

# El terremoto en Chile Central-2010

## Edificios dañados en Concepción y Viña del Mar.

Patricio Bonelli

**Universidad Santa María**



# Introducción

Edificio de Hormigón Armado en Maipú y Concepción



# Temas

- Reconocimientos
- Edificios de hormigón armado,  
Viña del Mar y Concepción
- Edificio Aislado en la Base, Viña del Mar



# Reconocimientos:

- Augusto Holmberg, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile
- Rubén Boroscheck, Universidad de Chile
- Leonardo Massone, Universidad de Chile



# Equipos de reconocimiento visitantes:

- EERI team of 20+
- GEER team (ground motion and geotech)
- UNAM Mexico team of 8
- Canadian team of 5
- SEAW team of 5
- French team
- German team
- Venezuela/Ecuador team
- NSF-NEES
- LA Tall Buildings Council
- ATC team
- ASCE team
- AIJ & Concrete Institute of Japan

# Especiales agradecimientos a:

- José Restrepo Universidad de California San Diego
- Joe Maffei EERI team of 20+

# Aceleraciones

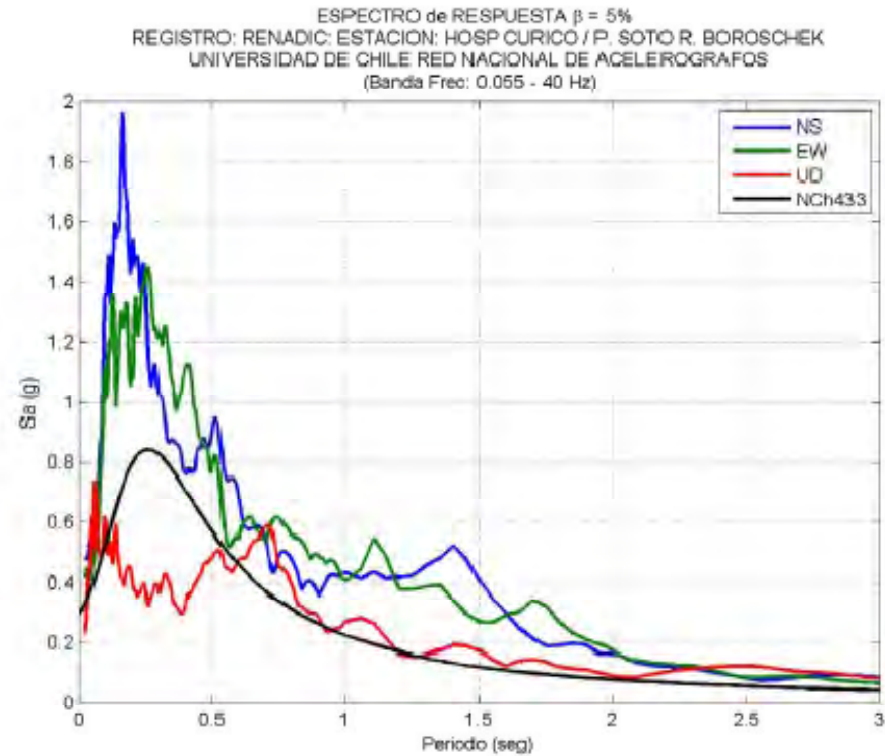


Figura 18 Comparación Espectro de Diseño Norma Chilena NCh433 – Estación Hospital Curico.

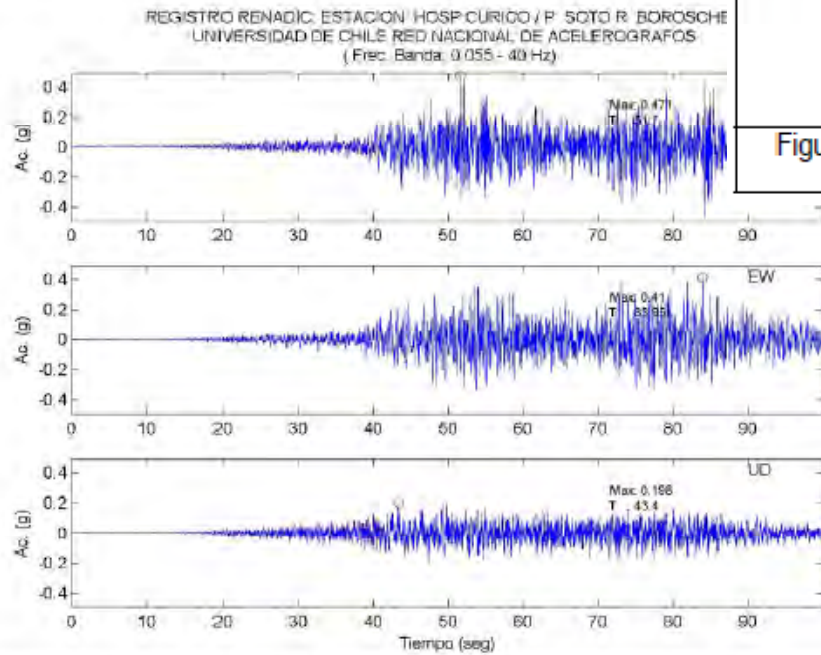


Figura 16 Registro de Aceleraciones Estación Hospital Curico.

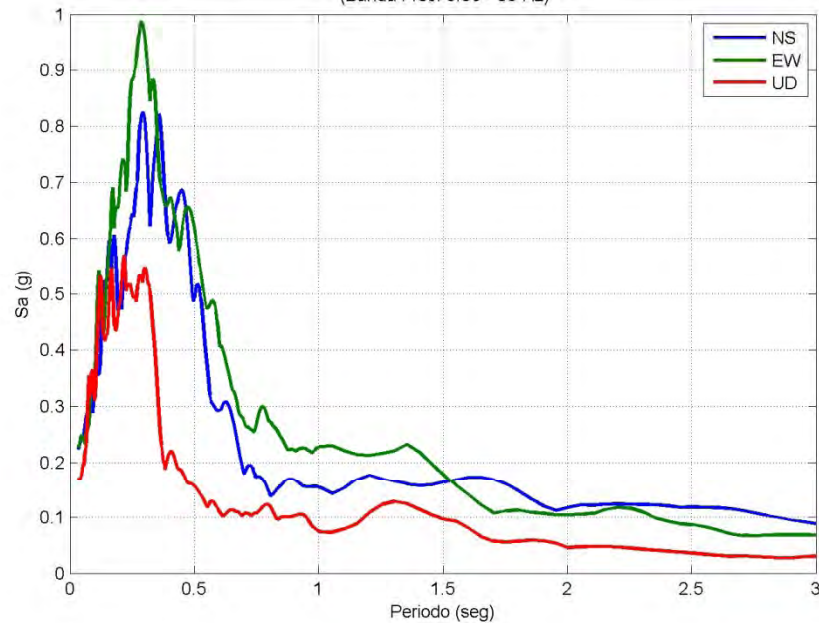
Ruhen Borroschek



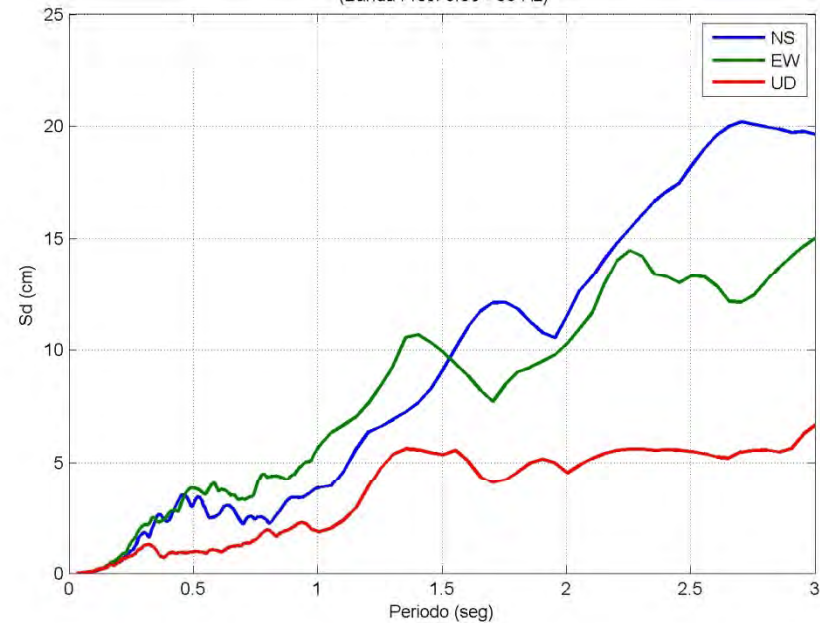
# Aceleraciones

# Desplazamientos ...

REGISTRO: RENADIC: ESTACION: HOSPITAL TISNE SANTIAGO P. III/ P. SOTO R. BOROSCHEK  
UNIVERSIDAD DE CHILE RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS  
(Banda Frec: 0.06 - 30 Hz)



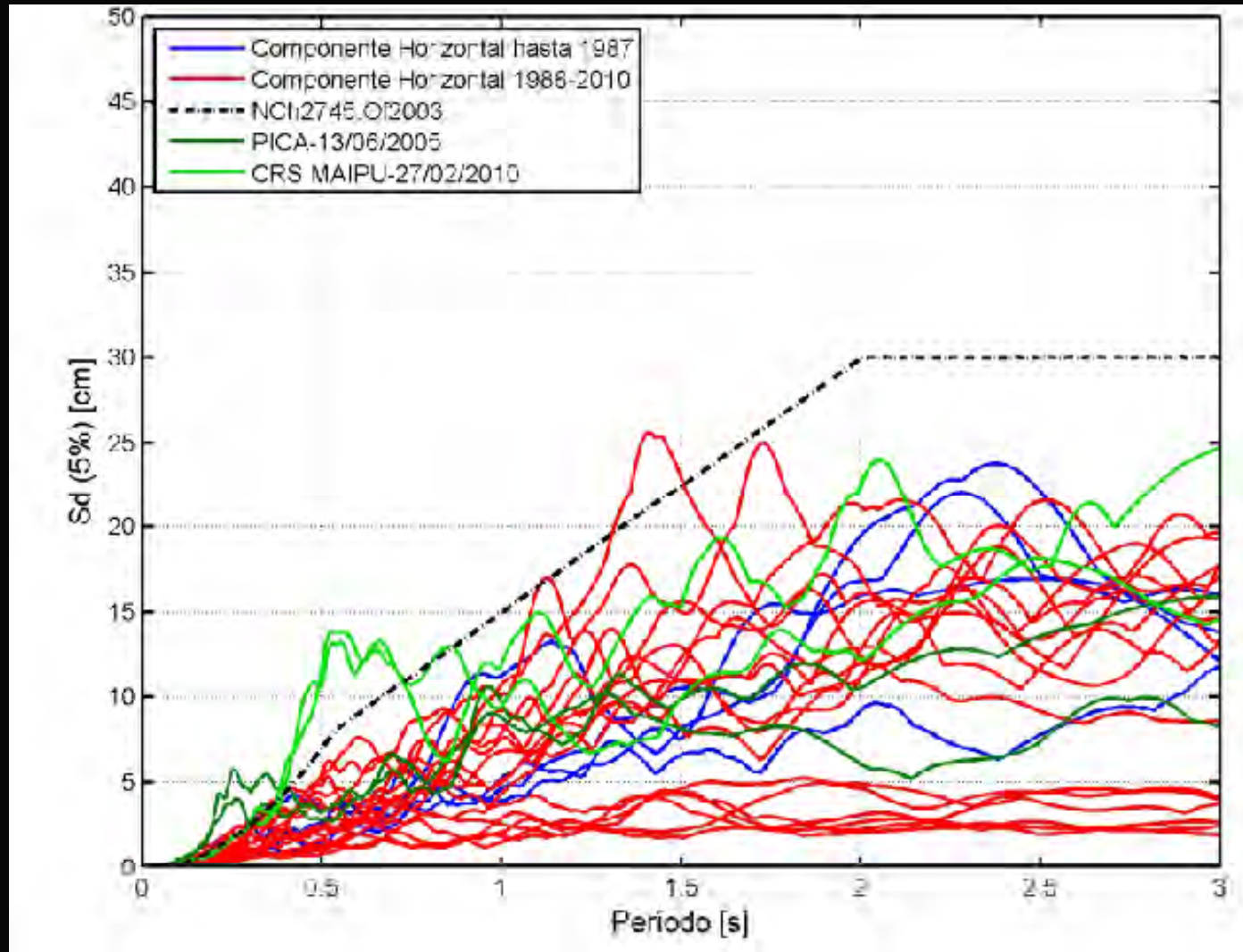
ESPECTRO de RESPUESTA  $\beta = 5\%$   
REGISTRO: RENADIC: ESTACION: HOSPITAL TISNE SANTIAGO P. III/ P. SOTO R. BOROSCHEK  
UNIVERSIDAD DE CHILE RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS  
(Banda Frec: 0.06 - 30 Hz)



