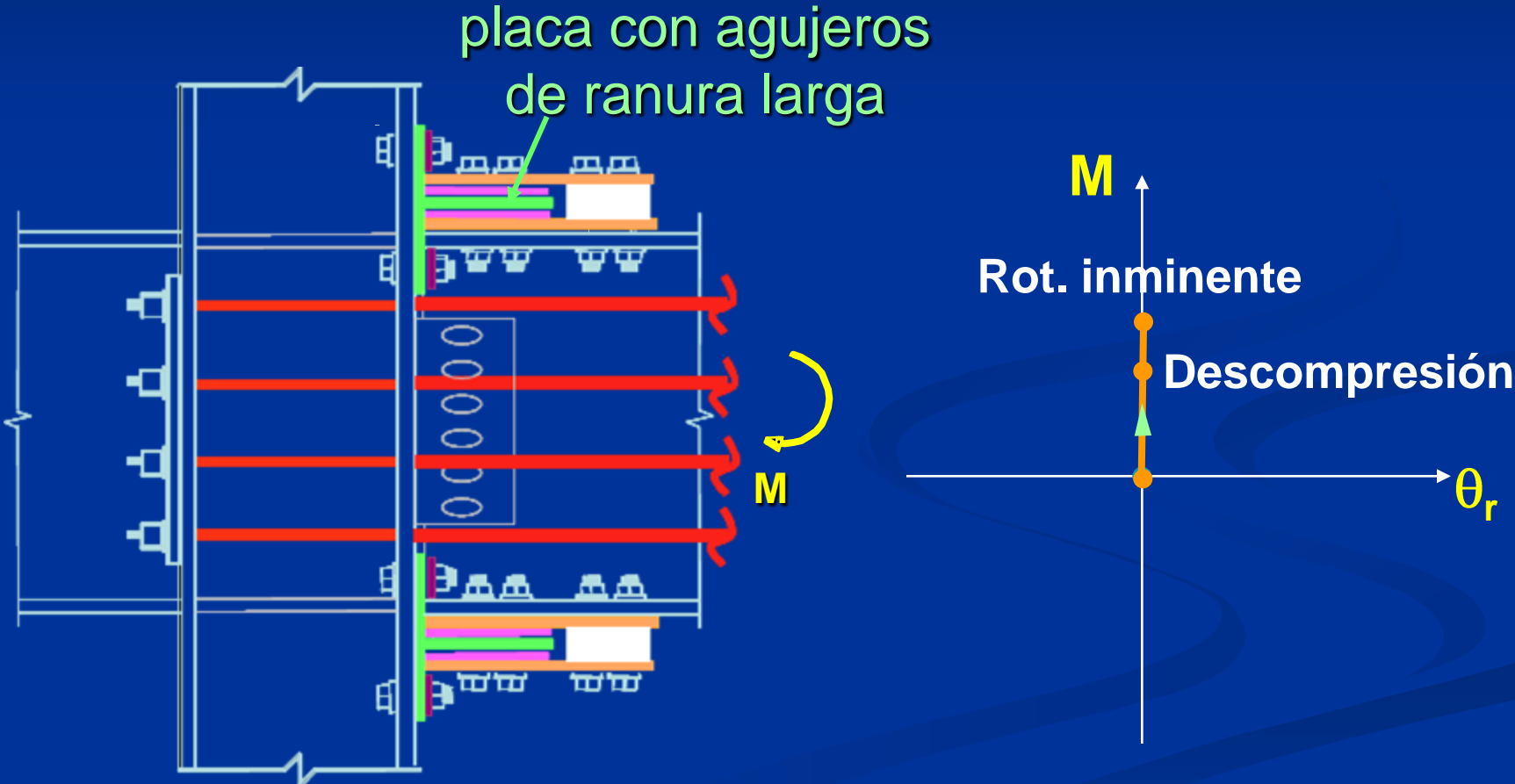
## Comportamiento



rigidez inicial similar a una conexión a momento soldada totalmente restringida

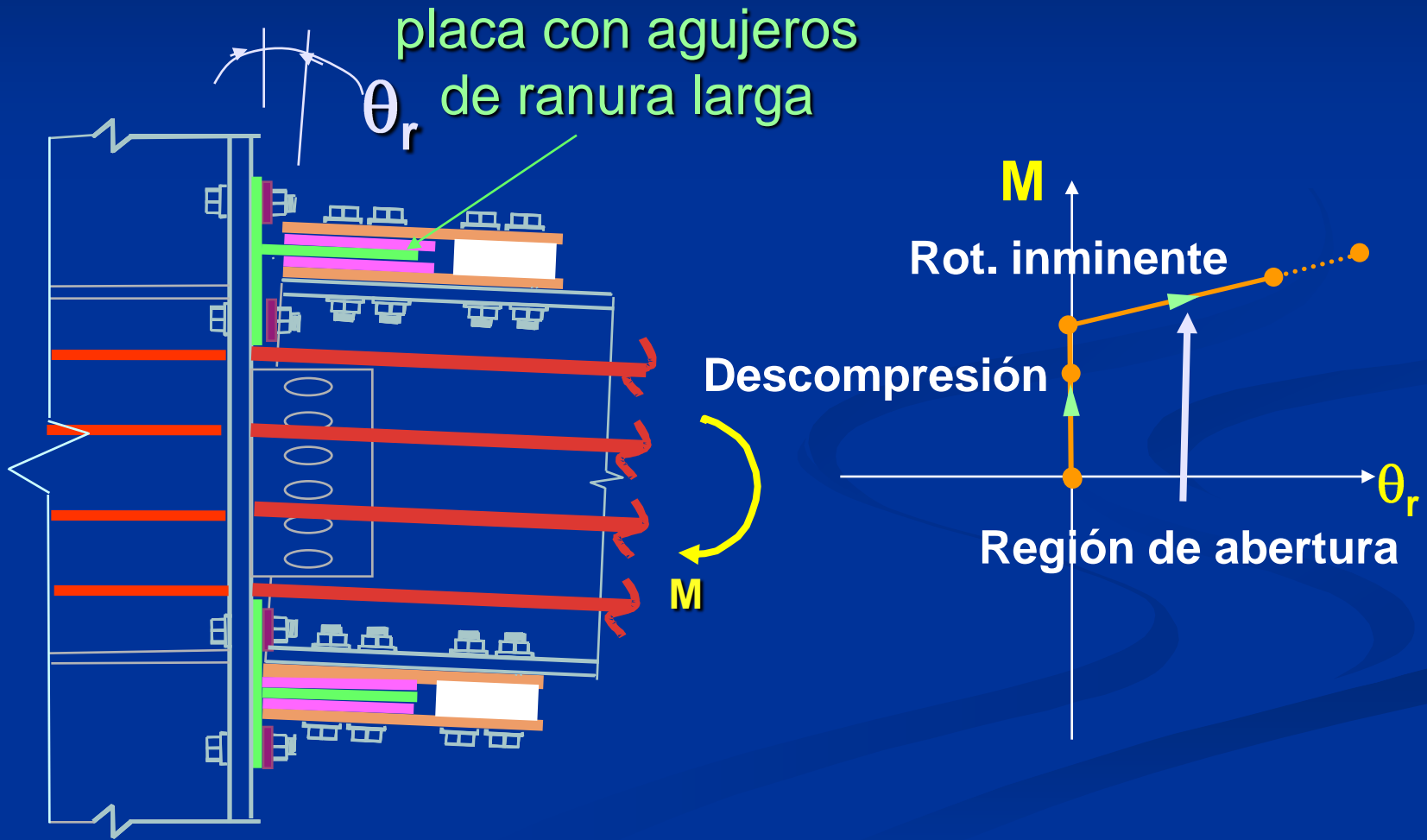
# Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)

## Comportamiento



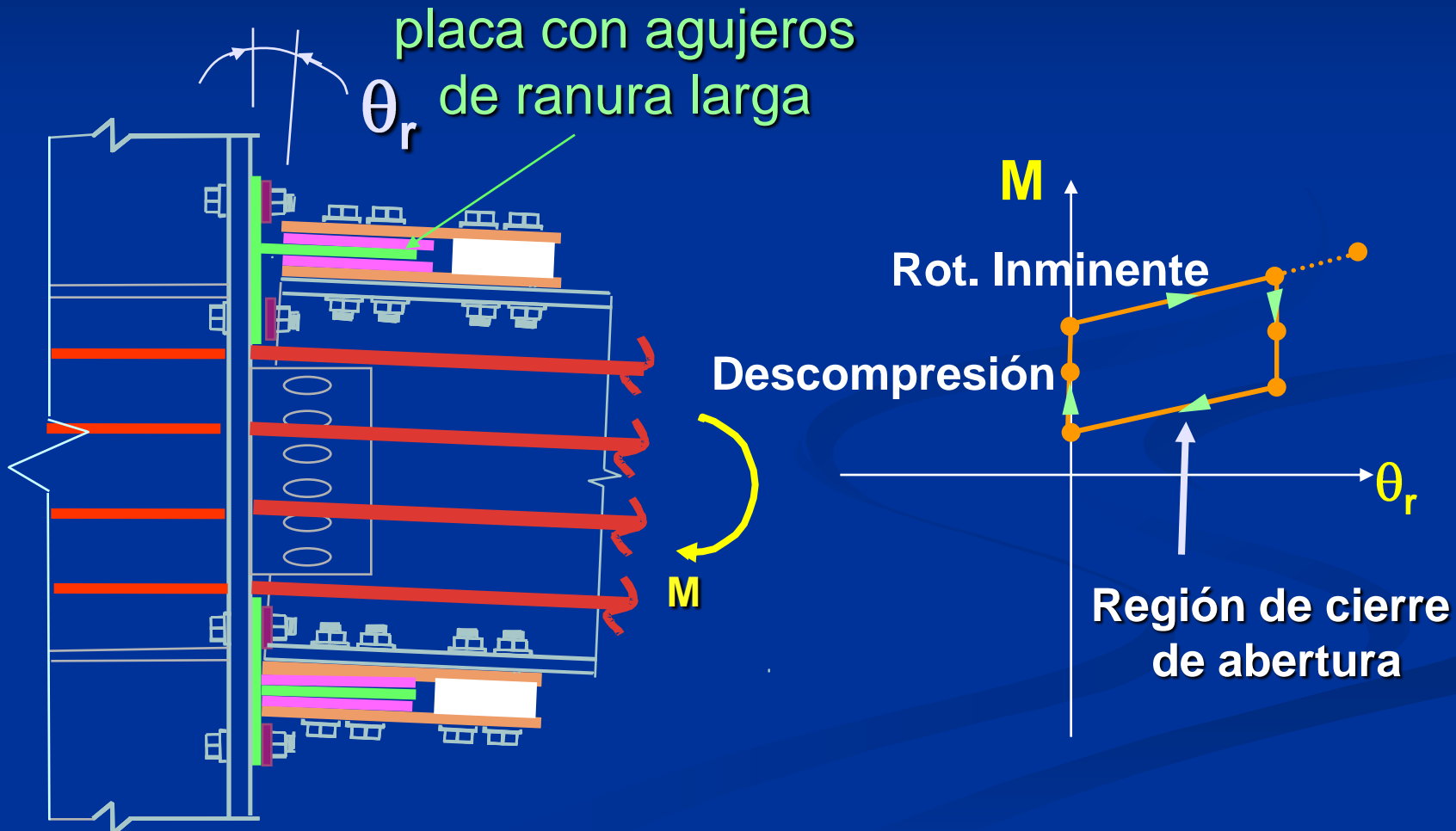
# Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)

## Comportamiento



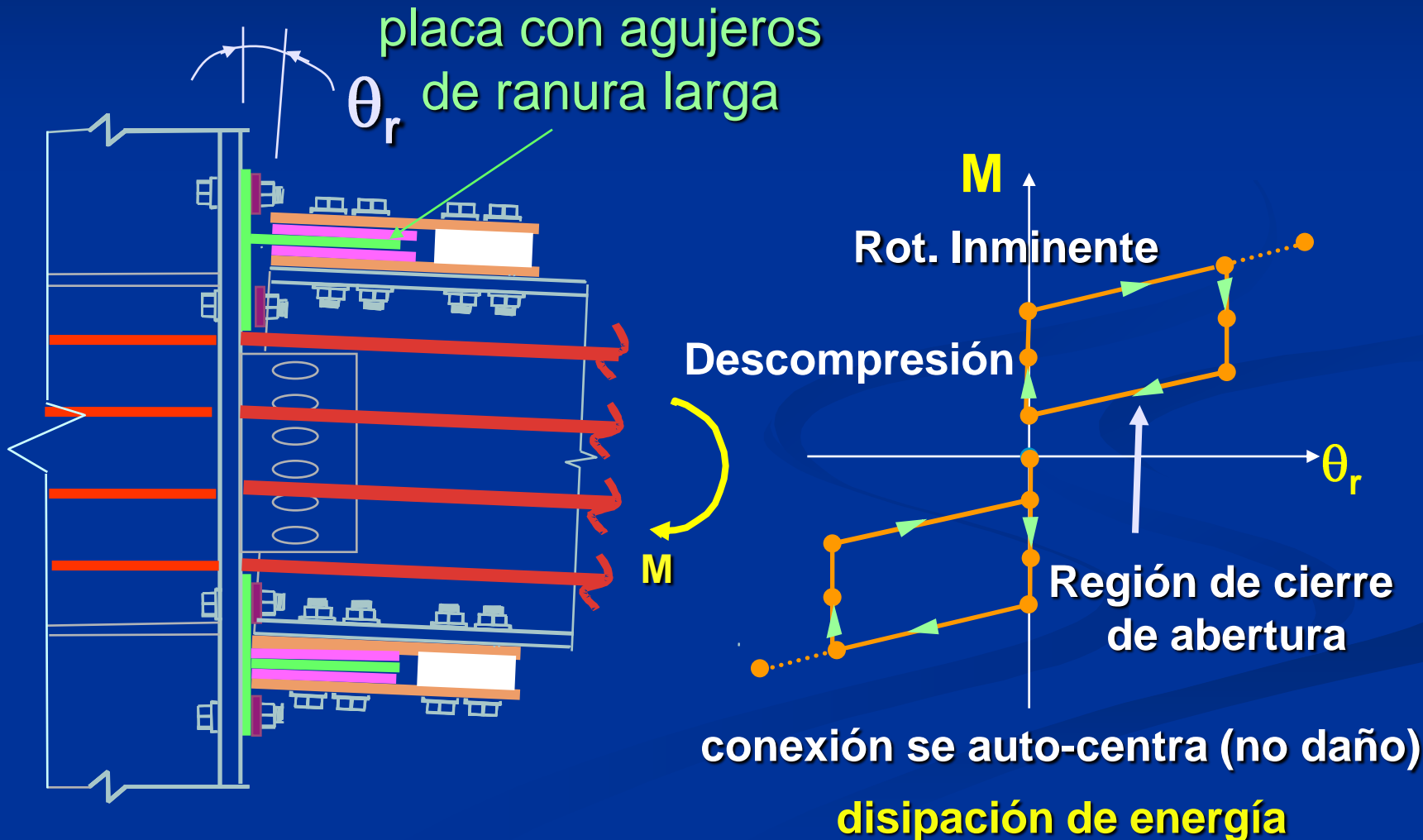
# Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)

## Comportamiento



# Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)

## Comportamiento



# Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF) Ventajas

- Capacidad de disipación de energía (elementos de fricción)
- Capacidad de auto-centrarse (no deriva de entrepiso permanente)
- Viga, zona de panel y columna se mantienen esencialmente en el rango elástico
- Ductilidad
- Tecnología de construcción existente
- Rigidez inicial similar a la rigidez de conexiones a momento soldadas

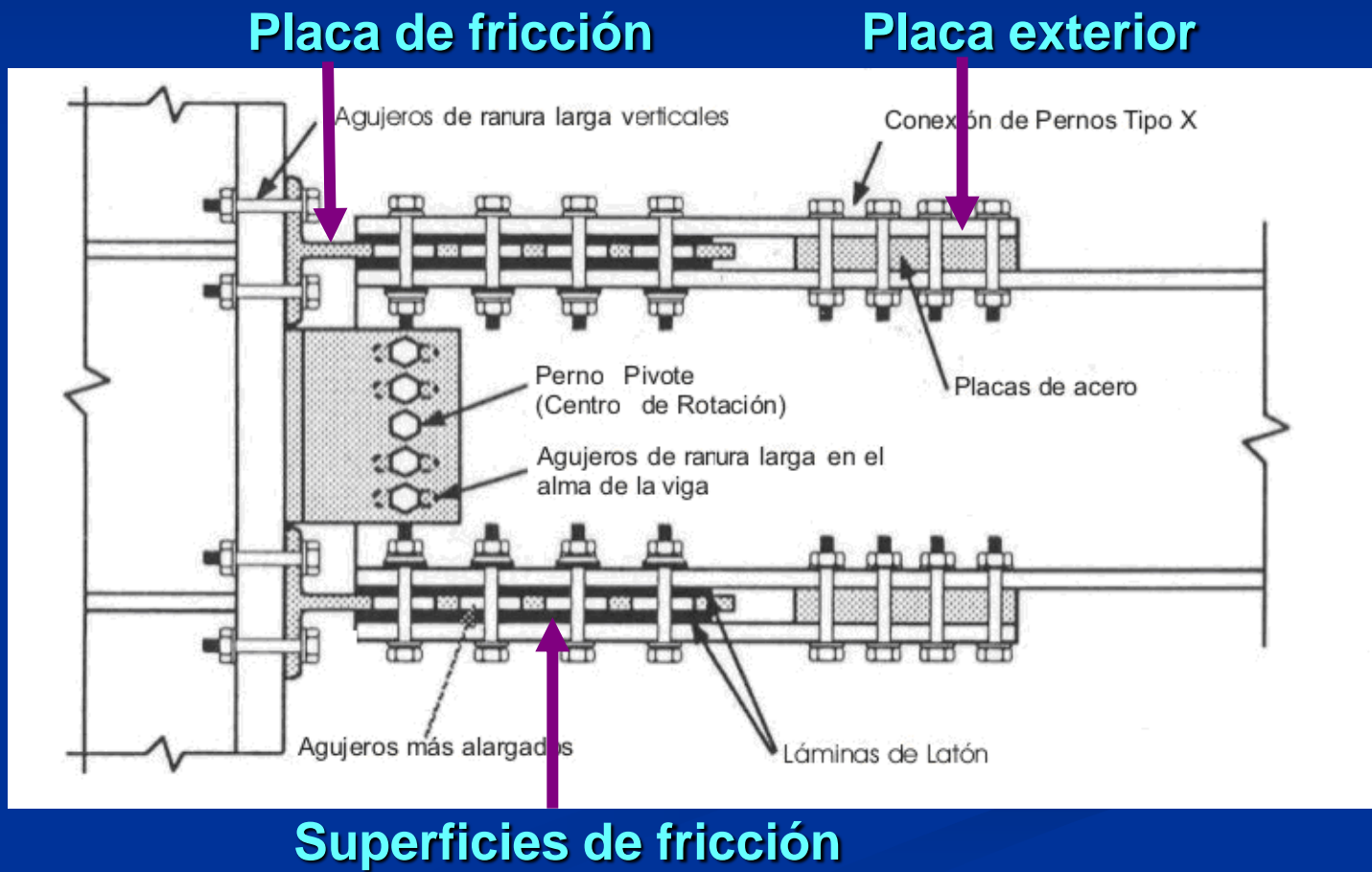
# Contenido

- Introducción
- Objetivos
- Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)
- **Investigación Previa**
- Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes
- Modelo Analítico
- Diseño por Desempeño
- Evaluación Sísmica de Edificios Existentes
- Conclusiones

# Investigación Previa

## Conexión Empernada Rotacional (CERARL)

(U. de Berkeley; Yang y Popov 1995)





