



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

**Tesis de Grado:**

**“Análisis, Diseño y Evaluación Sísmica de Pórticos Especiales de Acero Resistentes a Momento (PEARM) a base de Planchas Soldadas”**

**Presentada por:**

**Andrés Emén**

# Contenido

- **Introducción**
- **Objetivos**
- **Conexiones con alas no reforzadas soldadas y alma soldada (ANRS-AS).**
- **Investigación Previa**
- **Diseño por Desempeño de Edificio Prototipo Compuesto con PEARM**
- **Modelo Analítico de Pórtico Prototipo**
- **Evaluación Sísmica de Pórtico Prototipo**
- **Conclusiones**

# Contenido

- **Introducción**
- **Objetivos**
- **Conexiones con alas no reforzadas soldadas y alma soldada (ANRS-AS).**
- **Investigación Previa**
- **Diseño por Desempeño de Edificio Prototipo Compuesto con PEARM**
- **Modelo Analítico de Pórtico Prototipo**
- **Evaluación Sísmica de Pórtico Prototipo**
- **Conclusiones**

# Introducción

## Guayaquil

- La construcción en acero se ha popularizado (de 4 pisos promedio)
- Cassagne (2008) ha investigado el estado del arte y de la práctica de varios edificios construidos en la ciudad.



Vista Area del Centro de Guayaquil

# Introducción

## Guayaquil

- El sistema estructural que se usa con más frecuencia son los PEARM en donde:
  - Vigas generalmente son fabricadas utilizando armaduras o perfiles I soldados
  - Columnas se fabrican a partir de perfiles tubulares rectangulares formados a base de canales
  - Se utilizan generalmente perfiles doblados en frío
  - Ciertas estructuras han sido diseñadas para resistir solo cargas gravitacionales
  - Se utiliza soldadura de filete en las conexiones viga – columna.

# Introducción

## Guayaquil

- Algunos de estos edificios podrían tener un desempeño sísmico inadecuado, cuyas principales causas serían:
  - Criterios obsoletos de diseño sísmico
  - Diseño para perfiles laminados en caliente, mientras que se utilizan laminados en frío
  - Mano de obra no calificada y pobre inspección
  - Poco conocimiento de la soldadura y sus procesos (por ejemplo el uso de soldadura de filete en la conexión viga-columna)
  - Conectores de corte en las losas.

# Introducción

## Guayaquil

- Este desempeño sísmico inadecuado ha sido observado en los siguientes Terremotos:
  - Ciudad de México 1985 (México)
  - Northridge 1994 (EE.UU.)
  - Kobe 1995 (Japón)

# Introducción

## Sismo de México 1985

- Septiembre 19 de 1985
- $M = 8.1$
- 30 mil estructuras destruidas, 68 mil con daños parciales
- 35 mil muertes

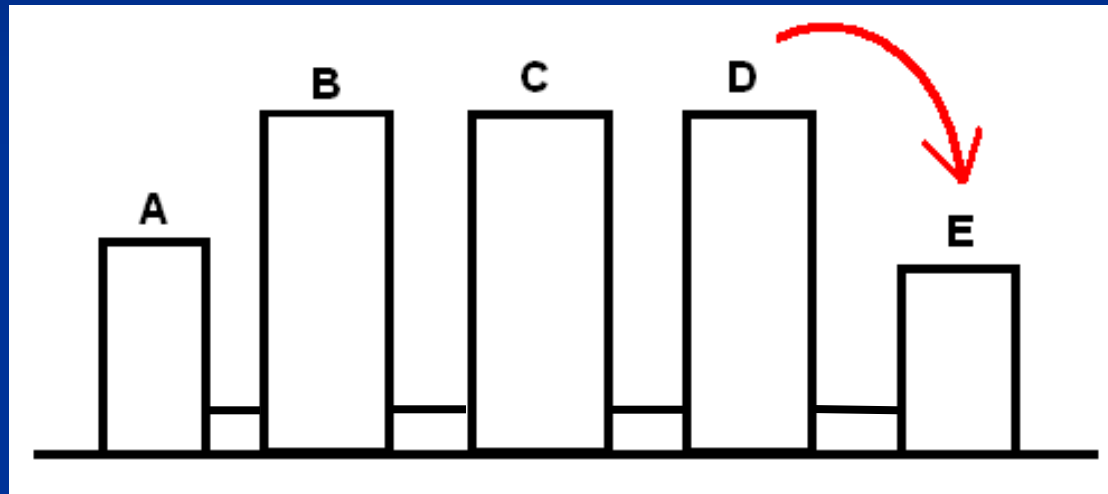




# Introducción

## Sismo de México 1985

### Torres Pino Suárez



- A y E de 14 pisos; B, C y D de 21 pisos
- B tuvo daños significativos, C estuvo cerca del colapso y D colapsó y cayó sobre E.

# Introducción

## Sismo de México 1985

### Torres Pino Suárez: Torre D

- Edificio Irregular en planta y en elevación
- Respuesta estructural excedió ductilidad original del diseño



# Introducción

## Sismo de México 1985

### Torres Pino Suárez: Torre D

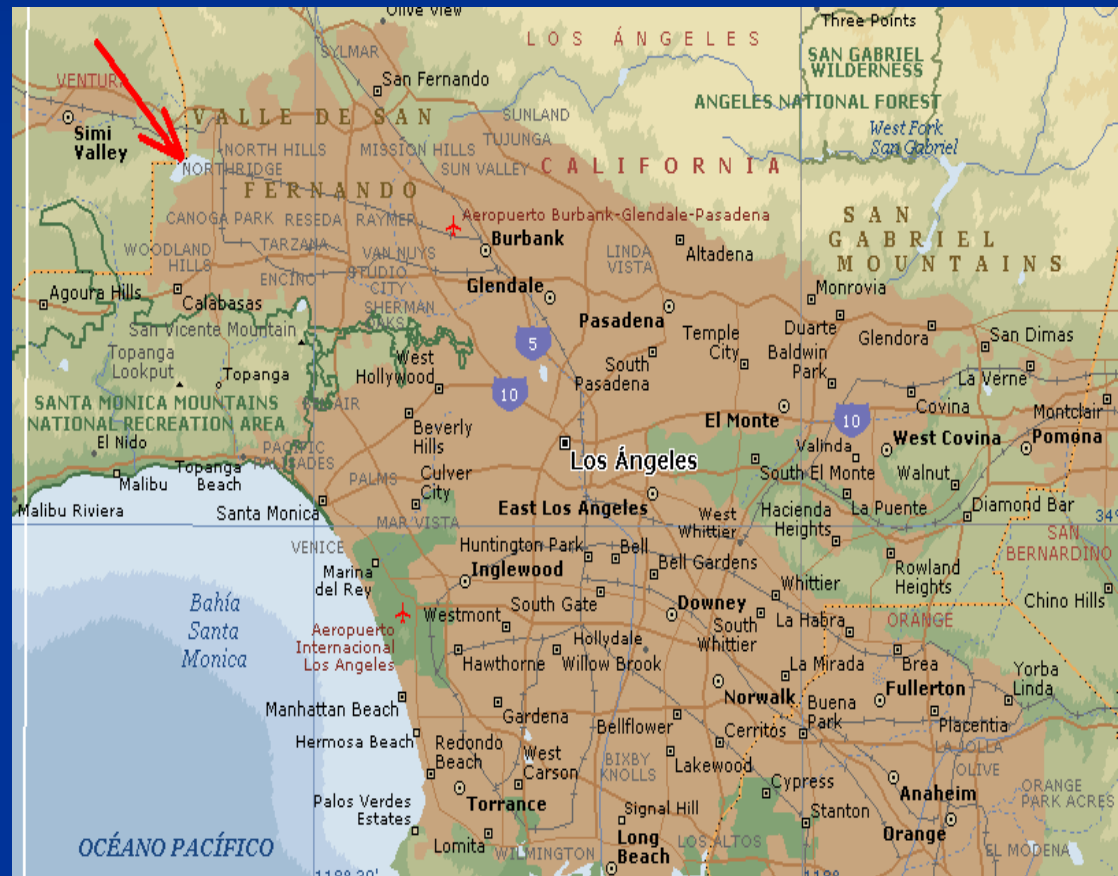
- Almas de las vigas (celosía) se pandearon (soldadura intermitente)
- Columnas en los entrepisos 2, 3 y 4 se pandearon, perdieron su capacidad de resistir cargas y rigidez.
- Pandeo de columnas y fluencia en las vigas desencadenaron un mecanismo de colapso que causó grandes derivas, inclinación del edificio, incremento del efecto  $P-\Delta$  y colapso estructural.



# Introducción

## Sismo de Northridge 1994

- Enero 17 de 1994
- $M = 6.7$
- US\$ > 20 billones en daños (Bruneau et. al. 98)
- 61 muertes y 9000 heridos



# Introducción

## Sismo de Northridge 1994

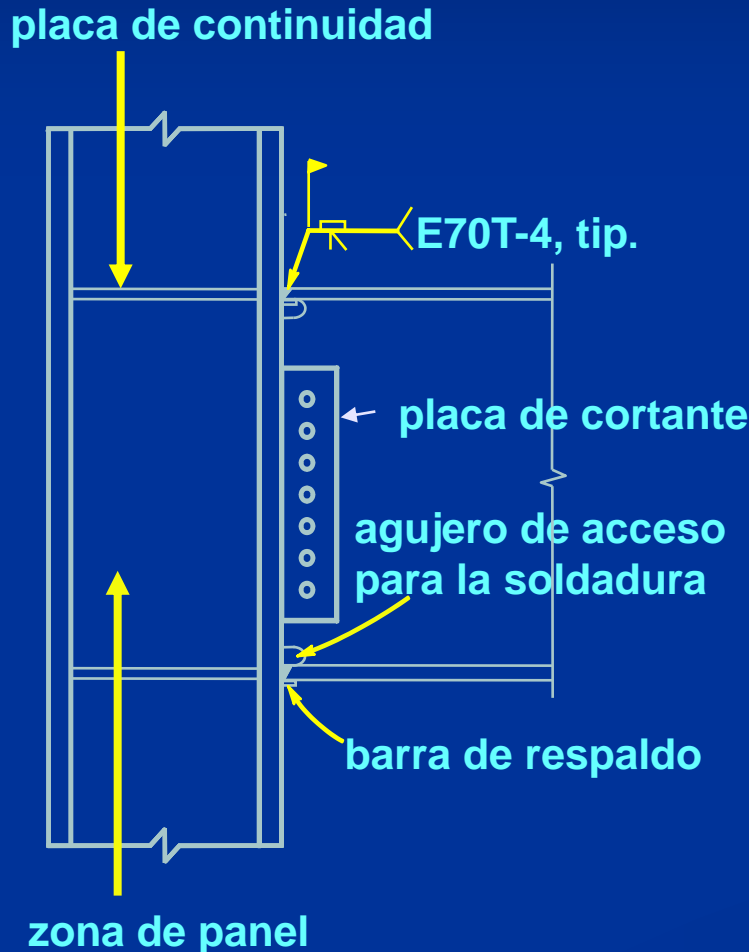
- Provocó daños en mas de 100000 edificios
- Deshabilitó mas de 11 carreteras importantes
- Dejó sin techo a mas de 22000 personas



# Introducción

## Conexión Pre-Northridge

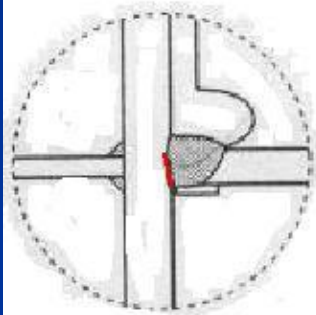
### Viga con alas soldadas y alma empernada



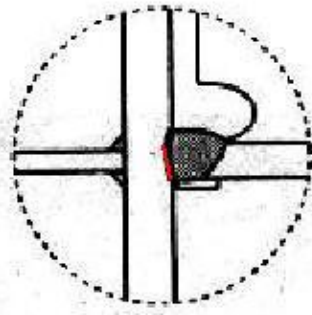
- 1965-1994
- Soldadura de arco con núcleo fundente
- Popular en EE.UU. y en muchos países
- Se creía que era dúctil
- Capaz de resistir los ciclos repetidos a grandes niveles de deformación inelástica

# Introducción

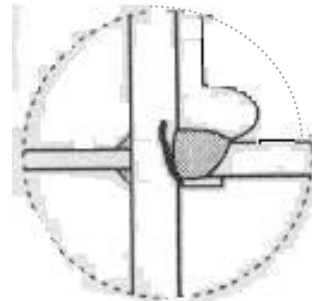
## Northridge - Tipos de daños



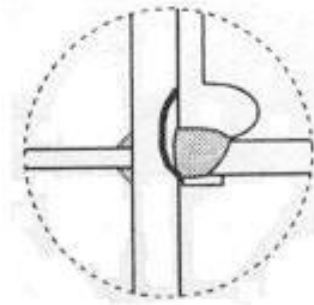
**TYPE 1**



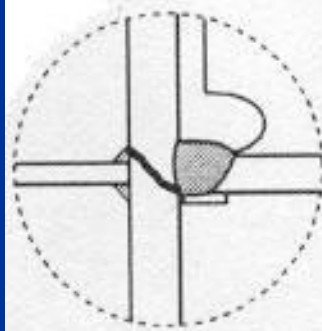
**TYPE 2**



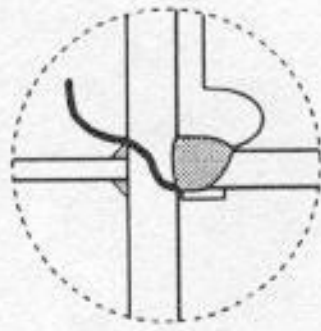
**TYPE 3**



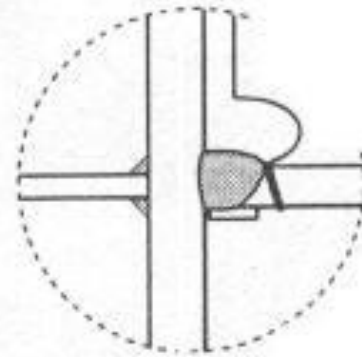
**TYPE 4**



**TYPE 5**



**TYPE 6**



**TYPE 7**

**Fallas típicas (Bruneau et. al. 1998)**

# Introducción

## Causas de los Daños (FEMA-352)

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



# Introducción

## Sismo de Kobe 1995

- Enero 17 de 1995
- $M = 7.2$
- US\$ = 150 billones en daños (FEMA 355-E)
- 5500 muertos, 35000 heridos y 300000 sin vivienda



# Introducción

## Sismo de Kobe 1995

- Mas de 100000 edificios destruidos y 80000 dañados severamente
- 4530 edificios viejos de acero dañados
- 1067 edificios nuevos de acero colapsaron



# Introducción

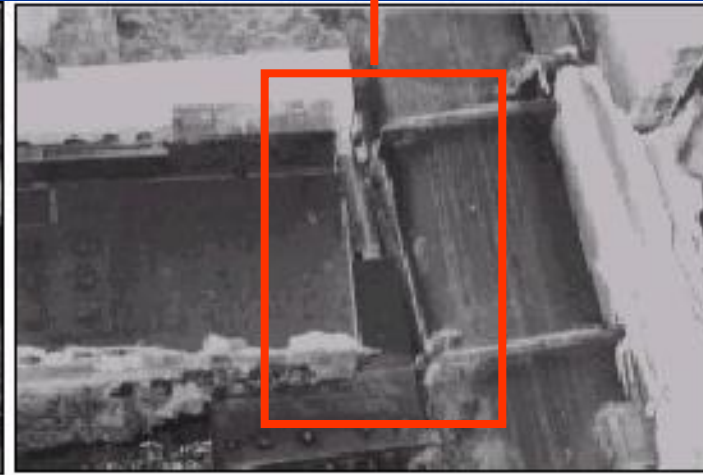
## Sismo de Kobe 1995 (FEMA 355-E)

Soldadura de  
filete



(a)

Soldadura de  
filete

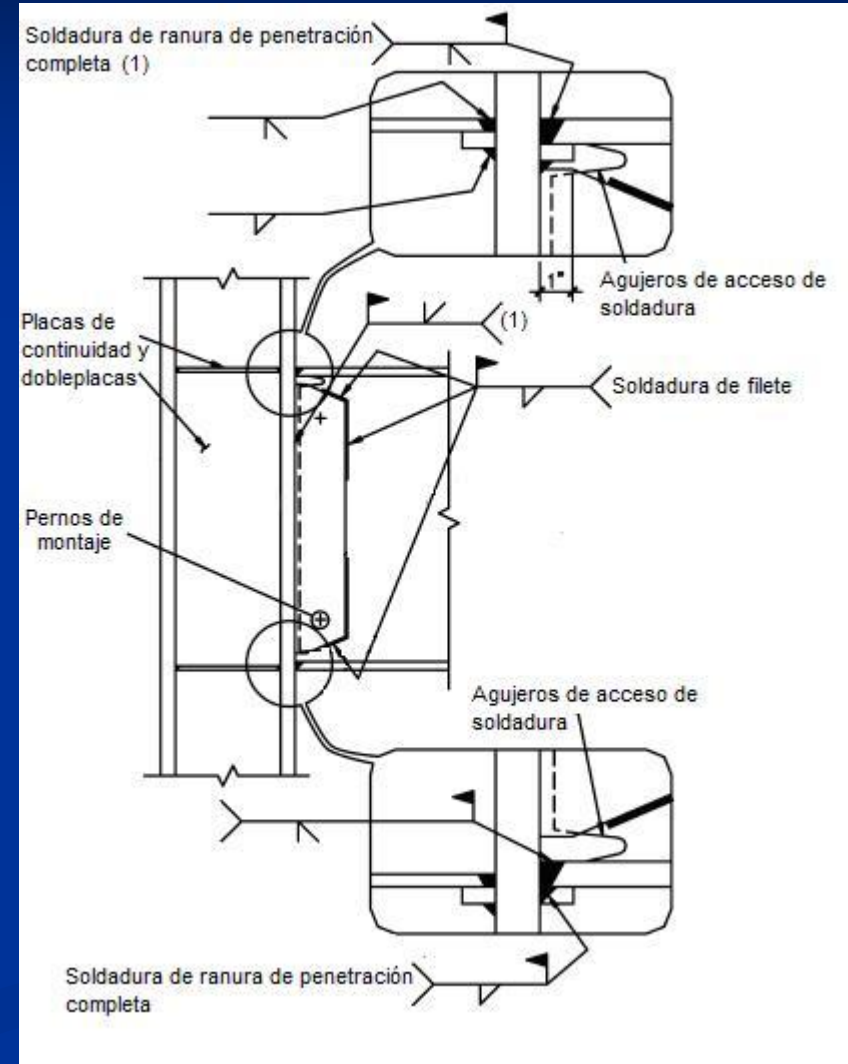


(b)

**Figure C-12 Fracture at Beam-To-Column Connections with Fillet Welding of Small Sizes; (a) Fracture at Column Top; (b) Fracture at Beam End**

# Introducción

- Investigar una **Conexión con alas no reforzadas soldadas y alma soldada (ANRS-AS)**.
- A ser usada en **Pórticos Especiales de Acero Resistentes a Momento (PEARM)**.
- **Planchas soldadas.**
- **Adecuada resistencia, ductilidad y capacidad de disipación de energía.**



# Introducción

- Fase 1: Identificación de posibles deficiencias de los edificios metálicos de la ciudad.
- Fase 2: Criterios de Diseño Sísmico para PEARM con conexiones ANRS-AS fabricados a partir de planchas soldadas.
- Fase 3: Evaluación Sísmica de PEARM con conexiones ANRS-AS.
- Fase 4: Análisis, Diseño y Evaluación de PEARM con columnas tubulares rellenas de concreto.