Rubén Boroschek

# Espectro de desplazamientos

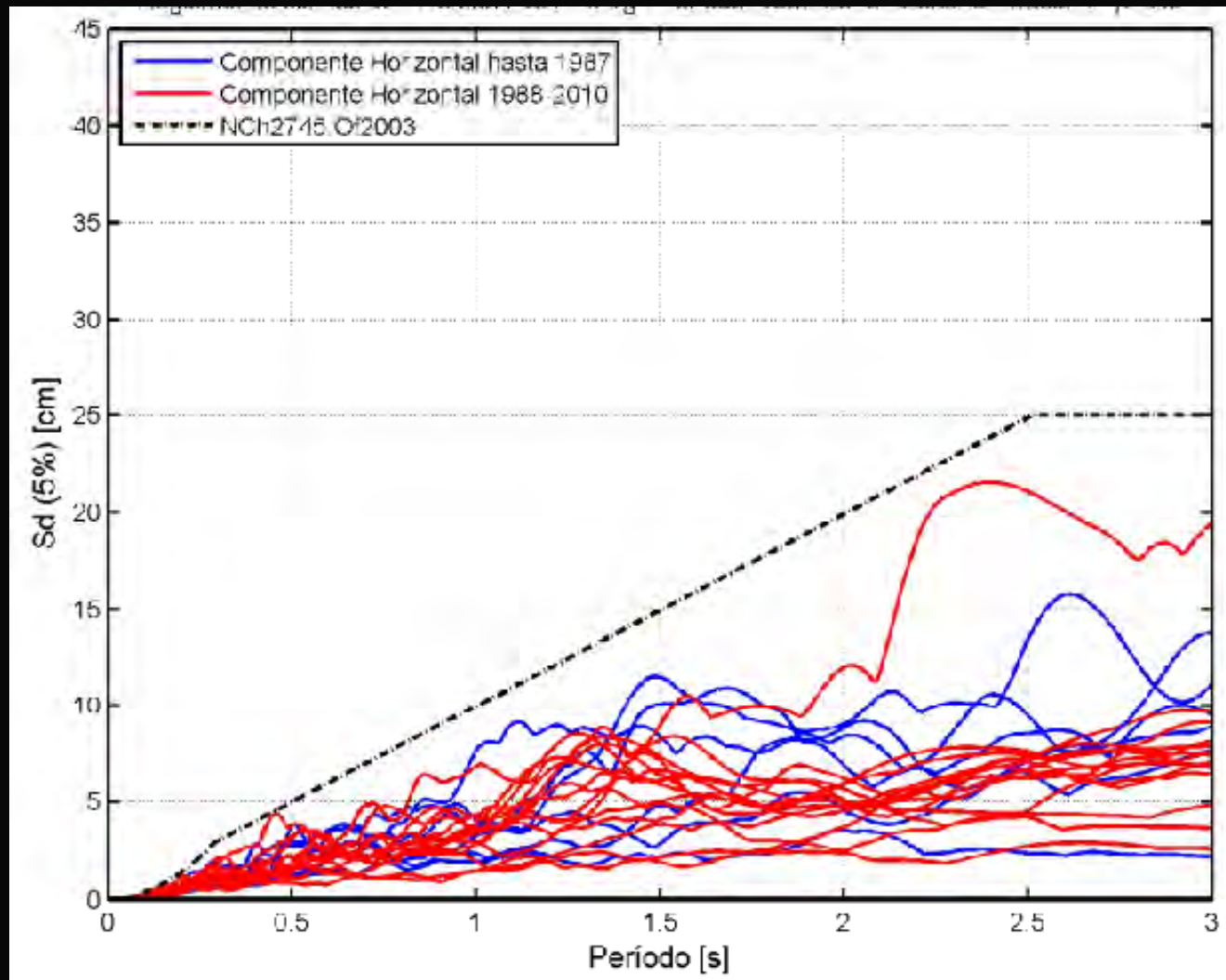
Sismos con  $M_r > 7.0$ ,  $PGA > 0.1$ , Suelo II, Zona 2, 5%, 1985-2010



Rubén Boroscchek

# Espectro de desplazamientos

Sismos con  $M_r > 7.0$ ,  $PGA > 0.1$ , Suelo I, Zona 3, 5%, 1985-2010

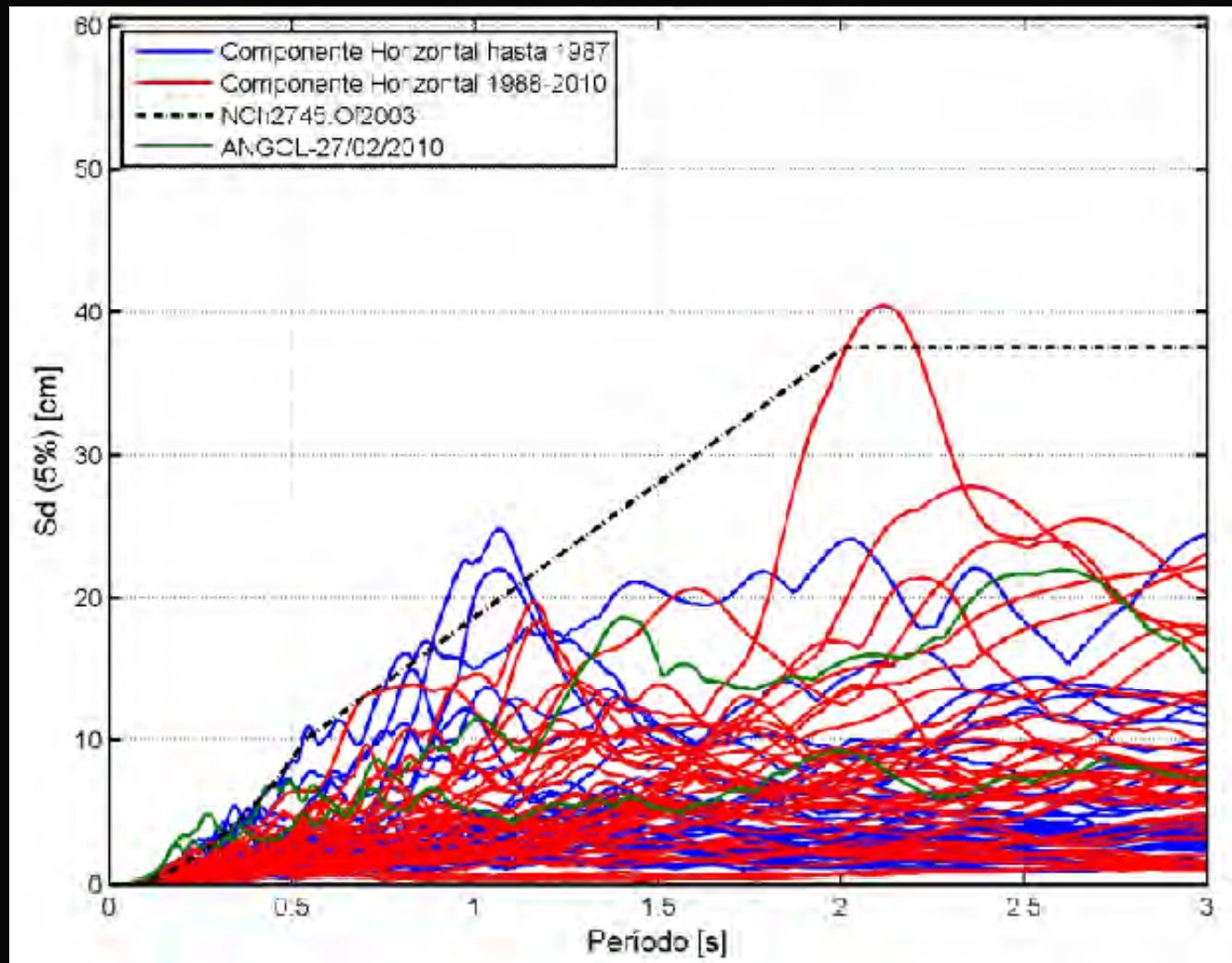


Rubén Boroscchek



# Espectro de desplazamientos

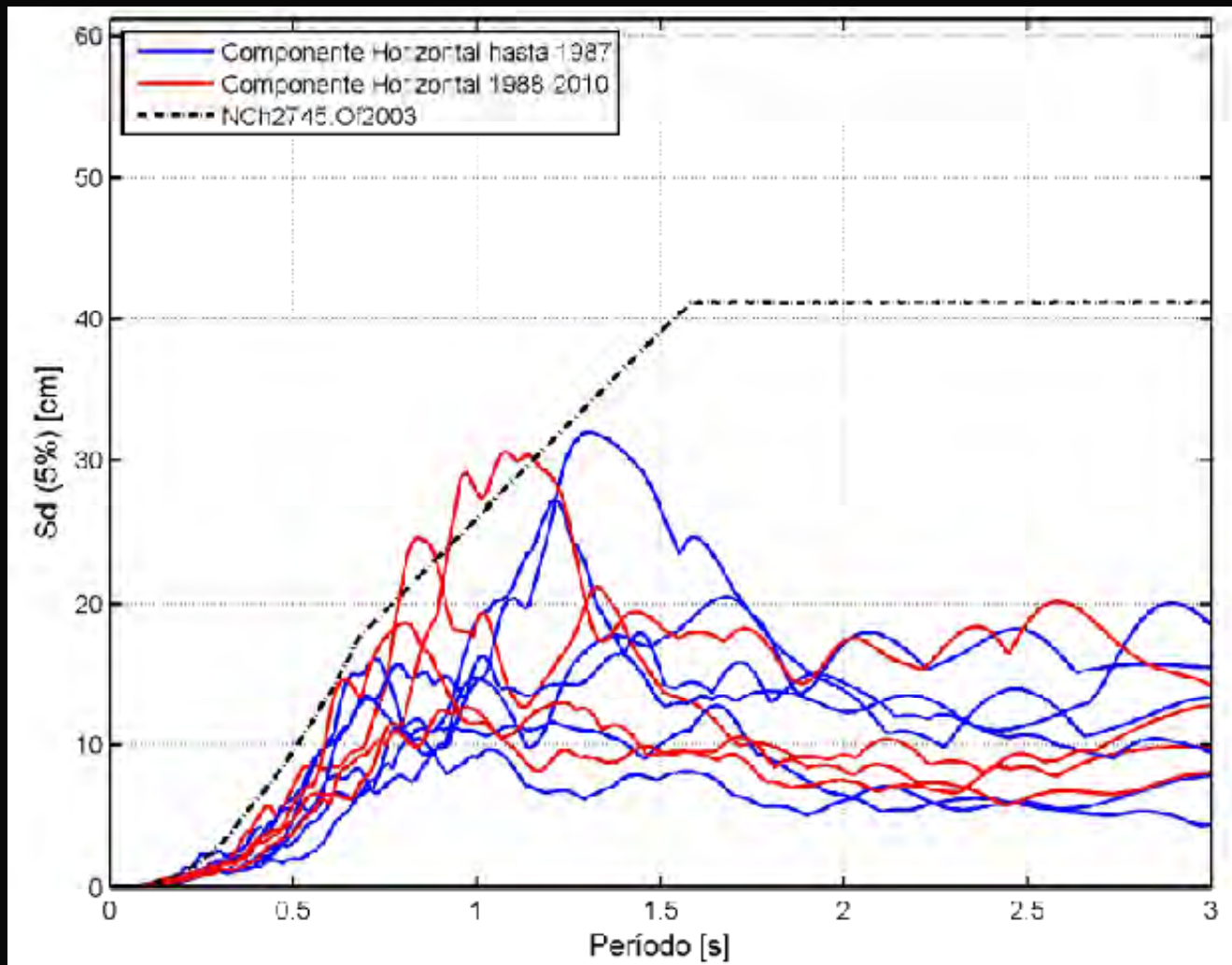
Sismos con  $M_r > 7.0$ ,  $PGA > 0.1$ , Suelo II, Zona 3, 5%, 1985-2010