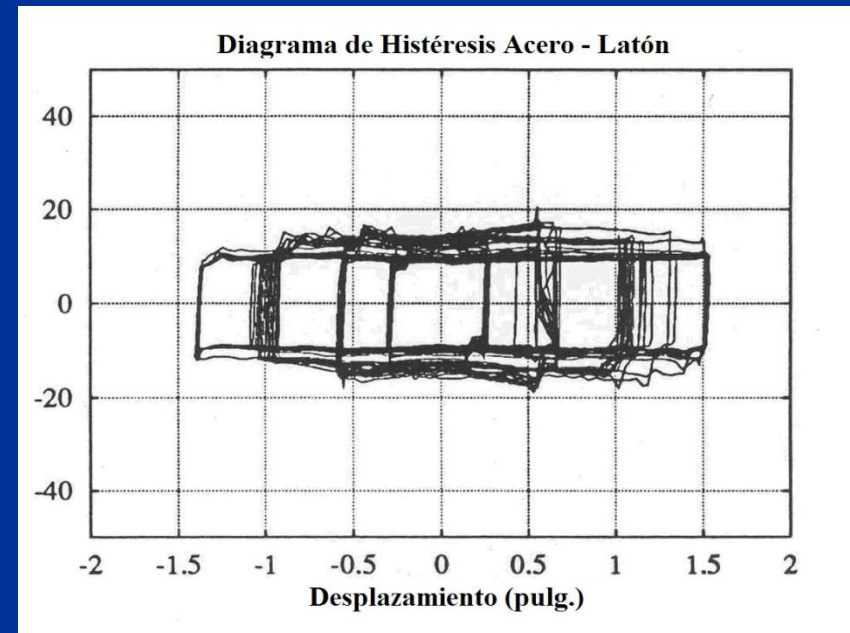
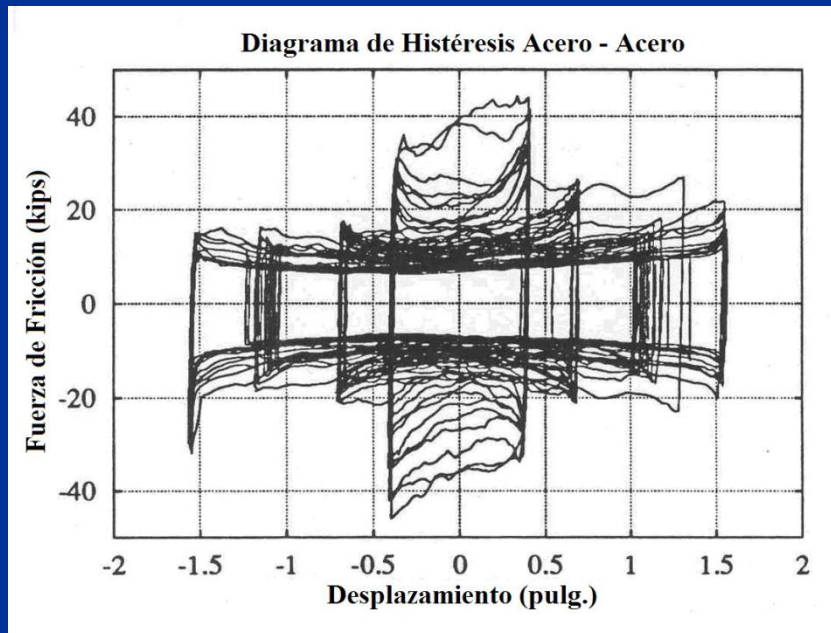
# Investigación Previa

## Conexión Empernada Rotacional (CERARL)

(U. de Berkeley; Grigorian y Popov 1992)

Acero

Latón



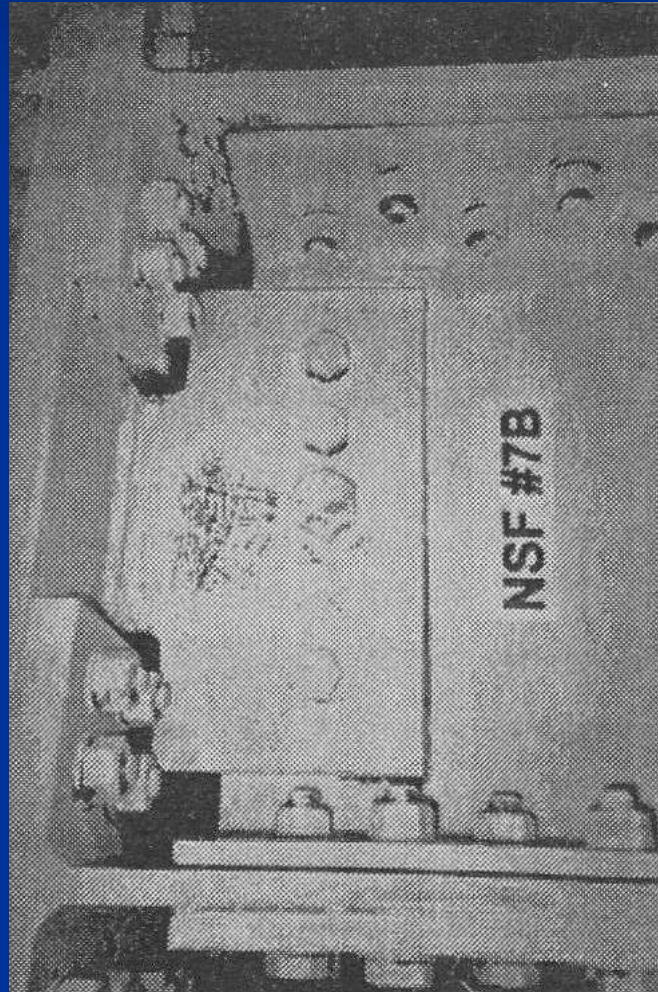
Comportamiento errático

Comportamiento estable

# Investigación Previa

## Conexión Empernada Rotacional (CERARL)

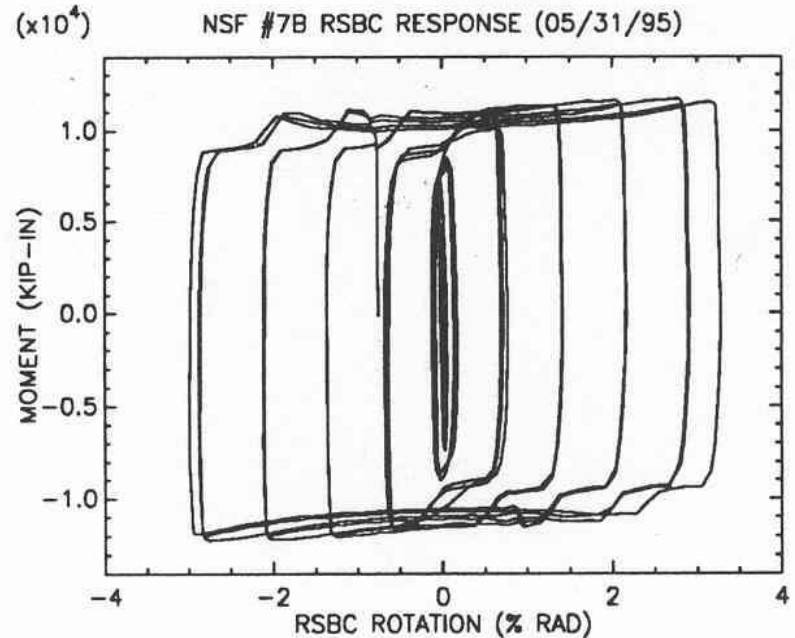
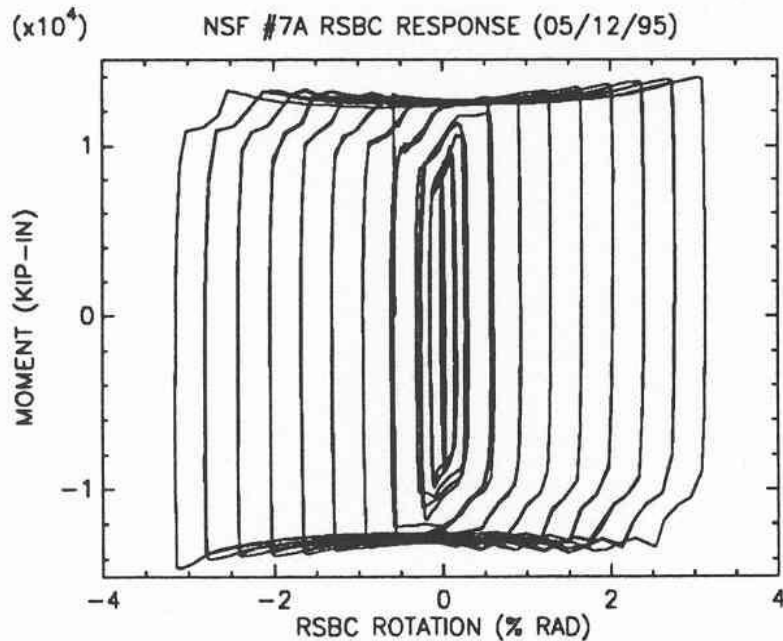
(U. de Berkeley; Yang y Popov 1995)



# Investigación Previa

## Conexión Empernada Rotacional (CERARL)

(U. de Berkeley; Yang y Popov 1995)



# Investigación Previa

## Conexión Empernada Rotacional (CERARL)

### Conclusiones

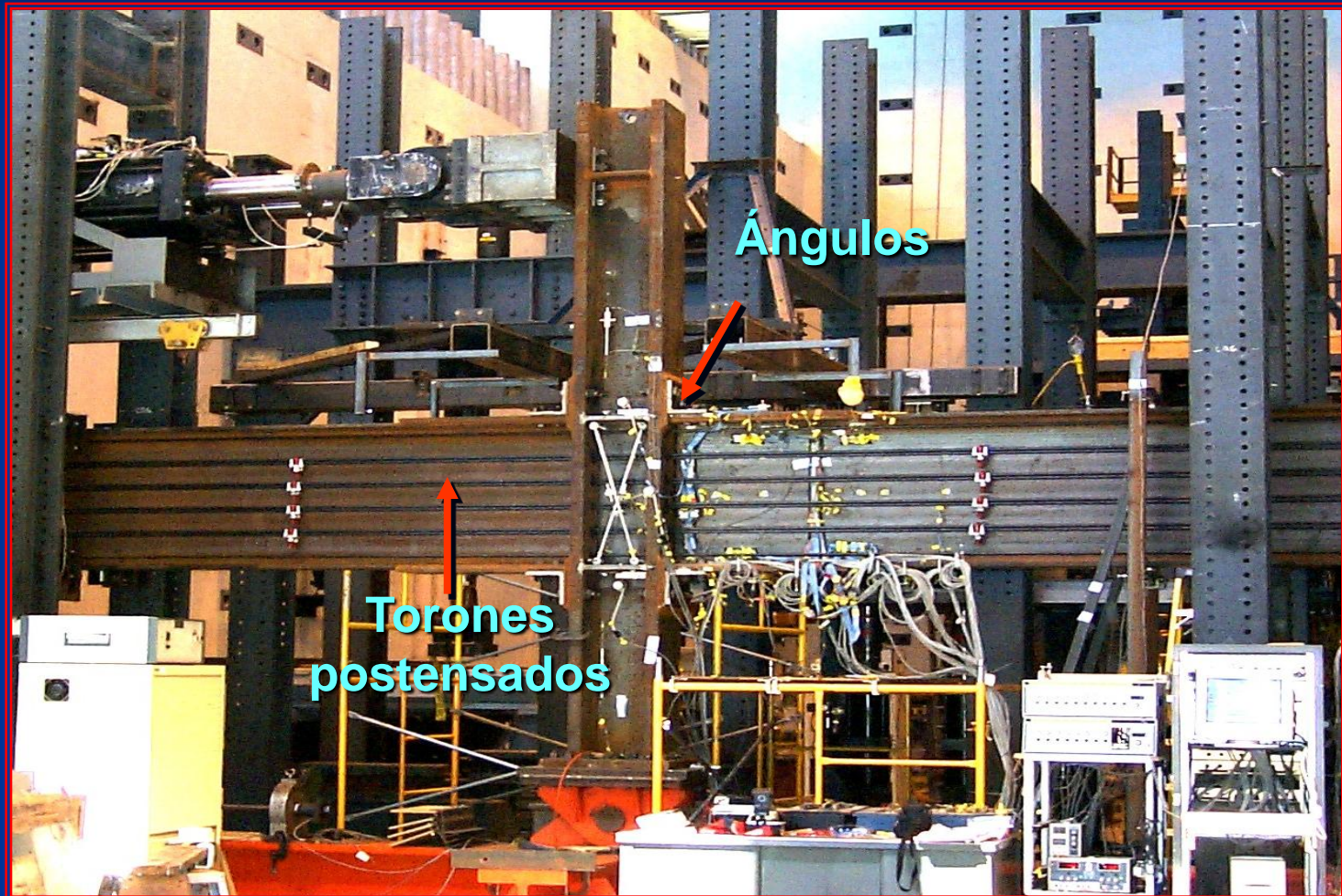
(U. de Berkeley; Yang y Popov 1995)

- Excelente disipación de energía
- Mejor que cualquier otra conexión a momento
- No hay degradación de resistencia
- No hay daño en los elementos estructurales
- Similares ciclos histeréticos analíticos y experimentales

# Investigación Previa

Conexiones Postensadas (CPT):

Ensayos Experimentales (U. Lehigh; Garlock 2002)

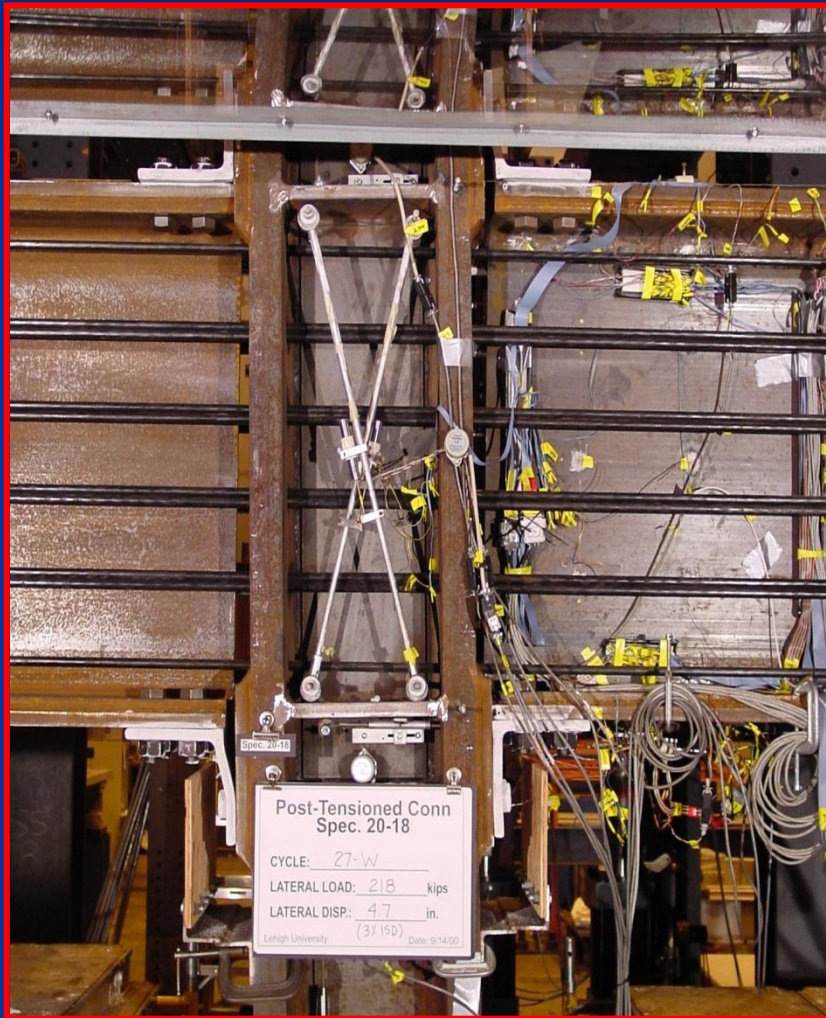


**Viga: W 36x150 — Columna: W 14x398**

# Investigación Previa

## Conexiones Postensadas (CPT):

## Ensayos Experimentales (U. Lehigh; Garlock 2002)



### Parámetros

$N_s$  = número de torones

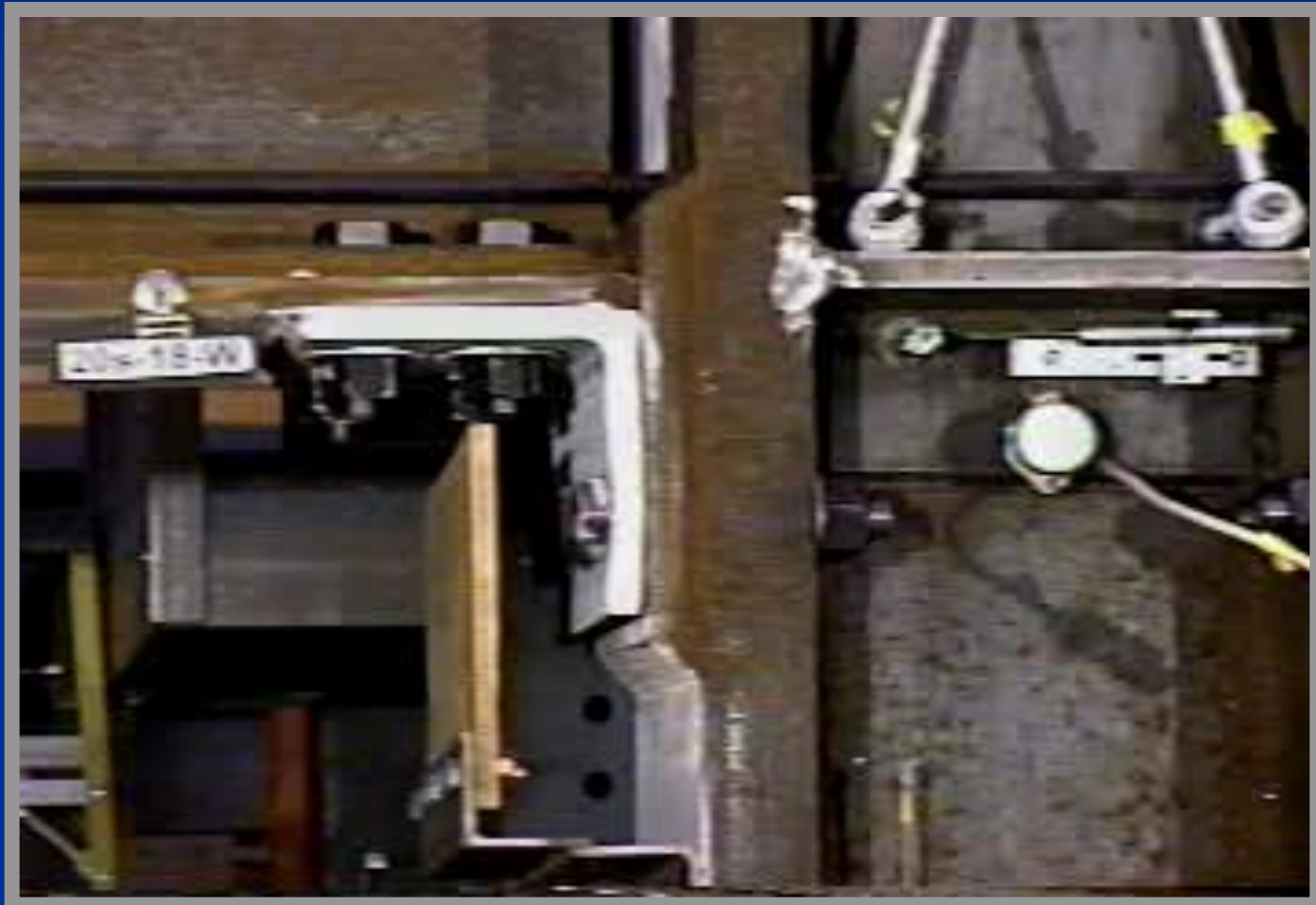
$T_o$  = fuerza total de postensado inicial

$L_{rp}$  = longitud de la placa de refuerzo

# Investigación Previa

Conexiones Postensadas (CPT):