# Contenido

- **Introducción**
- **Objetivos**
- **Conexiones con alas no reforzadas soldadas y alma soldada (ANRS-AS).**
- **Investigación Previa**
- **Diseño por Desempeño de Edificio Prototipo Compuesto con PEARM**
- **Modelo Analítico de Pórtico Prototipo**
- **Evaluación Sísmica de Pórtico Prototipo**
- **Conclusiones**

# Objetivos

- **Desarrollar criterios de diseño sísmico** con Conexiones de Alas No Reforzadas Soldadas y Alma Soldada (ANRS-AS) para Pórticos Especiales de Acero Resistentes a Momento (PEARM), fabricados a partir de planchas soldadas.
- **Introducir** este tipo de conexiones para que puedan ser utilizadas en el país
- **Evaluar el desempeño sísmico** del edificio a fin de estudiar su comportamiento ante diferentes intensidades de movimientos del terreno.
- **Comparar** el costo de la estructura de un edificio prototipo con PEARM y conexiones ANRS-AS, fabricado a partir de planchas soldadas, con el costo de un edificio similar pero en concreto reforzado.

# Contenido

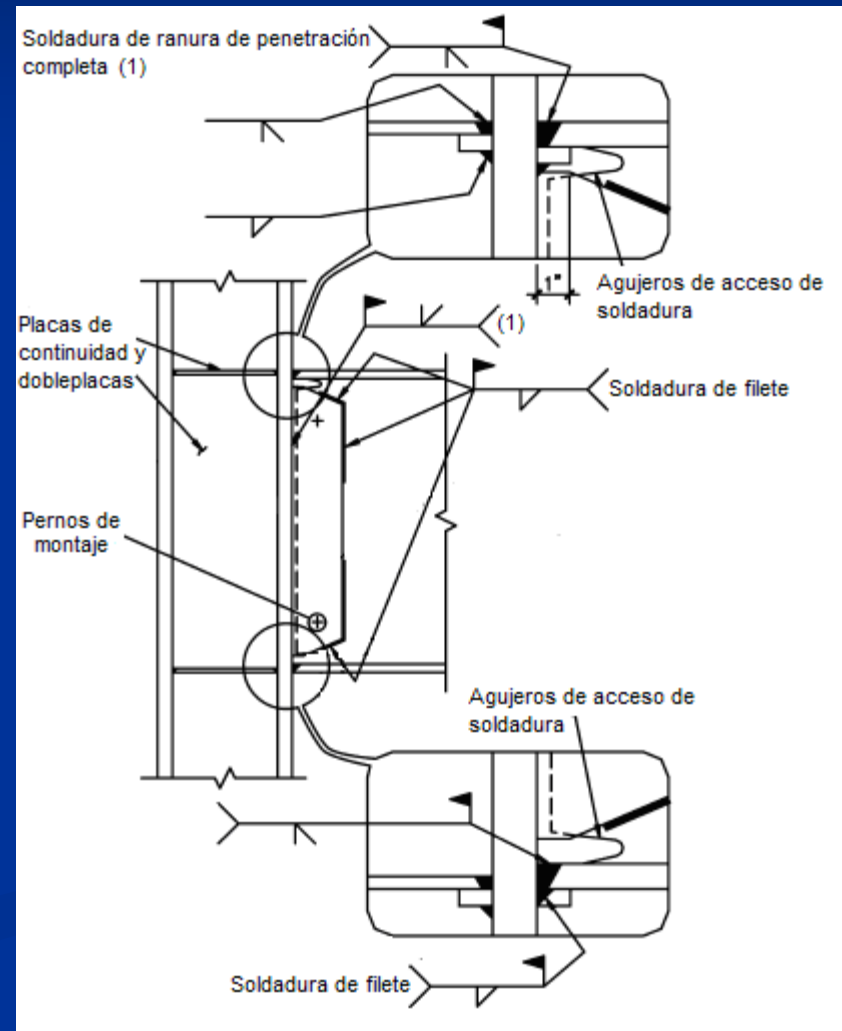
- **Introducción**
- **Objetivos**
- **Conexiones con alas no reforzadas soldadas y alma soldada (ANRS-AS).**
- **Investigación Previa**
- **Diseño por Desempeño de Edificio Prototipo Compuesto con PEARM**
- **Modelo Analítico de Pórtico Prototipo**
- **Evaluación Sísmica de Pórtico Prototipo**
- **Conclusiones**



# Conexión con Alas no Reforzadas Soldadas y Alma Soldada (ANRS-AS)

Concepto (FEMA 350 y ANSI/AISC 358-05)

- Es una de las Conexiones Precalificadas del FEMA 350 y y Borrador ANSI/AISC 358-05.
- Conexión completamente restringida.
- Utilizan soldadura de ranura de penetración completa para unir los elementos que la componen.



# Conexión con Alas no Reforzadas Soldadas y Alma Soldada (ANRS-AS)

## Ventajas

- Se puede diseñar y construir sin verificación teórica, ya que ha sido precalificada por los códigos pertinentes
- Viene acompañada de procedimiento y limitaciones detalladas en FEMA 350 y en Borrador para Revisión Pública de ANSI/AISC 358-05.
- Adecuada resistencia, ductilidad y capacidad de disipación de energía
- Su ejecución es económica en comparación con otras conexiones precalificadas.

# Contenido

- **Introducción**
- **Objetivos**
- **Conexiones con alas no reforzadas soldadas y alma soldada (ANRS-AS).**
- **Investigación Previa.**
- **Diseño por Desempeño de Edificio Prototipo Compuesto con PEARM**
- **Modelo Analítico de Pórtico Prototipo**
- **Evaluación Sísmica de Pórtico Prototipo**
- **Conclusiones**

# Investigación Previa

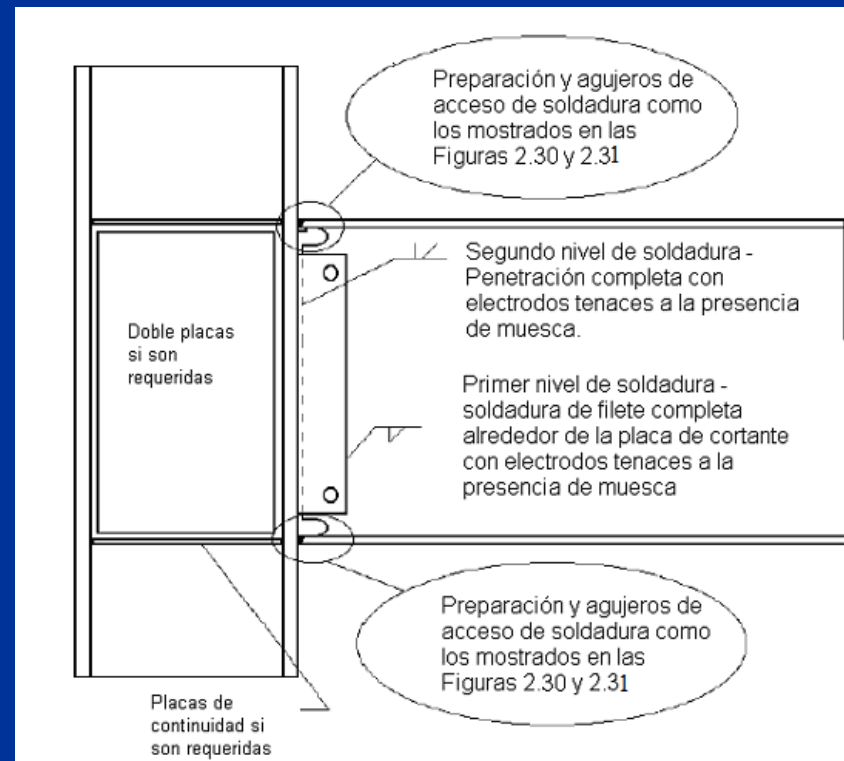
## Estudios Analíticos y Experimentales (FEMA-355D)

- El beneficio de combinar soldadura, barras de respaldo retiradas y detalles de agujeros de acceso de soldadura mejorado, no es suficiente sin otras mejoras.
- Análisis no lineales, (Ricles et al., 2000) mostraron que los accesorios del alma, reducían las demandas inelásticas.
- Análisis inelásticos del comportamiento de la conexión (El Tawil, Kunnath, Ricles) muestran que la transferencia de cortante depende del alma de la conexión.

# Investigación Previa

## Estudios Analíticos y Experimentales (FEMA-355D)

- Fueron examinados tres niveles de soldadura, con un mínimo de pernos utilizados en el alma para simular un montaje temporal de la conexión.



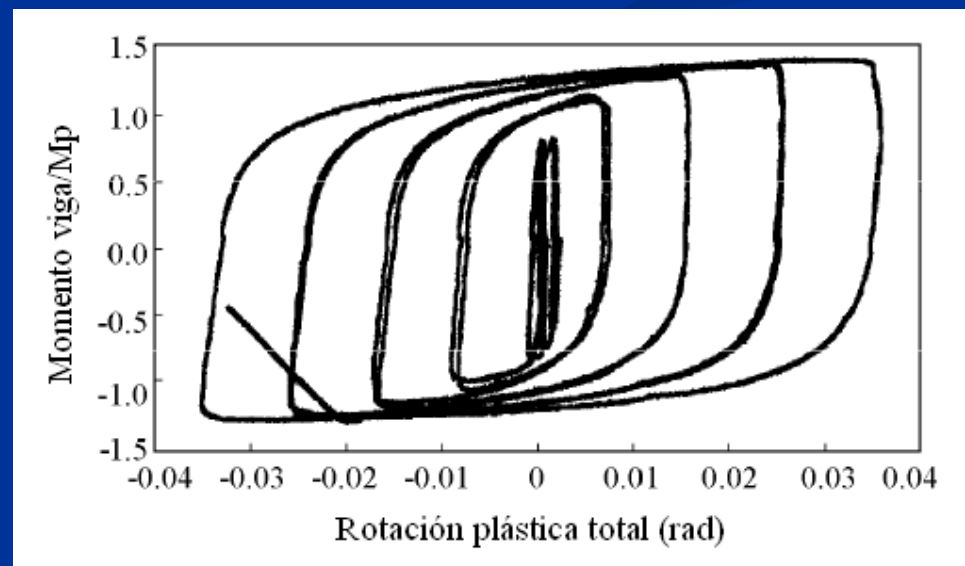
# Investigación Previa

## Estudios Analíticos y Experimentales (FEMA-355D)

- Especímenes están basados en las pruebas

Michigan (Lee et al, 2000):

- LU-T1:  $\theta_p$  de 0.018 rad y fractura a 0.019 rad.
- LU-T2:  $\theta_p$  de 0.025 rad y fractura a 0.035 rad.
- LU-T3:  $\theta_p$  de 0.035 rad



# Investigación Previa

## Estudios Analíticos y Experimentales (FEMA-355D)

- Las vigas desarrollaron un mayor endurecimiento por deformación .
- Los momentos máximos superaran (26-42%) el momento plástico,  $M_p$ .
- Un gran endurecimiento por deformación significó que los momentos flectores grandes serían transferidos a las columnas.
- Sistema estructural de columna fuerte – viga débil.
- Fractura inicial desarrollada en LU-T3 es fuertemente influenciada, aparentemente, por las deformaciones de la zona de panel.

# **Investigación Previa**

## **Estudios Analíticos y Experimentales**

### **(FEMA-355D)**

- **Conexiones con:**
  - **Barras de respaldo inferiores removidas, limpieza de escorias y remanente de soldadura; y refuerzo con soldadura de tenacidad a muesca.**
  - **Barras de respaldo superiores reforzadas con soldadura de filete tenaces a la presencia de muesca.**
  - **La geometría y acabados de los agujeros de acceso mejorado.**
  - **Soldadura de ranura de penetración completa entre el alma de la viga y la columna, y soldadura de filete adicionales entre el alma de la viga y la placa de montaje.**

**Resultará en un incremento de la ductilidad de la conexión.**

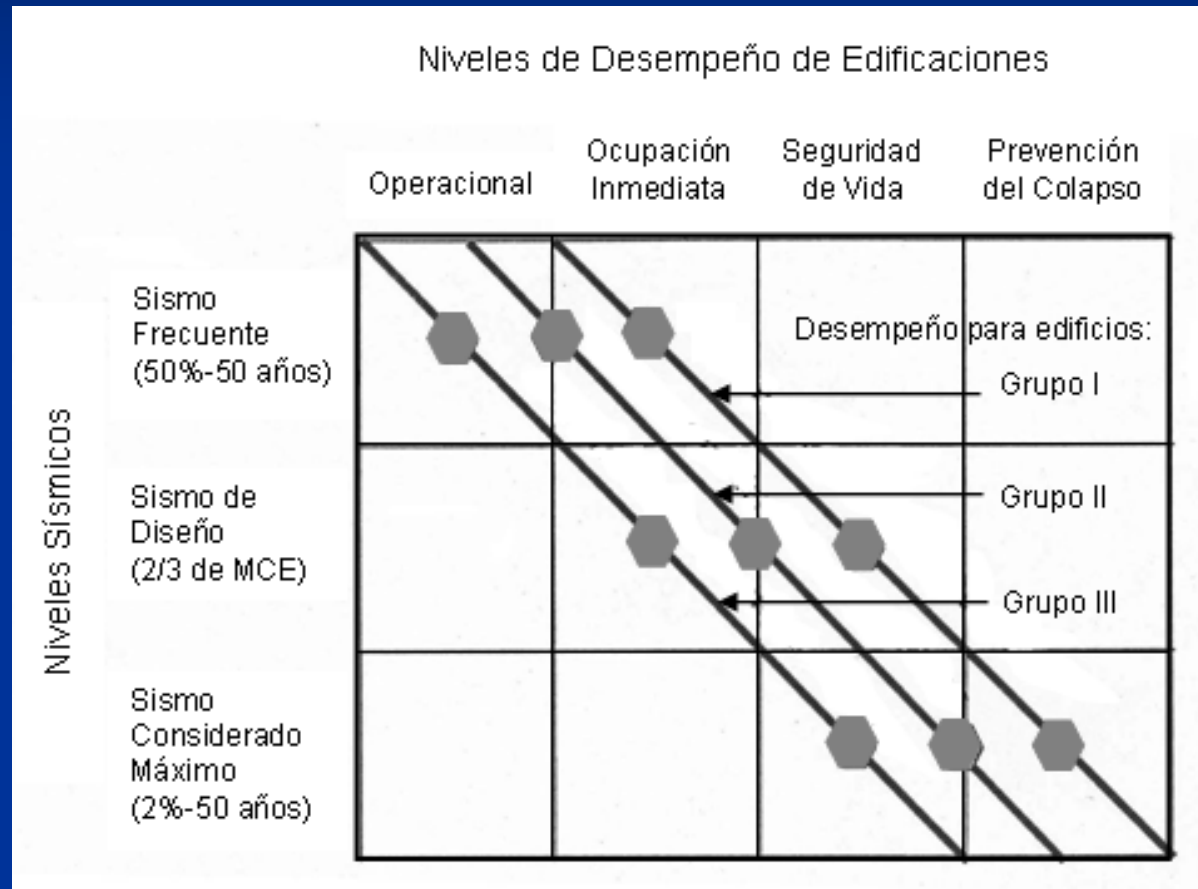


# Contenido

- Introducción
- Objetivos
- Conexiones con alas no reforzadas soldadas y alma soldada (ANRS-AS).
- Investigación Previa.
- Diseño por Desempeño de Edificio Prototipo y Compuesto con PEARM.
- Modelo Analítico de Pórtico Prototipo
- Evaluación Sísmica de Pórtico Prototipo
- Conclusiones

# Diseño por Desempeño

## Niveles de desempeño sísmico de edificios



**Objetivos de Diseño por Desempeño (ODD) para los diferentes Grupos de uso sísmico (FEMA 350)**

# Diseño por Desempeño

## Objetivos del diseño por desempeño

- Para un terremoto al nivel de DBE el sistema estructural debe satisfacer el nivel de desempeño de Seguridad de Vida.
- Para un terremoto al nivel del MCE el sistema estructural debe satisfacer el nivel de desempeño de Prevención del Colapso.