Rubén Boroschek

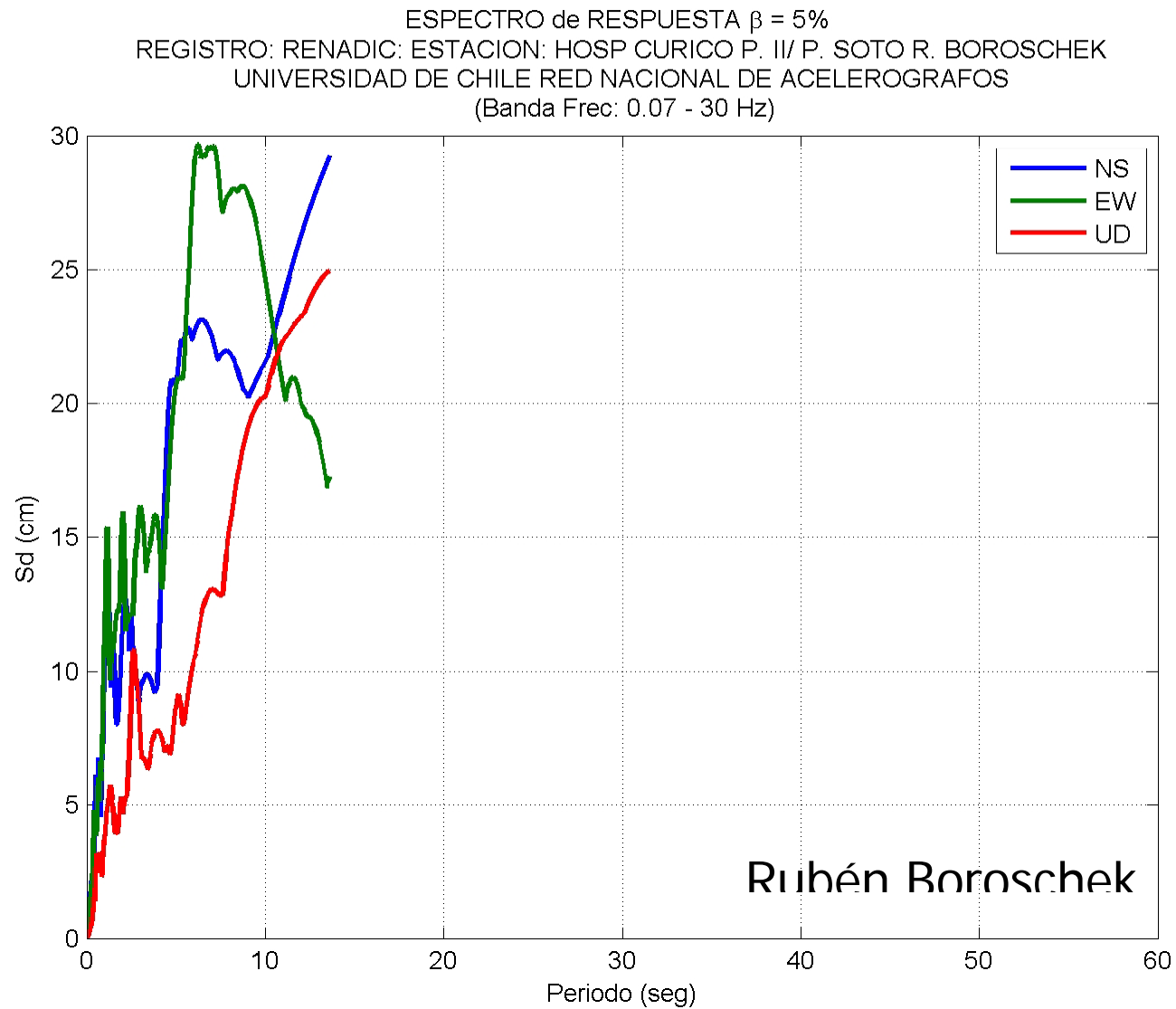
# Espectro de desplazamientos

Sismos con  $M_r > 7.0$ ,  $PGA > 0.1$ , Suelo III, Zona 3, 5%, 1985-2010



Rubén Boroschek

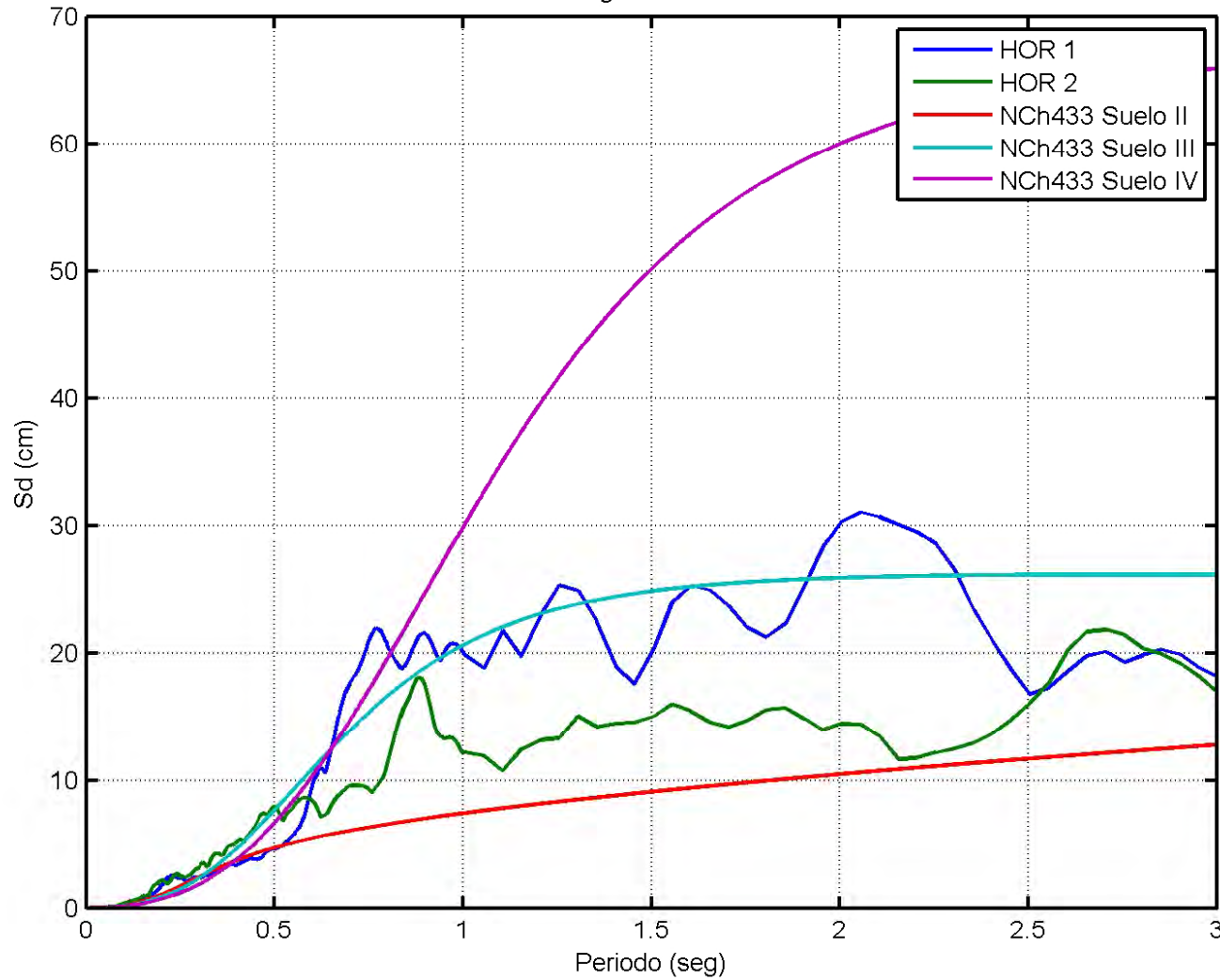
# Desplazamientos ...





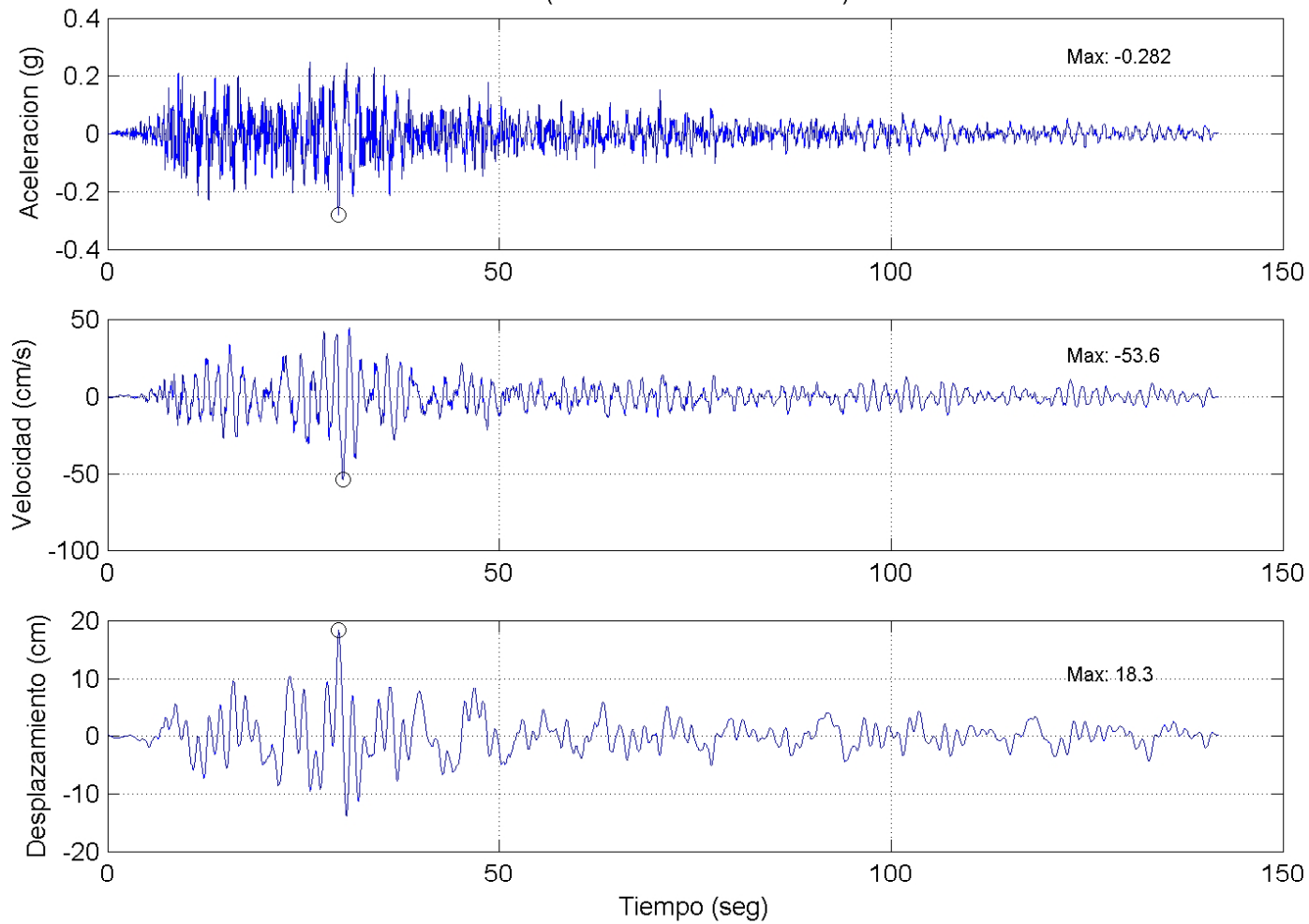
# San Pedro, Concepción

ESPECTRO RESPUESTA CONCEPCION COLEGIO SAN PEDRO  
Razon Amortiguamiento Critico: 0.05



# Concepción Centro

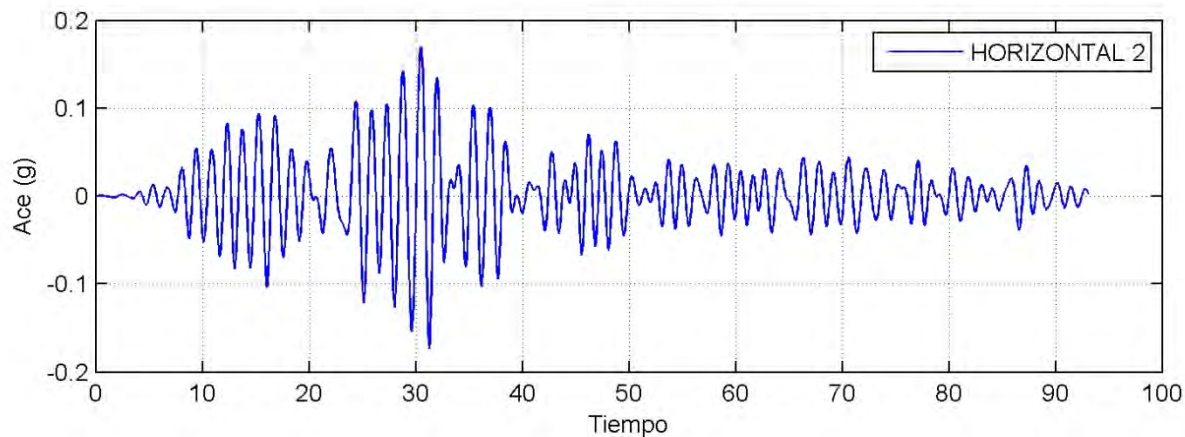
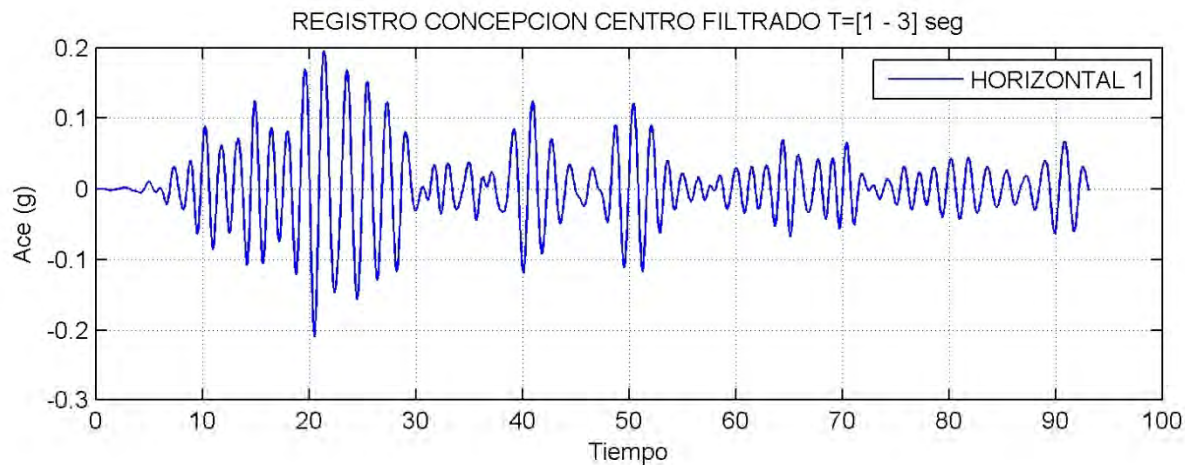
H2 CANAL. RENADIC ESTACION: CONCEPCION CENTRO PRELIMINAR/ R. BOROSCHEK  
UNIVERSIDAD DE CHILE RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS  
(Banda Frec: 0.08 - 30 Hz)