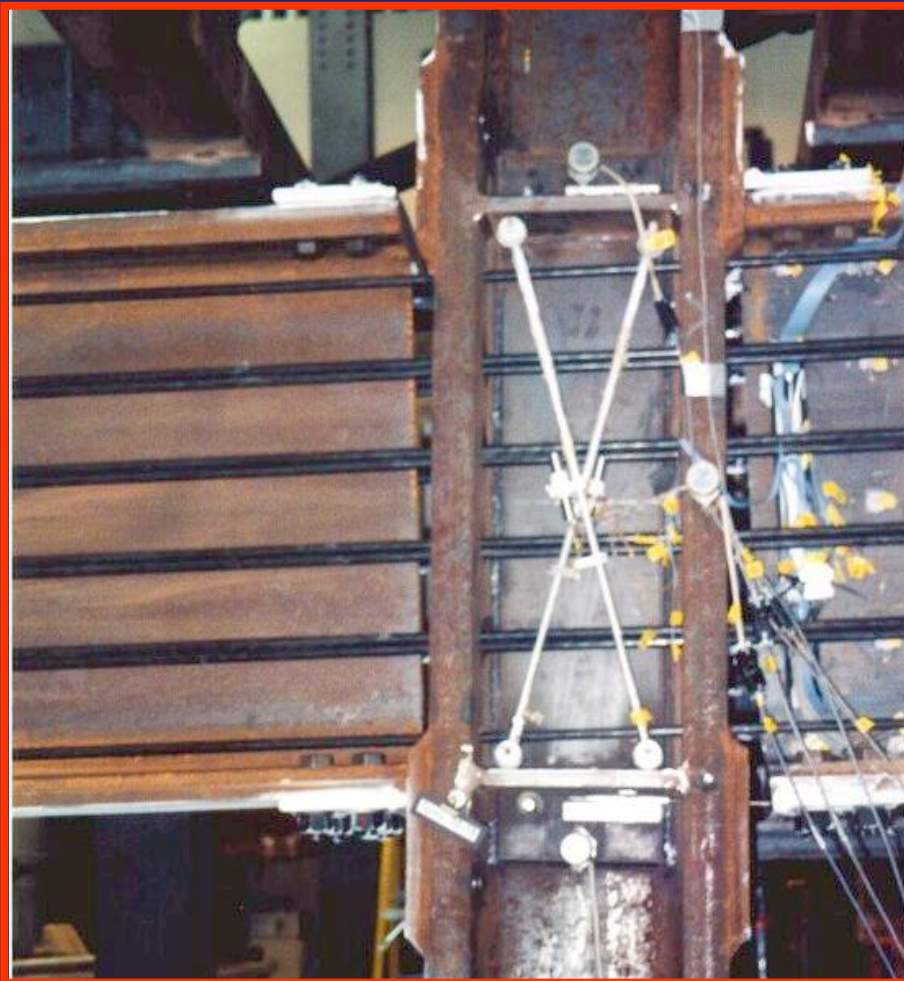
Ensayos Experimentales (U. Lehigh; Garlock 2002)



# Investigación Previa

Conexiones Postensadas (CPT):

Ensayos Experimentales (U. Lehigh; Garlock 2002)

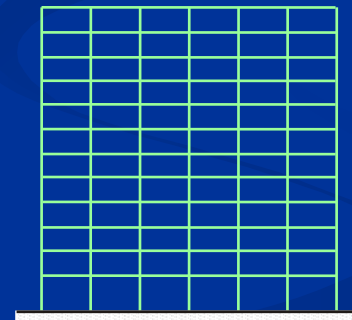
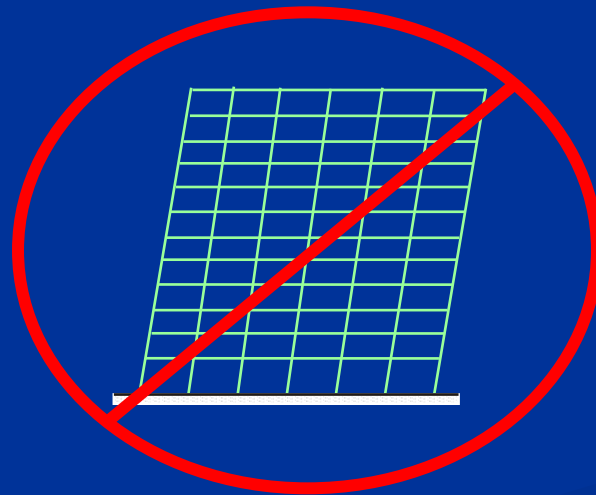




# Investigación Previa

## Conexiones Postensadas (CPT): Ventajas (U. Lehigh, Garlock 2002)

- Capacidad de auto-centrarse (no deriva de entrepiso permanente)



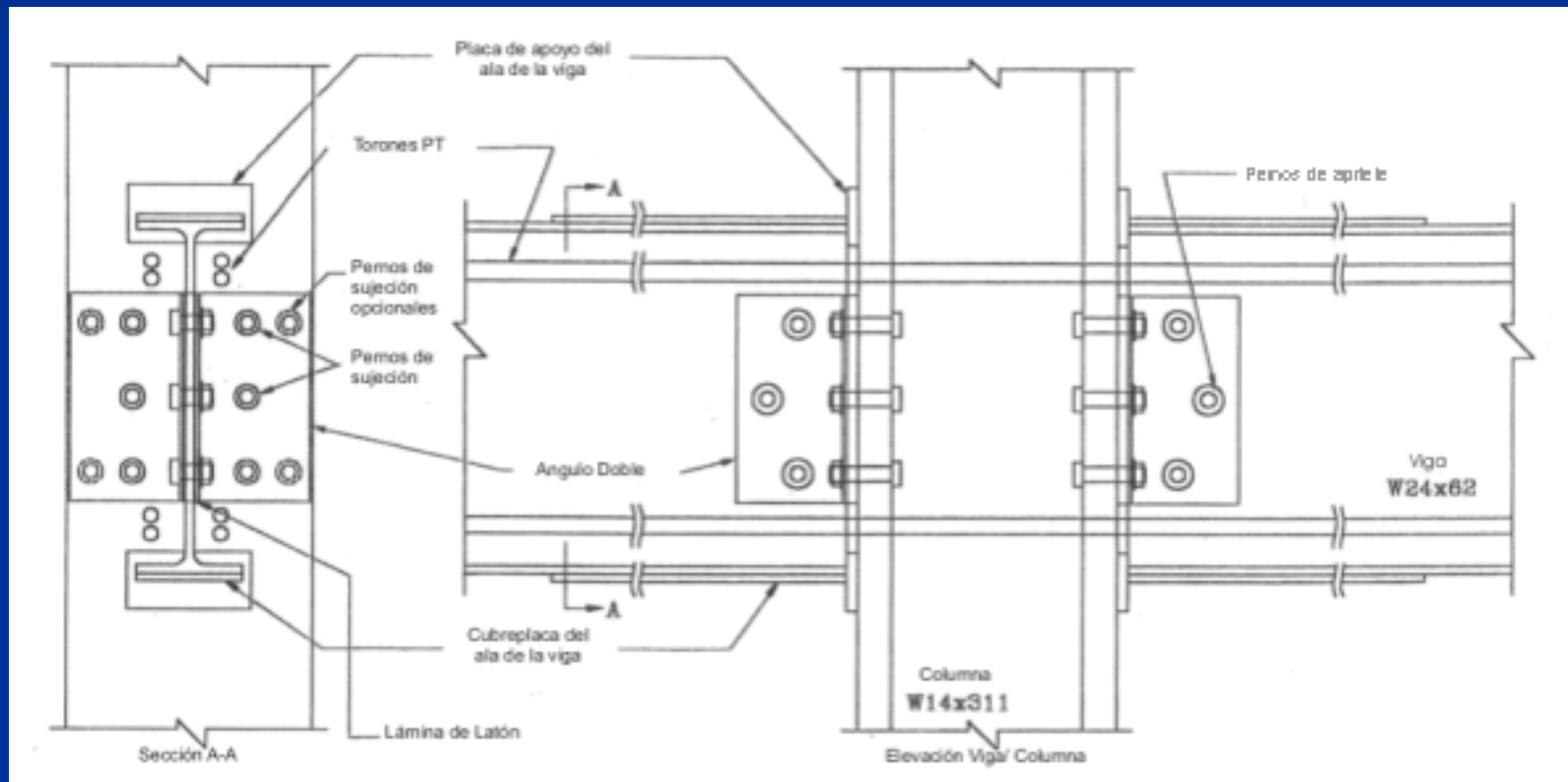
# Investigación Previa

## Conexiones Postensadas (CPT): Conclusiones (U. Lehigh; Garlock 2002)

- Adecuada resistencia, rigidez, ductilidad, y capacidad de auto-centrarse
- Deformación inelástica concentrada en los ángulos. Fácilmente reemplazables
- Viga/columna y zona de panel permanecen en el rango elástico
- No soldadura de campo

# Investigación Previa

## Conexiones PT con Elementos de Fricción (CPEF) (U. Lehigh; Petty 1999)



# Investigación Previa

## Conexiones PT con Elementos de Fricción (CPEF)

(U. Lehigh; Petty 1999)

Ensayos a nivel de componentes para estudiar las superficies acero-latón :

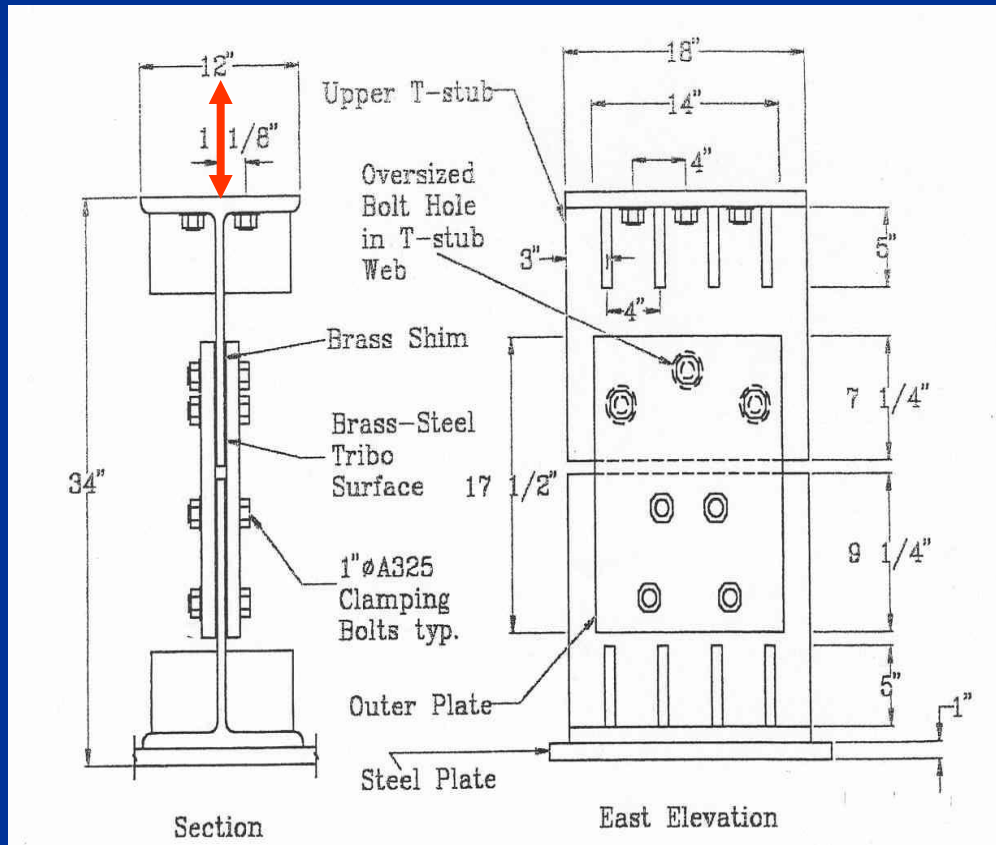
- Ensayos de Placas Dobles a Fricción
- Ensayos de Ángulos Dobles a Fricción

# Investigación Previa

## Conexiones PT con Elementos de Fricción (CPEF)

(U. Lehigh; Petty 1999)

### Ensayos de Placas Dobles a Fricción



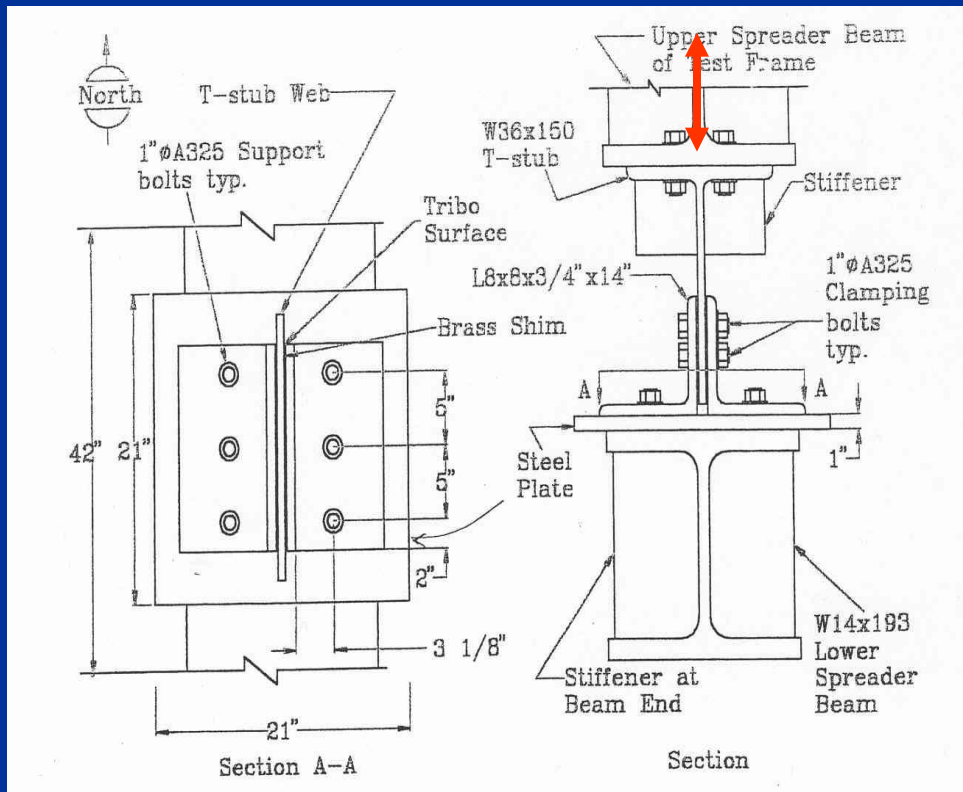
- Para estudiar las superficies latón-acero (similar a elementos de fricción en las alas de las vigas)

# Investigación Previa

## Conexiones PT con Elementos de Fricción (CPEF)

(U. Lehigh; Petty 1999)

### Ensayos de Ángulos Dobles a Fricción



- Para estudiar el comportamiento de ángulos dobles

# Investigación Previa

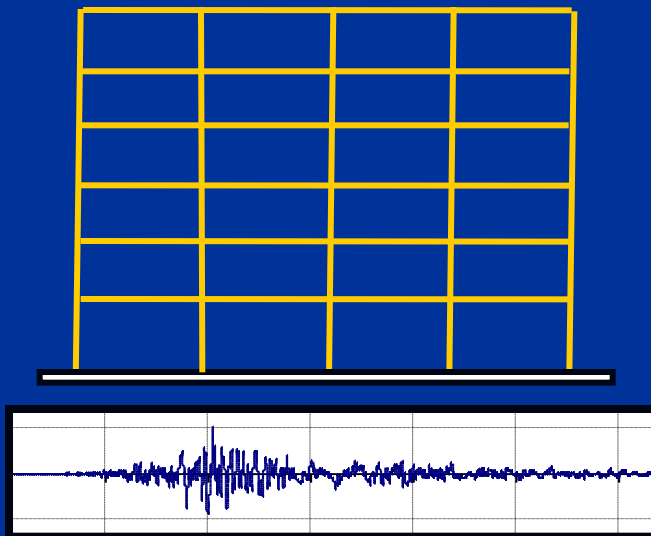
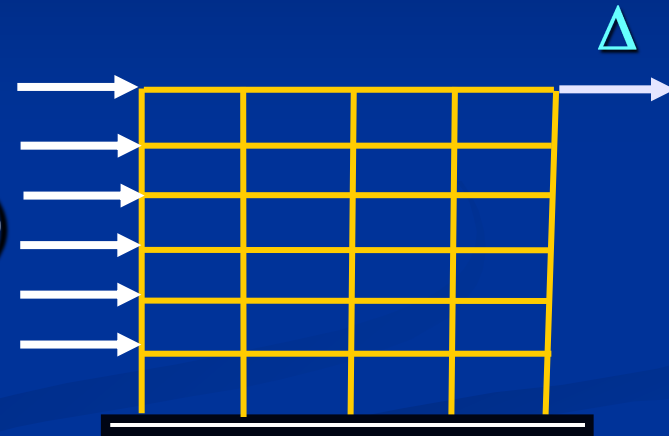
## Conexiones PT con Elementos de Fricción (CPEF): Conclusiones (U. Lehigh; Petty 1999)

- Coeficientes de fricción estático y cinético son muy similares
- Usar un coeficiente de fricción de 0.45
- Placas latón-acero producen una fuerza de fricción estable
- $F_f = 2\mu N$  (Teoría de Coulomb)
- Ángulos dobles a fricción pueden ser una forma viable de disipar energía en una CPT de acero

# Investigación Previa

## Conexiones PT con Elementos de Fricción (CPEF) para Edificios Nuevos (U. Lehigh; Rojas 2003)

- Análisis lateral estático (pushover)



- Análisis dinámicos con ocho registros de aceleraciones a nivel DBE y MCE



# Investigación Previa

## Conexiones PT con Elementos de Fricción (CPEF) para Edificios Nuevos (U. Lehigh; Rojas 2003)

### Conclusiones:

- Desempeño sísmico superior a un pórtico resistente a momento con conexiones soldadas convencionales
- Capacidad auto-centrante

# Contenido

- Introducción
- Objetivos
- Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)
- Investigación Previa
- **Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes**
- Modelo Analítico
- Diseño por Desempeño
- Evaluación Sísmica de Edificios Existentes
- Conclusiones

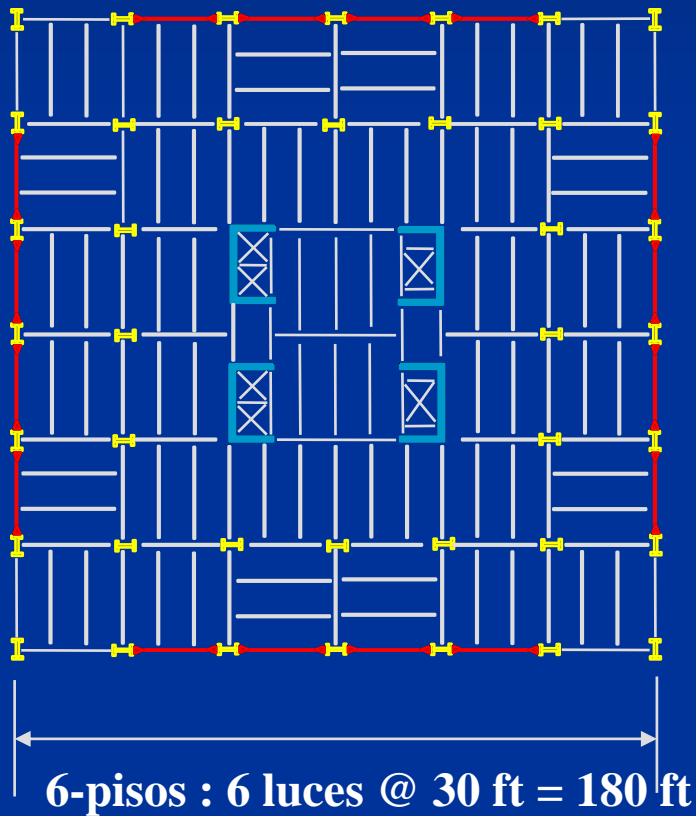
# Rehabilitación de Edificios Existentes

## ¿Porqué usar CPEF en PARM?

- Hay miles de edificios con la conexión soldadas a momento
- Daño significativo de acuerdo a la filosofía de diseño actual ante sismos severos (en especial MCE).
- Colapso es posible si réplicas severas ocurren en el edificio dañado.