# Diseño por Desempeño

## Limitaciones para vigas y columnas

### Relación Ancho - Espesor

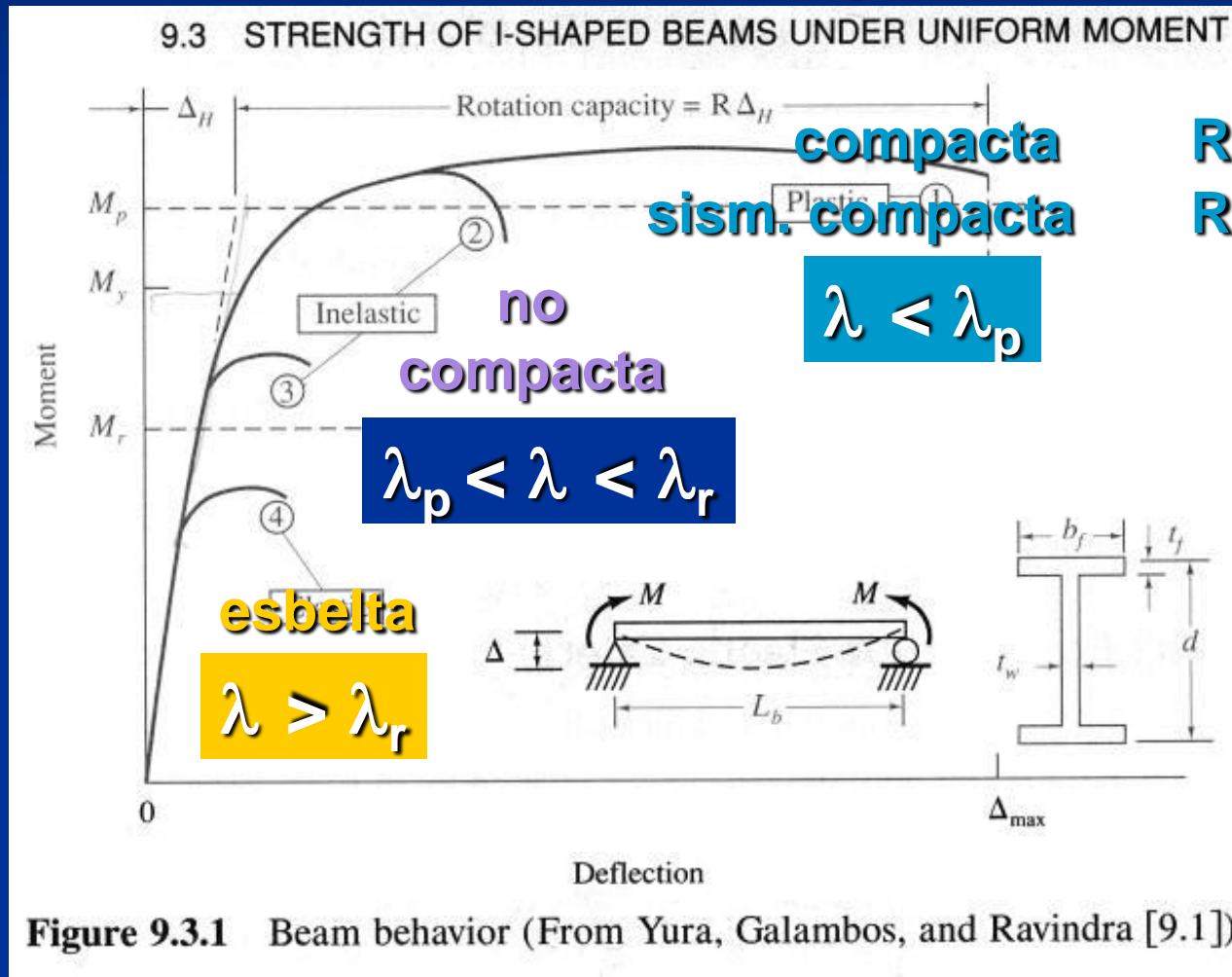


Figure 9.3.1 Beam behavior (From Yura, Galambos, and Ravindra [9.1])

Salmon y Johnson 1996

# Diseño por Desempeño

## Limitaciones para vigas y columnas

### Relación Ancho - Espesor

Description of Element		Width-Thickness Ratio	Limiting Width-Thickness Ratios
			$\lambda_{ps}$ (seismically compact)
Unstiffened Elements	Flexure in flanges of rolled or built-up I-shaped sections [a], [c], [e], [g], [h]	$b/t$	$0.30 \sqrt{E/F_y}$
	Uniform compression in flanges of rolled or built-up I-shaped sections [b], [h]	$b/t$	$0.30 \sqrt{E/F_y}$
	Uniform compression in flanges of rolled or built-up I-shaped sections [d]	$b/t$	$0.38 \sqrt{E/F_y}$
	Uniform compression in flanges of channels, outstanding legs of pairs of angles in continuous contact, and braces [c], [g]	$b/t$	$0.30 \sqrt{E/F_y}$
	Uniform compression in flanges of H-pile sections	$b/t$	$0.45 \sqrt{E/F_y}$
	Flat bars [f]	$b/t$	2.5
	Uniform compression in legs of single angles, legs of double angle members with separators, or flanges of tees [g]	$b/t$	$0.30 \sqrt{E/F_y}$
	Uniform compression in stems of tees [g]	$d/t$	$0.30 \sqrt{E/F_y}$

Para las alas de la viga

# Diseño por Desempeño

## Limitaciones para vigas y columnas

### Relación Ancho - Espesor

**TABLE I-8-1 (cont.)**  
**Limiting Width-Thickness Ratios for**  
**Compression Elements**

Description of Element	Width-Thickness Ratio	Limiting Width-Thickness Ratios
		$\lambda_{ps}$ (seismically compact)
Webs in flexural compression in beams in SMF, Section 9, unless noted otherwise	$h/t_w$	$2.45 \sqrt{E/F_y}$
Webs in flexural compression or combined flexure and axial compression [a], [c], [g], [h], [i], [j]	$h/t_w$	for $C_s \leq 0.125$ [k] $3.14 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (1 - 1.54 C_s)$
		for $C_s > 0.125$ [k] $1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (2.33 - C_s) \geq 1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Round HSS in axial and/or flexural compression [c], [g]	$D/t$	$0.044 E/F_y$
Rectangular HSS in axial and/or flexural compression [c], [g]	$b/t$ or $h/t_w$	$0.64 \sqrt{E/F_y}$
Webs of H-Pile sections	$h/t_w$	$0.94 \sqrt{E/F_y}$

Stiffened Elements

Para el alma de la viga

Para la columna

# Diseño por Desempeño

## Relación Columna Fuerte – Viga Débil

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1.0$$

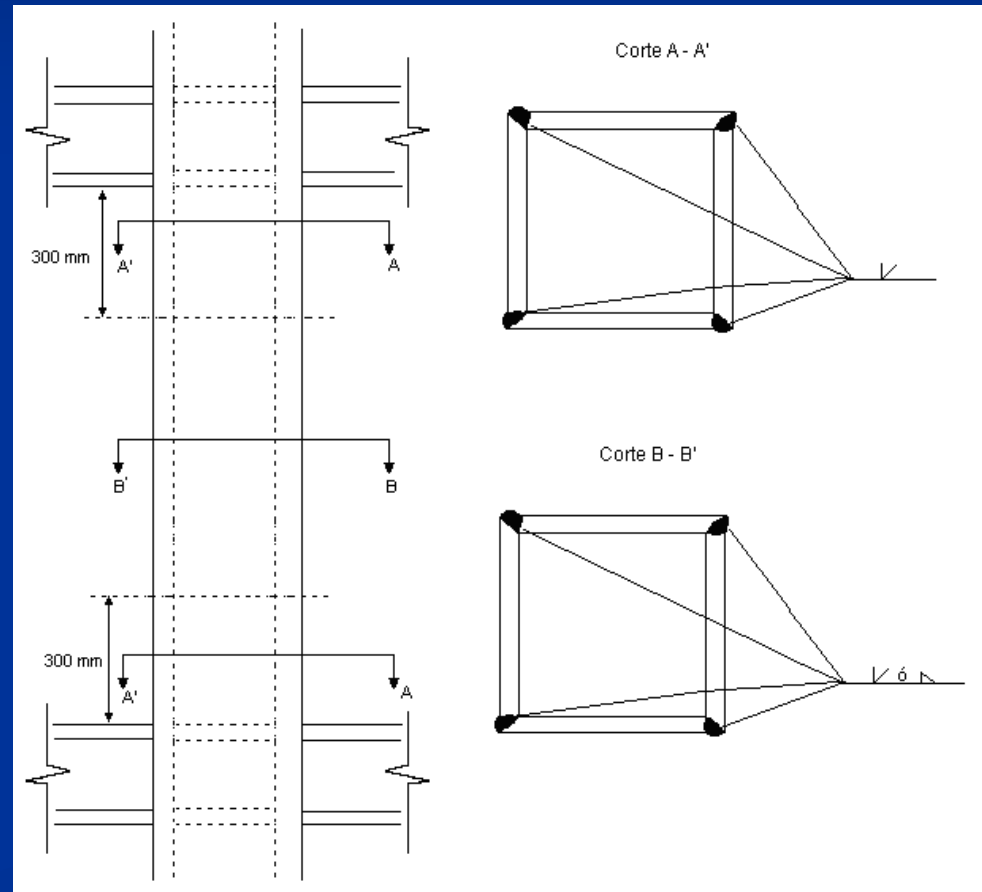
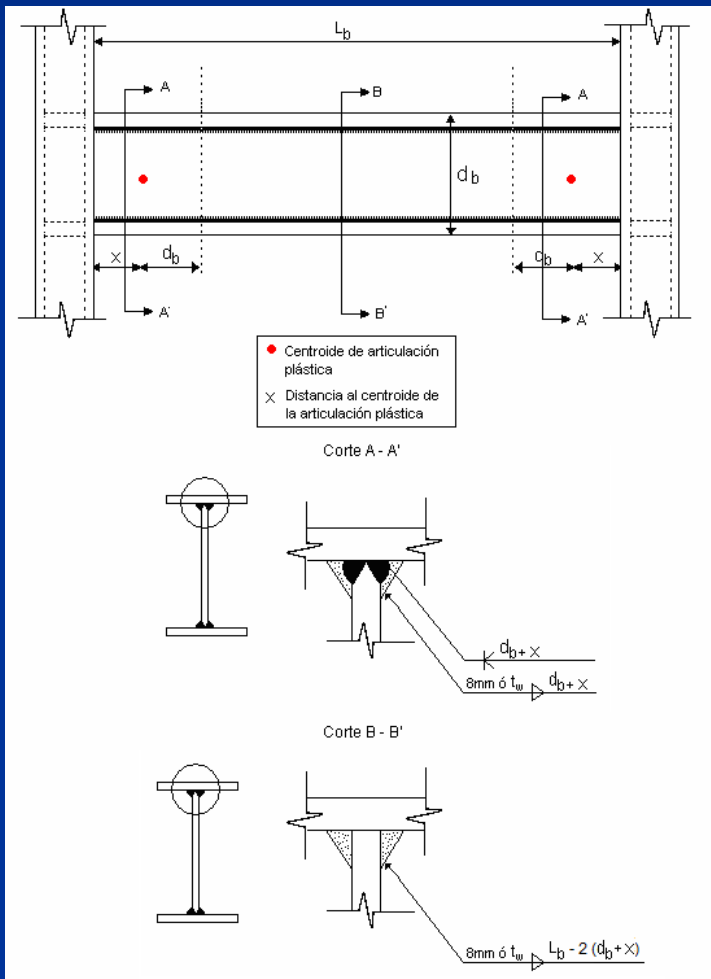
$$\sum M_{pc}^* = \sum Z_c (F_{yc} - P_{uc} / A_g)$$

$$\sum M_{pb}^* = \sum (1.1 R_y F_{yb} Z_x + M_{uv})$$

$$M_{uv} = V_p \left( x + \frac{d_c}{2} \right)$$

# Diseño por Desempeño

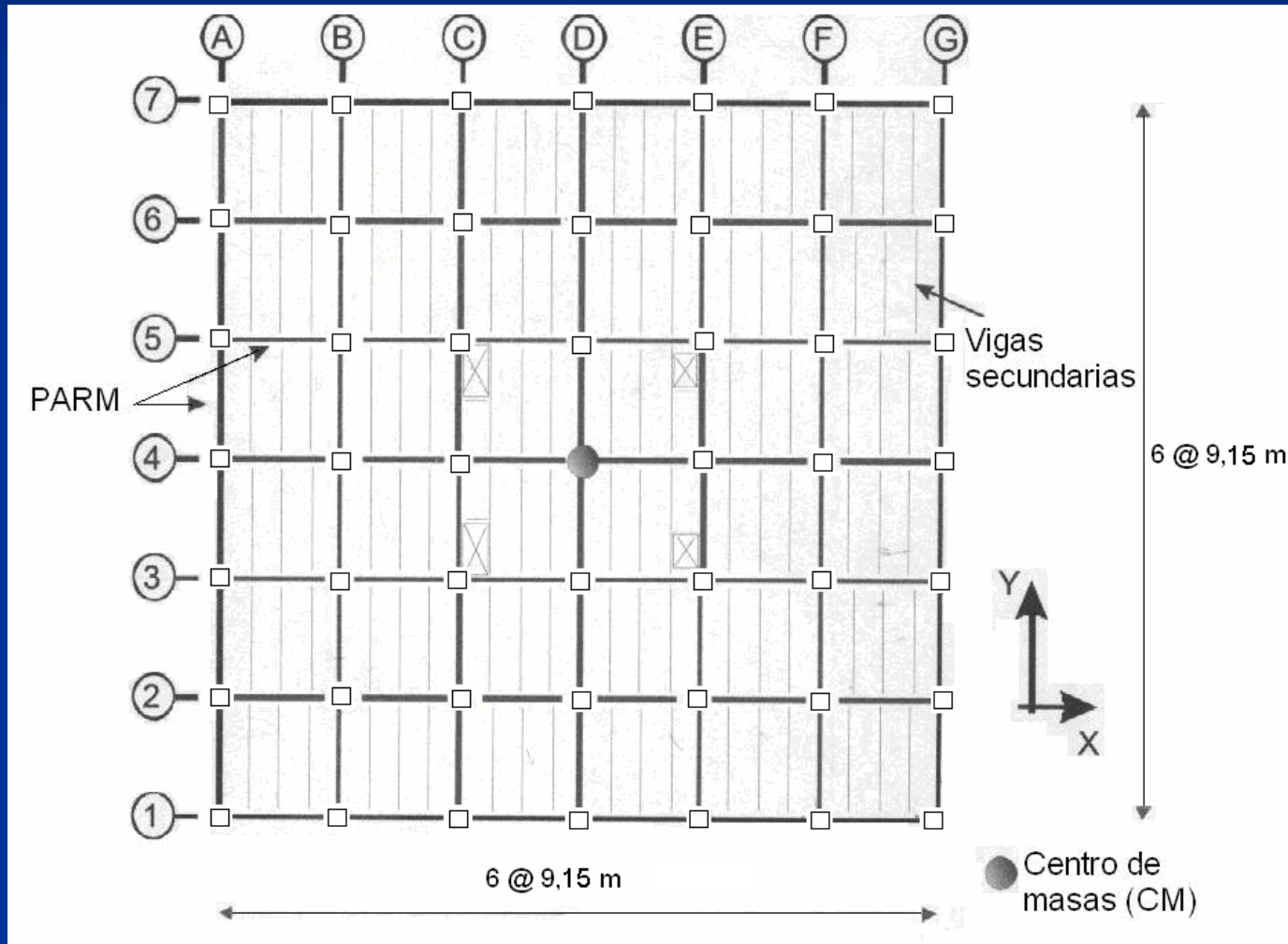
## Soldadura de los Miembros Estructurales





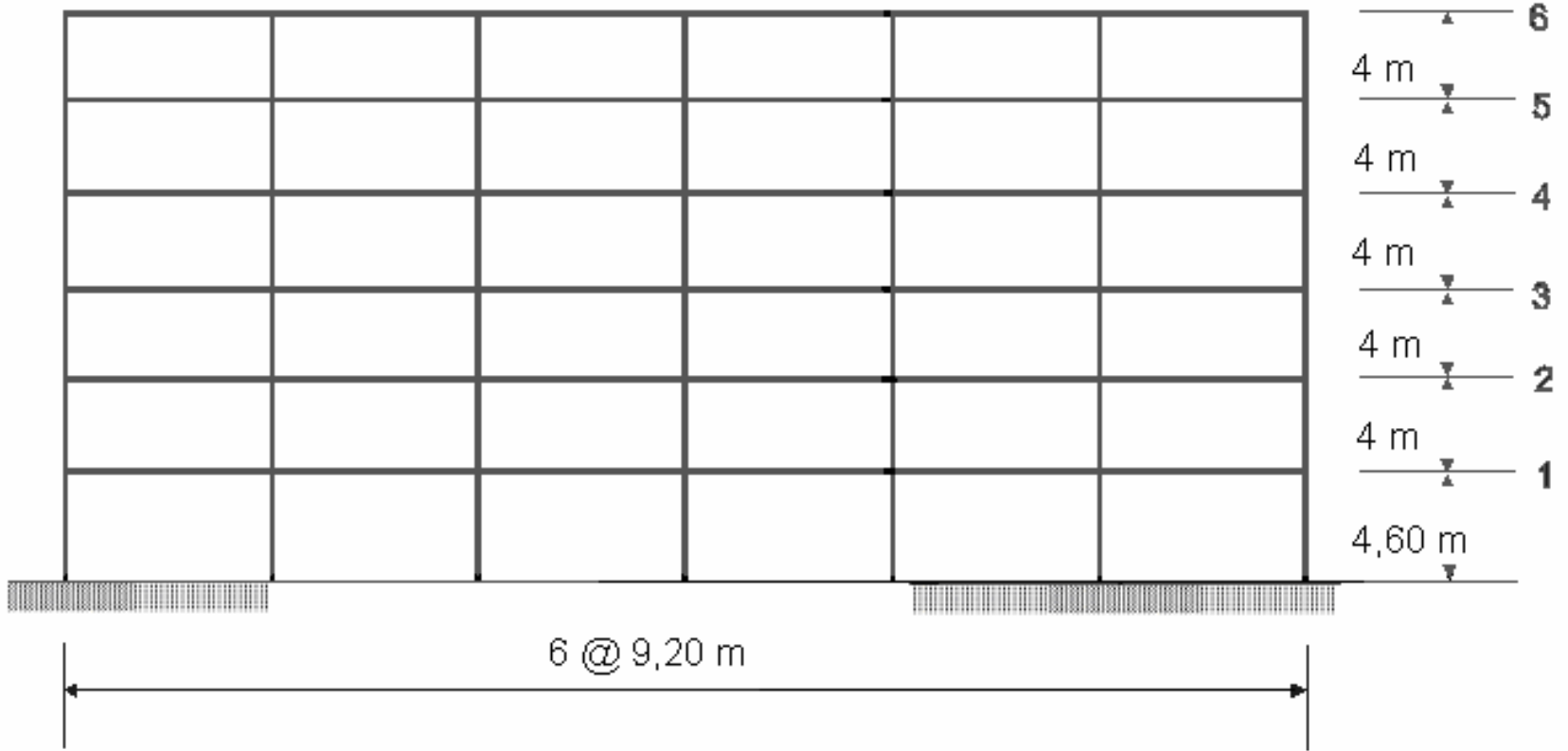
# Diseño por Desempeño

## Edificio Prototipo - Planta



# Diseño por Desempeño

## Edificio Prototipo - Elevación



# Diseño por Desempeño

## Carga muerta y carga viva

DESCRIPCION	CARGA (ton/m <sup>2</sup> )
Baldosas	0,12
Paredes	0,15
Losa (9 cm)	0,22
Ductos y Varios	0,03
Peso Propio (Vigas + Columnas)	0,07
<b>TOTAL</b>	<b>0,59</b>