# Concepción Centro

Aceleraciones originales filtradas en una banda de periodos entre 1 y 3 segundos

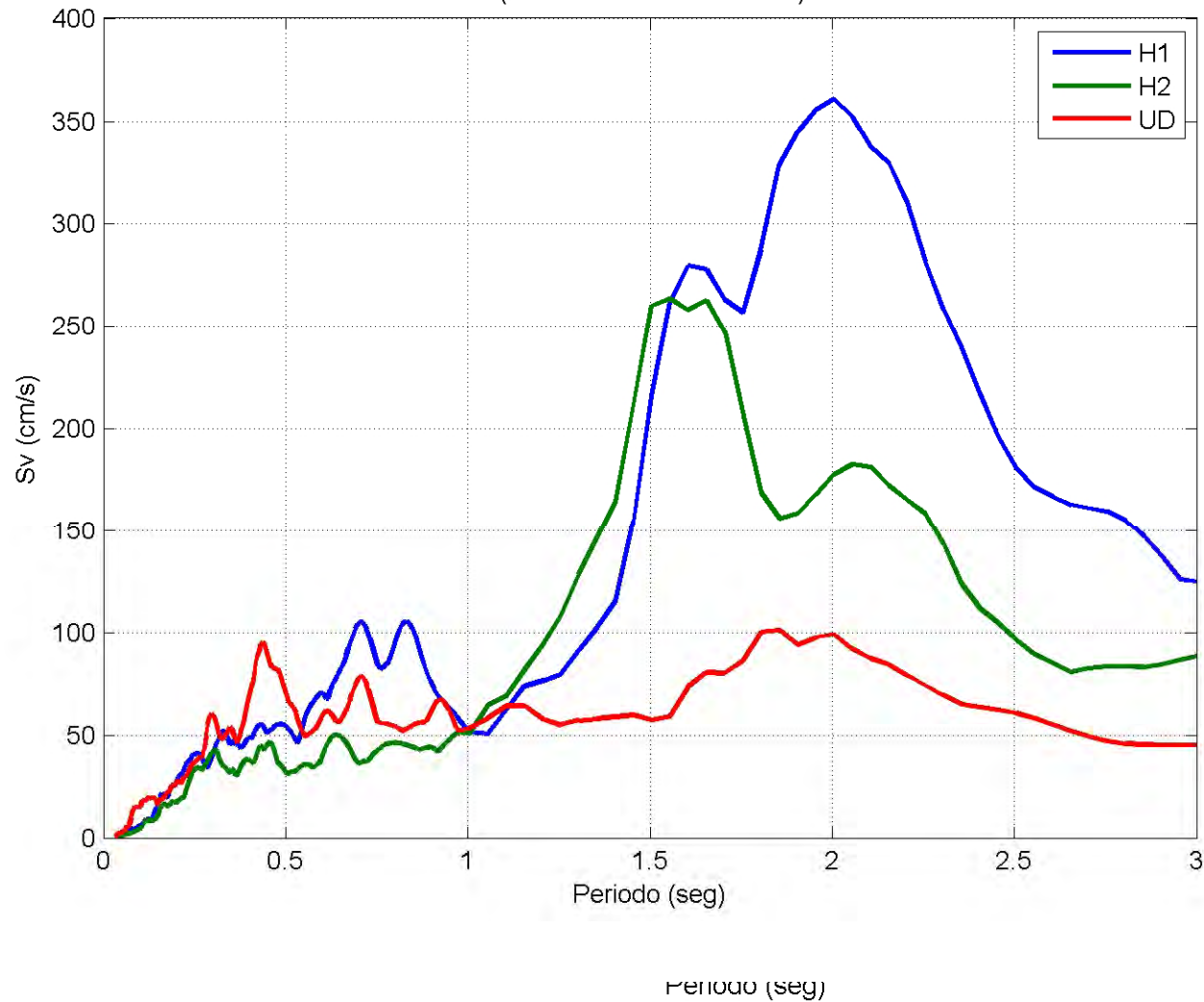
11 ciclos mayores a 0.10 g y más de 20 ciclos mayores a 0.05 g.



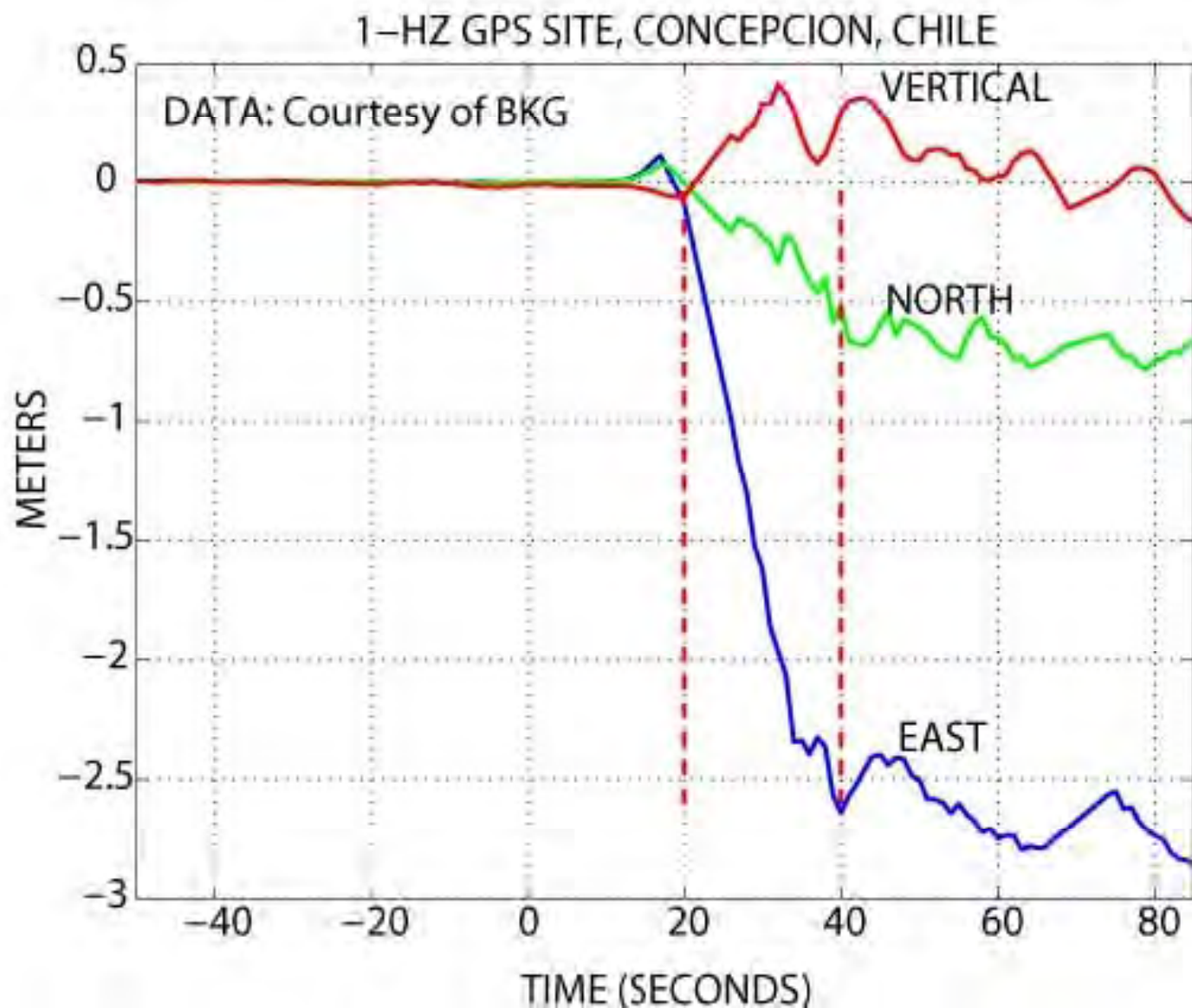


# Concepción Centro

ESPECTRO de RESPUESTA  $\beta = 5\%$   
RENADIC ESTACION: CONCEPCION CENTRO PRELIMINAR/ R. BOROSCHEK  
UNIVERSIDAD DE CHILE RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS  
(Banda Frec: 0.08 - 30 Hz)



# Movimiento del suelo en Concepción



# Concepción





# Viña del Mar



# Daños en estructuras de hormigón armado

- Flexión con pandeo de la armadura longitudinal
- Flexión con falla en compresión
- Fallas de soportes de muros discontinuos
- Fallas por corte