# Rehabilitación de Edificios Existentes

## PARM-TR



--- PLANTA ---

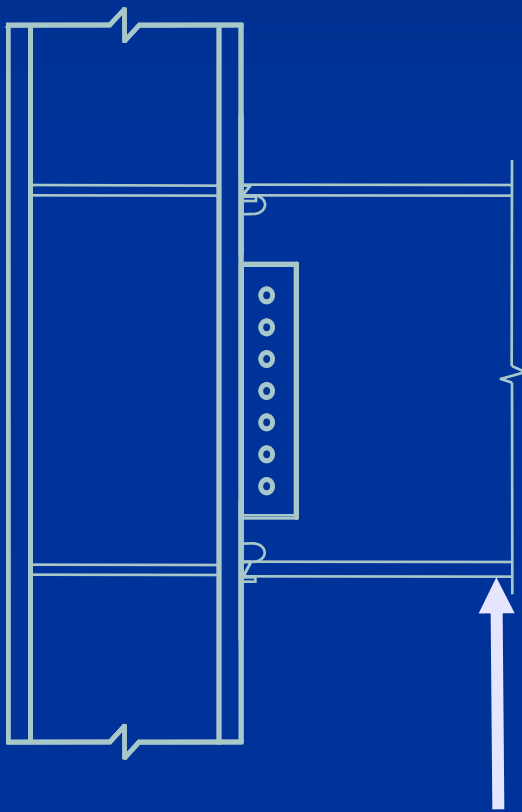


ELEVACION

# Rehabilitación de Edificios Existentes

## Proceso Constructivo

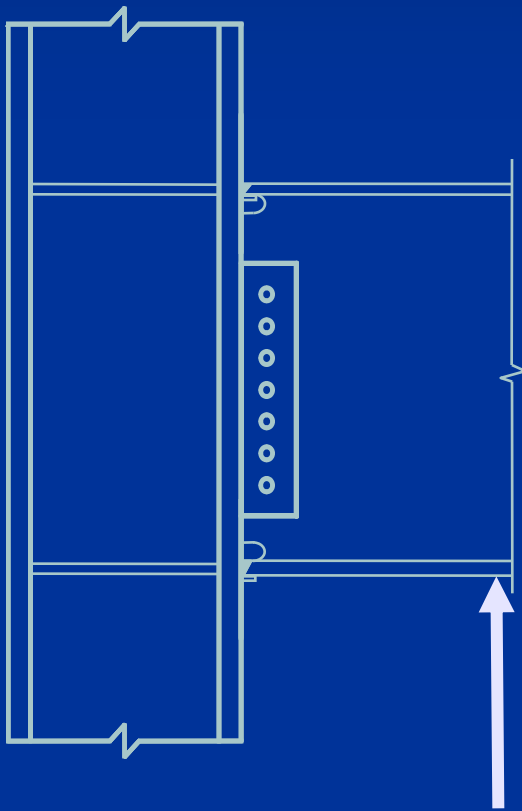
### Apuntalar Viga



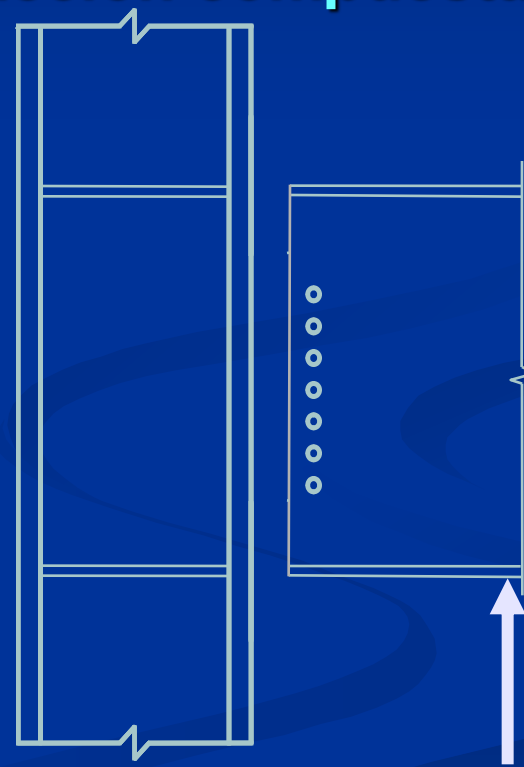
# Rehabilitación de Edificios Existentes

## Proceso Constructivo

Apuntalar Viga



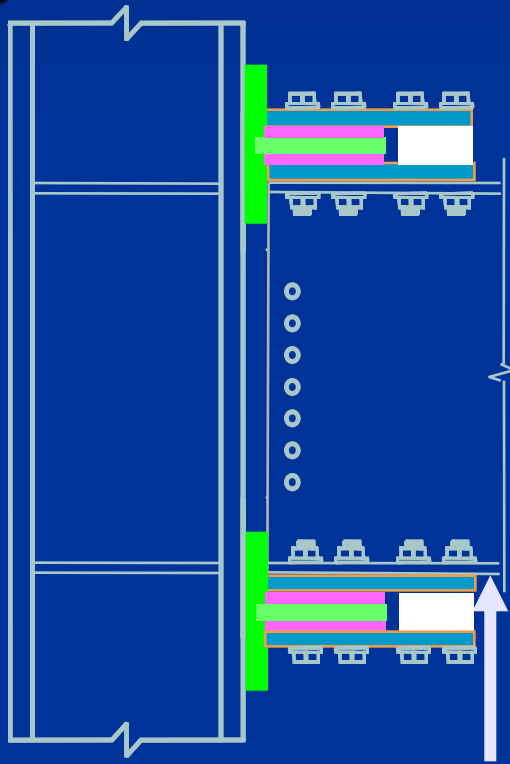
Remover conexión  
y acción compuesta de losa



# Rehabilitación de Edificios Existentes

## Proceso Constructivo

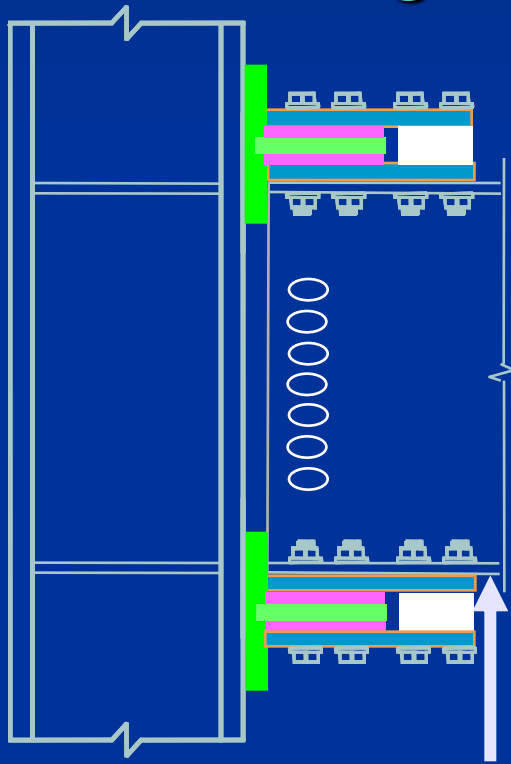
### Placas de refuerzo y Elementos de Fricción



# Rehabilitación de Edificios Existentes

## Proceso Constructivo

Agujeros en alma  
de viga

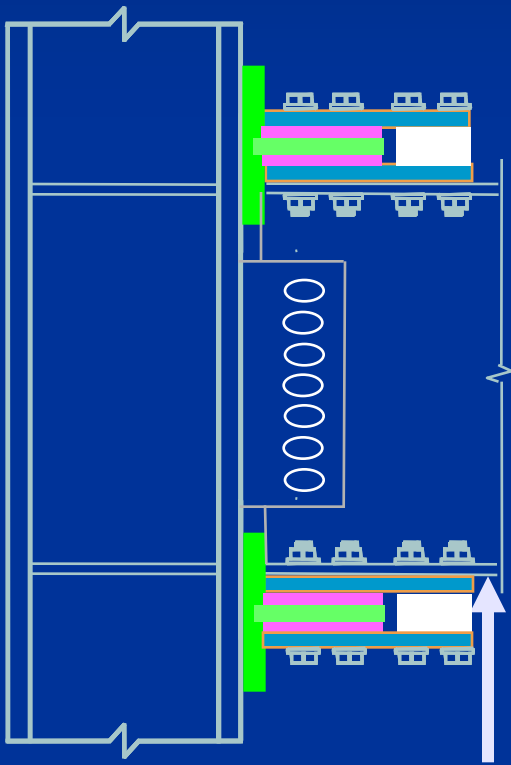




# Rehabilitación de Edificios Existentes

## Proceso Constructivo

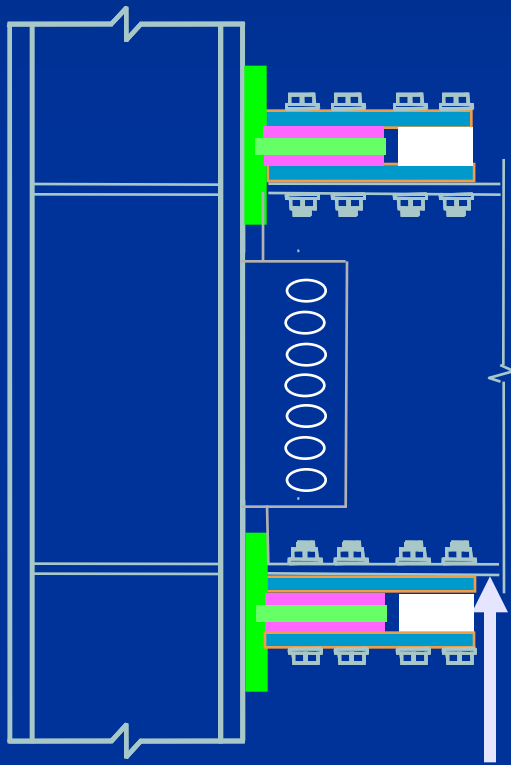
### Placa de cortante



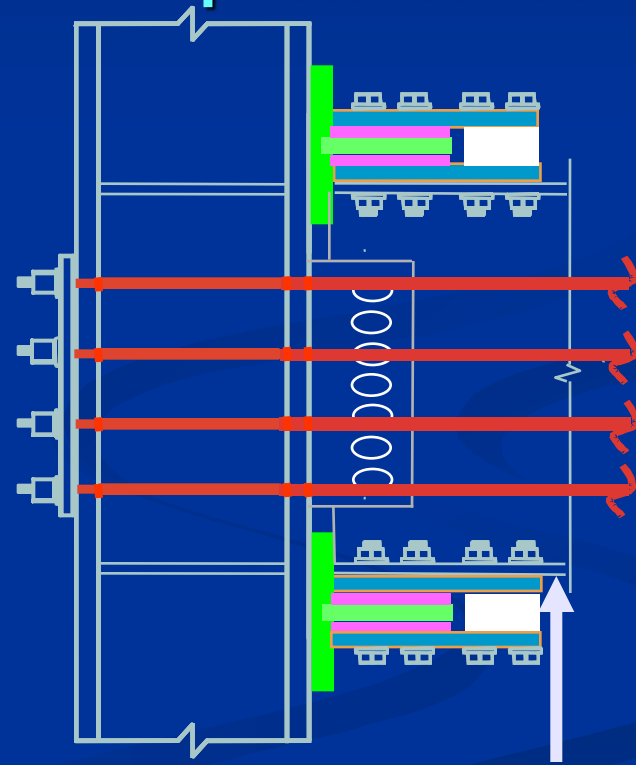
# Rehabilitación de Edificios Existentes

## Proceso Constructivo

Placa de cortante

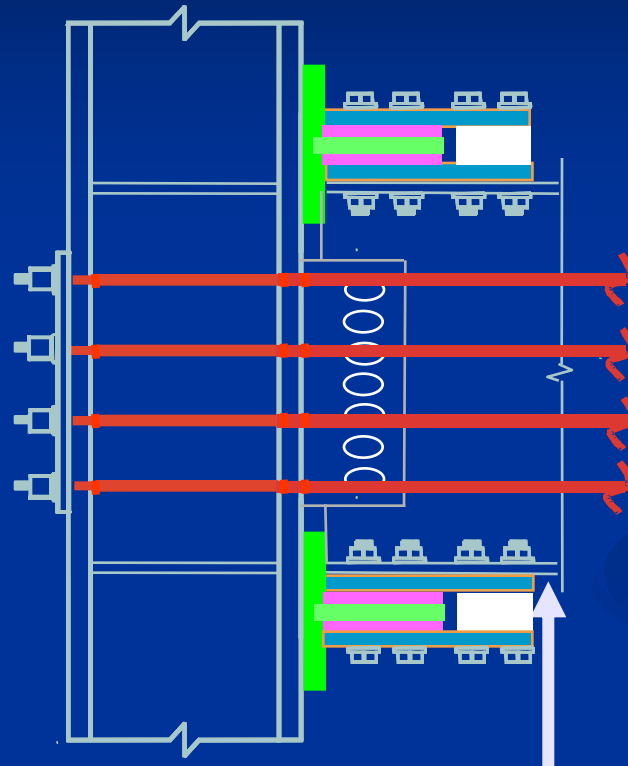


Colocar torones postensados



# Rehabilitación de Edificios Existentes

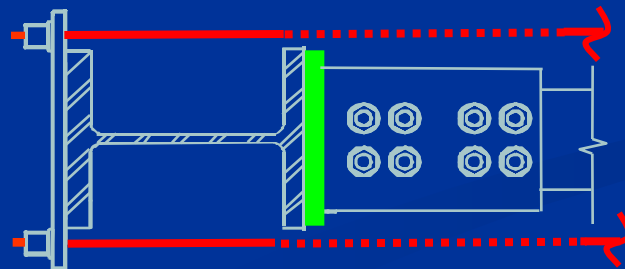
## Proceso Constructivo



Apretar pernos  
en los elementos de  
fricción

Reforzar vigas  
colectoras (de ser  
necesario)

Tensar torones  
postensados



Detalle para  
apertura en las  
conexiones

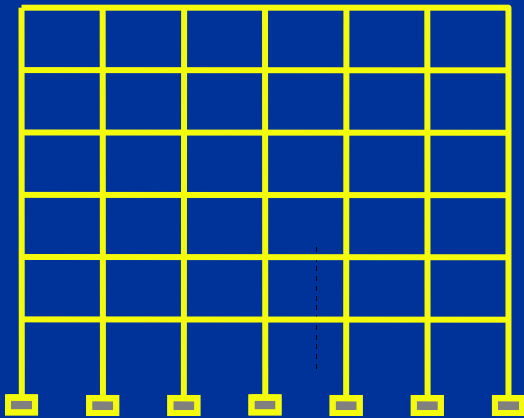
# Contenido

- Introducción
- Objetivos
- Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)
- Investigación Previa
- Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes
- **Modelo Analítico**
- Diseño por Desempeño
- Evaluación Sísmica de Edificios Existentes
- Conclusiones

# Modelo Analítico

## DRAIN-2DX

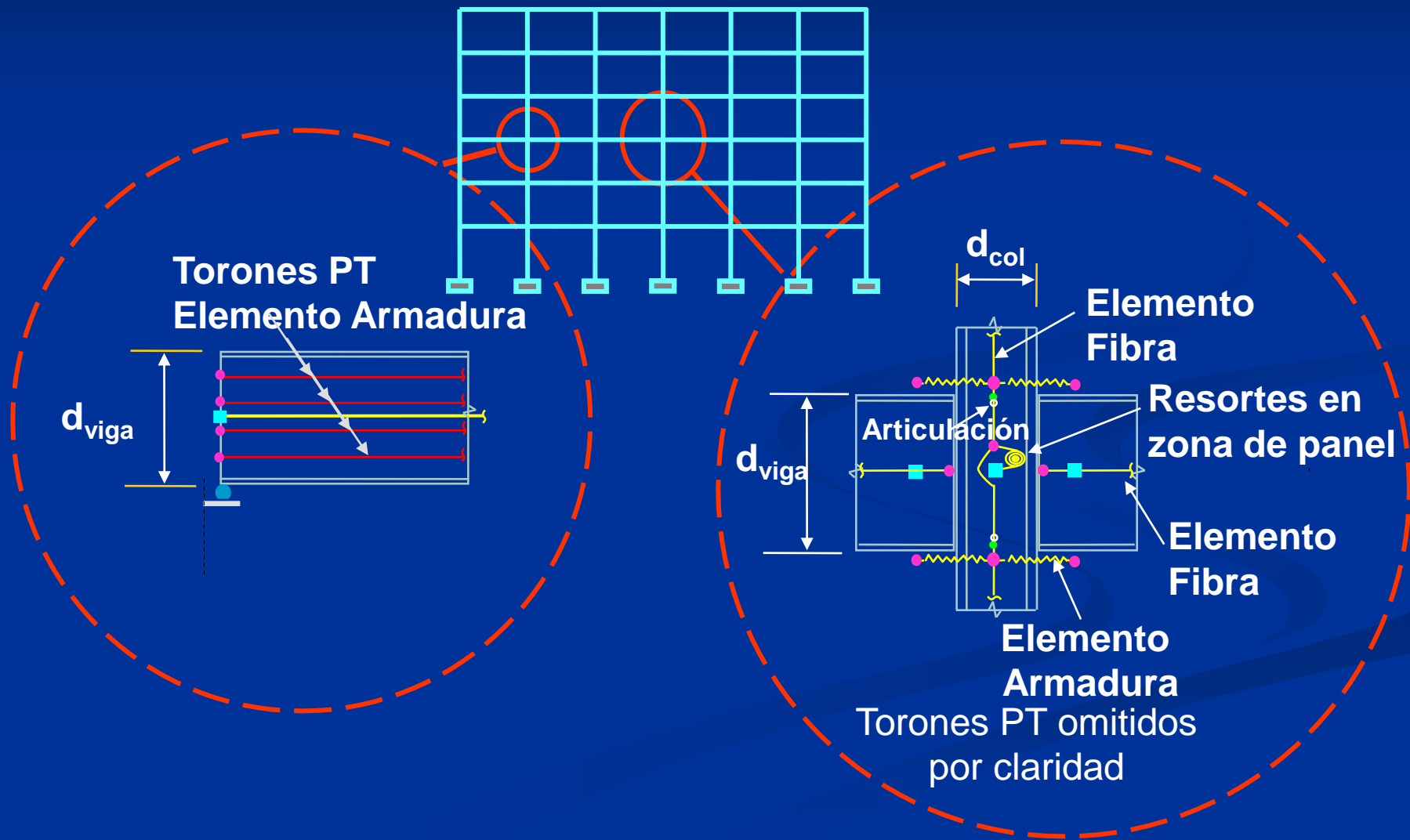
Permite hacer análisis no-lineales estáticos y dinámicos para pórticos bi-dimensionales



- Elemento Fibra
- Elemento Armadura
- Elemento de Conexión
- Elemento de Resorte Rotacional
- Elemento Viga-Columna