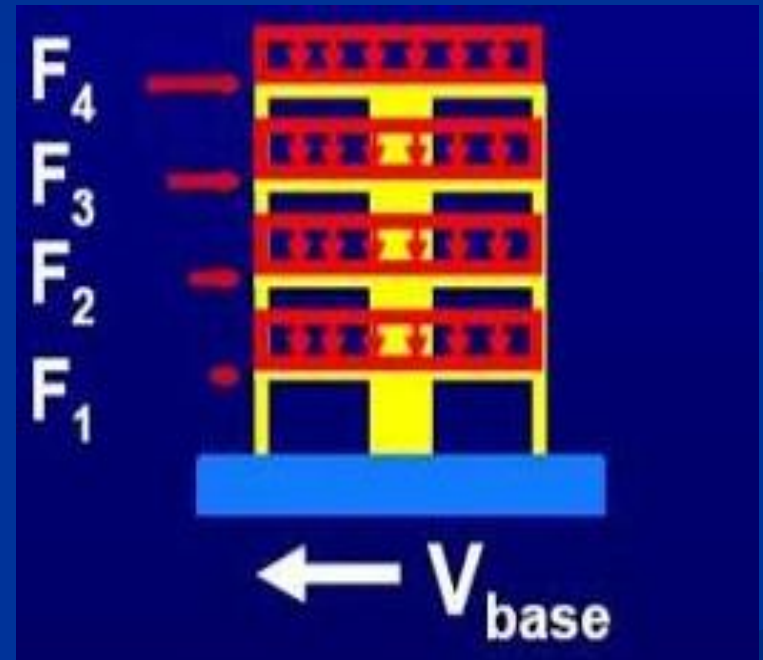
ASCE/SEI 7-05

DESCRIPCION	CARGA (ton/m <sup>2</sup> )
Carga Viva para Oficinas	0,25
<b>TOTAL</b>	<b>0,25</b>

# Diseño por Desempeño

## Cargas: Fuerzas Laterales Equivalentes

- Procedimiento descrito por el ASCE/SEI 7-05 (IBC 2003).
- $R = 6$
- Clase de Sitio : D
- $I = 1$  (oficinas)
- Peso sísmico  $W$ : 10334 tonf



# Diseño por Desempeño

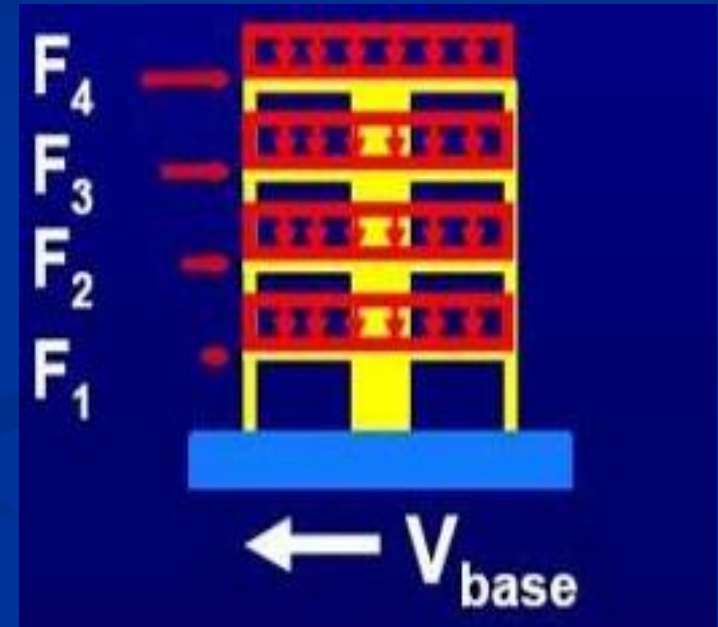
## Cargas: Fuerzas Laterales Equivalentes

- $C_s = S_{ds}/(R/I) < S_{d1} / T^*(R/I)$
- Para cálculos de resistencia el período  $T$  no puede ser mayor que:  $C_u * T_a$ .
- Para cálculos de derivas el período  $T$  es el del resultado del análisis modal.
- Análisis Modal:  $T_{1y} = 1.51$ ,  $T_{2x} = 1.22$ ,  $T_{3\theta} = 1.15$

# Diseño por Desempeño

## Cargas: Fuerzas Laterales Equivalentes

- $V = C_s * W$
- Para los análisis de resistencia:
  - $V_x = 849$  ton
  - $V_y = 792$  ton
- Para los análisis de derivas:
  - $V_x = 849$  ton
  - $V_y = 685$  ton
- Para distribuir los cortantes se pone el 100% del cortante en una dirección y el 30% del cortante de la otra dirección, para luego distribuirlos por pisos.



# Diseño por Desempeño

## Análisis Elástico Lateral

- Todos los pórticos son resistentes a momento
- Columnas empotradas en la base
- Zonas rígidas para vigas y columnas
- Conexiones totalmente restringidas para todos los pórticos
- Torsión accidental
- Diafragmas rígidos
- No se consideró interacción suelo-estructura

# Diseño por Desempeño

## Diseño de Secciones

- **Vigas:**
  - Estado límite de resistencia a la fluencia
  - Estado límite de resistencia de fluencia al corte
  - Estado límite de serviciabilidad
- **Columnas:**
  - Criterio Columna Fuerte – Viga Débil
  - Ecuación de Interacción
  - Estado límite de resistencia de fluencia al corte



# Diseño por Desempeño

## Edificio Prototipo - Secciones finales

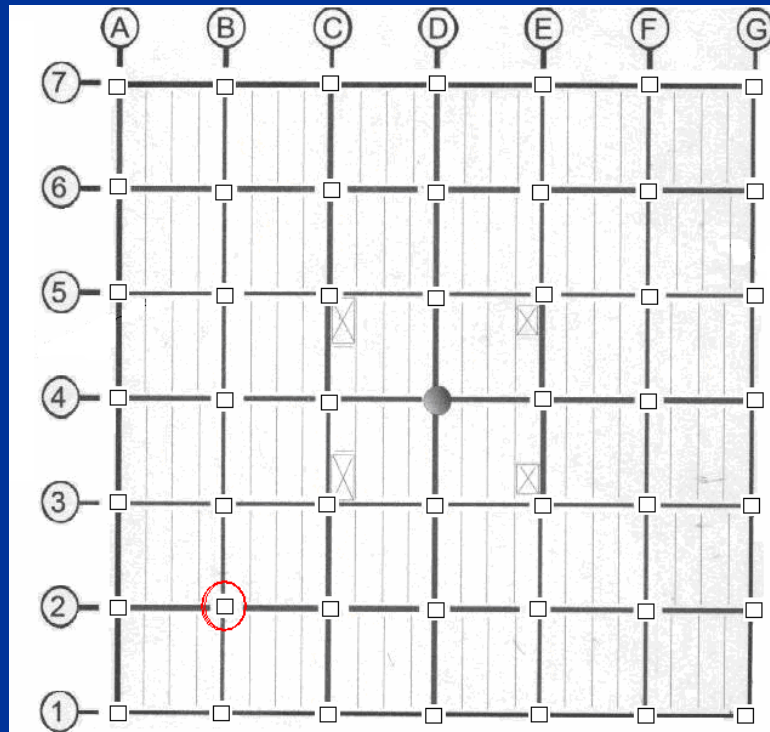
VIGAS PRINCIPALES				
PISO	Paralelas al Eje X		Paralelas al Eje Y	
	ALAS	ALMA	ALAS	ALMA
	mm	mm	mm	mm
6	200x20	600x10	200x15	500x8
5	200x20	600x10	200x15	500x8
4	200x22	600x10	200x20	500x8
3	200x22	600x10	200x20	500x8
2	200x25	600x10	200x20	500x8
1	200x25	600x10	200x20	500x8

VIGAS SECUNDARIAS Y COLUMNAS			
PISO	VIGAS SECUNDARIAS		COLUMNAS
	ALAS	ALMA	
	mm	mm	mm
6	150x6 - 150x8	450x5	HSS 450 x 450 x 22
5	150x6 - 150x8	450x5	HSS 450 x 450 x 22
4	150x6 - 150x8	450x5	HSS 500 x 500 x 25
3	150x6 - 150x8	450x5	HSS 500 x 500 x 25
2	150x6 - 150x8	450x5	HSS 550 x 550 x 30
1	150x6 - 150x8	450x5	HSS 550 x 550 x 30

# Diseño por Desempeño

## Cumplimiento del Criterio Columna Fuerte-Viga Débil

- Conexión B2 del 1er piso
- Columna HSS 550x550x30
- Viga de alas de 200x25 y alma de 600x10



# Diseño por Desempeño

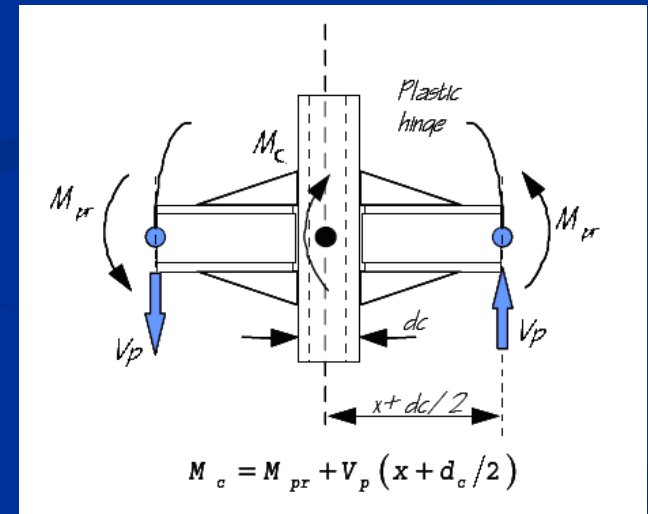
## Cumplimiento del Criterio Columna Fuerte-Viga Débil

- $\sum M_{pc} / \sum M_{pb} > 1.0$
- Se calcula la capacidad de la columna:
- $\sum M_{pc} = \sum Z_c (F_y - P_{uc}/A_g)$

- Se calcula la capacidad de la viga:
- $\sum M_{pb} = \sum (1.1 R_y F_{yb} Z_b + M_{uv})$ 
  - $M_{uv} = V_p (x + d_c/2)$

- $\sum M_{pc} / \sum M_{pb} = 1.17$

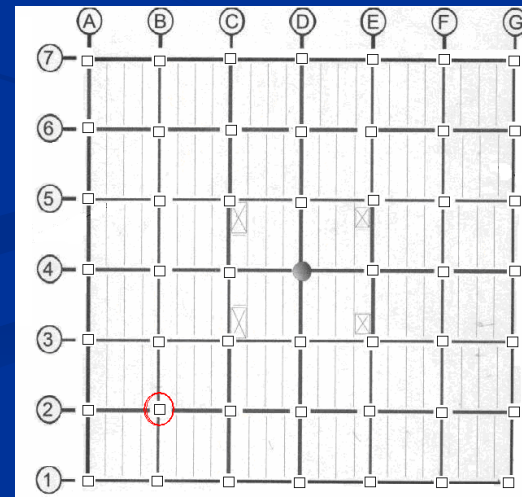
- El criterio columna fuerte – viga débil se cumple



# Diseño por Desempeño

## Edificio Prototipo - Diseño de la conexión ANRS-AS

- Datos:
- Columna:
  - HSS 550x550x30
  - A36,  $F_{yc} = 2.5 \text{ ton/cm}^2$ ,  $F_u = 4.06 \text{ ton/cm}^2$
- Viga:
  - Alas de 200x25 y alma de 600x10
  - A36,  $F_{yc} = 2.5 \text{ ton/cm}^2$ ,  $F_u = 4.06 \text{ ton/cm}^2$
- Luz del pórtico: 9.15 m



# Diseño por Desempeño

## Edificio Prototipo - Diseño de la conexión ANRS-AS

**Paso 1:** Limitaciones para la viga según ANSI/AISC 358-05.

- Tipo:
  - Vigas I fabricadas a partir de planchas soldadas, permitidas por las limitaciones.
- Peralte:
  - $650\text{mm} < \text{máximo permitido: } W920$
- Peso:
  - $130\text{ kg/m} < \text{máximo permitido: } 447\text{ kg/m}$
- Espesor del ala de la viga:
  - $25\text{mm} < \text{máximo permitido } 44.5\text{ mm}$
- Relación luz/peralte:
  - $9.15/0.65 = 14 > 7$  mínimo permitido para PEM
- Relaciones ancho-espesor:
  - $b_f/2t_f = 5 < \text{máximo permitido: } 0.3\sqrt{(E/F_y)} = 8.5$

# Diseño por Desempeño

## Edificio Prototipo - Diseño de la conexión ANRS-AS

**Paso 2:** Limitaciones para la columna según ANSI/AISC 358-05

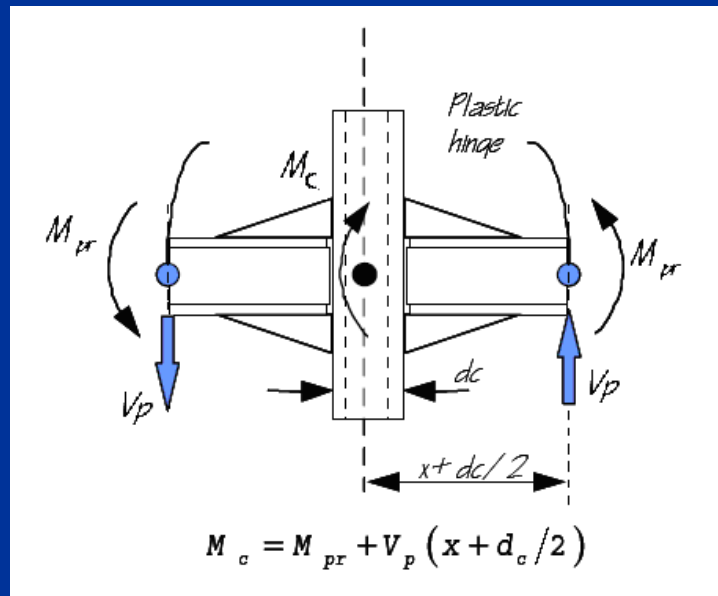
- Tipo:
  - Columnas tipo cajón fabricadas a partir de planchas soldadas
- Conexión a la Viga:
  - La viga deberá conectarse al ala de la columna
- Peralte o ancho:
  - $550\text{mm} < \text{máximo permitido: } 610\text{mm}$
- Relaciones ancho-espesor:
  - $b/t = h/t_w = (55-6)/3 = 16.33 < \text{máximo permitido } 0.64\sqrt{(E/F_y)} = 18.2$

# Diseño por Desempeño

## Edificio Prototipo - Diseño de la conexión ANRS-AS

**Paso 3:** Determinar el  $M_c$  de la conexión:

- $M_c = M_{pr} + V_p (d_b/3 + d_c/2)$



# Diseño por Desempeño

## Edificio Prototipo - Diseño de la conexión ANRS-AS

**Paso 4:** Cálculo del espesor requerido de la zona de panel. El espesor mínimo para no requerir doble placas lo determina la sgte. ecuación :

$$t = \frac{C_y \sum M_c \frac{(h_p - d_b)}{h_p}}{(0.90)0.6F_y R_y d_c (d_b - t_f)}$$

$$C_y = \frac{1}{C_{FV} \frac{Z_x}{S_b}}$$

$$C_y = 0.737$$

$$M_c = 386 \text{ ton-m}$$

$$t = \frac{0.737(2*193) \frac{(4.3 - 0.65)}{4.3}}{(0.90)0.6(2.5)(1.3)(0.55)(0.65 - 0.025)} = 3.97 \text{ cm}$$

Como  $2t_{cf} = 60.0\text{m}$ , y es mayor a  $39.7 \text{ mm}$ , entonces no se requerirá doble placas.



# Diseño por Desempeño

## Edificio Prototipo - Diseño de la conexión ANRS-AS

**Paso 5:** Cálculo de las placas de continuidad. Se necesitarán placas de continuidad a través del alma de la columna si el espesor del ala de la columna,  $t_{cf}$ , es menor que

$$t_{cf} < 0.4 \sqrt{\frac{1.8 b_{pf} t_{pf} F_{yp} R_{yc}}{F_{yc} R_{yc}}} = 3.79 \text{ cm}$$

ó

$$t_{cf} < \frac{b_{pf}}{6} = 3.33 \text{ cm}$$

Como  $t_{cf} = 30 \text{ mm}$ , entonces se requerirán placas de continuidad de 40 mm de espesor.