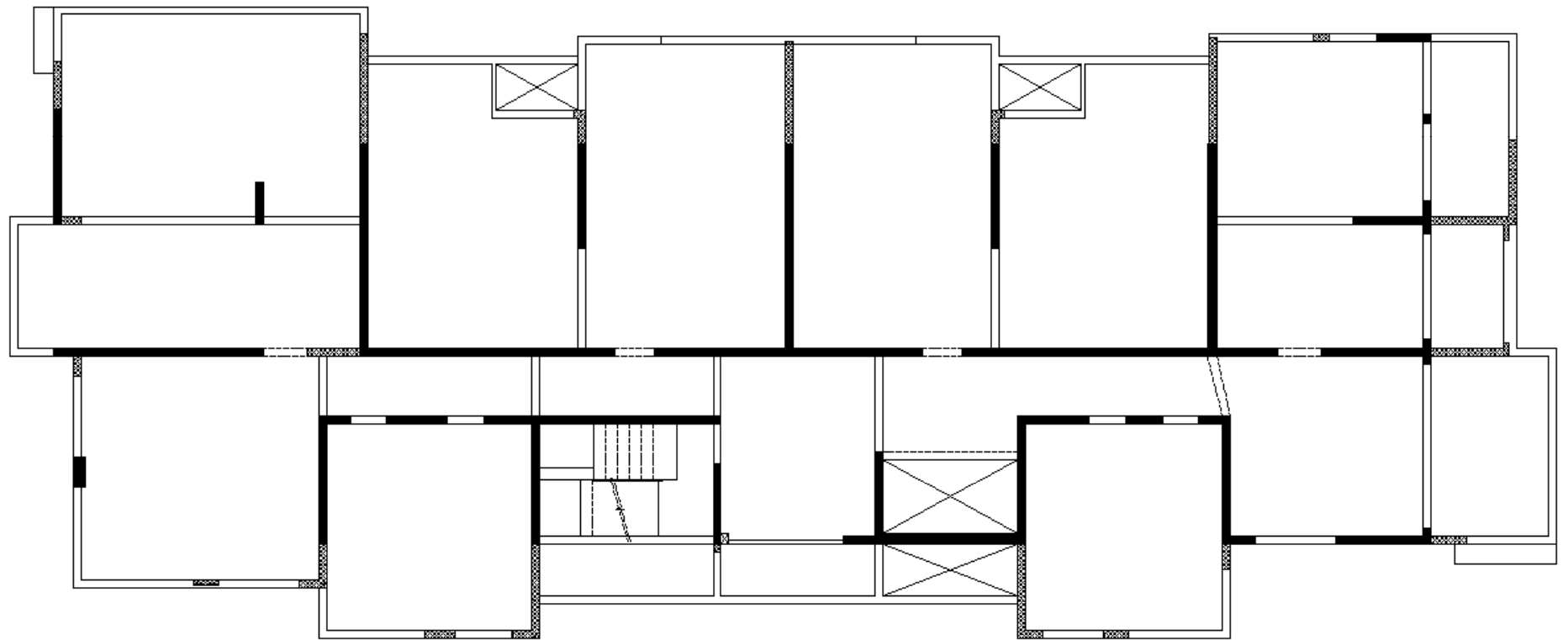


# Flexión con falla en compresión

# Edificio B Viña del Mar

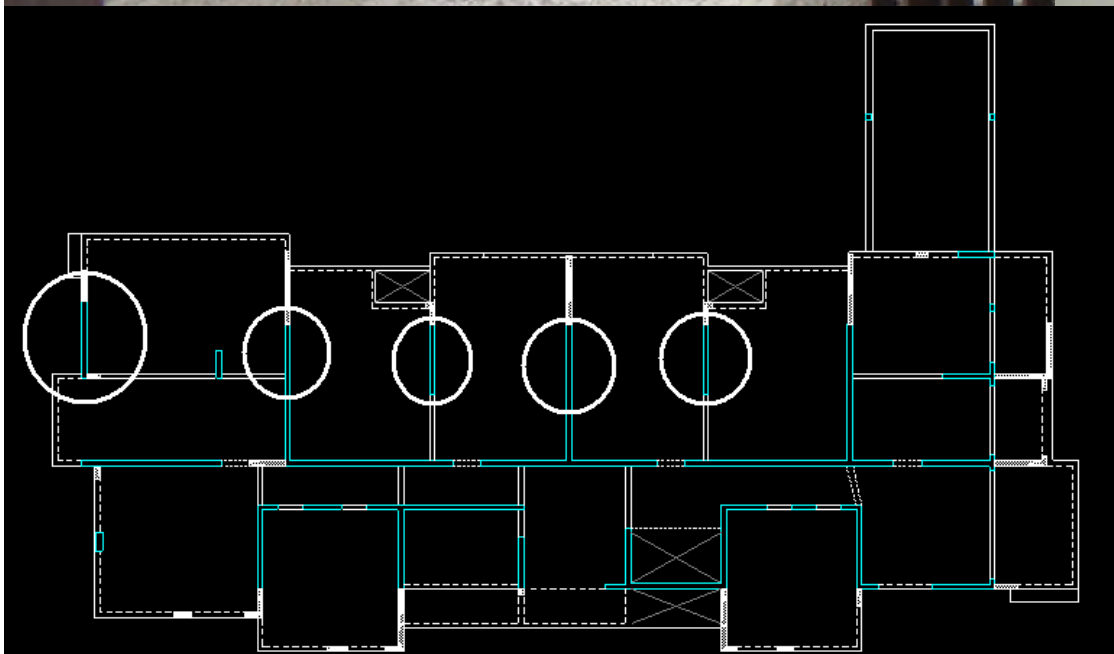


# Edificio Toledo Planta primer piso



# Edificio B

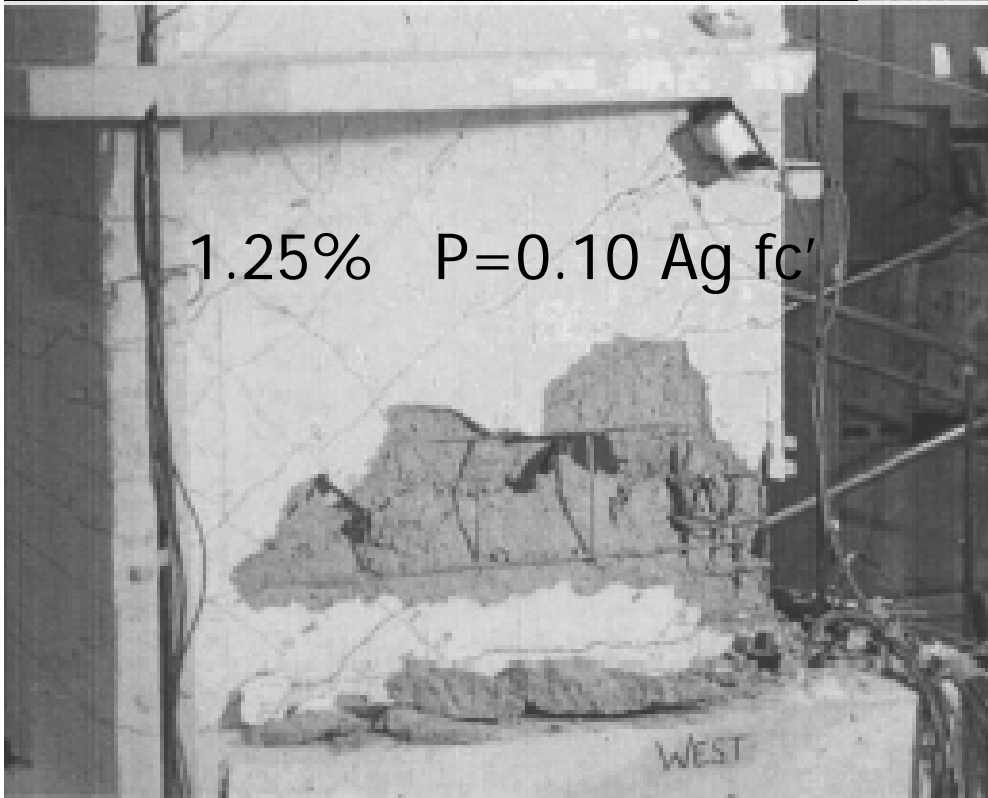
# – Viña del Mar





# Edificio B

– Viña del Mar

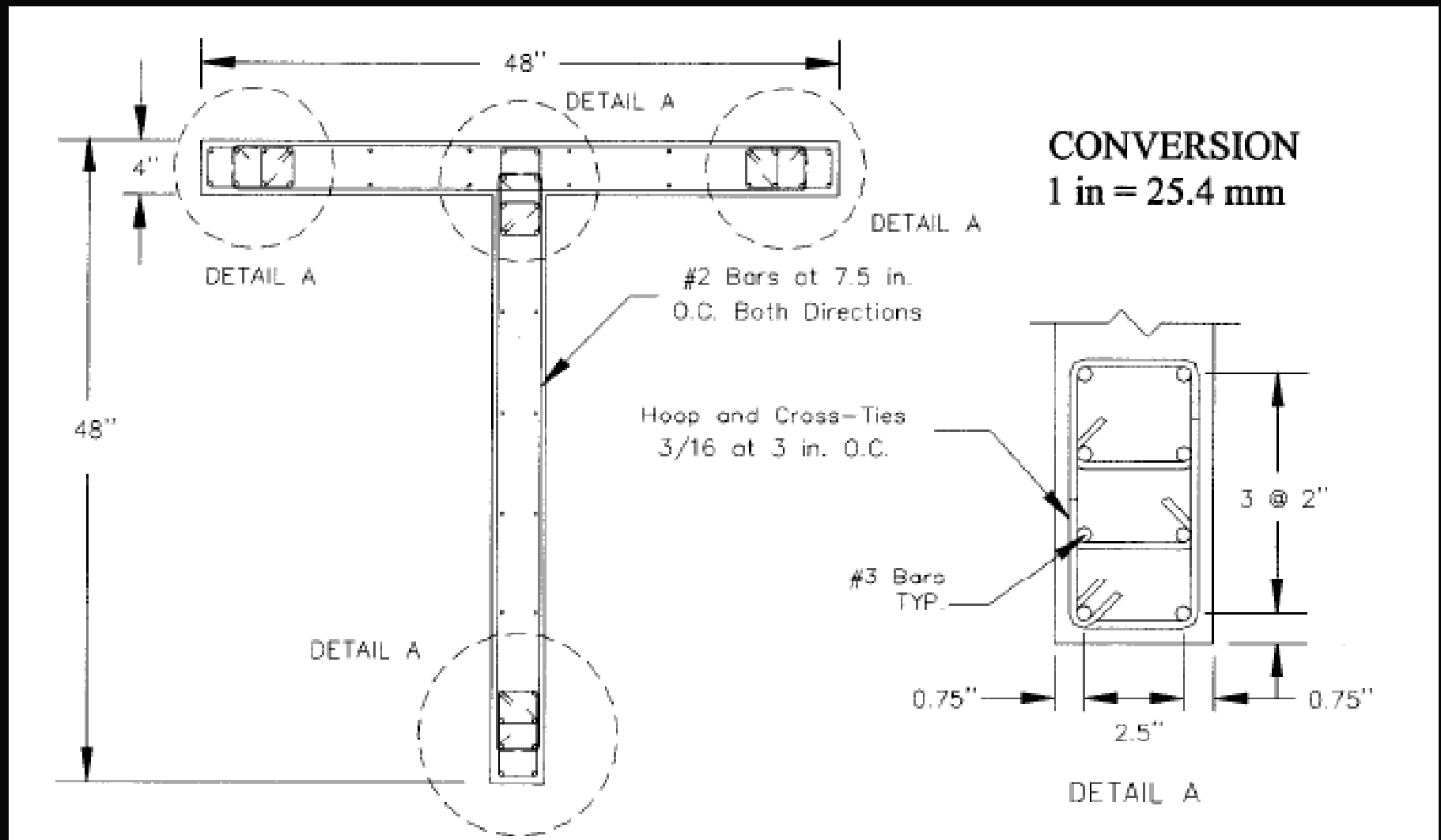


1.25%  $P=0.10 A_g f_c'$

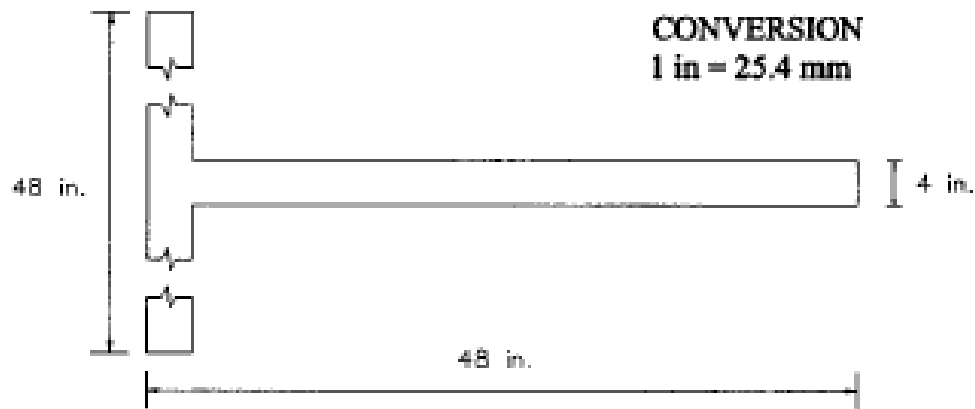
Thomsen y Wallace  
ASCE journal 2004



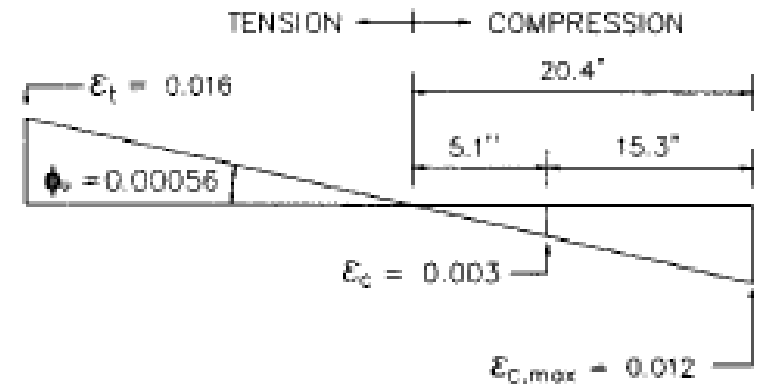
# Thomsen y Wallace ASCE journal 2004



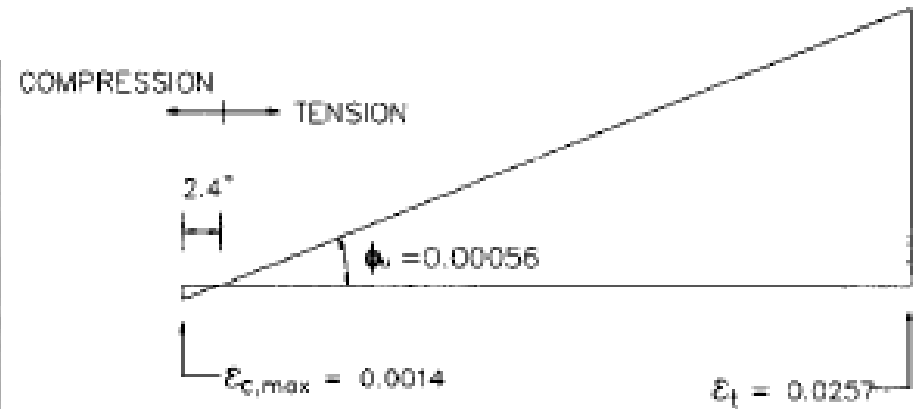
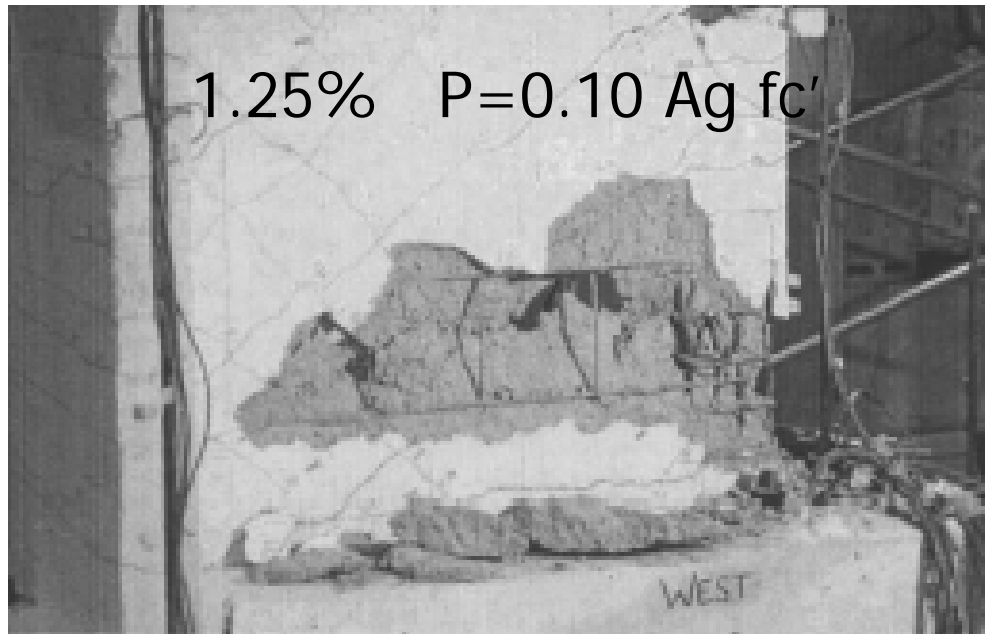
# Thomsen y Wallace ASCE journal 2004