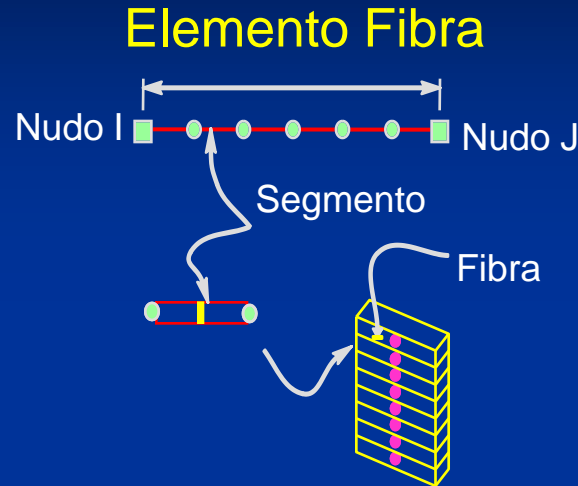
# Modelo Analítico

## Modelo con DRAIN-2DX

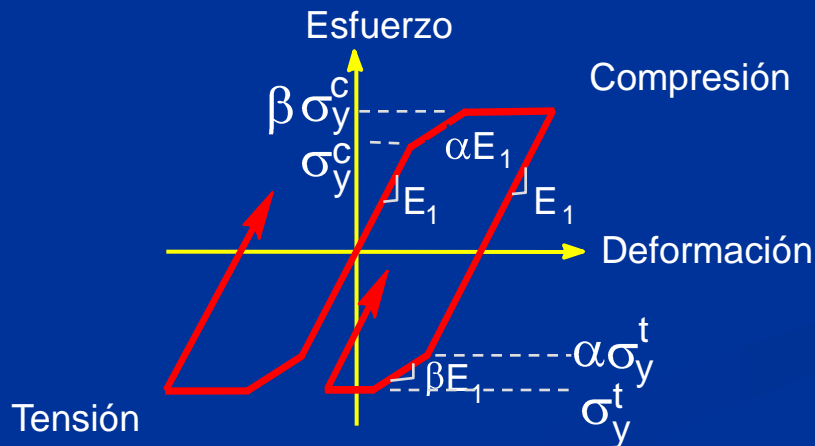


# Modelo Analítico

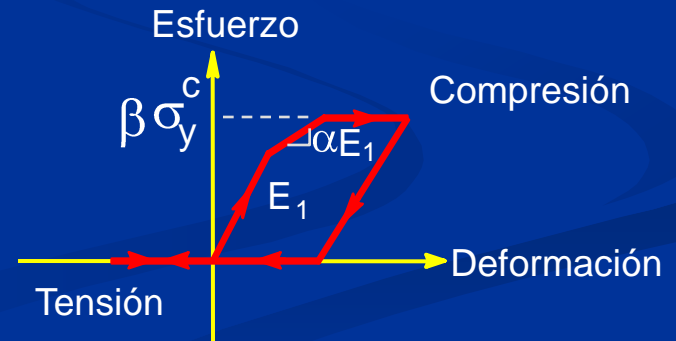
## Modelo con DRAIN-2DX



### Propiedad de Materiales para Fibras de Acero

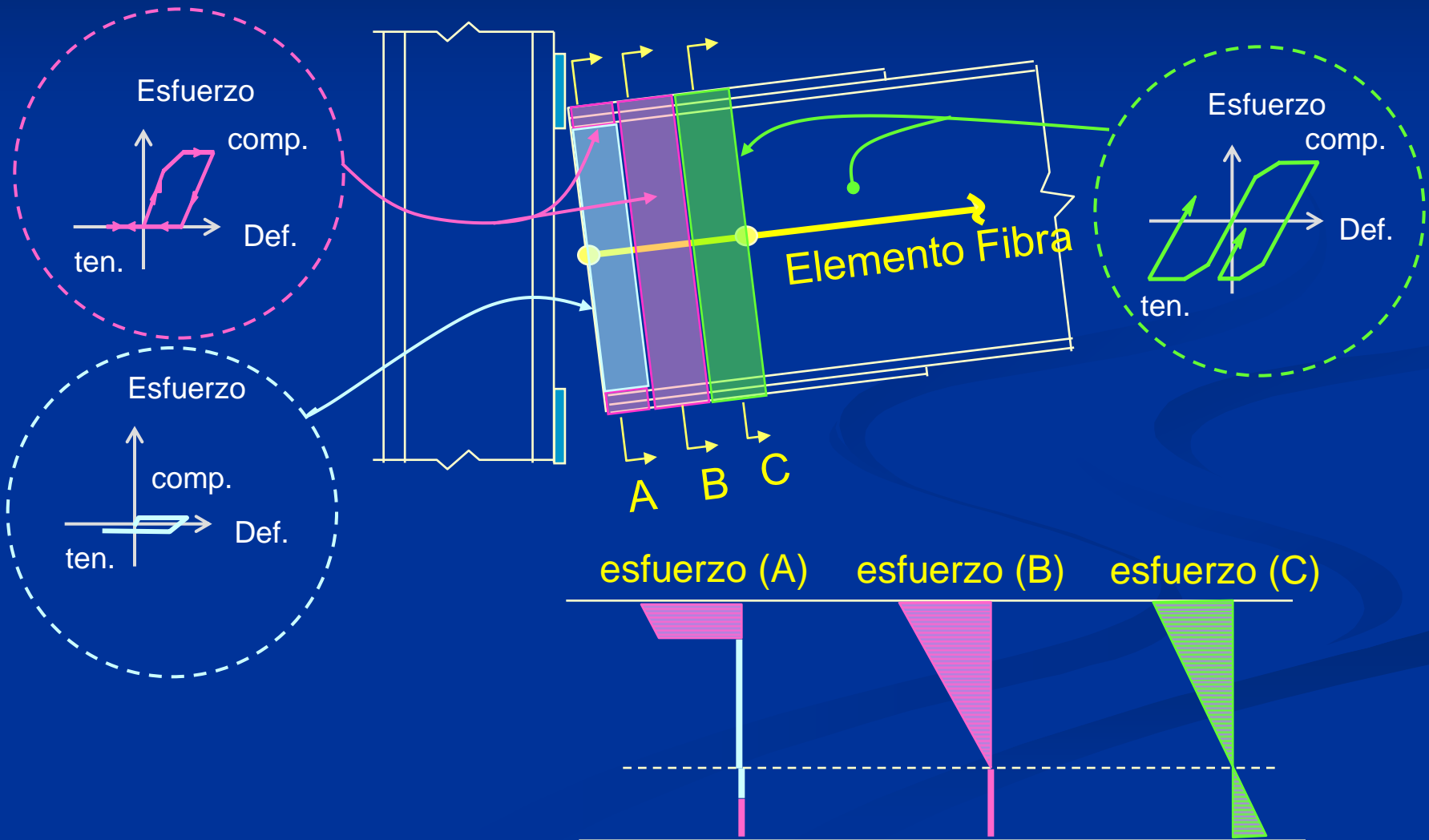


### Propiedad de Materiales para Fibras en Contacto con Columna



# Modelo Analítico

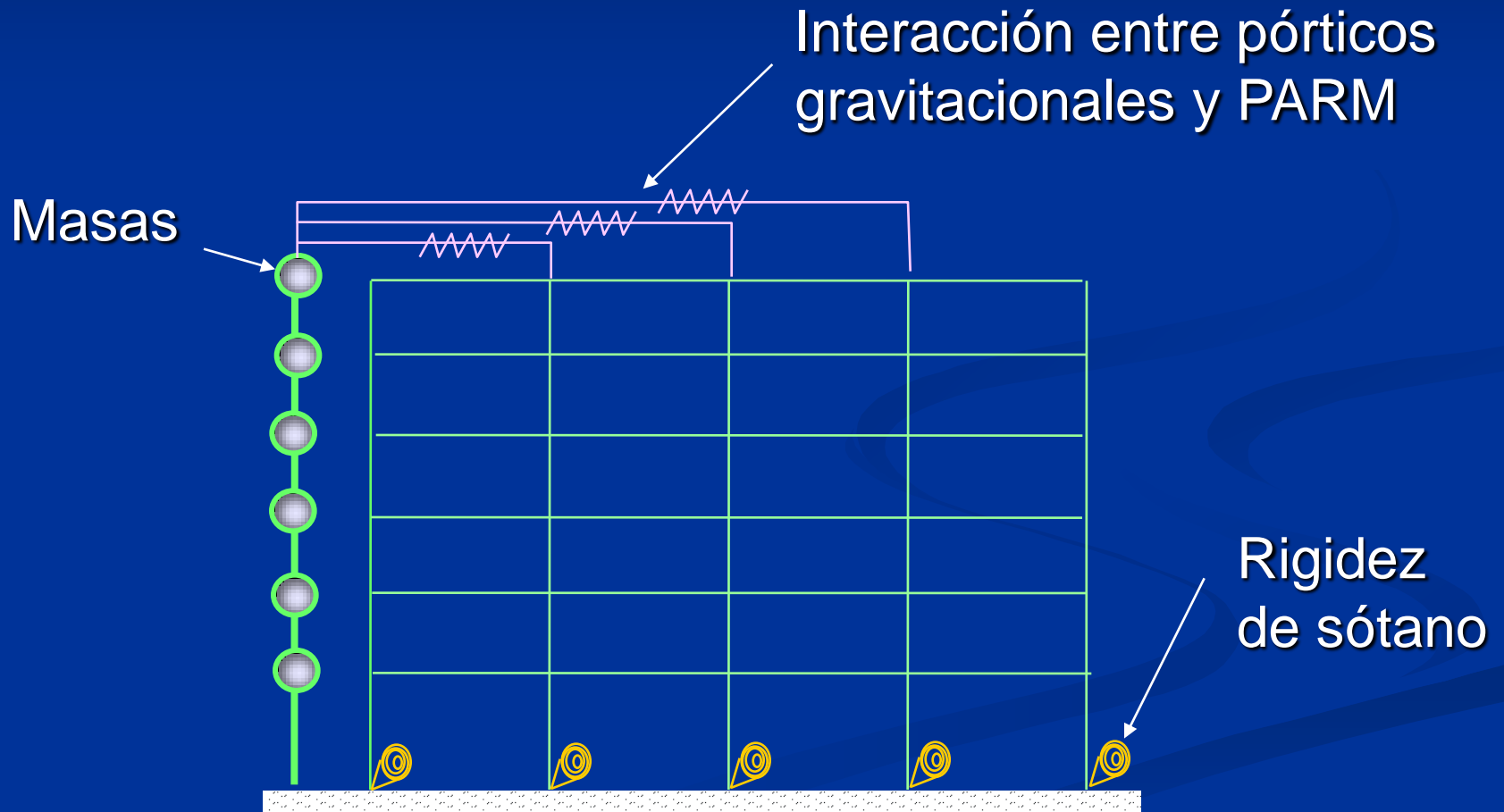
## Modelo con DRAIN-2DX: Abertura





# Modelo Analítico

## Pórtico Rehabilitado con CPEF

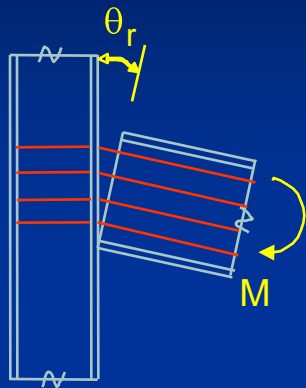


# Contenido

- Introducción
- Objetivos
- Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)
- Investigación Previa
- Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes
- Modelo Analítico
- **Diseño por Desempeño**
- Evaluación Sísmica de Edificios Existentes
- Conclusiones

# Diseño por Desempeño

## Objetivos

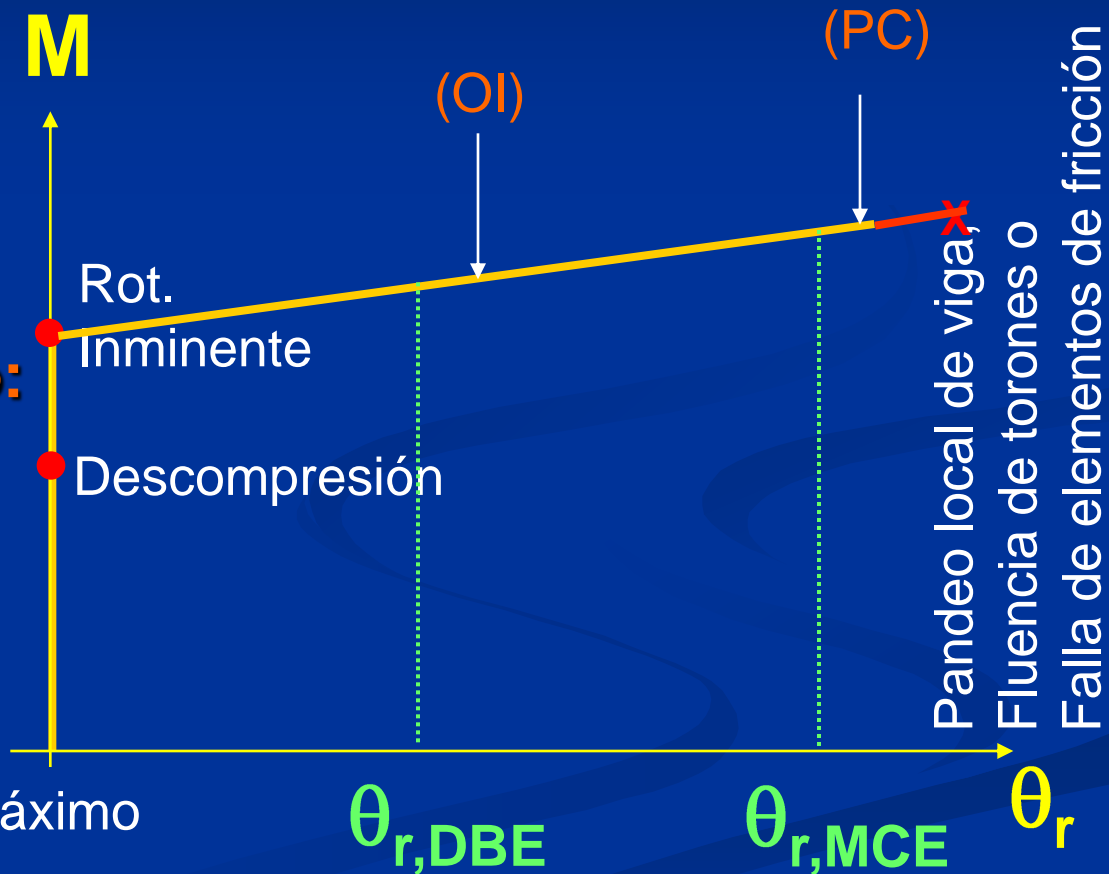


### Niveles de Des. Sísmico:

- (OI) Ocupación inmediata
- (PC) Prevención del colapso

### Niveles Sísmicos:

- (DBE) Sismo de Diseño
- (MCE) Sismo Considerado Máximo

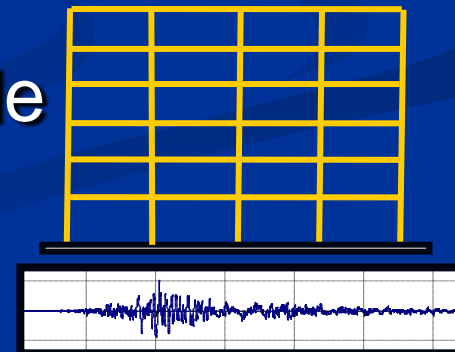
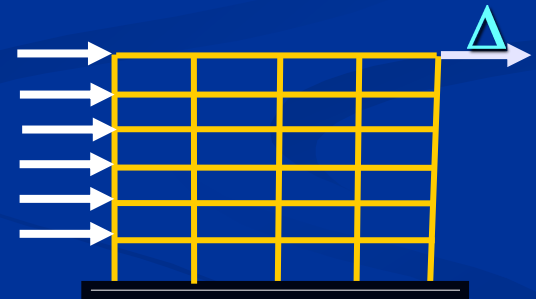


# Contenido

- Introducción
- Objetivos
- Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)
- Investigación Previa
- Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes
- Modelo Analítico
- Diseño por Desempeño
- **Evaluación Sísmica de Edificios Existentes**
- Conclusiones

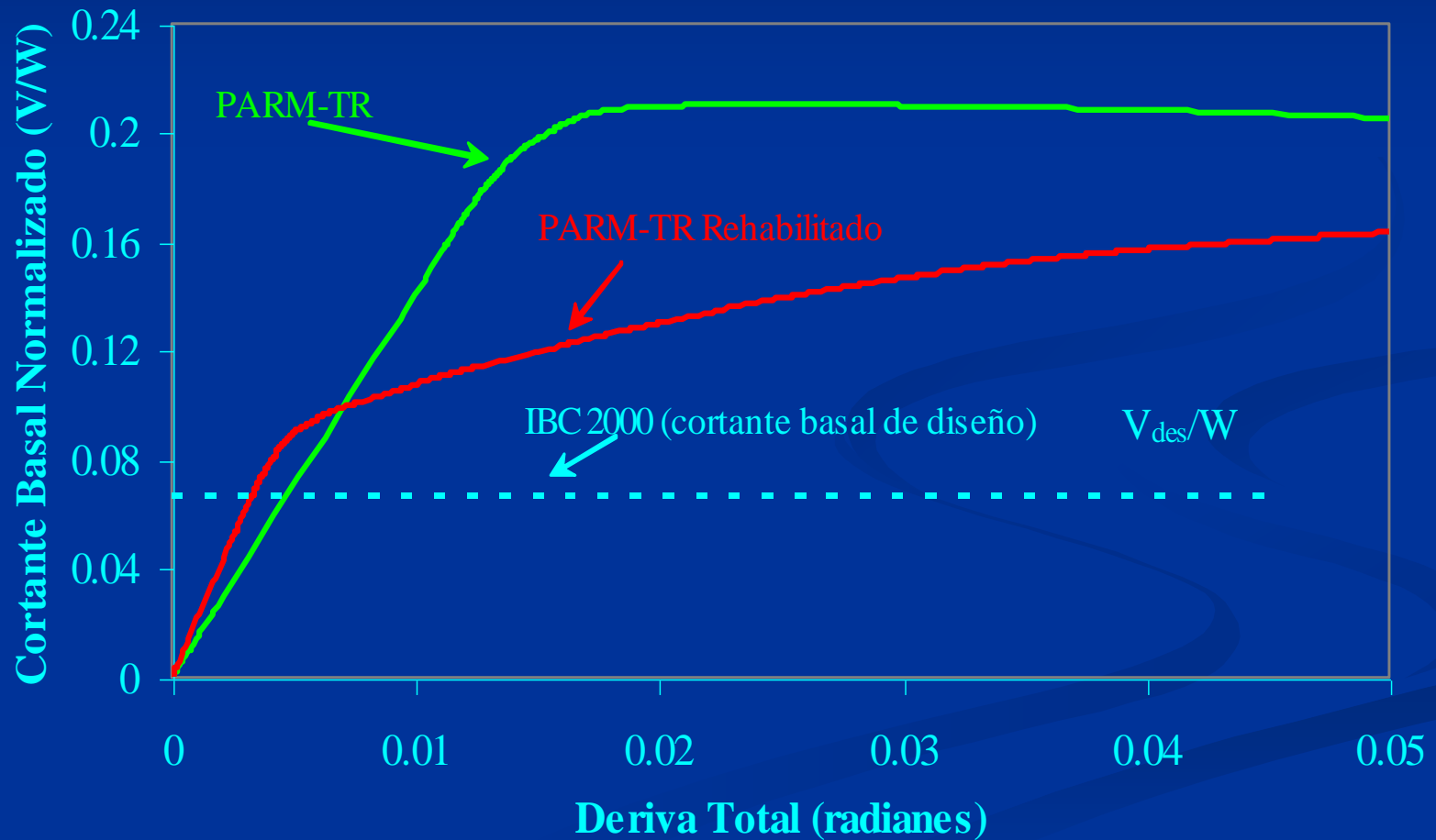
# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

- Modelo analítico DRAIN-2DX de pórtico rehabilitado.
- Modelo similar al caso de edificios nuevos con CPEF.
- CPEF diseñadas de acuerdo al procedimiento de diseño para edificios nuevos.
- Análisis lateral estático (pushover)
- Análisis dinámicos con ocho registros de aceleraciones a nivel DBE y MCE.