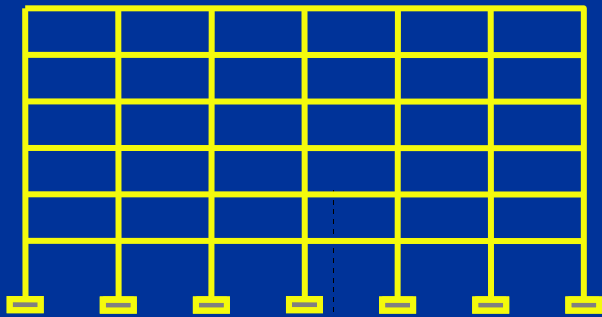
# Contenido

- Introducción
- Objetivos
- Conexiones con alas no reforzadas soldadas y alma soldada (ANRS-AS).
- Investigación Previa.
- Diseño por Desempeño de Edificio Prototipo Compuesto con PEARM.
- Modelo Analítico de Pórtico Prototipo
- Evaluación Sísmica de Pórtico Prototipo
- Conclusiones

# Modelo Analítico del Pórtico Prototipo

## DRAIN-2DX

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



- Elemento Fibra

- Elemento de Conexión

- Elemento Viga-Columna

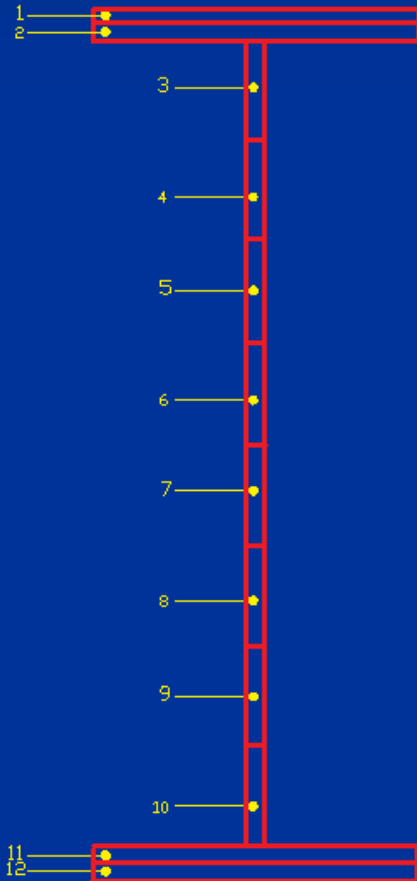
- Simple (E4)

- Refinado (E5)

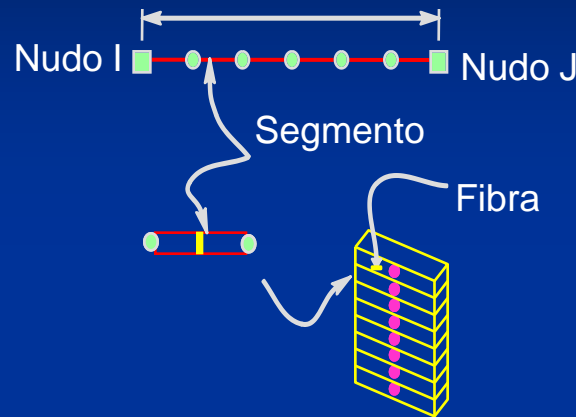
# Modelo Analítico del Pórtico Prototipo

## Modelo con DRAIN-2DX

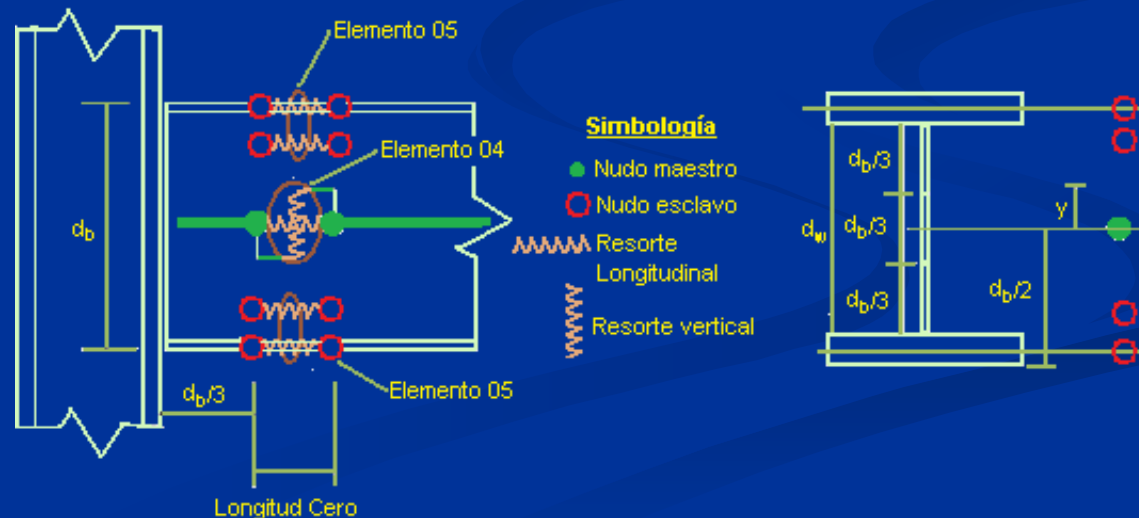
- Vigas:



### Elemento Fibra



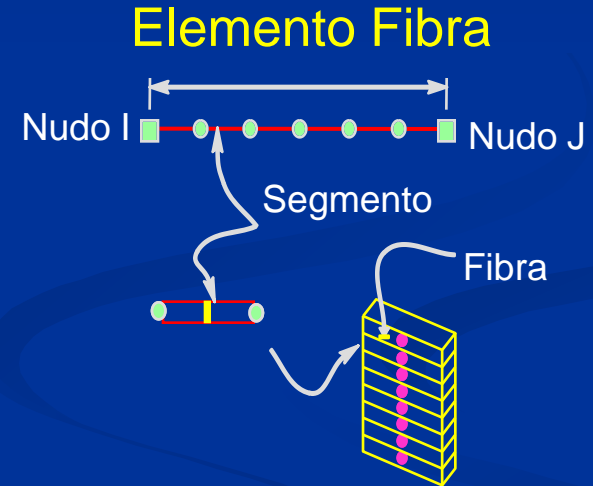
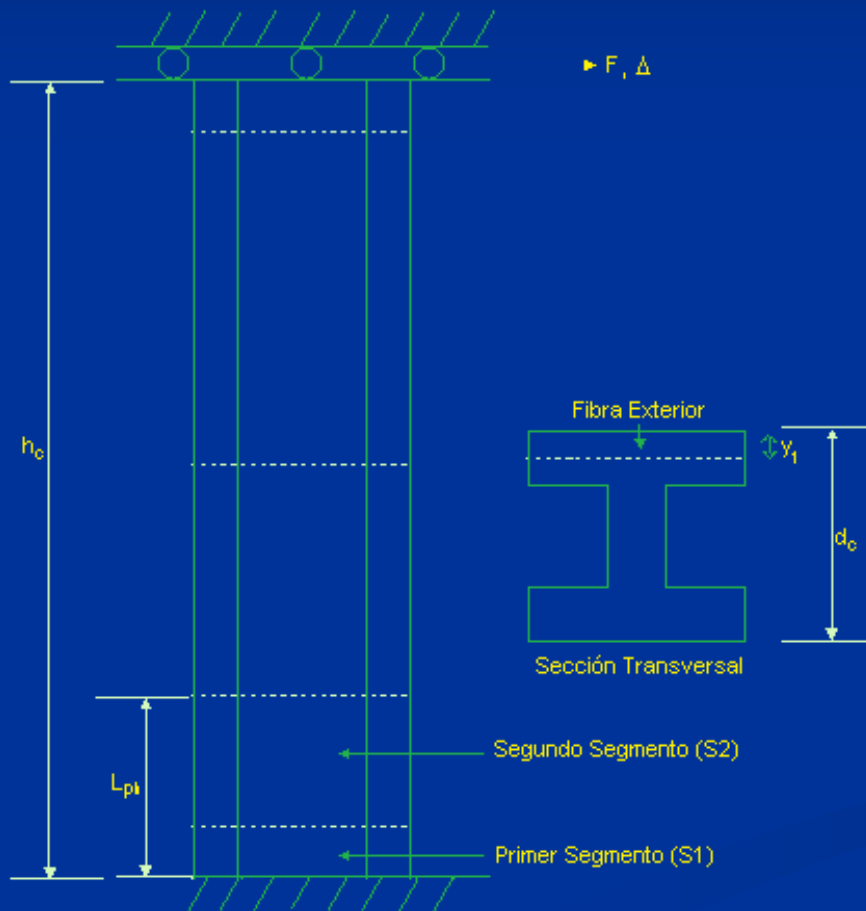
- Rótulas Plásticas



# Modelo Analítico del Pórtico Prototipo

## Modelo con DRAIN-2DX

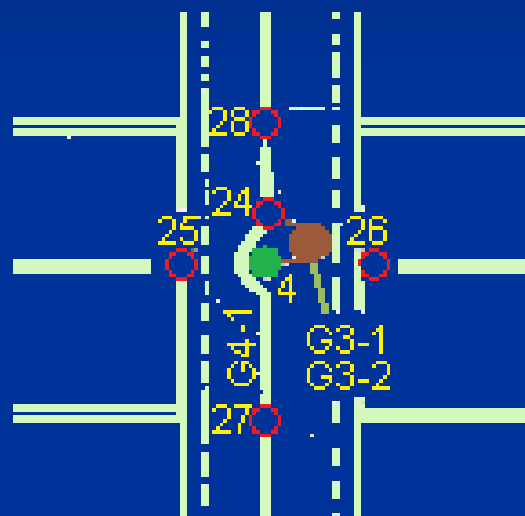
- Columnas:



# Modelo Analítico del Pórtico Prototipo

## Modelo con DRAIN-2DX

- Zonas de Panel:



### Simbología

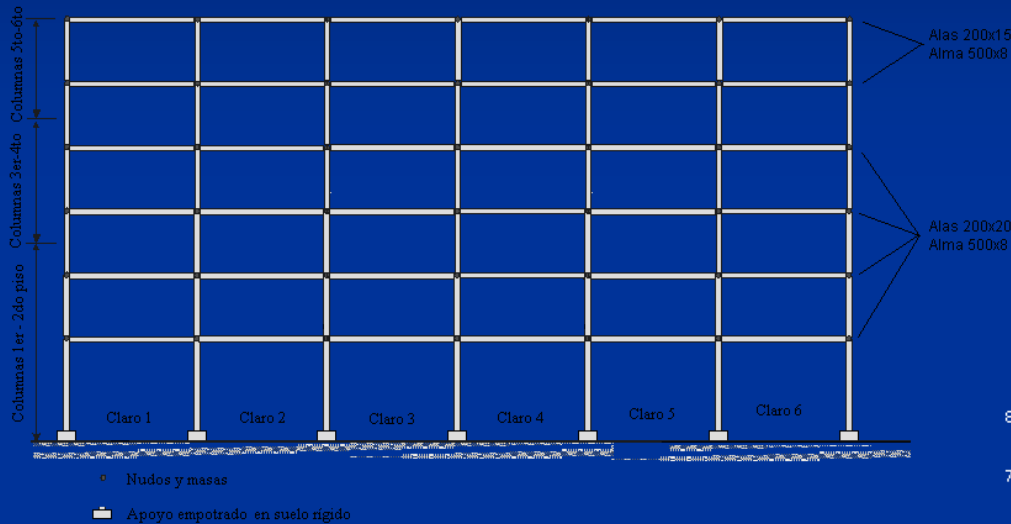
- Nudo Maestro
- Nudo Esclavo

Elemento Grupo	Elemento Tipo	Descripción	Nudo Maestro	Nudo(s) Esclavo(s)	GDL de Esclavo
G3	Conexión Simple	Resortes de zona de panel	4	27, 28	0
G4	Rótula Plástica viga - columna	Zona de panel rígida	24	25, 26	0

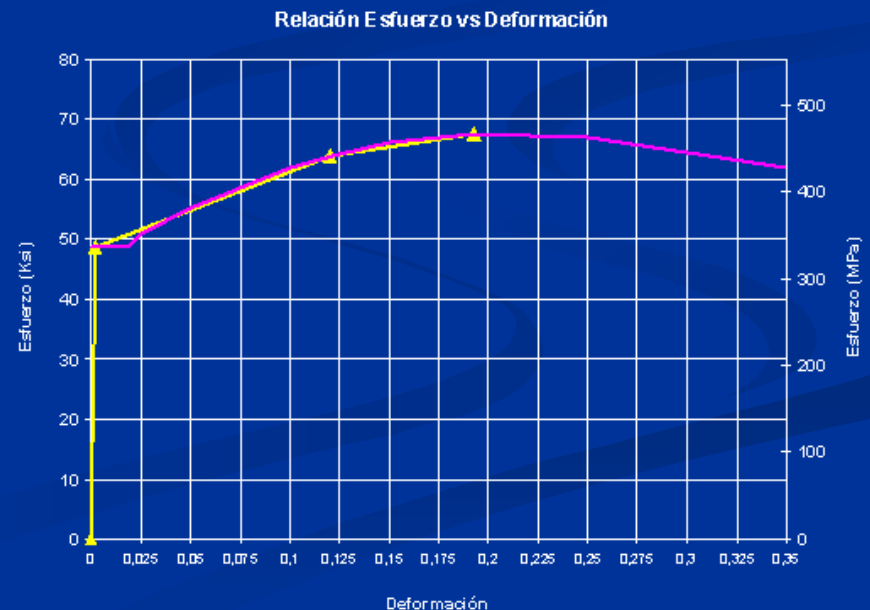
# Modelo Analítico del Pórtico Prototipo

## Modelo con DRAIN-2DX

- Configuración Estructural:



- Propiedades de los materiales:


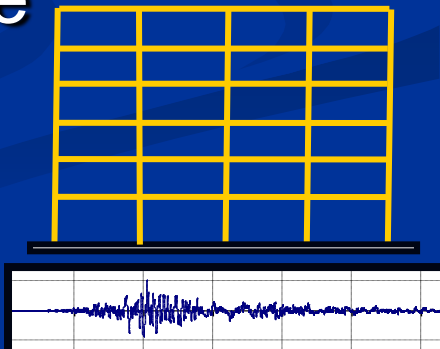


# Contenido

- **Introducción**
- **Objetivos**
- **Conexiones con alas no reforzadas soldadas y alma soldada (ANRS-AS).**
- **Investigación Previa.**
- **Diseño por Desempeño de Edificio Prototipo Compuesto con PEARM.**
- **Modelo Analítico de Pórtico Prototipo**
- **Evaluación Sísmica de Pórtico Prototipo**
- **Conclusiones**

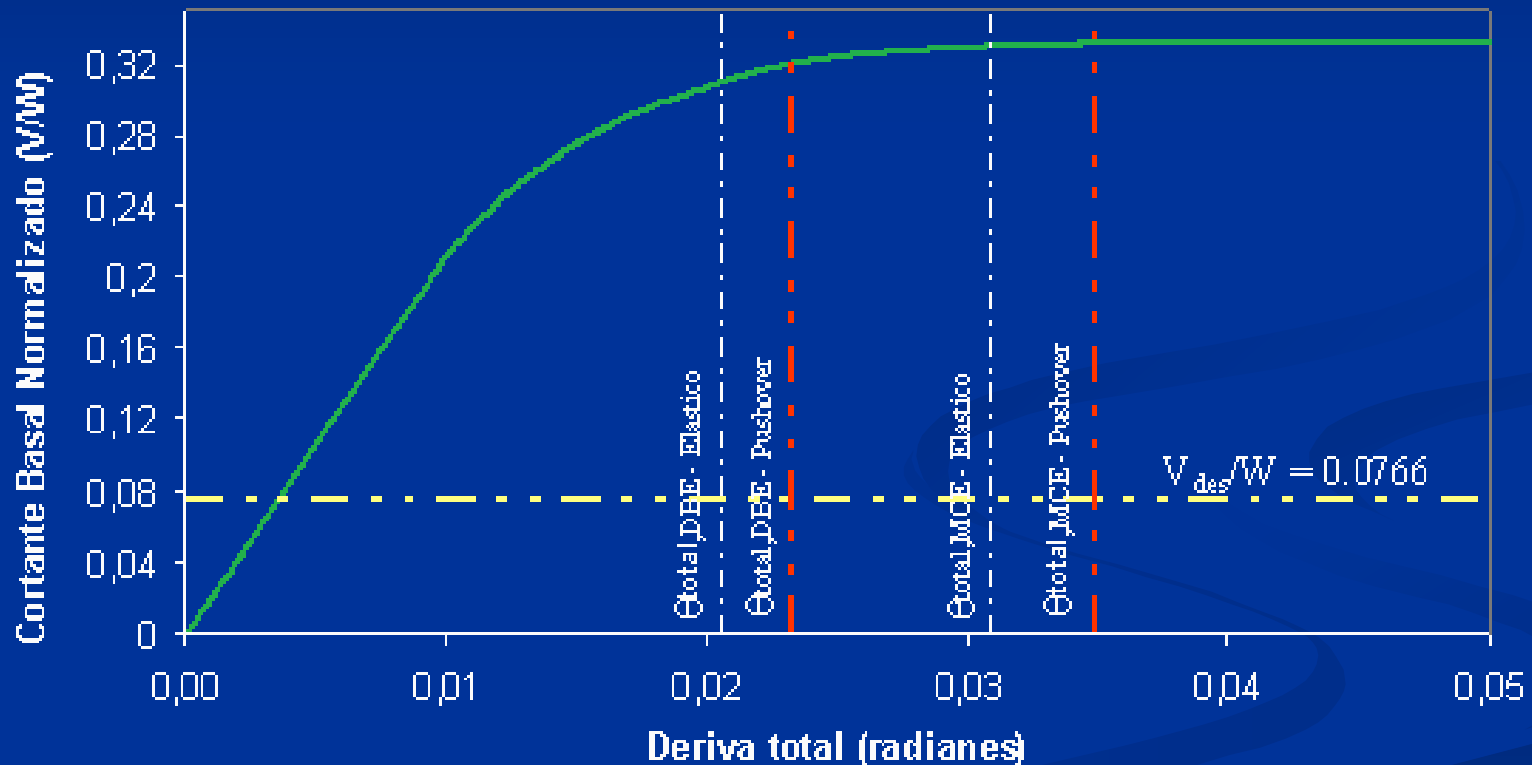


# Evaluación Sísmica de Pórtico Prototipo

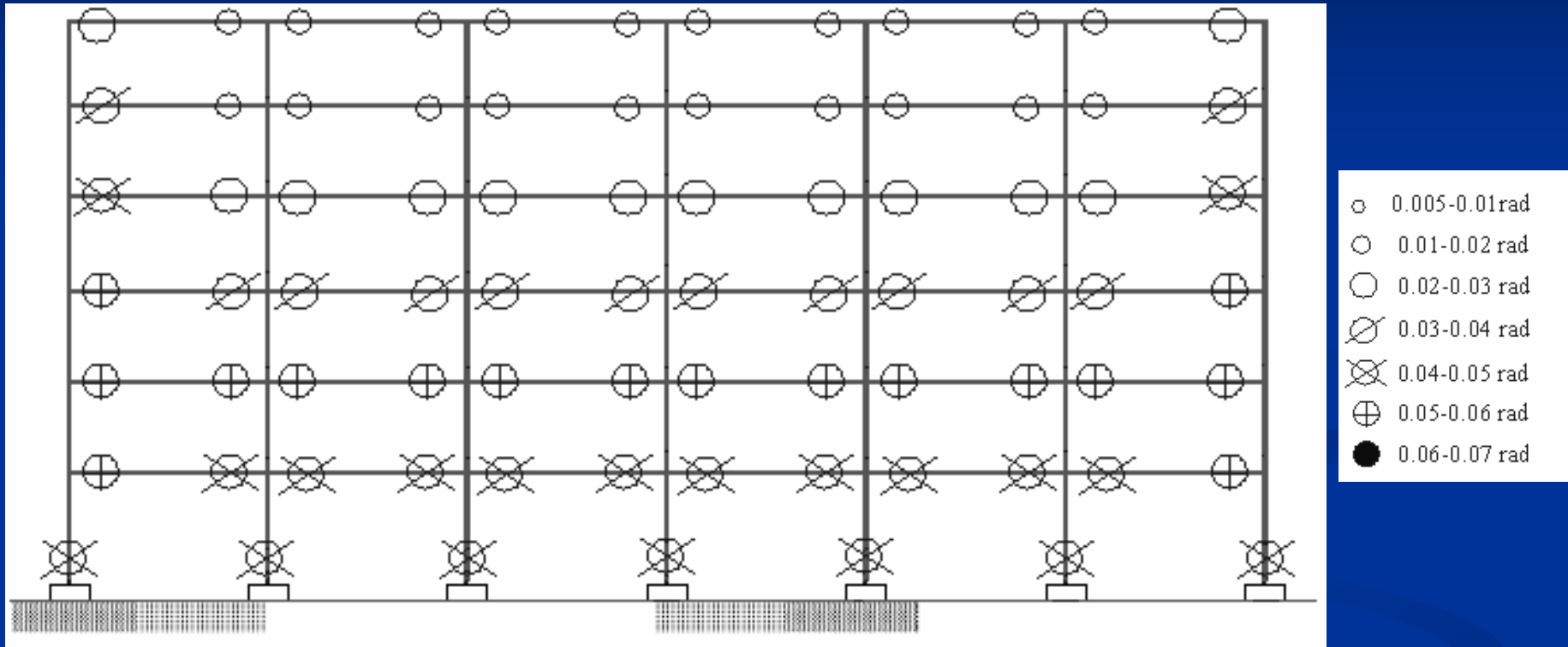
- Modelo analítico DRAIN-2DX de pórtico prototipo.
- Modelo que simula un PEARM.
- Conexiones restringidas que no modelan la soldadura.
- Análisis lateral estático (pushover) 
- Análisis dinámicos con cinco registros de aceleraciones a nivel DBE y MCE. 

# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

## Resultados Estáticos Laterales



# Análisis Estático Pushover

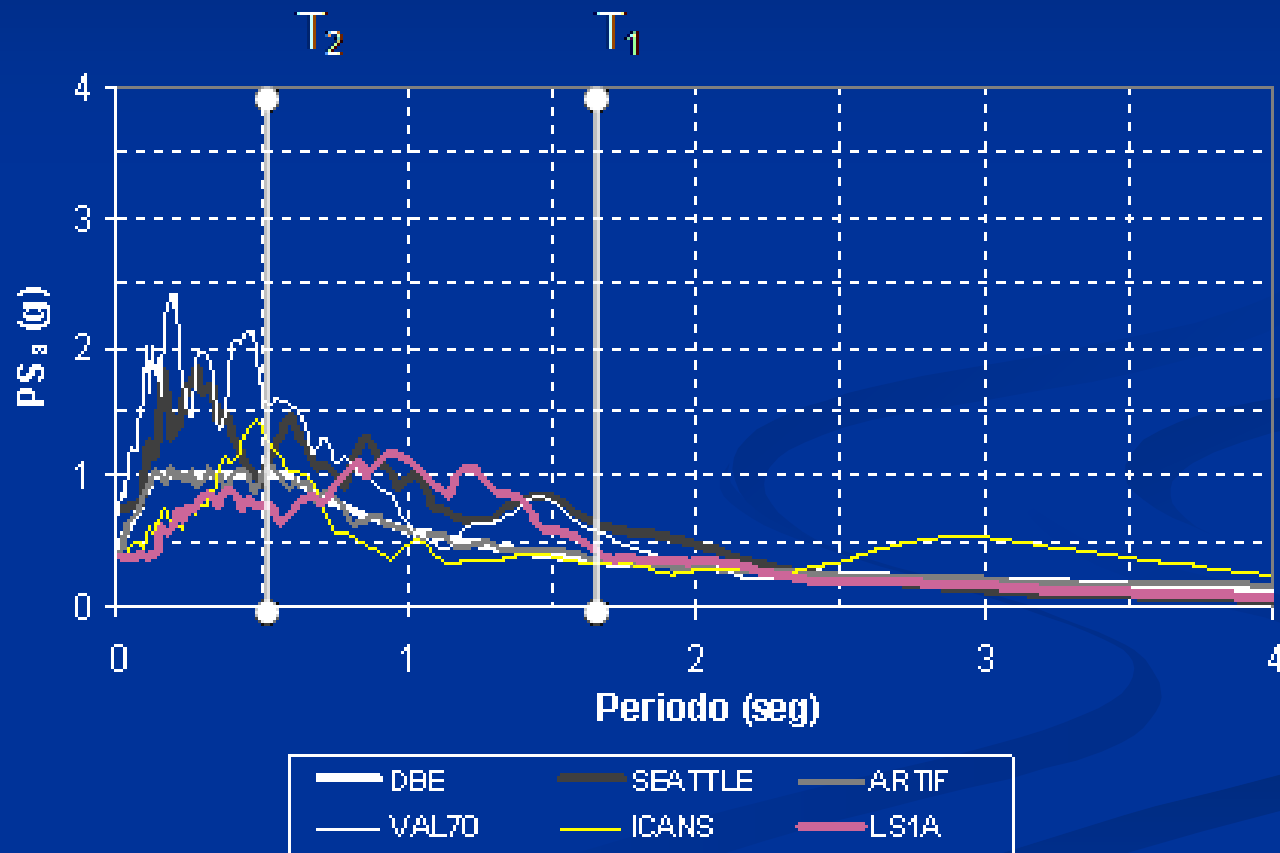


$5.4\Delta_y$  ( $\theta_{\text{total}} = 5\%$ )

# Evaluación del Desempeño Sísmico

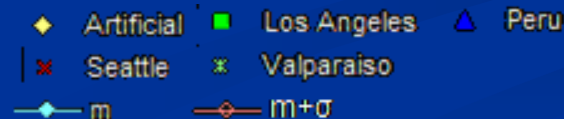
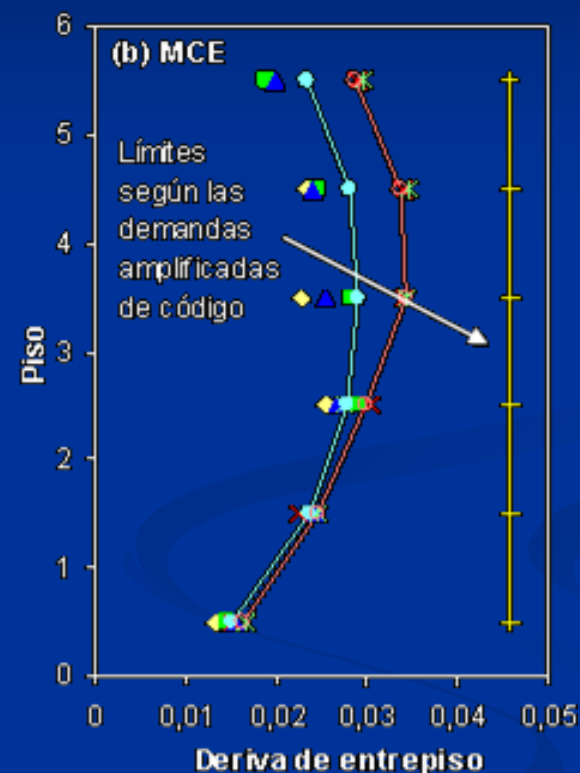
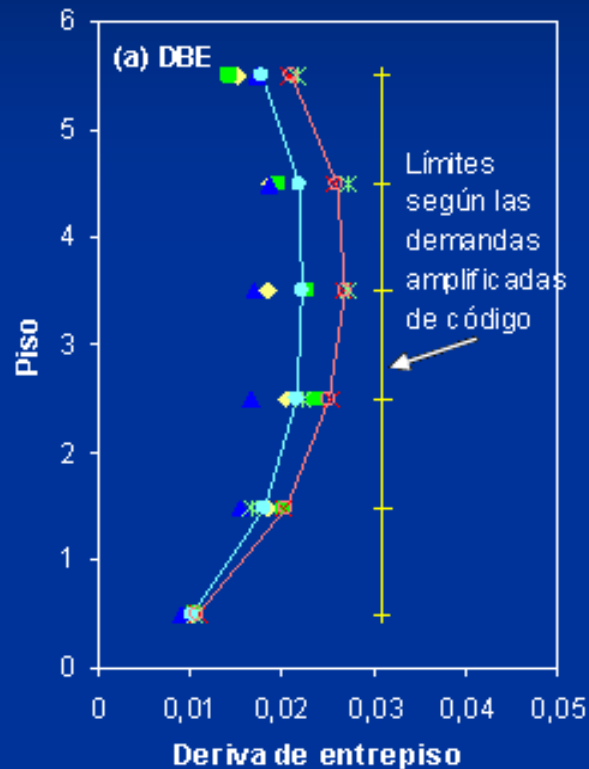
## DBE – Espectro de Respuesta

Espectros de Pseudo-Aceleración escalados a DBE



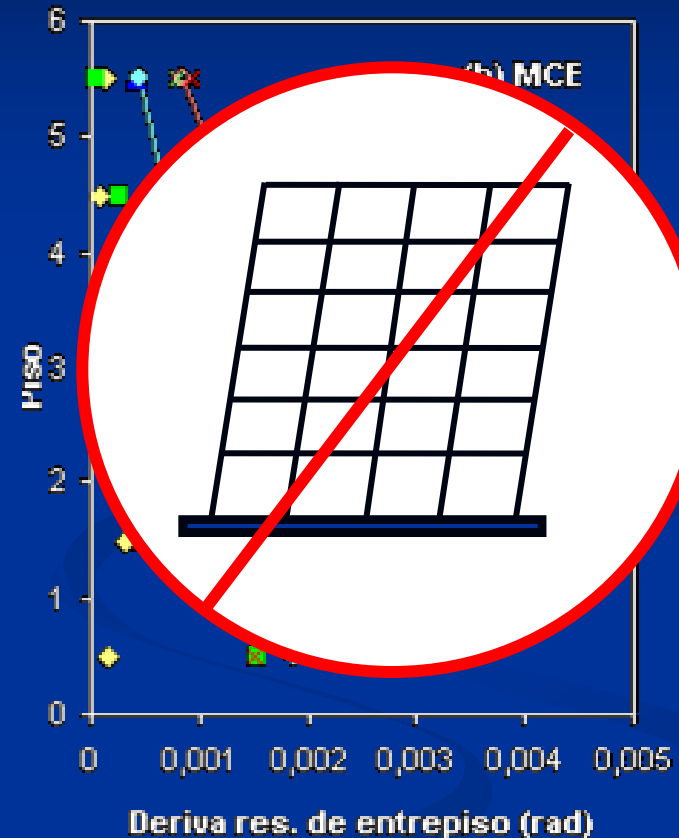
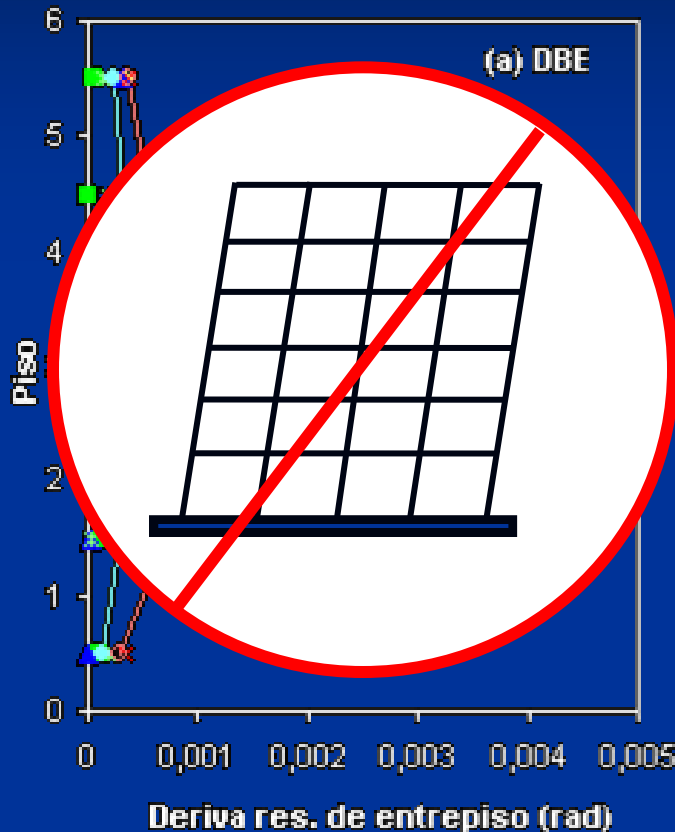
# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

## Desempeño Sísmico: Resultados Dinámicos



# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

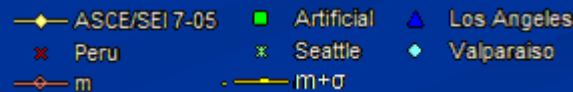
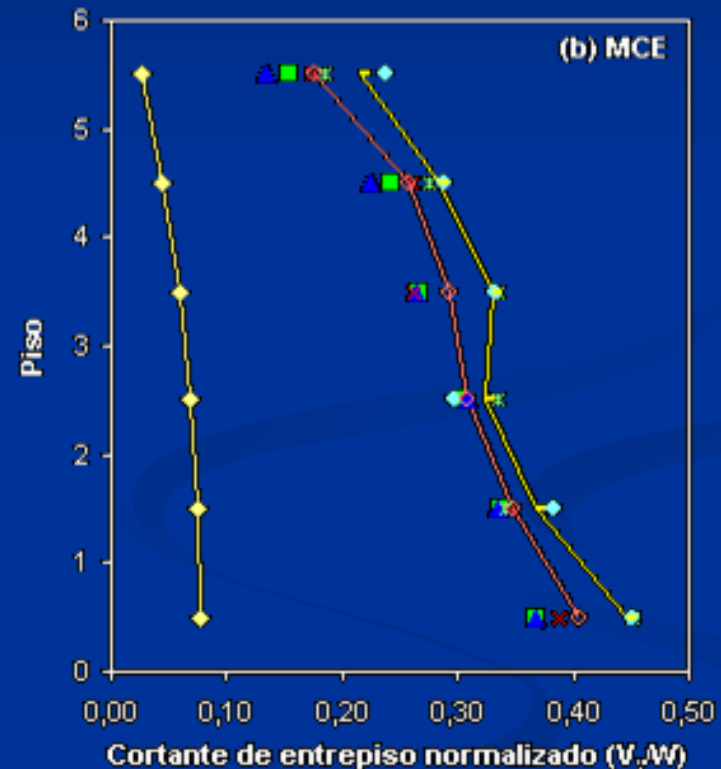
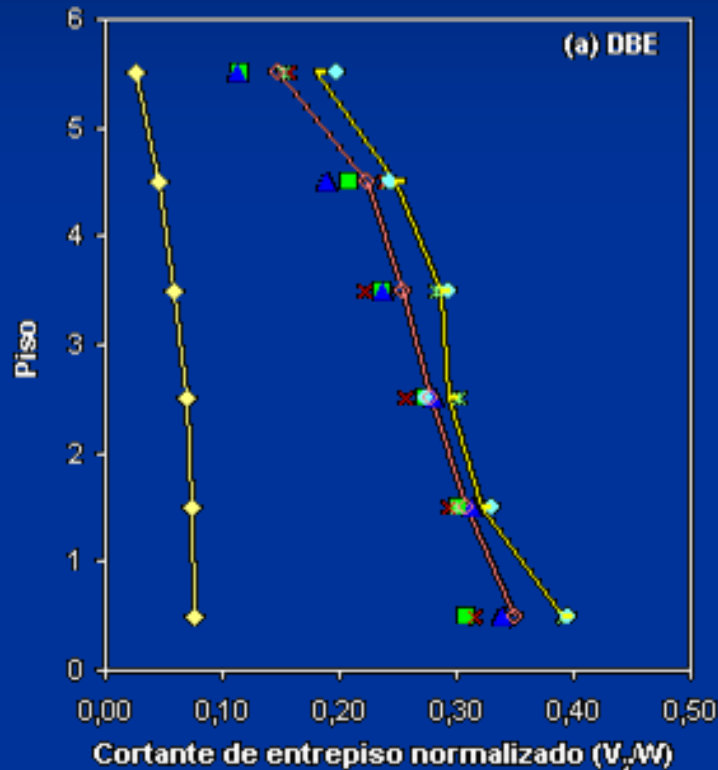
## Desempeño Sísmico: Resultados Dinámicos



- ♦ Artificial
- Los Angeles
- ▲ Peru
- ✕ Seattle
- ⊠ Valparaiso
- ◆ m
- ◇ m+σ

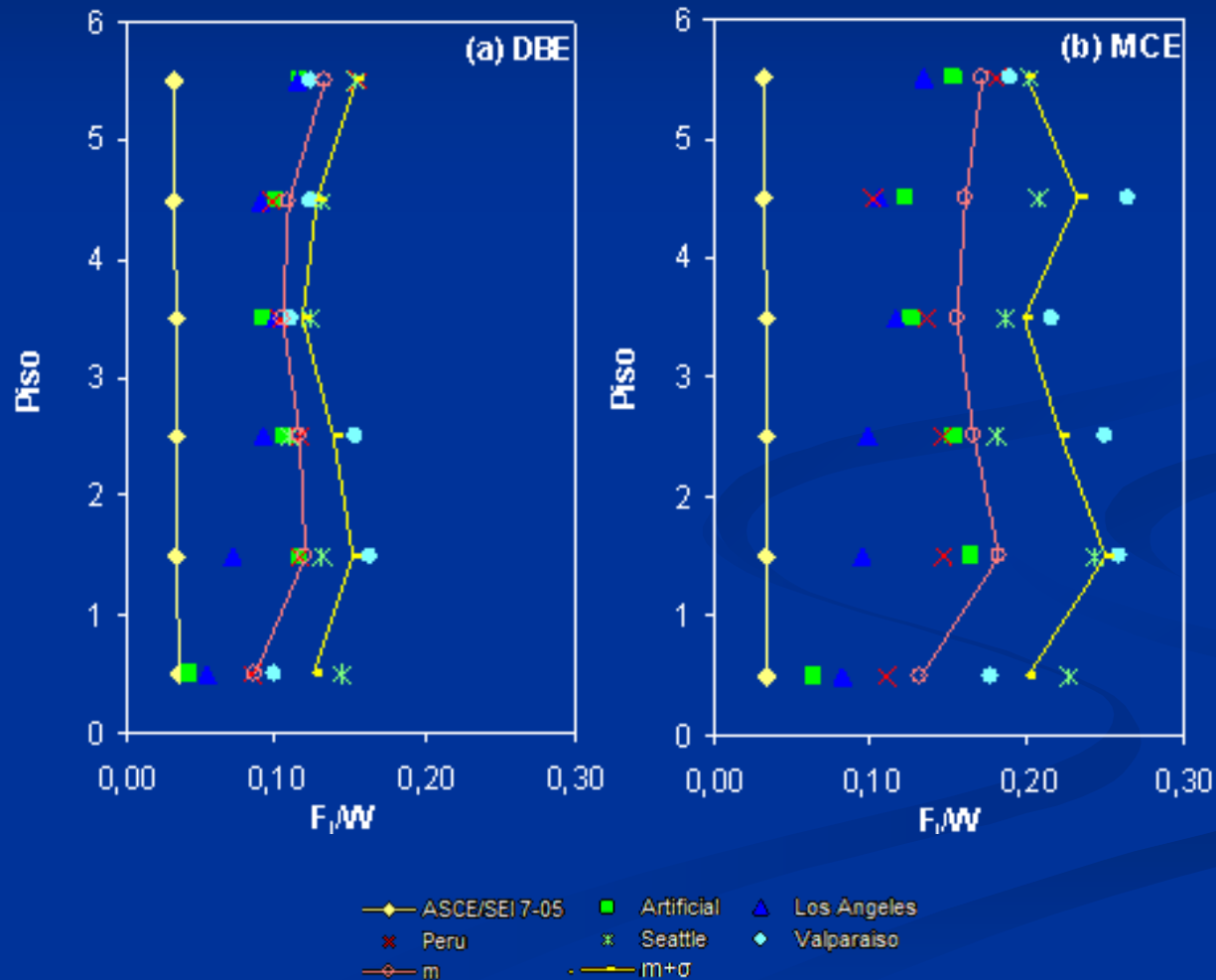
# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