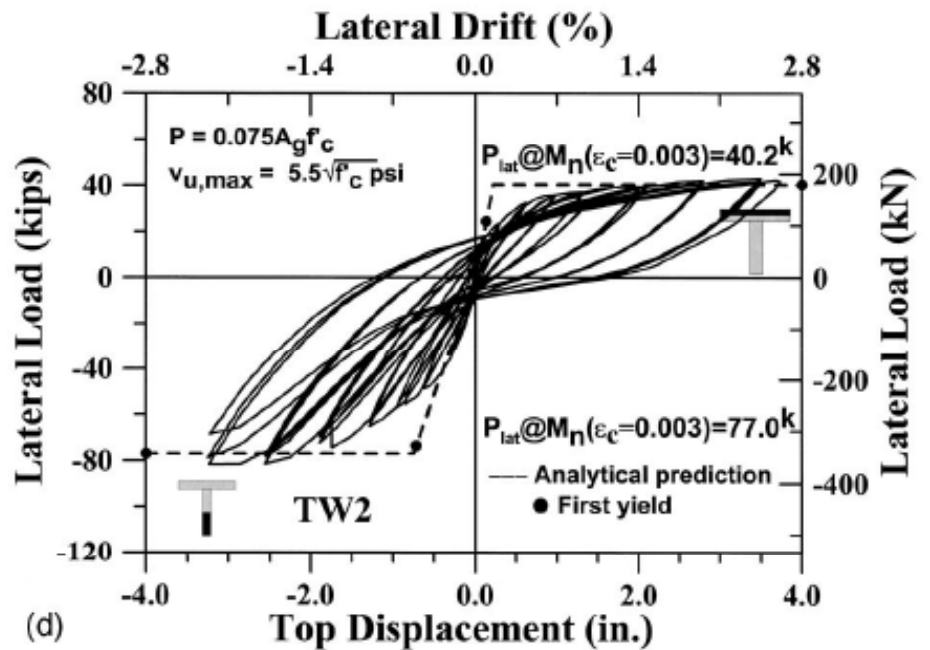
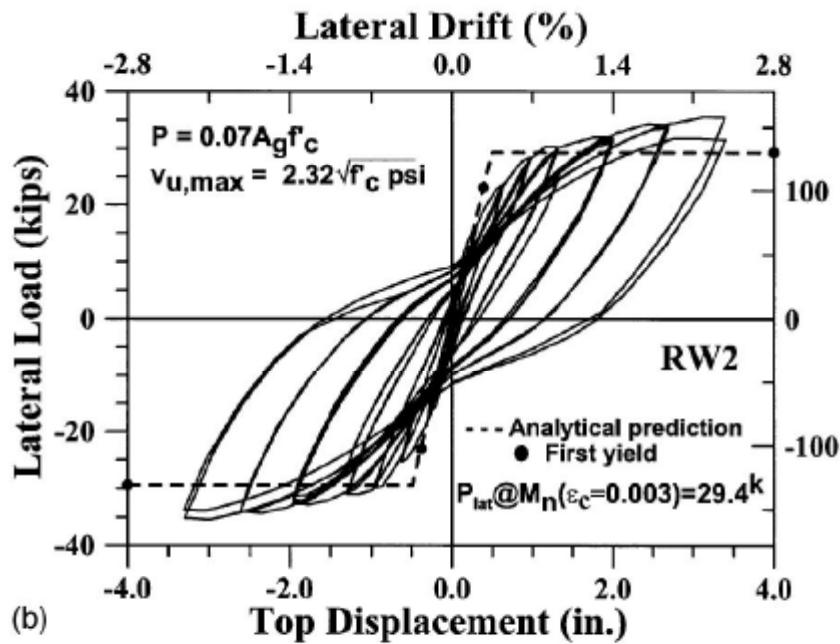
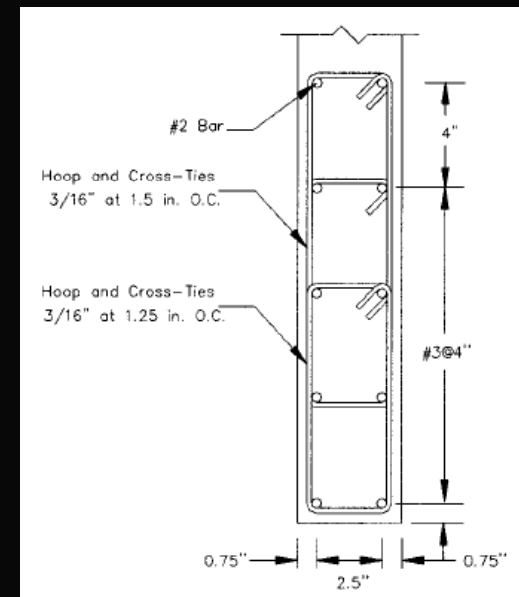
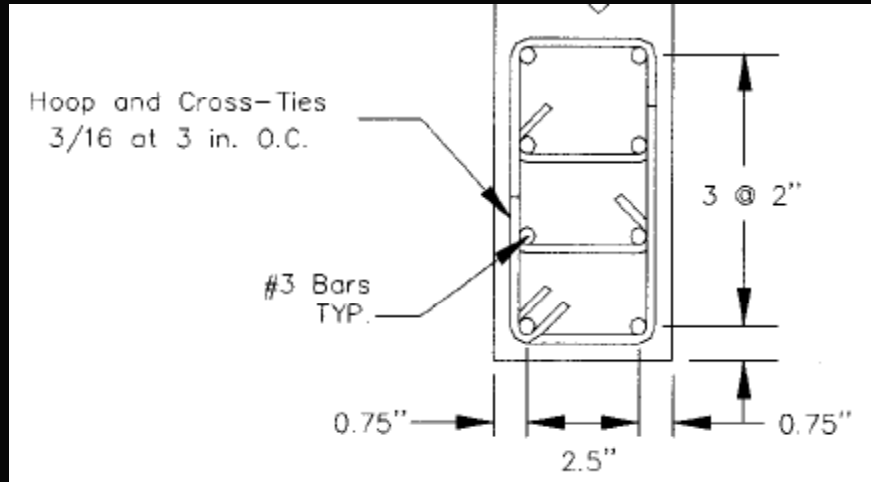
(a) WALL CROSS-SECTION



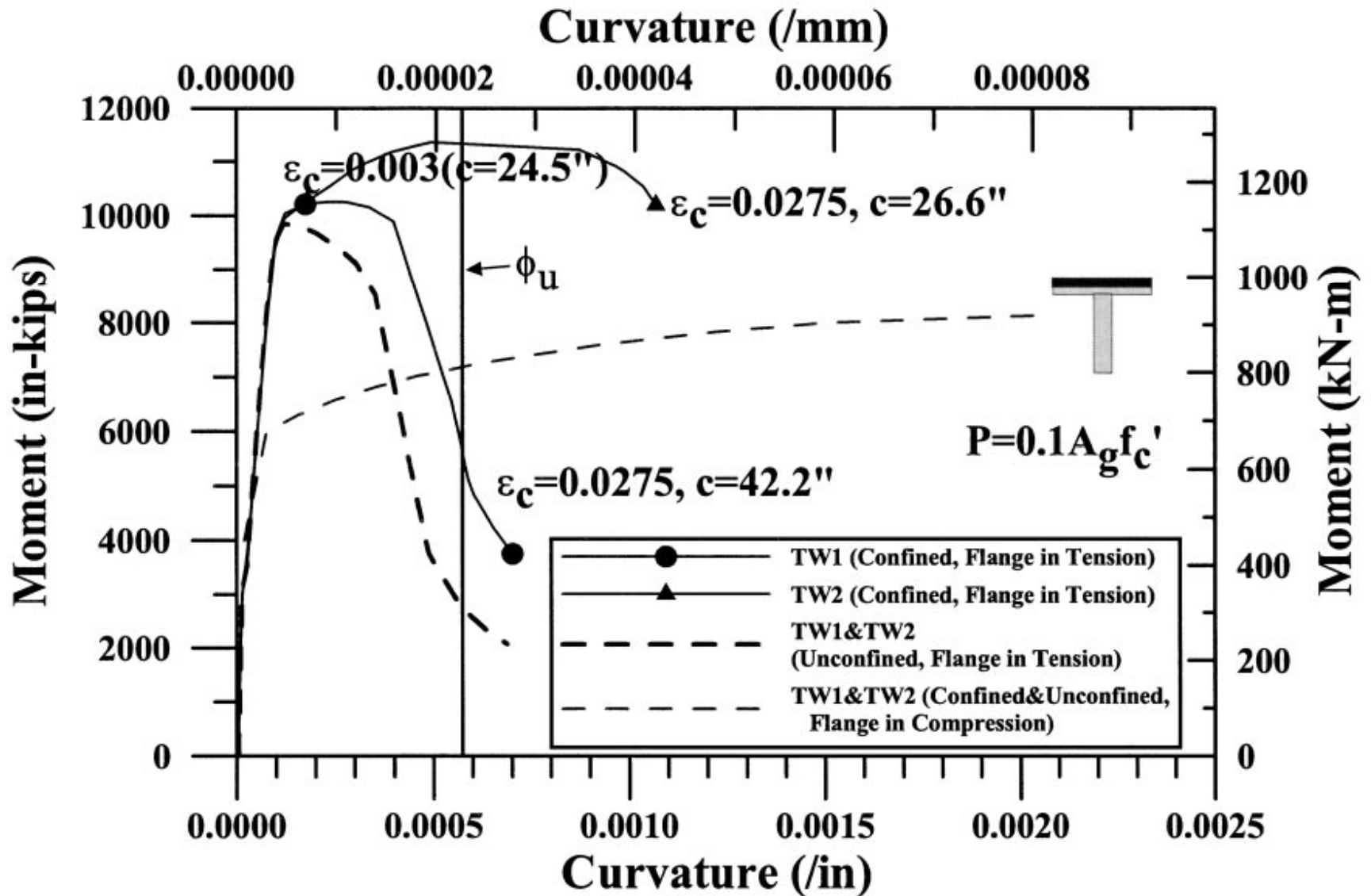
(b) STRAIN PROFILE @  $P=0.10Agf'c$  (TENSION IN FLANGE)



(c) STRAIN PROFILE @  $P=0.10Agf'c$  (COMPRESSION IN FLANGE)



# Thomsen y Wallace ASCE journal 2004



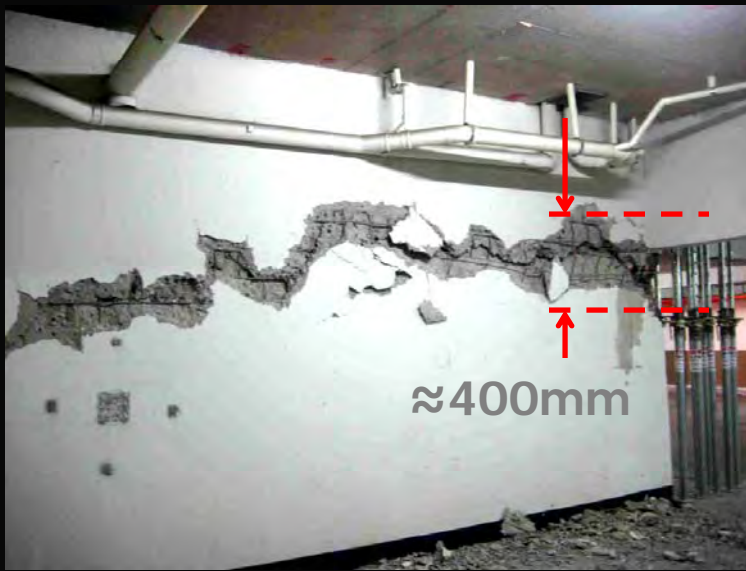
# Requerimientos de ductilidad

## Espectro de demanda de desplazamiento

- 20 a 30 cm ( $T > 1s$ )
- $C_0 = 1.5$ , desp. techo (sobre 10 pisos)
- $C_1 = 1.0$ , período alto ( $\delta_{inelast} = \delta_{elast}$ )
- $C_2 = 1$  a  $1.2$  (período alto, histéresis)
- $C_3 = ?$  (efecto P-d)