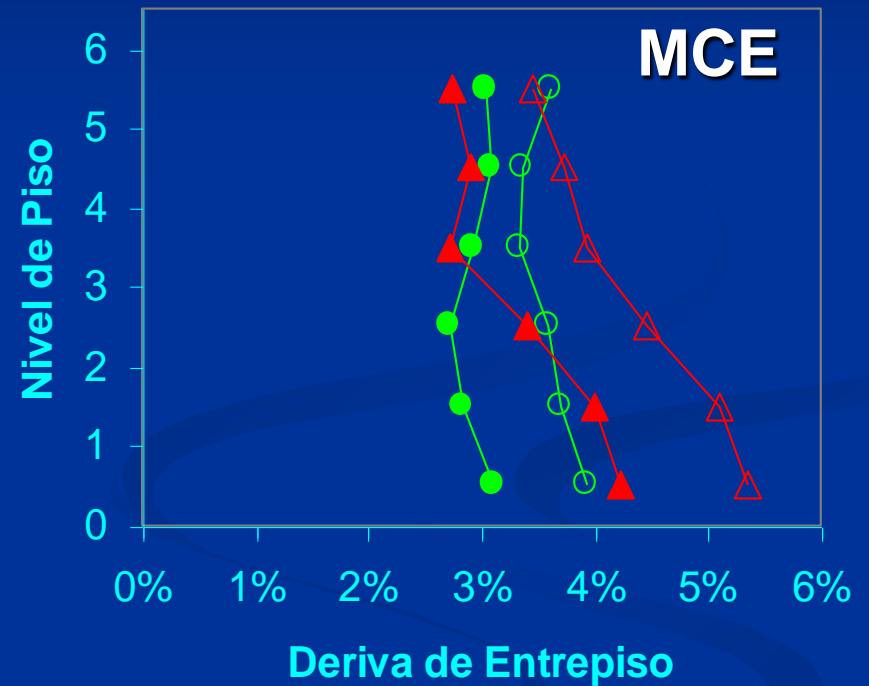
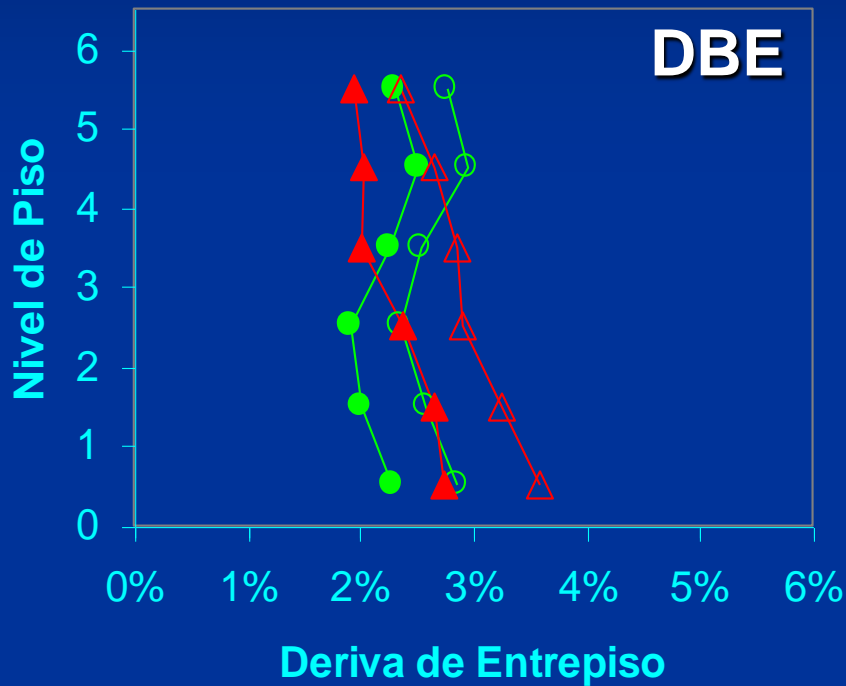
# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

## Resultados Estáticos Laterales



# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

## Desempeño Sísmico: Resultados Dinámicos



### Legenda

**Rehabilitado:**

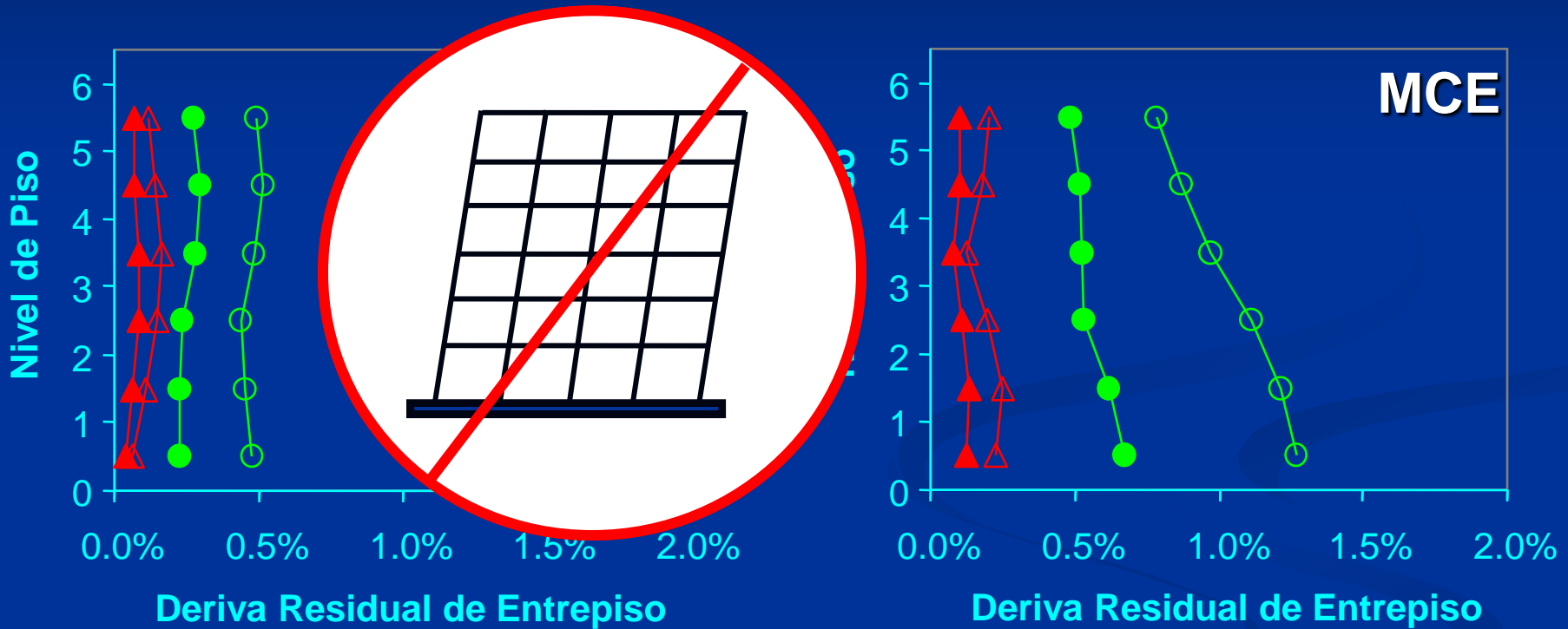
- ▲ media
- △ media +  $\sigma$

**TR:**

- media
- media +  $\sigma$

# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

## Desempeño Sísmico: Resultados Dinámicos

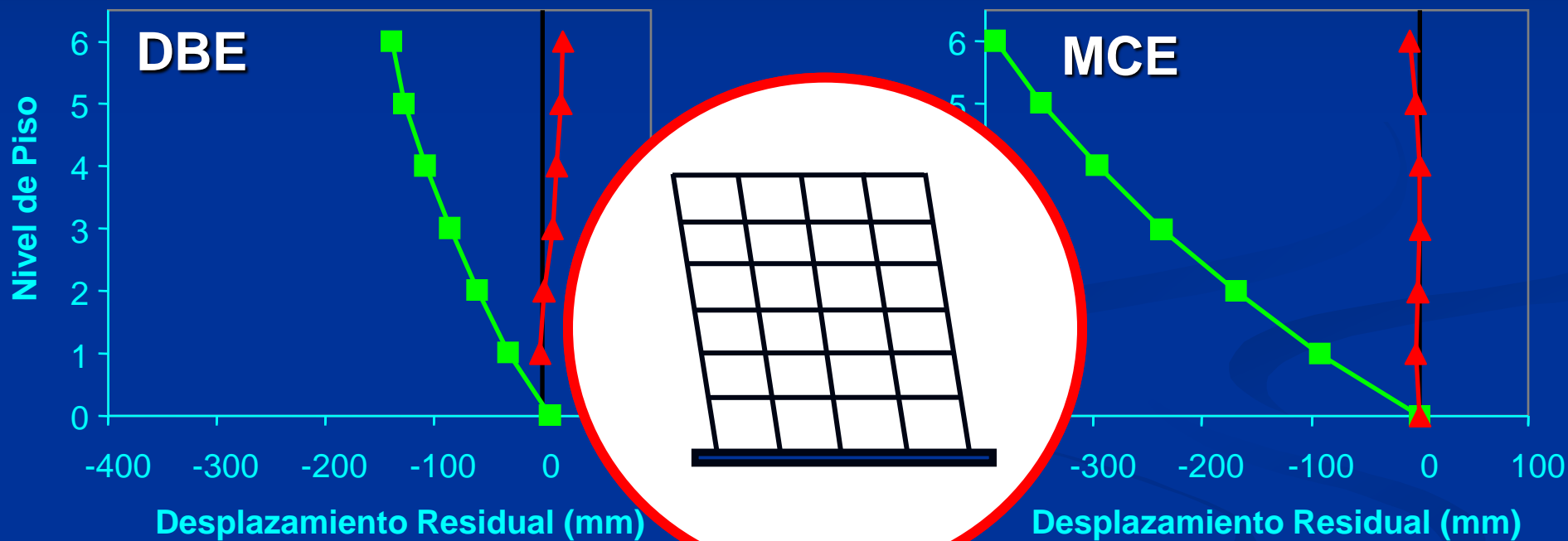




# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

## Desempeño Sísmico: Resultados Dinámicos

(Registro Canoga; Northridge 1994)



### Leyenda

■ PARM-TR



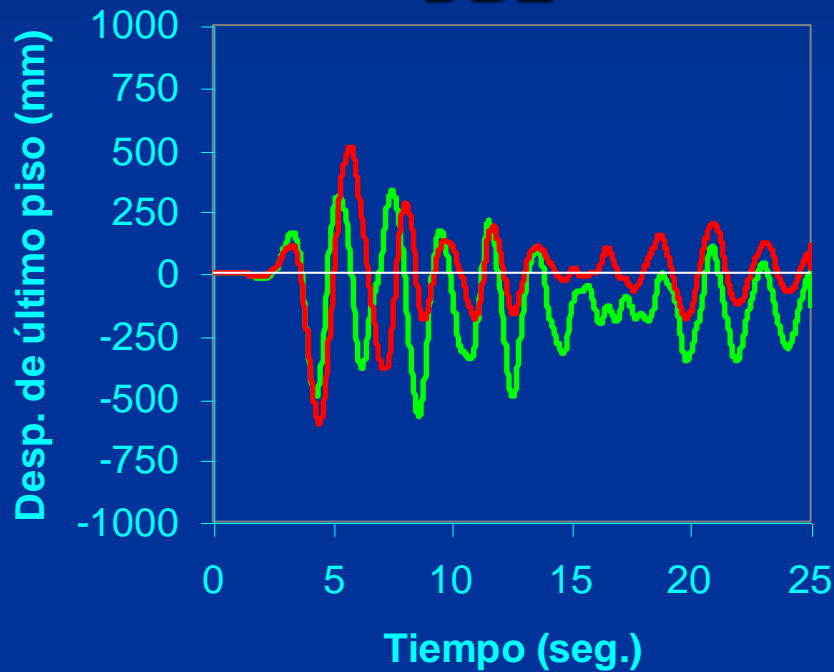
▲ PARM-TR Rehabilitado

# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

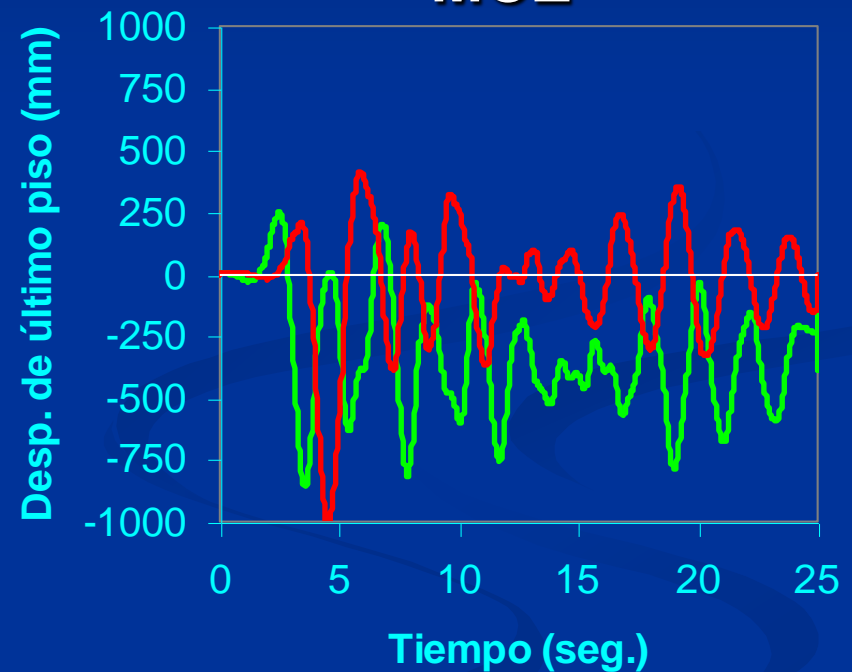
## Desempeño Sísmico: Resultados Dinámicos

(Registro Canoga; Northridge 1994)

### DBE



### MCE



### Leyenda

— PARM-TR

— PARM-TR Rehabilitado

# Contenido

- Introducción
- Objetivos
- Conexión Postensada con Elementos de Fricción (CPEF)
- Investigación Previa
- Diseño por Desempeño
- Modelo Analítico
- Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes
- Evaluación Sísmica de Edificios Existentes
- **Conclusiones**

# Conclusiones

- Una CPEF es una alternativa prometedora para edificios nuevos y existentes con PARM
- El modelo analítico desarrollado predice con gran exactitud el comportamiento de la conexión sometida a carga cíclica.
- Prácticamente no existe daño en los elementos estructurales a niveles de sismos DBE y MCE.
- El desempeño sísmico de un PARM con CPEF es satisfactorio en términos de resistencia, disipación de energía, deformación y capacidad de auto-centrarse.

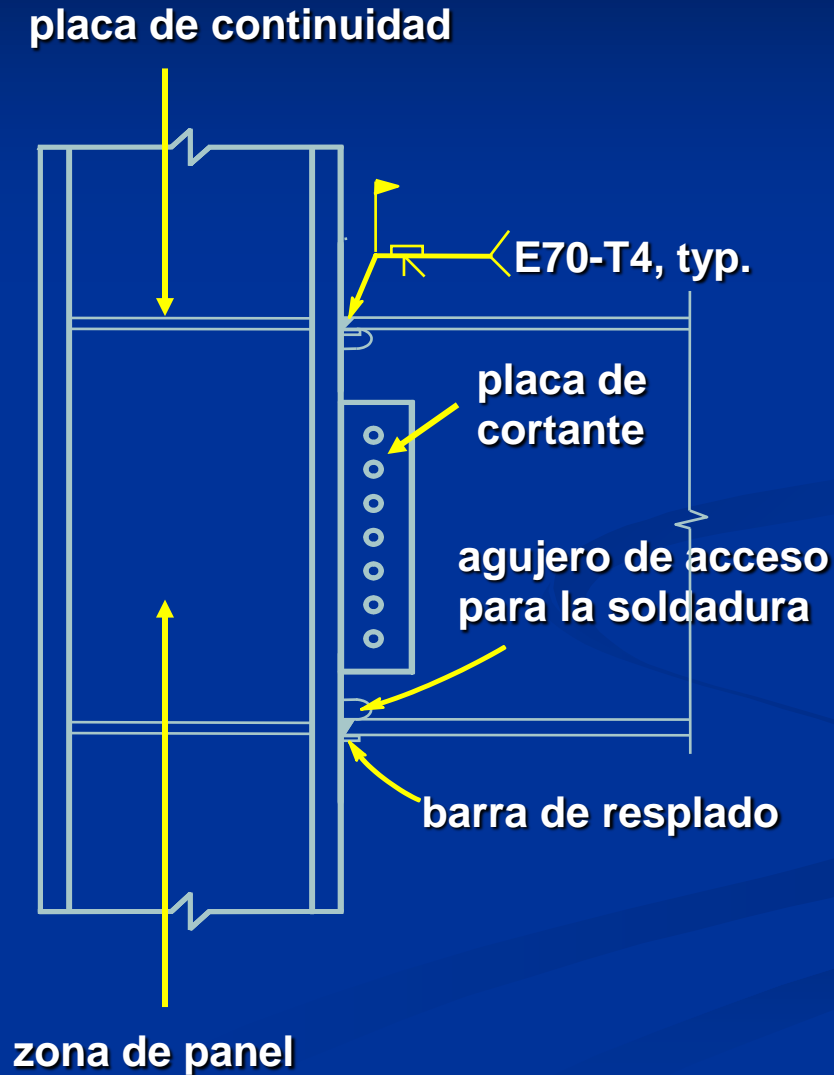
# Agradecimientos

- Dr. Pedro Rojas C. – Director de Tesis de Grado
- Dr. James Ricles y Dr. Richard Sause por la revisión y opiniones relacionadas en esta investigación
- **Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL**

**Gracias**

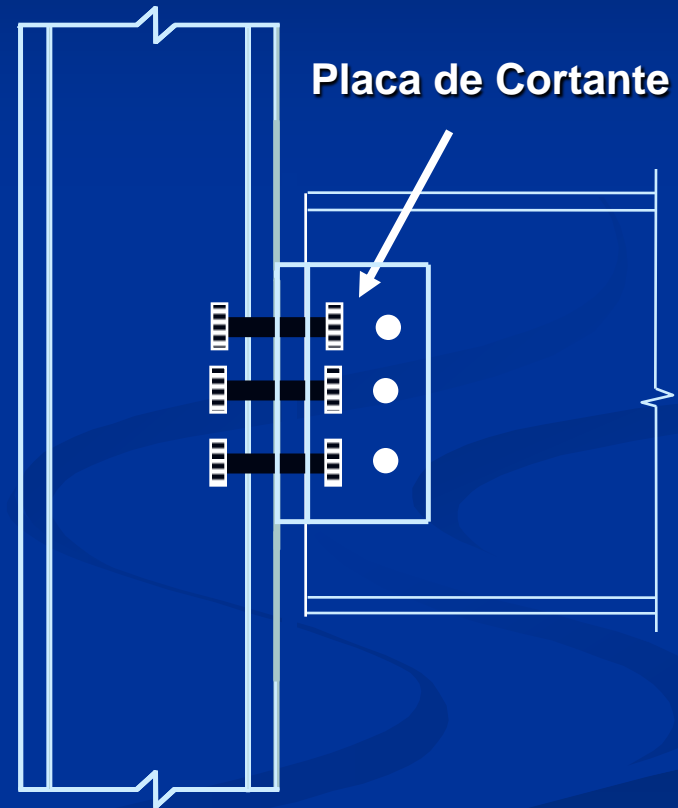
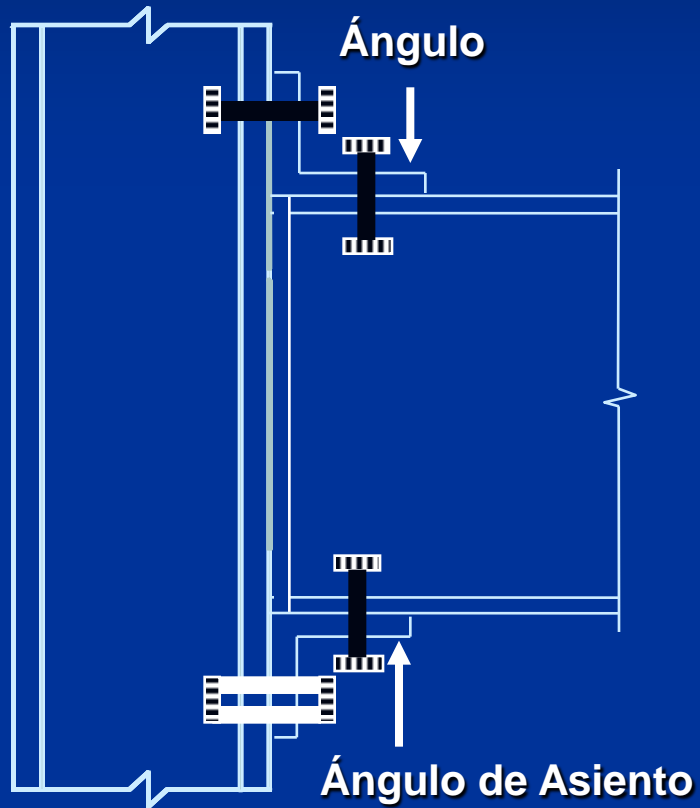
**Gracias**