## Desempeño Sísmico: Resultados Dinámicos



# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

## Desempeño Sísmico: Resultados Dinámicos



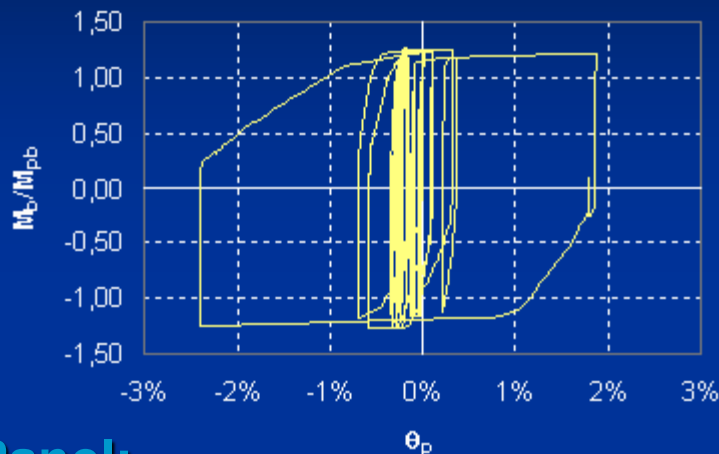


# Evaluación Sísmica de Pórtico Rehabilitado

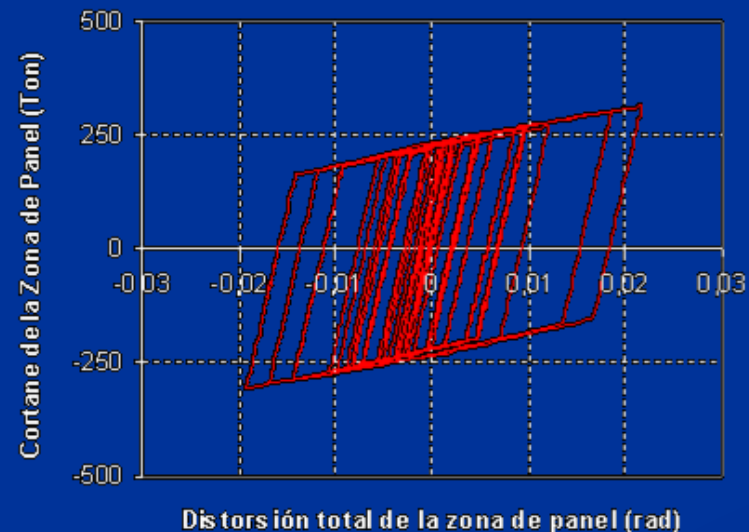
## Desempeño Sísmico: Resultados Dinámicos

Claro 1 - Piso 4

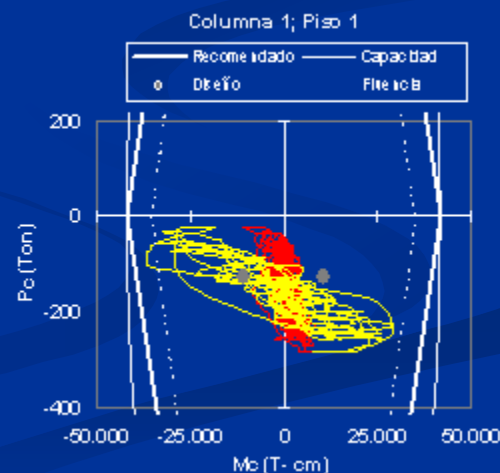
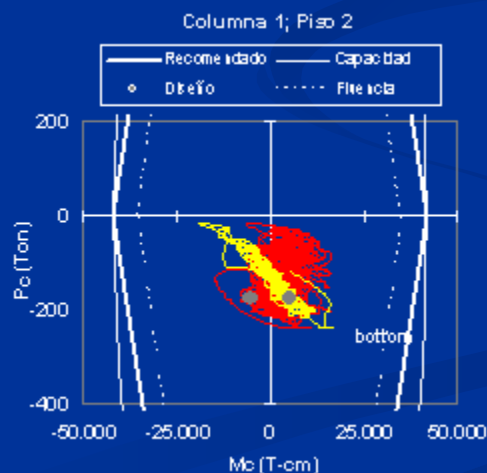
- Vigas:



- Zonas de Panel:



- Columnas:



# Contenido

- **Introducción**
- **Objetivos**
- **Conexiones con alas no reforzadas soldadas y alma soldada (ANRS-AS).**
- **Investigación Previa.**
- **Diseño por Desempeño de Edificio Prototipo Compuesto con PEARM.**
- **Modelo Analítico de Pórtico Prototipo**
- **Evaluación Sísmica de Pórtico Prototipo**
- **Conclusiones**

# Conclusiones

- El desempeño sísmico de un PEARM con conexiones ANRS-AS es satisfactorio en términos de resistencia, disipación de energía y deformación.
- El peso de la estructura metálica es de 65 kg/ m<sup>2</sup> (para edificios medianos localizados en Guayaquil.)
- El costo estimado de la estructura resultó estar en el orden de los 170 us/m<sup>2</sup>:
  - Costo mas elevado que el de un edificio similar en hormigón.
  - Diferencia de costos se compensa con la rapidez del trabajo en acero.
  - Permite realizar distintas actividades a la vez.
  - Construcción en concreto reforzado es más pesada, lo cual se traduce en una cimentación más costosa.

# Conclusiones

- Las vigas no sufrieron degradación de la resistencia y las rótulas plásticas desarrolladas en la base de las columnas de la planta baja fueron realmente bajas.
- Edificio con las mismas características localizado en Los Angeles estudiado por Rojas:
  - Mayor calidad de inspección y mano de obra;  $R = 8$
  - Edificio poco redundante
  - Tuvo un peso de  $60 \text{ kg/m}^2$
- La sobrerresistencia máxima,  $\Omega_{MAX}$ , de 4.33 resultante del análisis estático lateral no lineal (*pushover*) resultó mayor a 3.
- Por medio de la Teoría de Análisis al Límite para PEARM se obtuvo un factor de sobrerresistencia de 4.13; es decir, muy similar al 4.33 obtenido con el análisis estático lateral no lineal.

# Conclusiones

- Las derivas ocurridas en el edificio fueron menores a los límites establecidos en los códigos, tanto en el análisis elástico como en la evaluación sísmica.
- Las relaciones ancho - espesor para secciones sísmicamente compactas, dadas por la ASCE/SEI 7-05, resultaron ser satisfactorias.

# Recomendaciones

- Realizar ensayos experimentales locales de ANRS-AS para PEARM fabricados a partir de planchas soldadas.
- Investigar la posibilidad de rellenar las columnas tubulares de acero con concreto.
- Realizar diseños y análisis no-lineales para otro tipo de geometría de PEARM,
- Realizar una investigación adicional respecto a las relaciones ancho-espesor para secciones sísmicamente compactas y factor de amplificación de deflexión para la determinación de derivas de entrepiso.
- Efectuar un estudio de cómo detallar las zonas de los empalmes de columnas que presenten cambios de secciones.

# Agradecimientos

- Dr. Pedro Rojas C. – Director de Tesis de Grado
- Dr. Seo por la empatía al responder oportunamente las preguntas relacionadas a esta investigación
- Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL

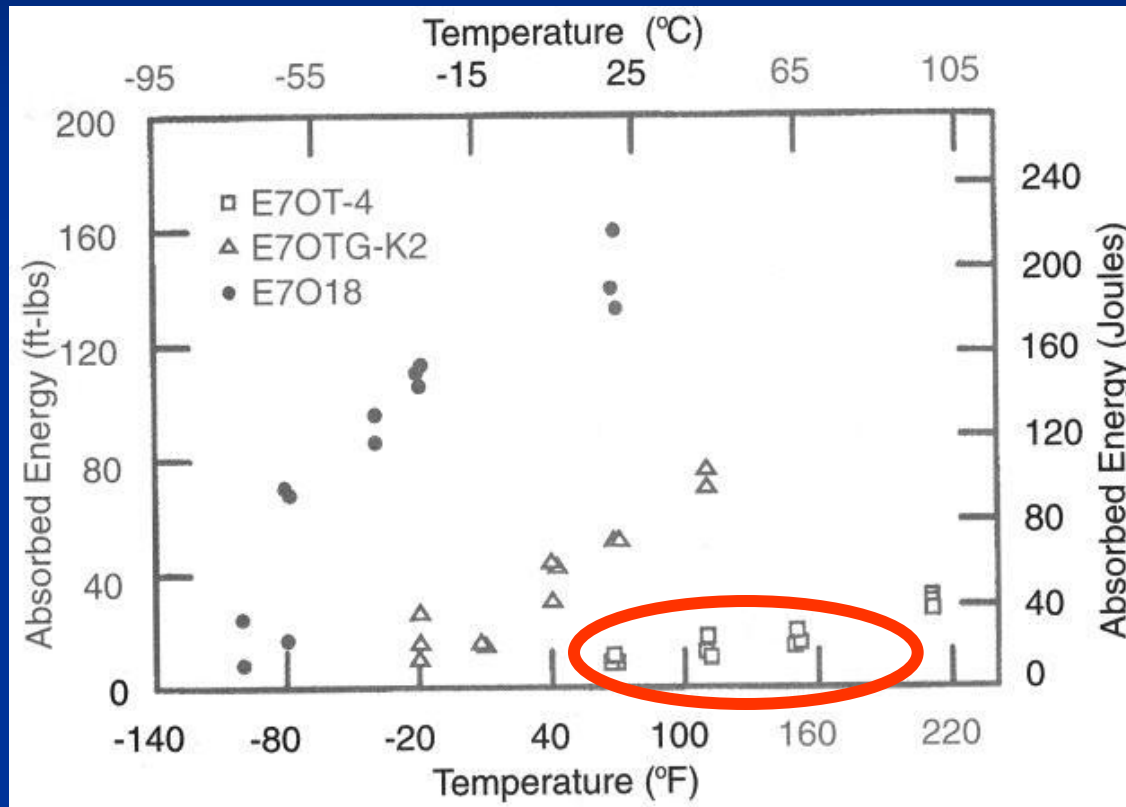
**Gracias**



**Gracias**

# Causas de los Daños

## Baja tenacidad de la soldadura



**Soldadura E70T-4** (70 grados F; 10 ft-lbs)

Ensayo de impacto “**Charpy de muesca en V**”

(U. Lehigh; Kaufmann et al. 1996)

# Introducción

## Northridge - Tipos de daños



Fractura de  
soldadura

- falta de fusión entre barra de respaldo y la columna
- Fractura de conexión de ala superior de viga
- Pernos fallaron por corte

(EERI, CD-98-1)

# Introducción

## Northridge - Tipos de daños



Fractura de  
soldadura

- Grieta se propagó en  
ala y alma de columna.

(EERI, CD-98-1)

# Introducción

## Northridge - Tipos de daños



Fractura de  
soldadura

- Grieta se inició en la  
soldadura de filete entre  
la columna y las placas  
bases

(EERI, CD-98-1)

# Causas de los Daños

## Elevados esfuerzos de fluencia en vigas

- A36 para vigas
- A572-Grado 50 para columnas
- Diferentes materiales para garantizar criterio de Columna fuerte-viga débil
- A572 Grado 50 aumenta la resistencia de la zona de panel

# Causas de los Daños

Elevados esfuerzos de fluencia en vigas

ASTM	Par.	Min (ksi)	Media (ksi)	Máx (ksi)
A36	$F_y$	36.7	46.8	71
	$F_u$	58	65.9	80
A36 - Ecuador	$F_y$	36	47.2	63
	$F_u$	51	64.8	84

(A36 - para alas; Dexter et al. 2000)

# Causas de los Daños

Elevados esfuerzos de fluencia en vigas

ASTM	Par.	Min (ksi)	Media (ksi)	Máx (ksi)
A36	$F_y$	43.5	50.5	65.5
	$F_u$	61	69.1	76
A36 - Ecuador	$F_y$	36	47.2	63
	$F_u$	51	64.8	84

(A36 - para almas; Dexter et al. 2000)



# Causas de los Daños

Elevados esfuerzos de fluencia en vigas (Bruneau et al. 1998)

- $F_y = 36$  ksi (diseño)
- $F_{y,m} = 46.8, 50.5$  ksi (valores medios)
- $F_{y,m}/F_y = 1.30, 1.40$
- Fuerzas en las alas de la viga actuando en la soldadura fueron probablemente subestimadas
- Posiblemente soldadura más débil que el metal base de las vigas
- Probablemente columna débil-viga fuerte

# Causas de los Daños

## Pobre mano de obra e inspección (FEMA 352)

- Pobre calidad de las soldaduras
  - Porosidades
  - Falta de fusión en la raíz de la soldadura
  - Estos defectos se convierten en iniciadores de grietas
- Pobre inspección
  - Prueba ultrasónica atrás de la barra de apoyo y del alma de la viga no es muy confiable

# Diseño por Desempeño

## Niveles de desempeño sísmico estructural

Elementos	Seguridad de Vida PEARM
Viga	Formación de articulaciones Pandeo local de algunas vigas
Columna	Formación de articulaciones en la base de las columnas del primer entrespiso
Conexión	Fracturas de ciertas conexiones
Deriva residual de Entrespiso	2,5 % (transitoria) 1% (residual)

# Diseño por Desempeño

## Niveles de desempeño sísmico de edificios

Daño	Niveles de Desempeño Sísmico de Edificios	
	Nivel de Prevención del Colapso	Nivel de Ocupación Inmediata
	Severo	Leve
General	La estructura posee resistencia y rigidez residual mínima, pero las cargas gravitacionales son soportadas. Presenta grandes deformaciones permanentes. Las paredes podrían tener daño extenso y algunas fallas locales podrían ocurrir. La edificación está cerca de experimentar colapso.	La estructura permanece con la resistencia y rigidez original. Ocurren fisuras menores en paredes, tumbados y elementos estructurales. Los sistemas contra incendios y elevadores están en funcionamiento.
Componentes no-estructurales	Daño extensivo.	Equipos permanecen generalmente seguros, pero podrían no operar debido a fallas mecánicas.
Comparación con el desempeño esperado por FEMA-302 para edificaciones asignadas al Grupo de Uso Sísmico I (GUS-I) sujetas al Sismo de Diseño.	Daño significativo y mayor riesgo.	Daño despreciable y menor riesgo.
Comparación con el desempeño esperado por FEMA-302 para edificaciones asignadas al Grupo de Uso Sísmico I (GUS-I) sujetas al Sismo Considerado Máximo.	Igual nivel de desempeño.	Daño despreciable y menor riesgo.

**Niveles de desempeño sísmico para edificaciones asignadas al Grupo de Uso Sísmico I**

# Diseño por Desempeño

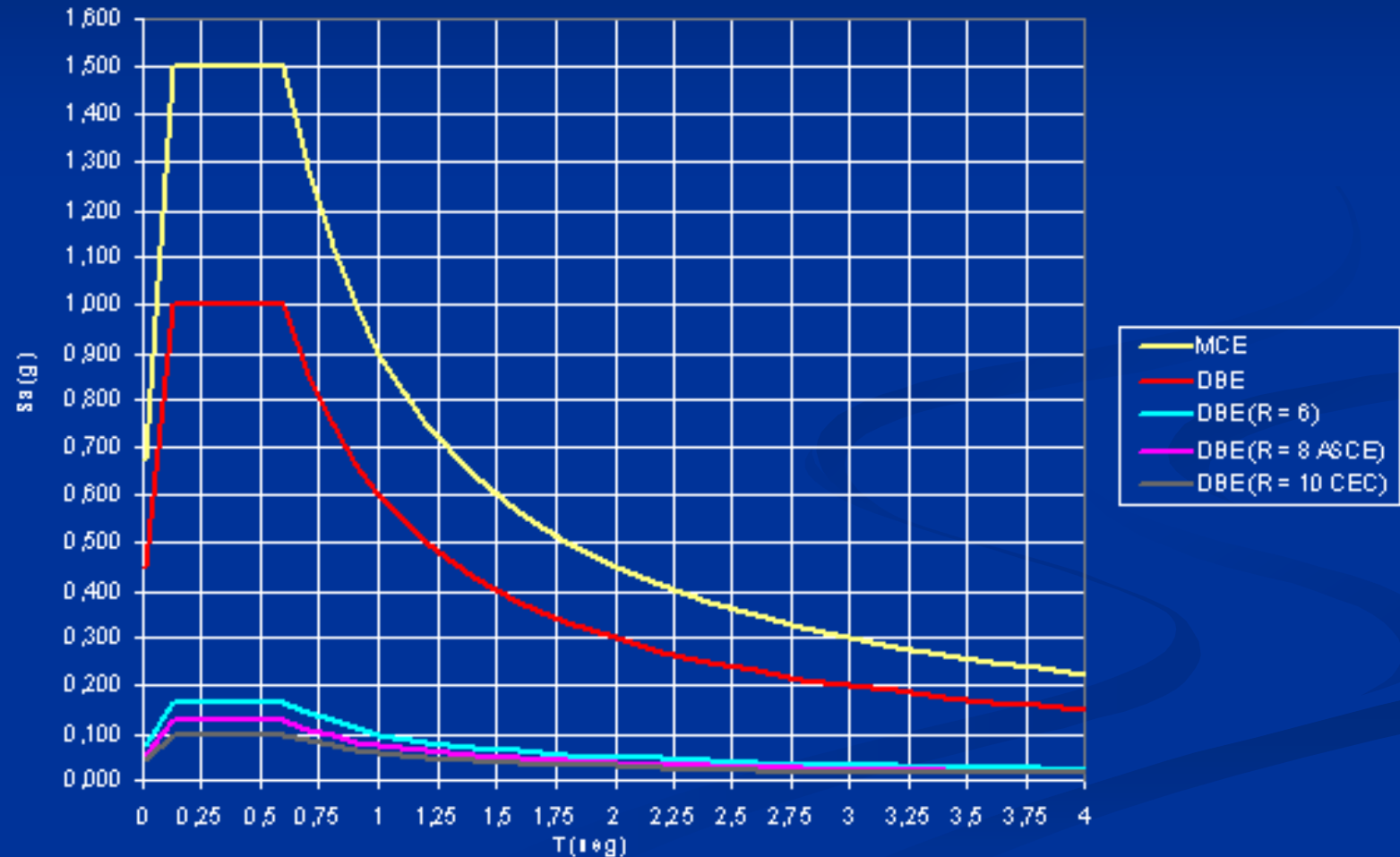
## Niveles de desempeño sísmico estructural

Elementos	Niveles de Desempeño Estructural	
	Nivel de Prevención de Colapso	Nivel de Ocupación Inmediata
Viga	Distorsión extensiva; pandeo y fluencia local. Una pocas vigas pueden experimentar fracturas parciales.	Menor fluencia y pandeo local en pocos lugares.
Columna	Distorsión moderada; algunas columnas experimentan fluencia. Pandeo local en algunas alas.	No se observa daño o distorsión.
Conexiones Viga-Columna	Muchas fracturas con algunas conexiones cerca de experimentar la pérdida total de su capacidad.	Menos del 10% de la conexiones se fracturan en un piso particular; algo de fluencia en otras conexiones.
Zona de Panel	Distorsión extensiva.	Menor distorsión.
Unión de Columnas	No fracturas.	No fluencia.
Placa de Base	Fluencia extensiva en los pernos y en la placa de base.	No se observa daño o distorsión.
Deriva de Entrepiso	Grandes valores de deriva permanente.	Menor que el 1% de la deriva permanente.