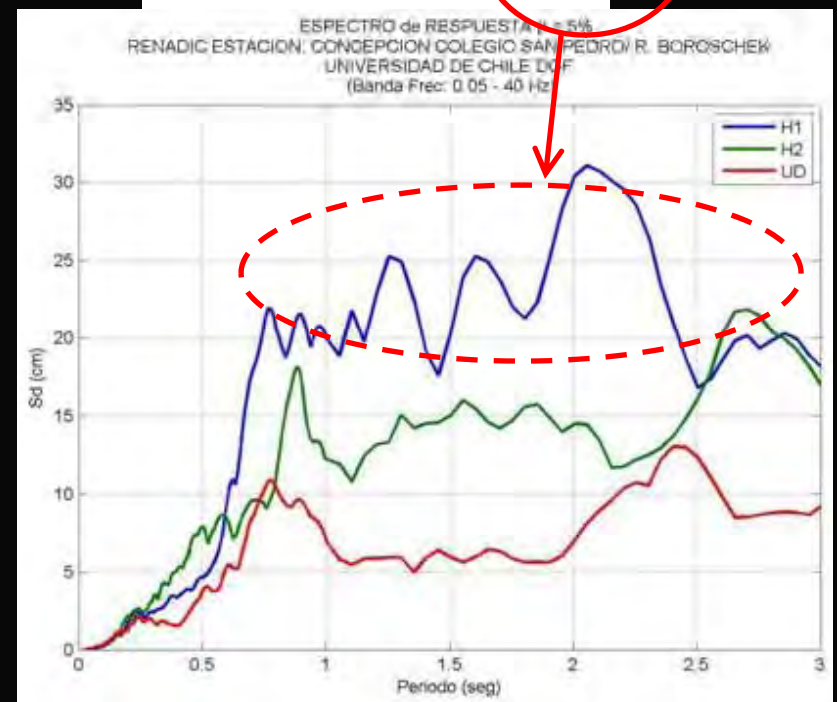
“Drift”(20 pisos) =  $25 * 1.5 / (20 * 270) = 0.7\%$

Curvatura =  $0.007 / l_p (400) = 0.000017 / mm$



ATC 40 – “Target displacement”

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2}$$

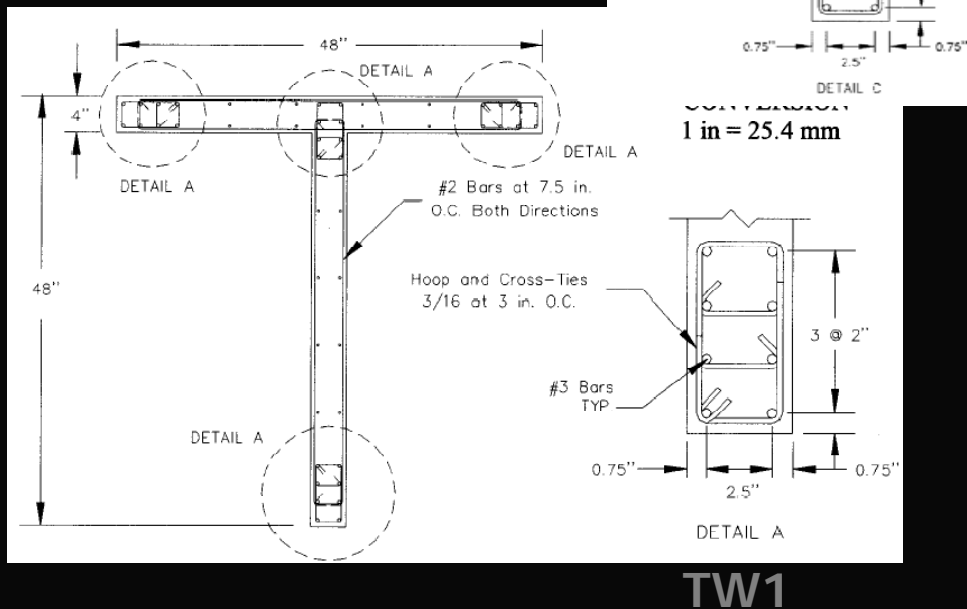




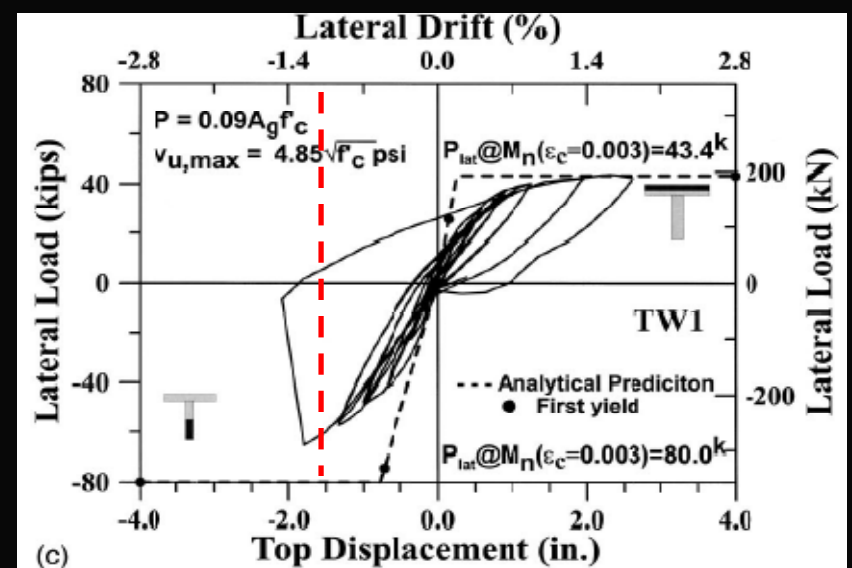
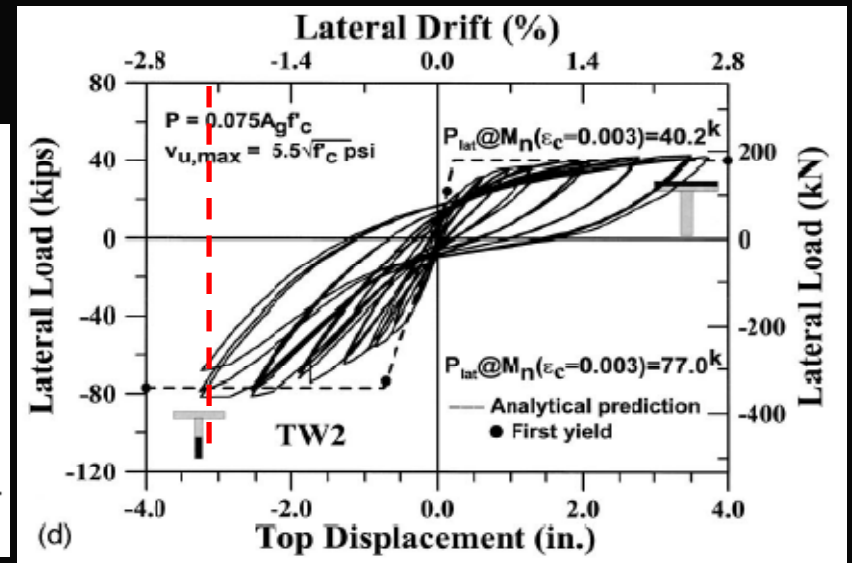
# Ductilidad