# Conexión Soldada a Momento

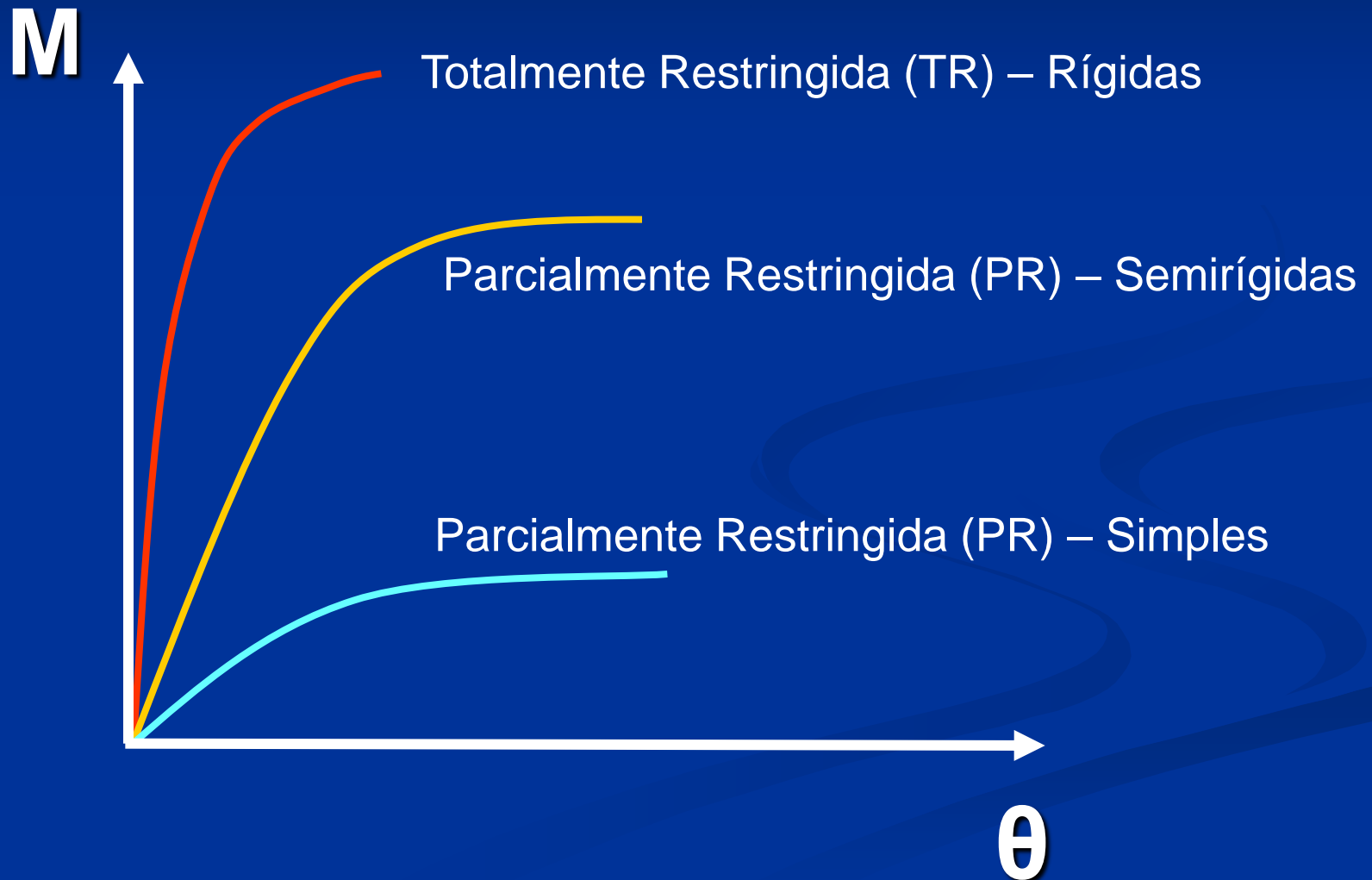




# Conexión Simple

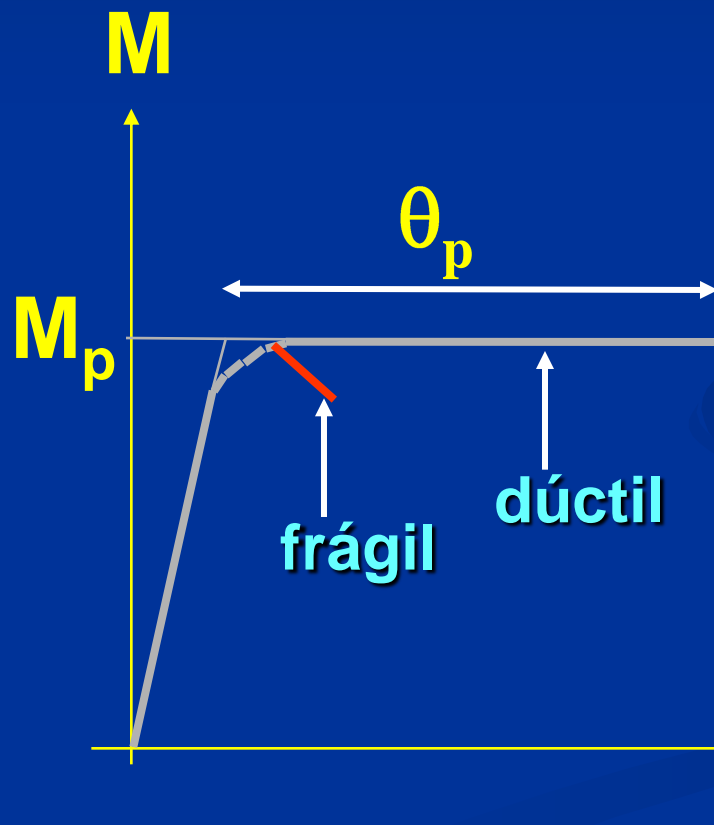


# Tipos de Conexiones



# Conexión Pre-Northridge

¿Dúctil?

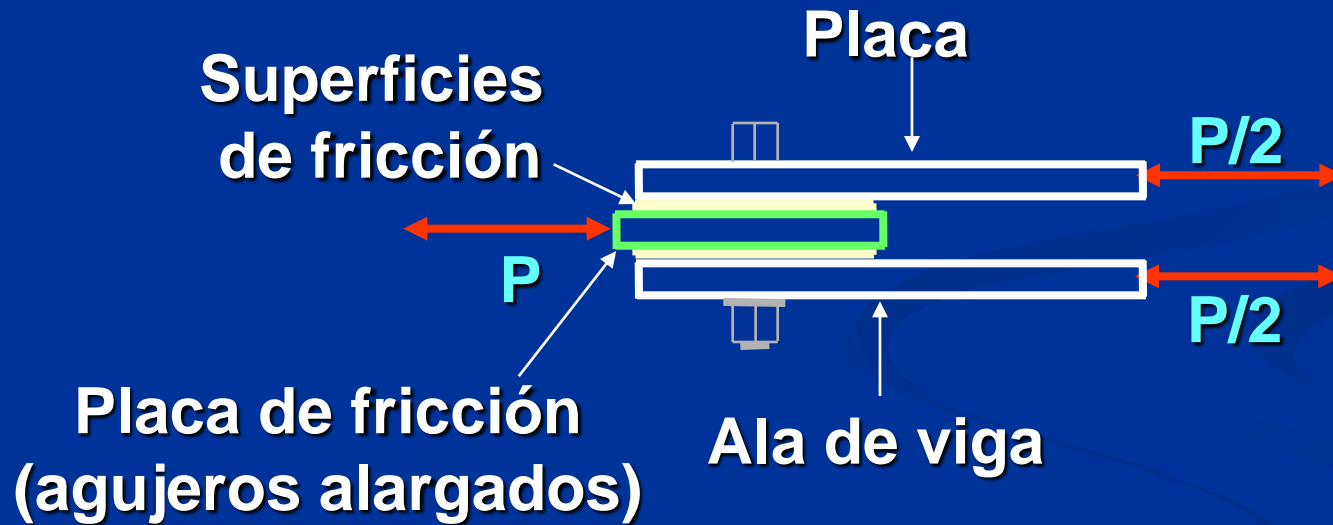


$\theta_p \geq 0.03$  rad  
(diseño sísmico)

# Conexión empernada rotacional

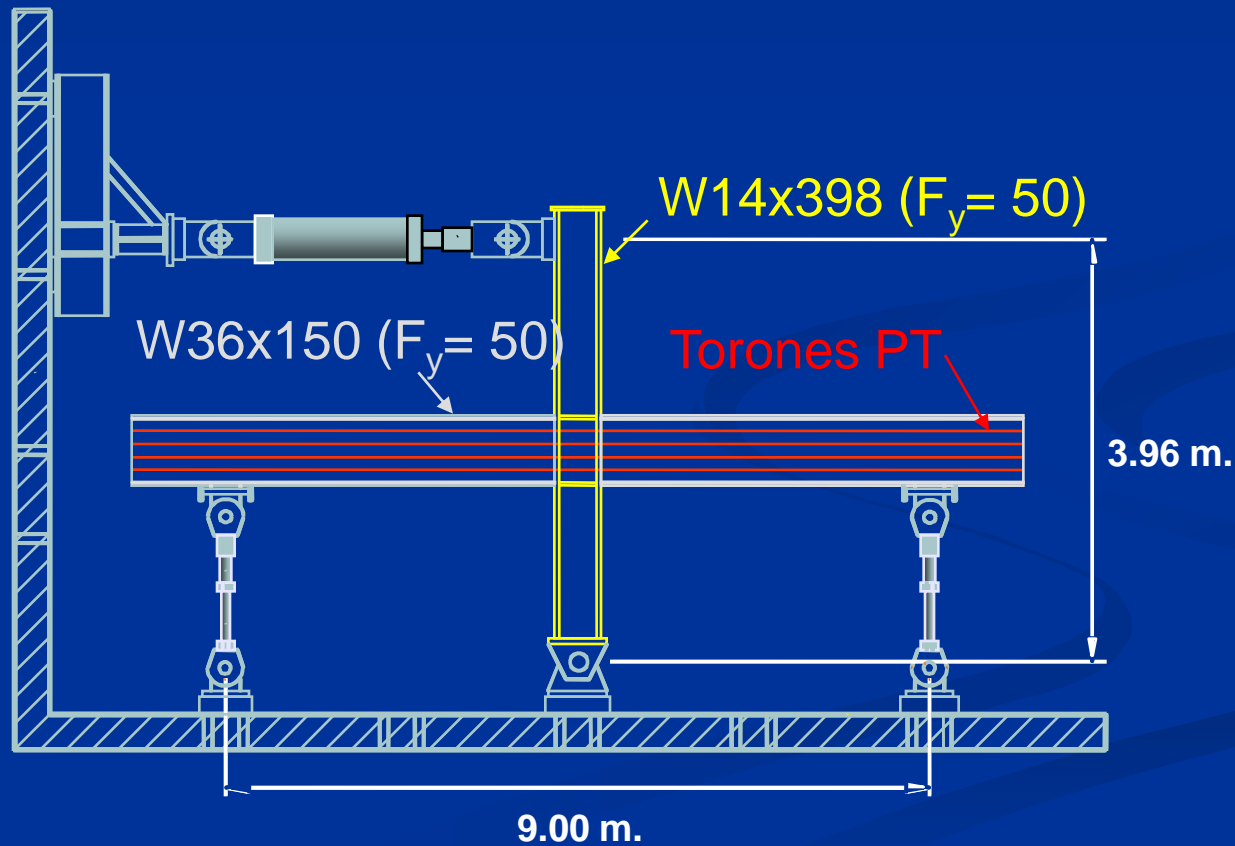
## Superficies de Fricción

(U. de Berkeley; Grigorian y Popov 1992)



# Investigación Previa

## Ensayo Experimental en Conexiones Postensadas (U. Lehigh; Garlock 2002)

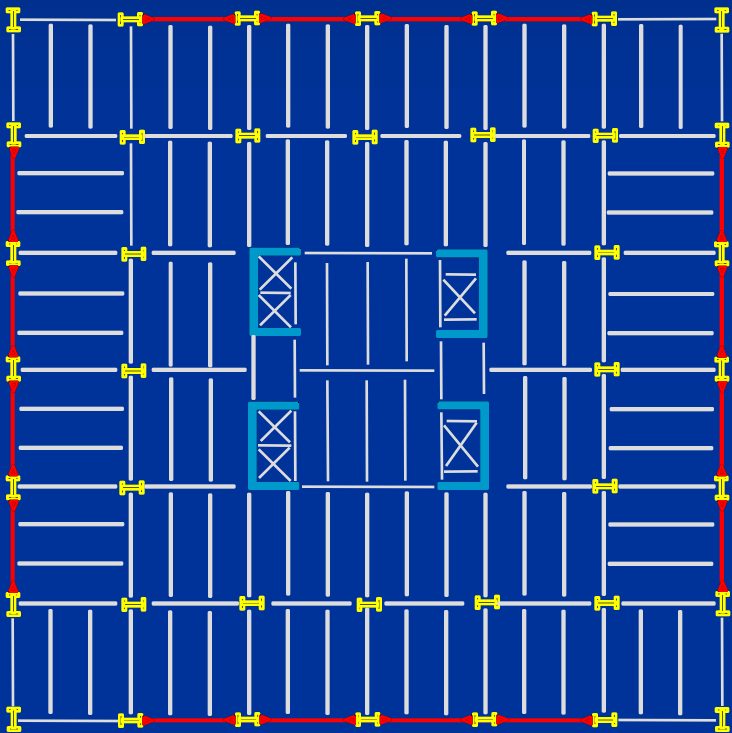


# Investigación Previa

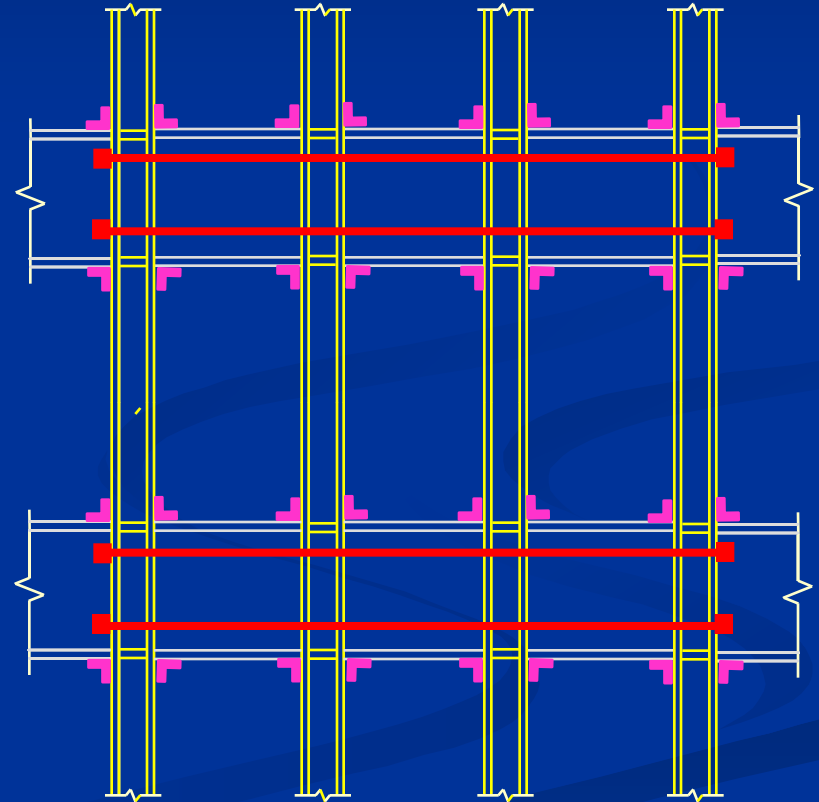
## Conexiones Postensadas (CPT)

(U. Lehigh, Garlock 2002)

### Pórtico Resistente a Momento PARM-TR



Planta  
(PARM en rojo)



Elevación

# NOMENCLATURA

**20s – 18 W**

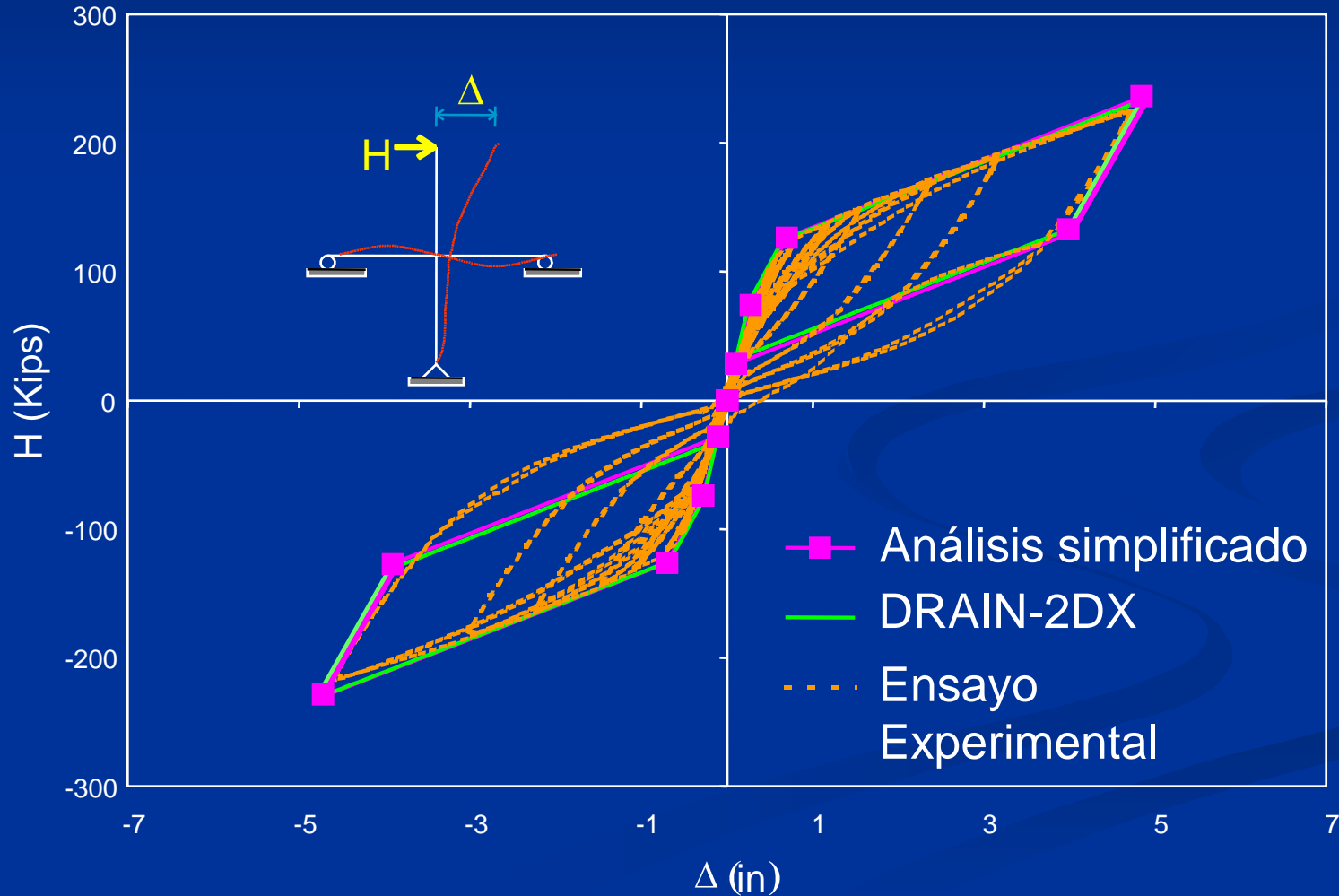
**20** = Número de Torones

**18** = Fuerza de Postensado Inicial por Torón

**W** = Ángulos soldados a las vigas

# Modelo Analítico

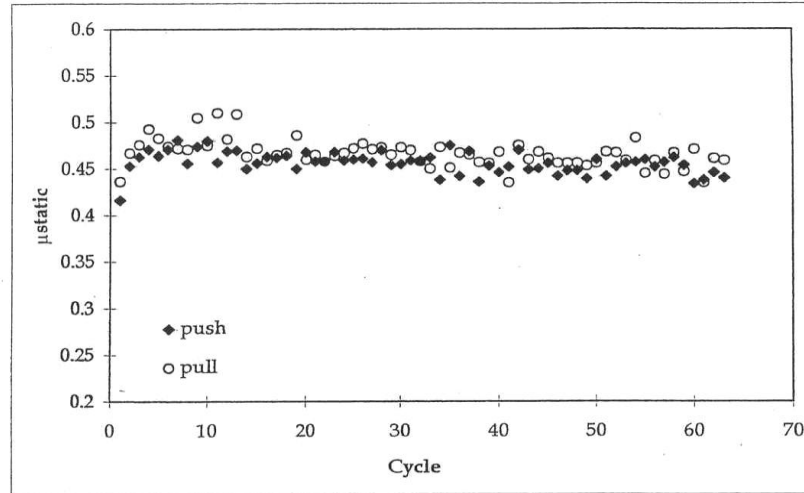
Verificación de Modelo Analítico de Cruciforme (CPT)  
(U. Lehigh; Garlock 2002)