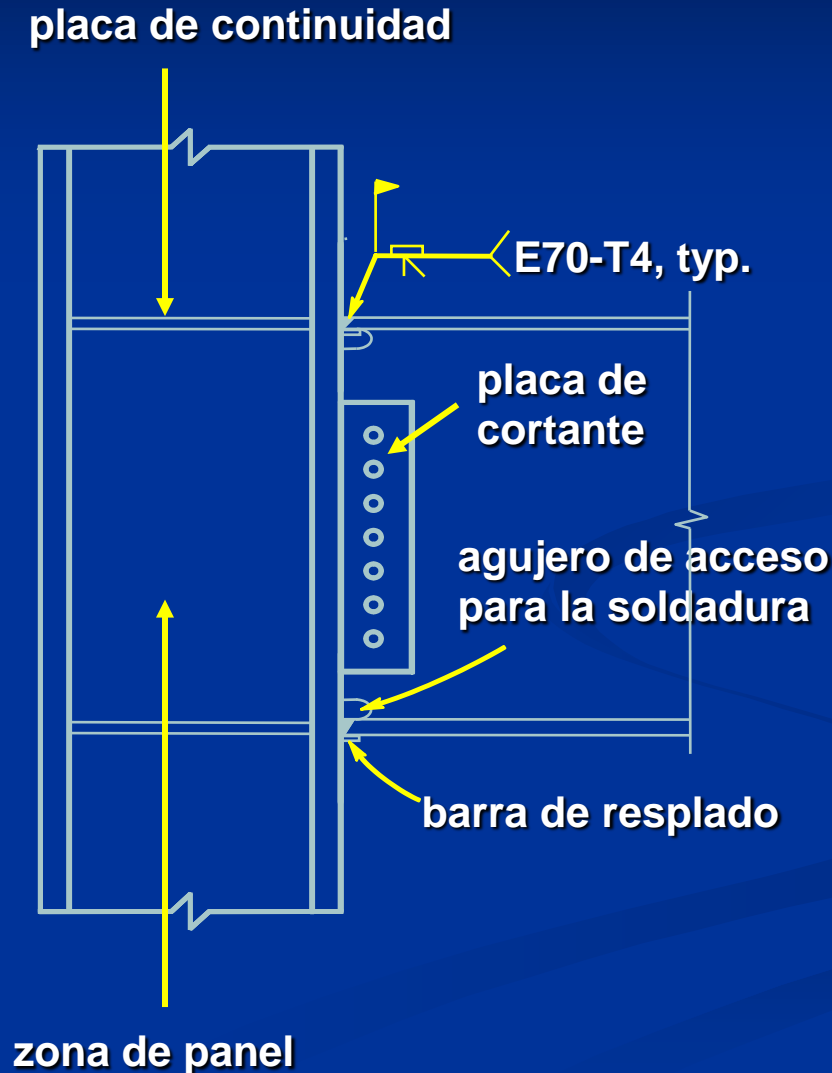
# Evaluación del Desempeño Sísmico

## Espectros de Respuesta - Diseño

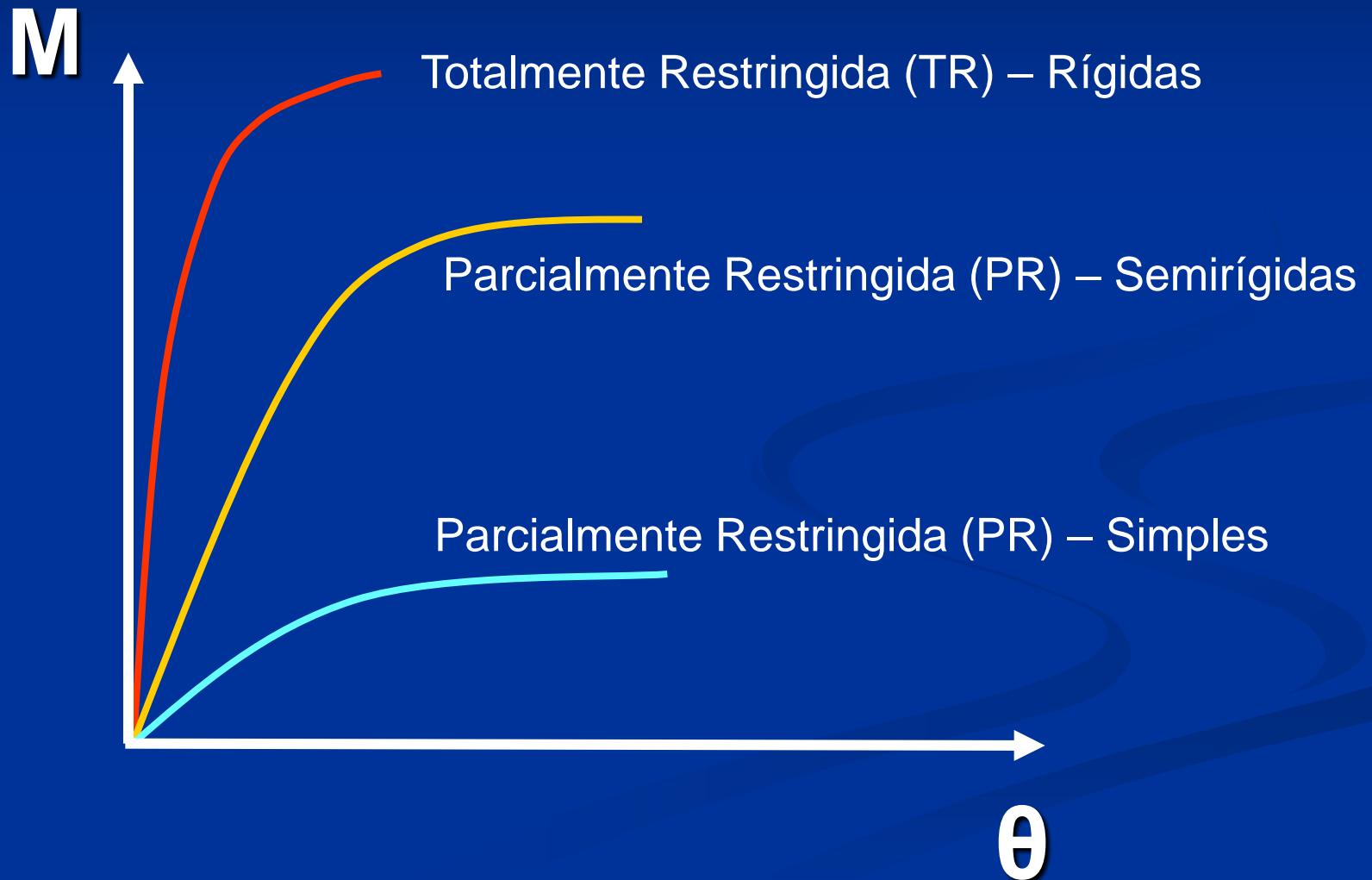
Espectros de Respuesta



# Conexión Soldada a Momento



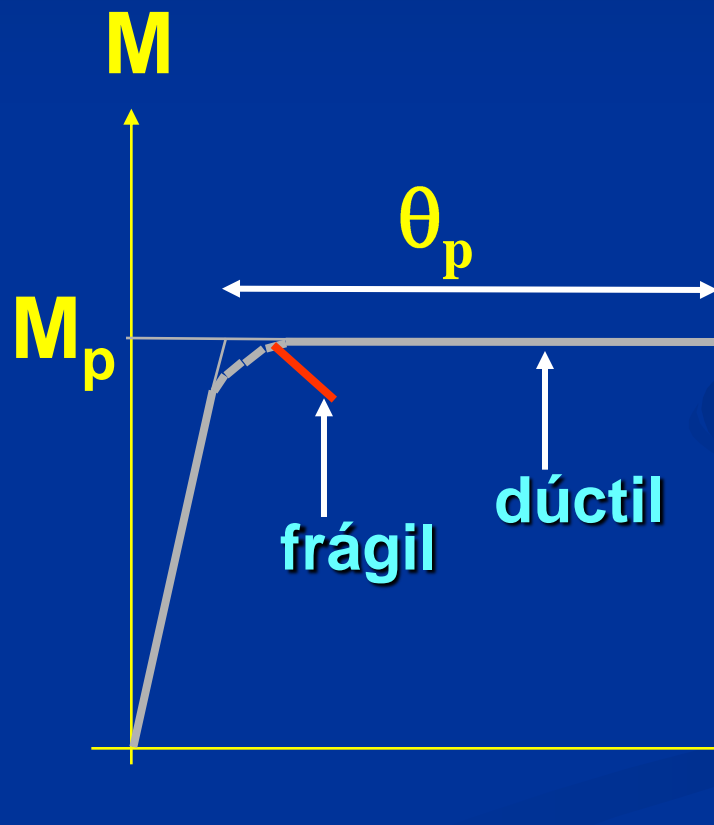
# Tipos de Conexiones





# Conexión Pre-Northridge

¿Dúctil?



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

# Procedimiento de Diseño

1. Suposiciones Iniciales Recomendadas
2. Determinación de Fuerzas Laterales Equivalentes
3. Realizar Análisis Elástico: Determinación de secciones de los elementos estructurales.
4. Diseño de la Conexión ANRS-AS.
5. Diseño de las placas de continuidad
6. Diseño de la zona de panel
7. Realizar Análisis No-lineales

# Procedimiento de Diseño

Combinaciones de carga:

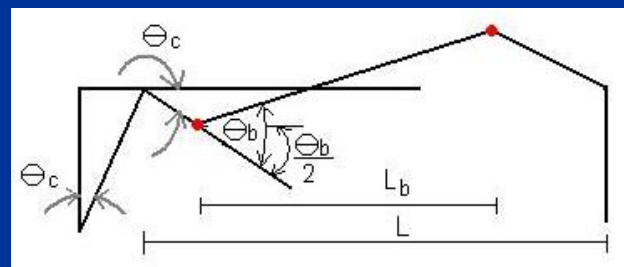
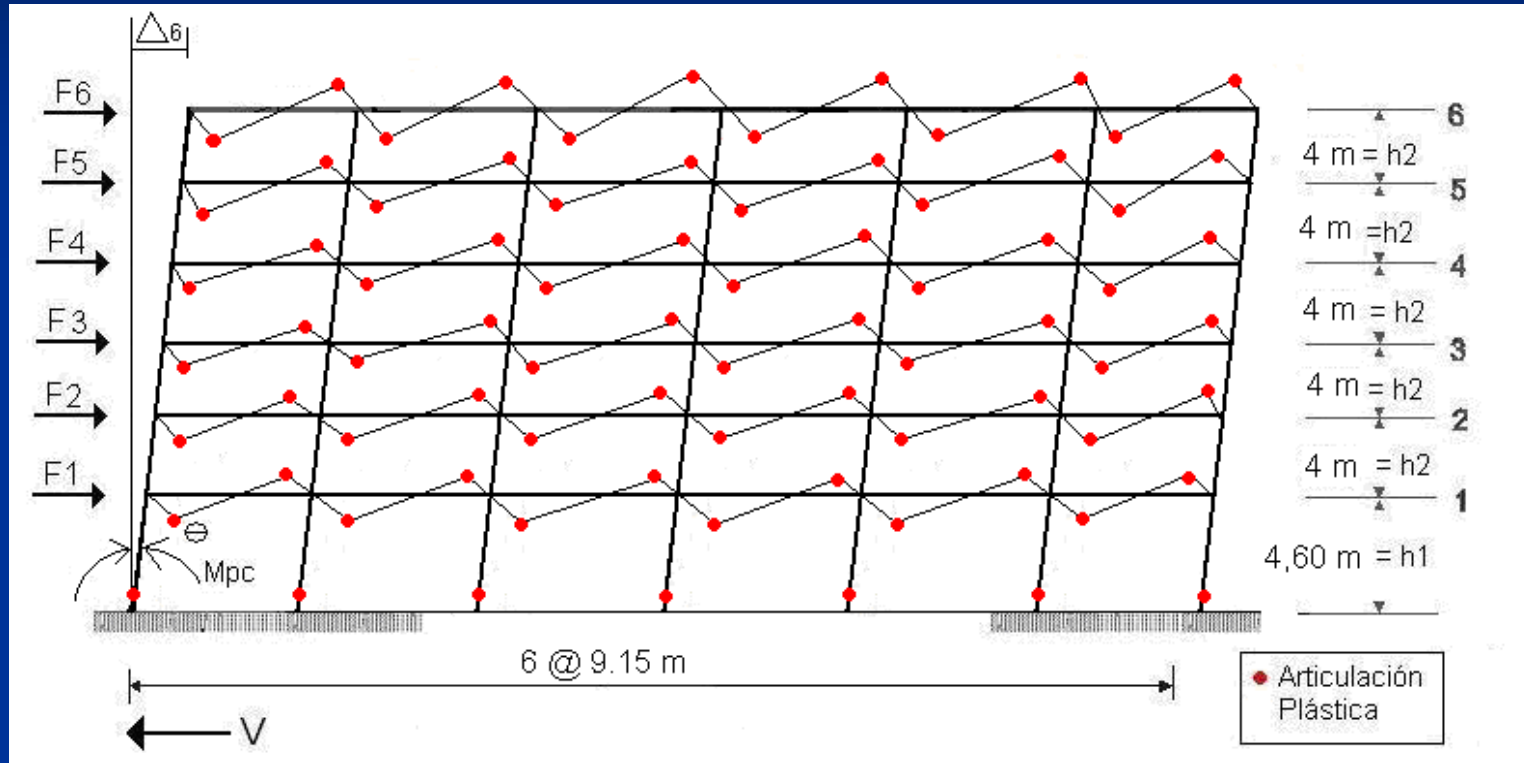
$$GRAV = 1.2D + 1.6L$$

$$EQ1 = 1.2D \pm E + 0.5L = 1.4D \pm \rho Q_E + 0.5L$$

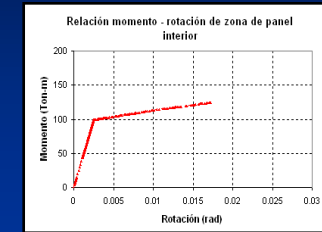
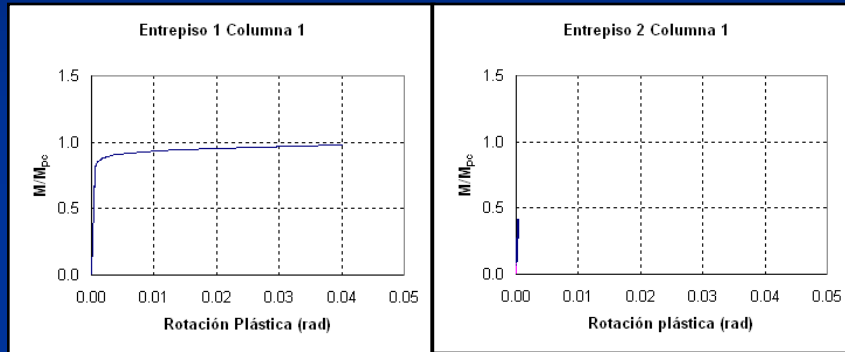
$$EQ2 = 0.9D \pm E = 0.7D \pm \rho Q_E$$

en donde  $E = \rho Q_E + 0.2S_{DS}D$  (con  $S_{DS} = 1.0$ ) es el efecto combinado de las fuerzas de sismo vertical y horizontal;  $Q_E$  es el efecto de las fuerzas sísmicas horizontales;  $\rho$  es un factor basado en la redundancia del sistema, igual a 1.0 (ver ASCE/SEI 7-05);  $D$  es la carga muerta (ver Tabla 4.1); y  $L$  es la carga viva (ver Tabla 4.2).

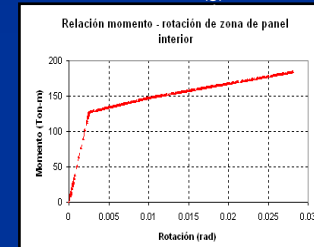
# Procedimiento de Diseño



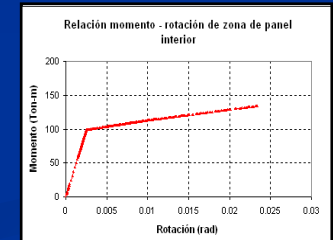
# Procedimiento de Diseño



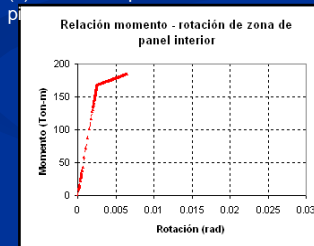
(g) Zona de panel interior del sexto



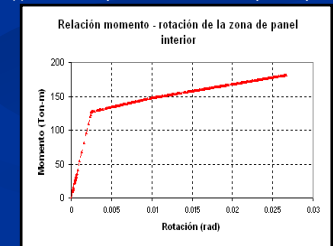
(e) Zona de panel interior del cuarto



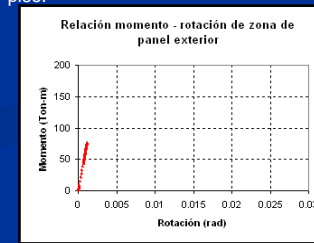
(f) Zona de panel interior del quinto piso.



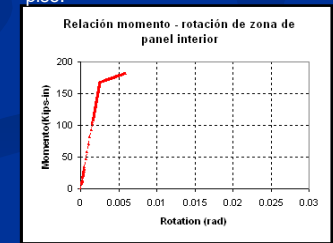
(c) Zona de panel interior del segundo piso.



(d) Zona de panel interior del tercer piso.



(a) Zona de panel exterior del primer piso.



(b) Zona de panel interior del primer piso.