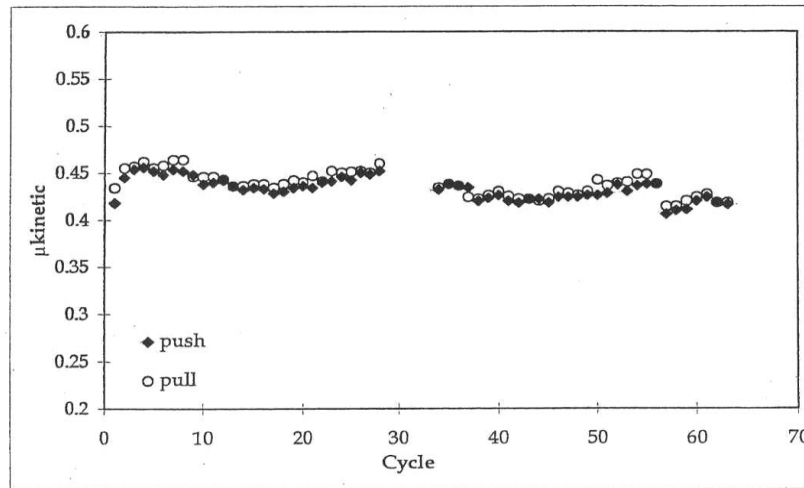


# Investigaciones Previas

## CPEF (Petty 1999)



(a)



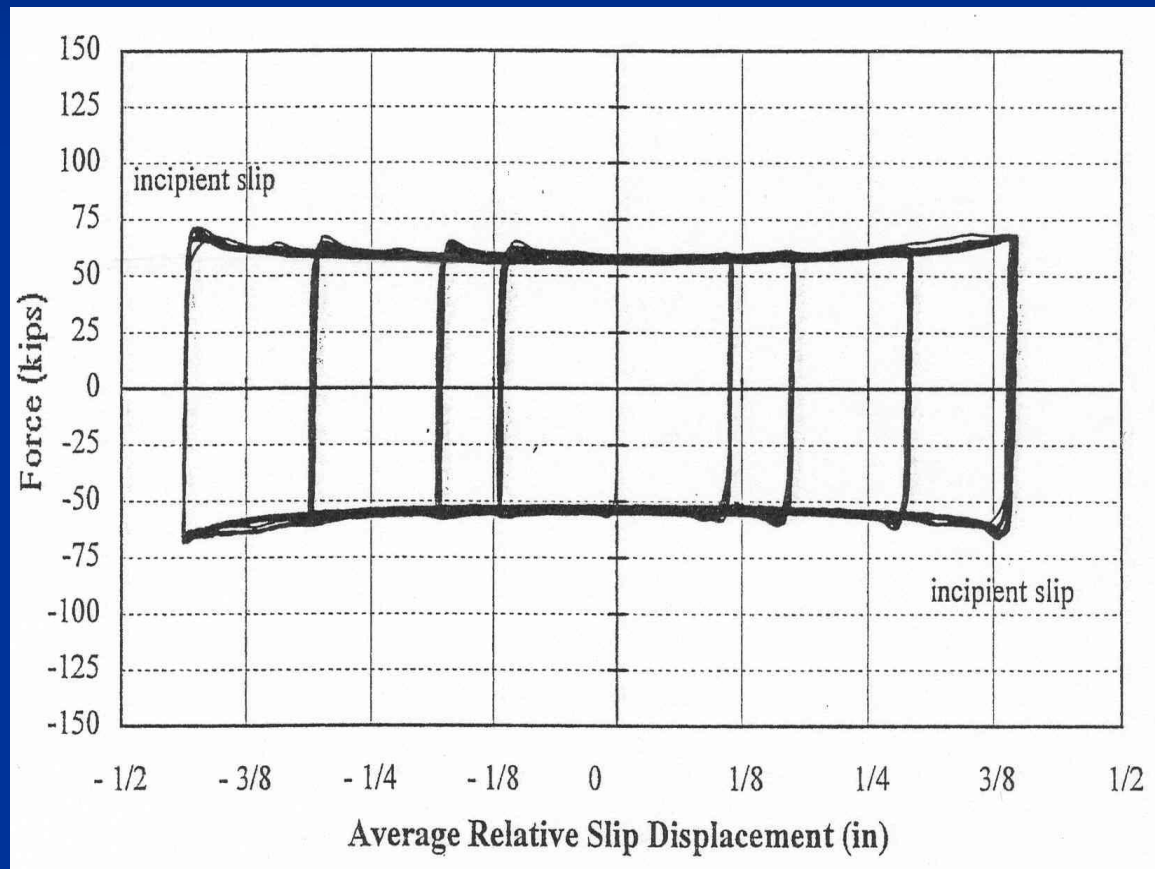
(b)

# Investigaciones Previas

## CPEF (Petty 1999)

### Conclusiones:

- Fuerza de fricción estable
- $F_f = 2\mu N$  (Coulomb)
- Doble ángulo a fricción es una forma viable para disipar energía en conexiones postensadas de acero.



# Diseño por Desempeño

## Objetivos de Diseño

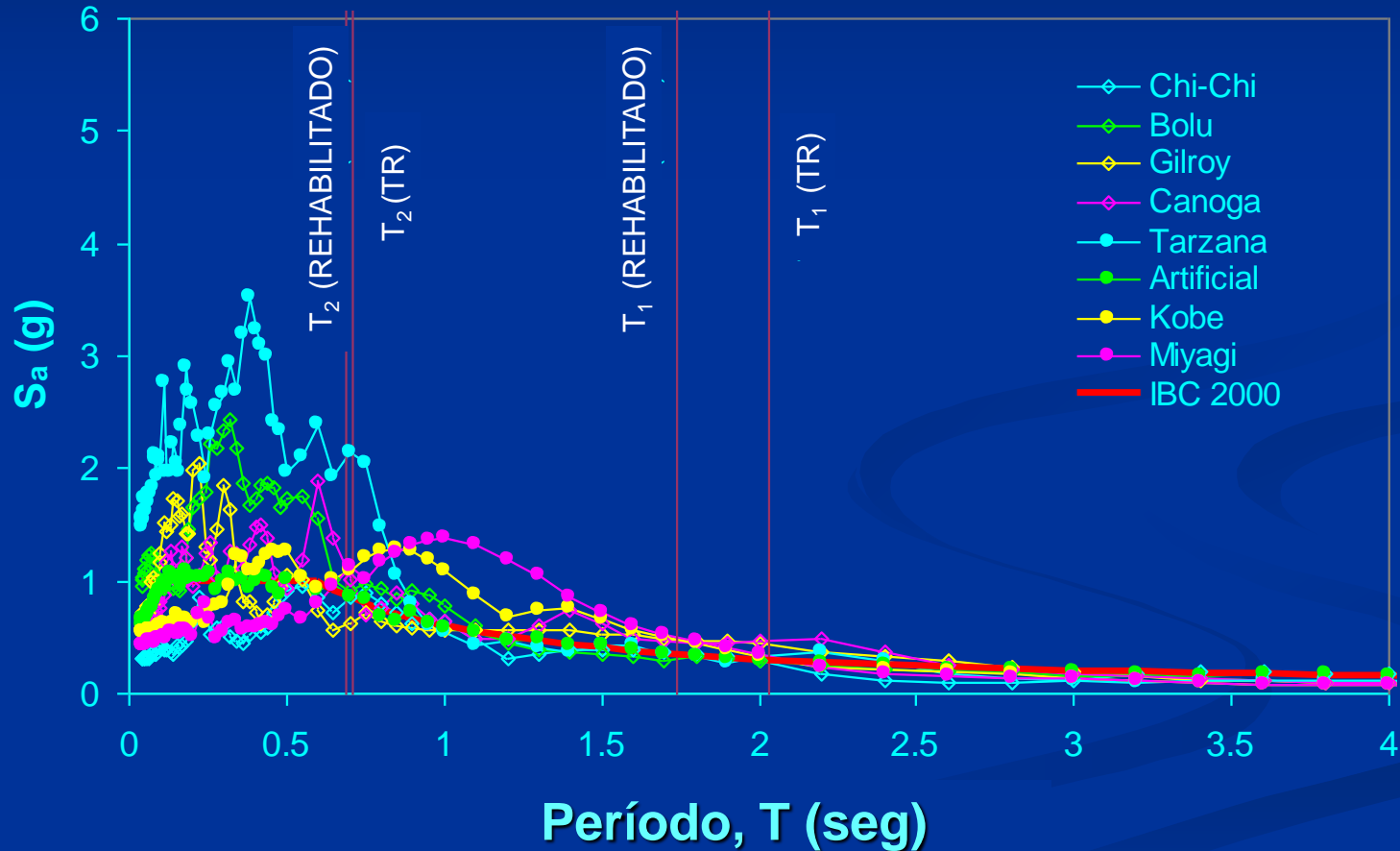
Nivel de Sismo	Desempeño Requerido	
	CPEF (local)	Pórtico (Global)
Sismo de Diseño (DBE)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Descompresión</li><li>• Abertura Inminente</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se mantiene la capacidad auto-centrante</li><li>• Vigas, columnas, zonas de panel permanecen elásticas</li><li>• Edificio listo para su reocupación</li></ul>
Sismo Considerado Máximo (MCE)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Torones permanecen elásticos</li><li>• No falla de elementos de fricción</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Deriva residual pequeña</li><li>• Previene el colapso</li><li>• Vigas, zonas de panel y/o columnas en el rango inelástico</li><li>• Puede ser seguro para su reocupación</li></ul>

La **desviación estándar** es la medida de la dispersión de los valores respecto a la media.

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}}$$

# Evaluación del Desempeño Sísmico

## DBE – Espectro de Respuesta



$$\text{MCE} = \text{DBE} * 1.5$$

# Rehabilitación de Edificios Existentes

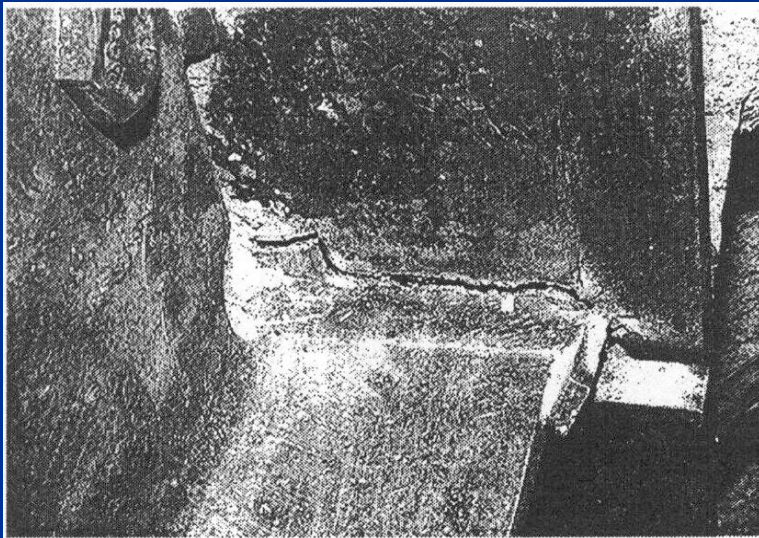
## PARM-TR

		Vigas	P. Refuerzo L - t (mm)	N <sub>s</sub>	T <sub>o</sub> - F <sub>f</sub> (KN)	
		W24x76	406 - 20	18	1313-343	
W14x398	W14x311	W30x108	406 - 25	24	1940-454	3.96 m
		W30x108	406 - 25	24	1940-454	3.96 m
		W36x150	406 - 25	30	2894-503	3.96 m
		W36x160	406 - 30	32	3170-556	3.96 m
		W36x160	406 - 30	32	3170-556	3.96 m
						4.57 m
		4 @ 9.15 m = 36.6 m				

ELEVACION

# Introducción

## Edificios de acero



a. Fracture at Fused Zone



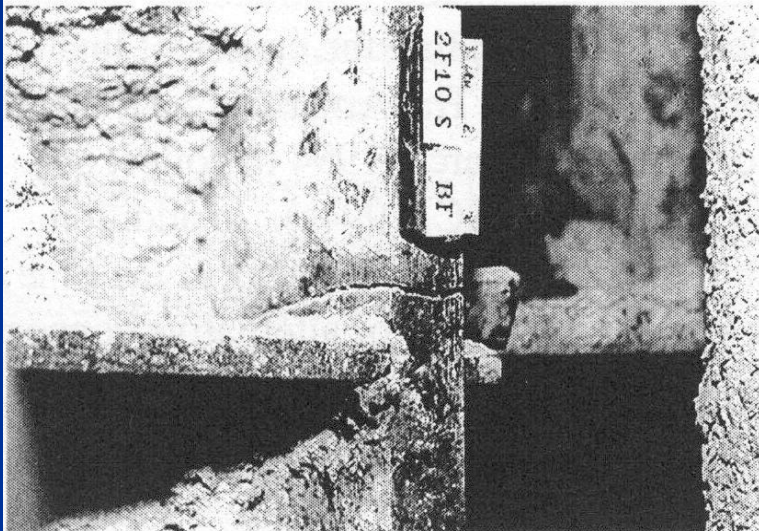
b. Column Flange "Divot" Fracture

**Figure 1-3 Fractures of Beam to Column Joints**

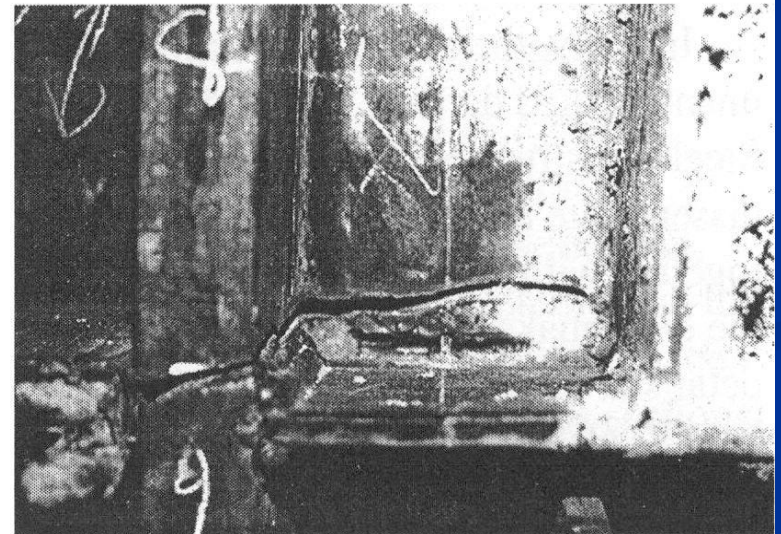
**Falla en las uniones  
(FEMA 352)**

# Introducción

## Edificios de acero



a. Fractures through Column Flange



b. Fracture Progresses into Column-Web

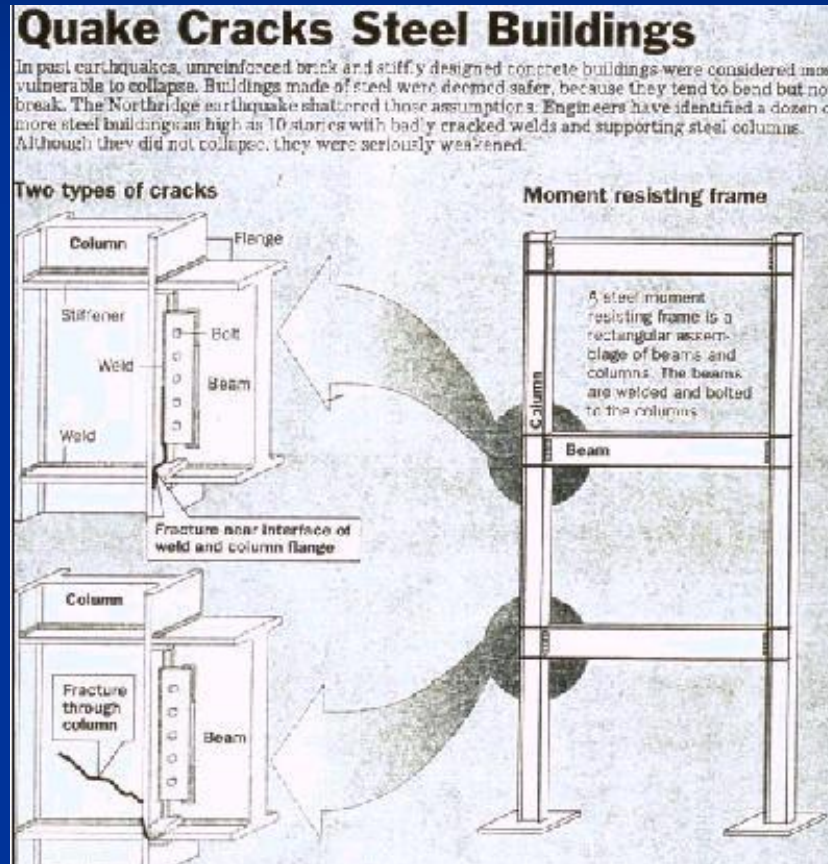
**Figure 1-4 Column Fractures**

**Falla en las columnas  
(FEMA 352)**



# Introducción

## Edificios de acero



**Falla en las uniones  
(EERI, CD-98-1)**

# Procedimiento de Diseño

1. Determinación de Fuerzas Laterales Equivalentes
2. Suposiciones Iniciales Recomendadas
3. Selección de Secciones de Vigas y Columnas
4. Realizar Análisis Estático
5. Diseño de vigas colectoras
6. Estimación de la Demanda Estructural
7. Determinación de la Resistencia Mínima de la Conexión
8. Diseño de la Placa de Refuerzo
9. Diseño de la Zona de Panel
10. Realizar Análisis No-lineales