## Respuesta de muros T

- Comportamiento o asimétrico



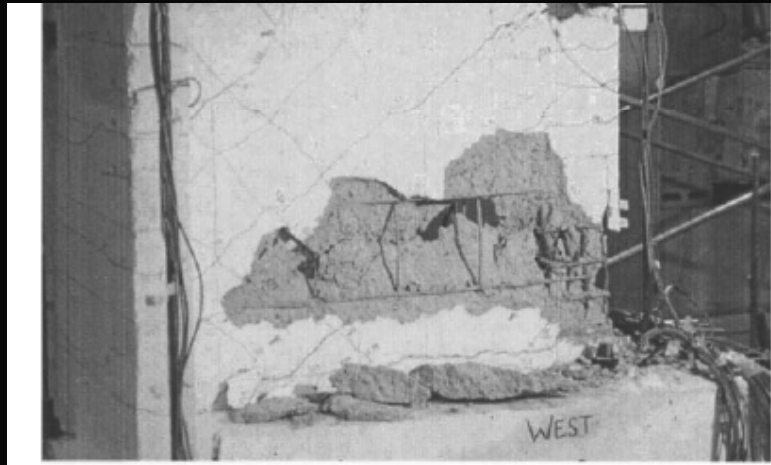
Thomsen y Wallace, 2004



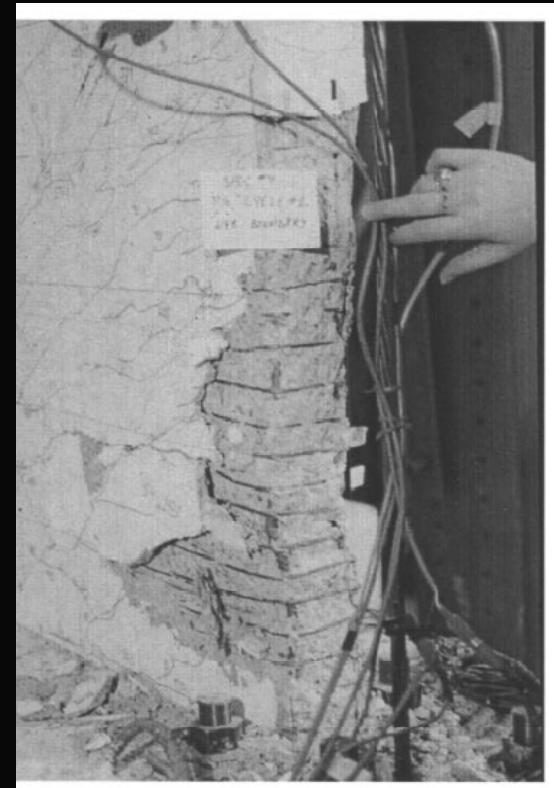


# Ductilidad y daños

TW1 damage -  
1.25% drift



Muro T –  
Chile 2010  
0.7%? drift



TW2 damage—2.5% drift  
Thomsen y Wallace, 2004



Edificio B

Viña del Mar



# Flexión en muros con pandeo de la armadura longitudinal



# Edificio A en Viña del Mar



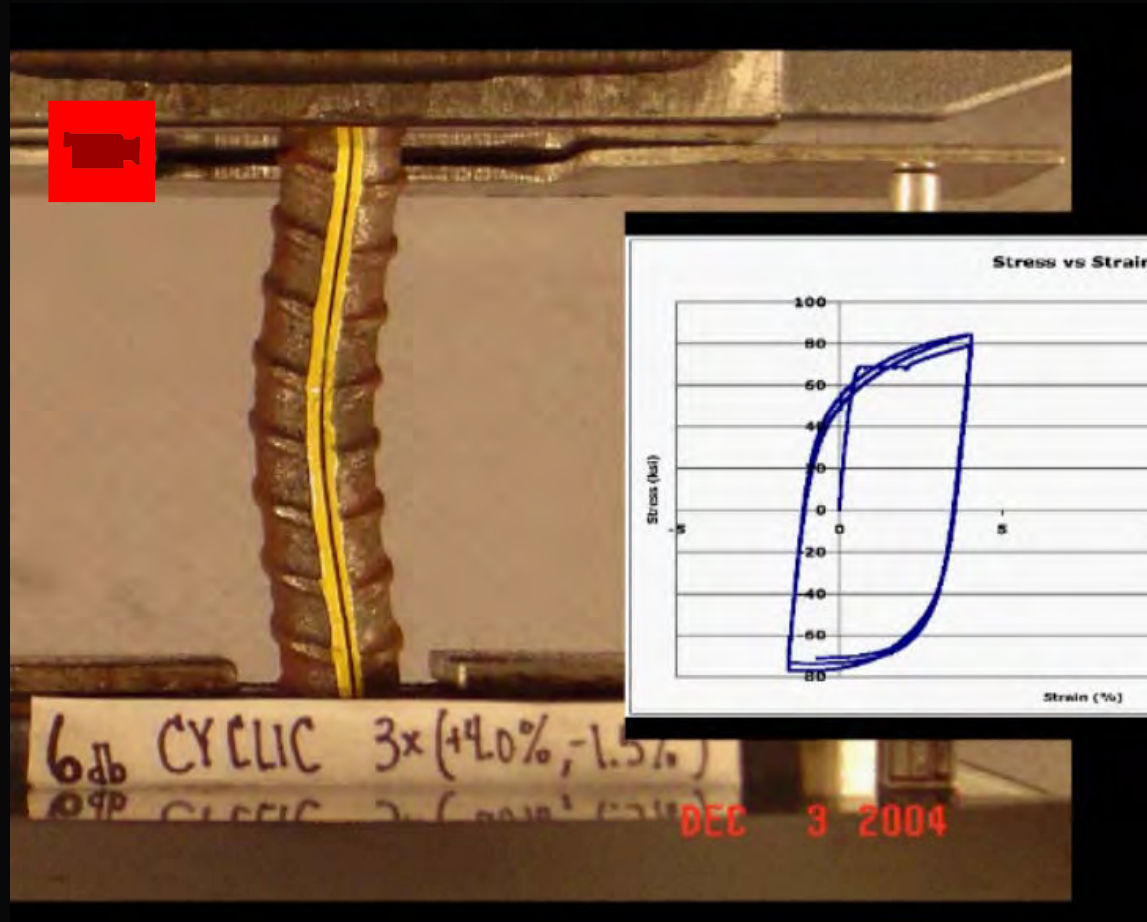






# Relación Momento-Curvatura

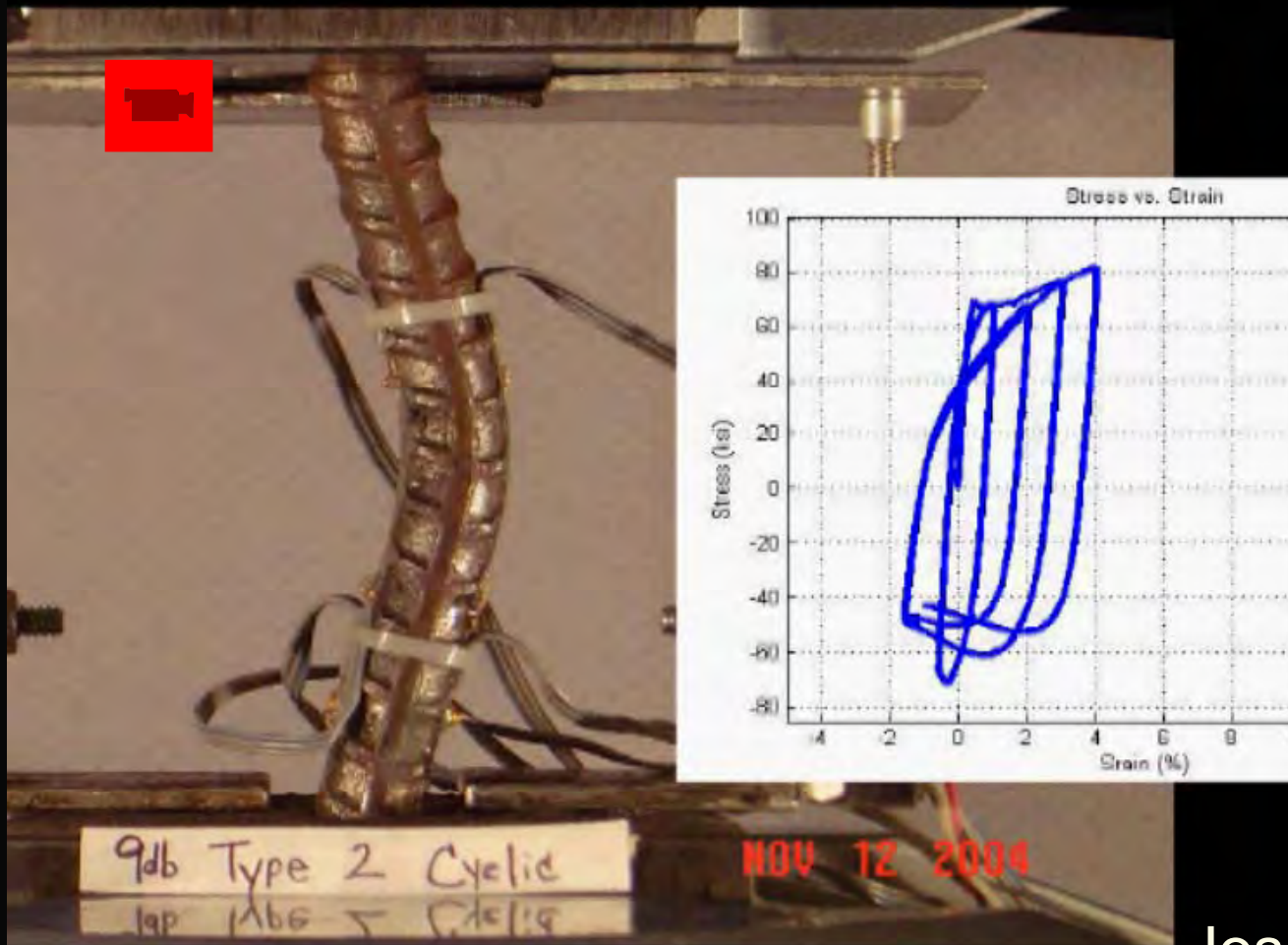
Pandeo de una barra de refuerzo sometida a cargas cíclicas ( $s_h/d_b = 6$ )



José Restrepo

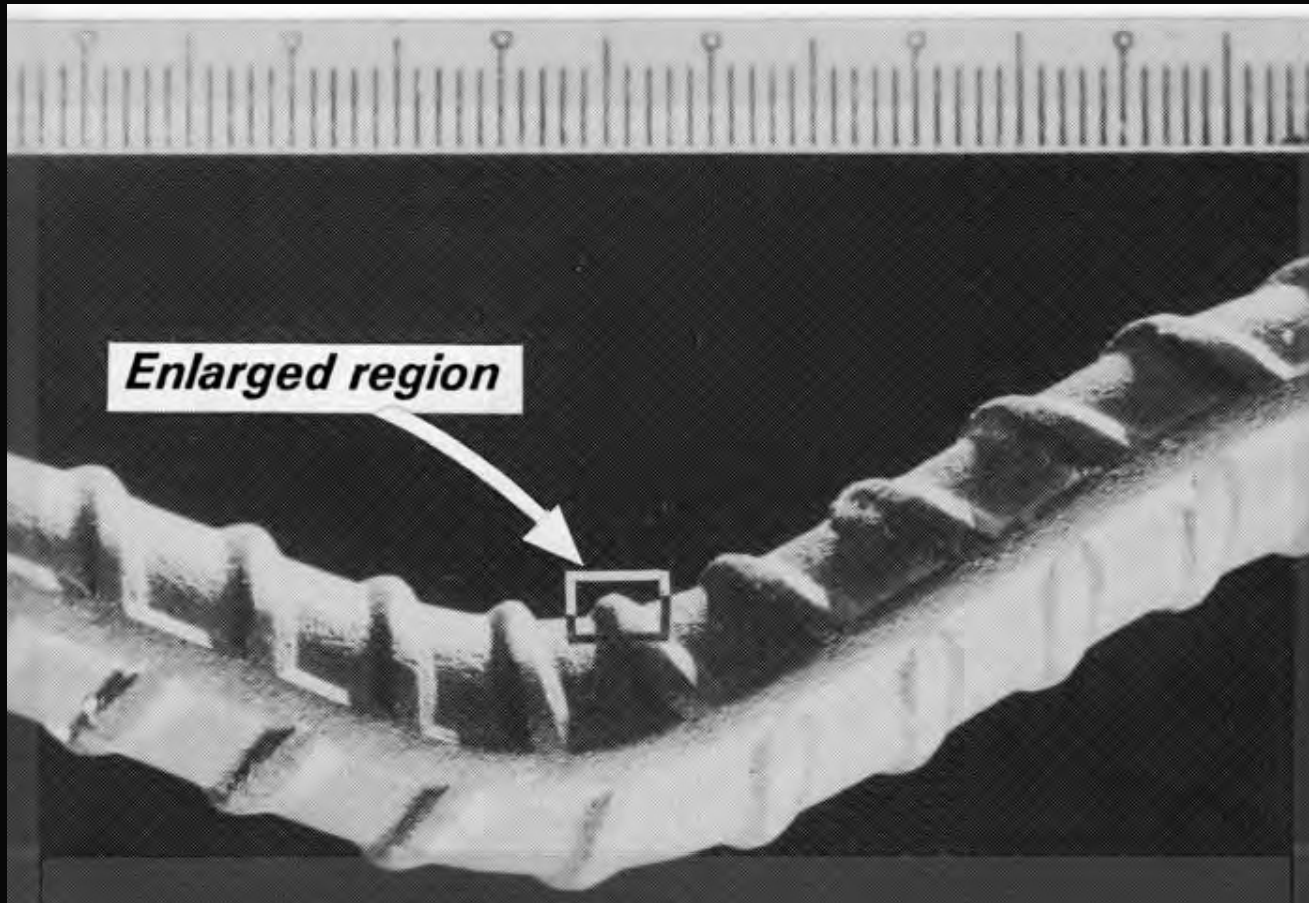
# Relación Momento-Curvatura

Pandeo de una barra de refuerzo  
sometida a cargas cíclicas ( $s_h/d_b = 9$ )



José Restrepo

# Fractura de bajo ciclaje Pandeo en tracción!



# Fractura de bajo ciclaje Pandeo en tracción!

José Restrepo





# Fractura de bajo ciclaje

## Pandeo de barras de refuerzo

- Demandas de acortamiento de hormigón y barras de refuerzo
- Efecto  $L/d_b$ 
  - Armaduras transversales muy separadas
  - Fractura por fatiga
  - Pandeo inelástico



Edificio – Terremoto Chile 2010

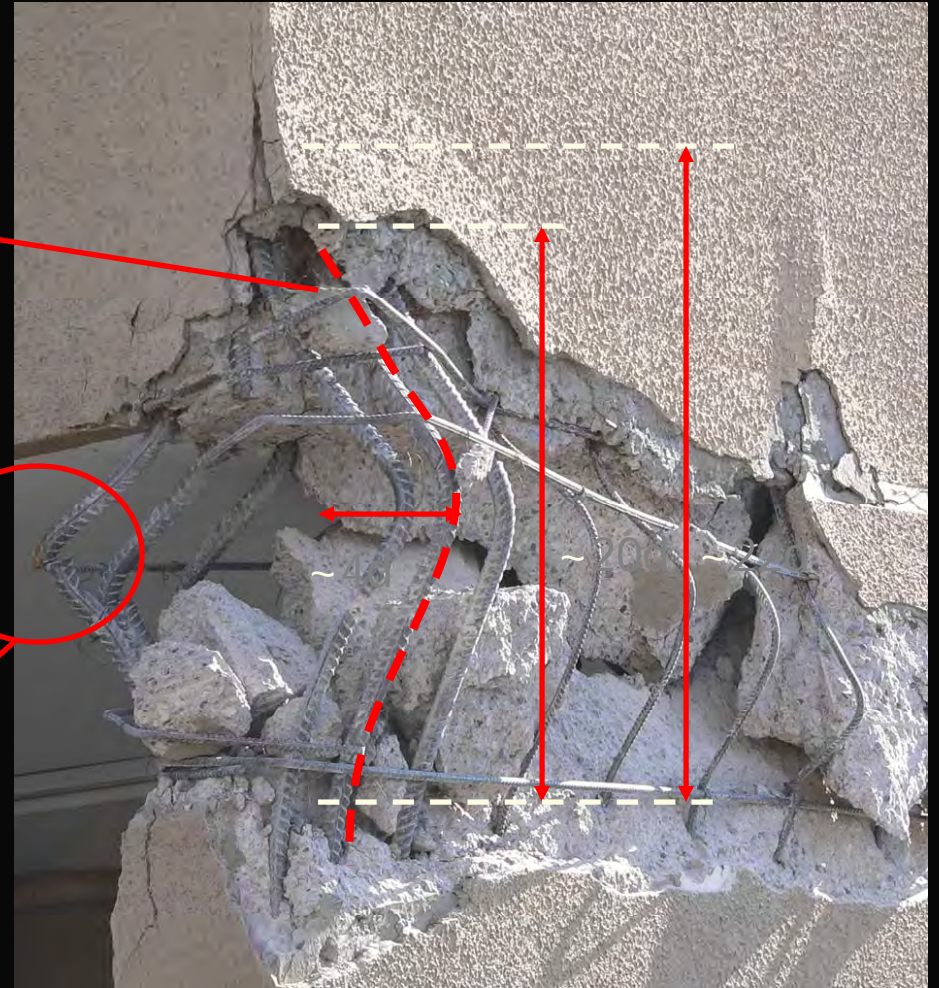
# Falla por pandeo y fatiga

## Pandeo de barras de refuerzo

- $L^*/d \sim 20$  ó  $22$   
(otros 10 a 20)
- $W_{\text{tranv}} \sim 4d$   
(otros  $4d$  a  $6d$ )
- $\rightarrow \varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon_{\text{min}} > 7\%$
- $\rightarrow$  Gran degradación de compresión

## Fatiga bajo ciclos

- 5 a 10 ciclos para deformaciones altas  
(Brown & Kunnath, 2004  
 $\pm 3\%$ , para  $L/d=6$ )



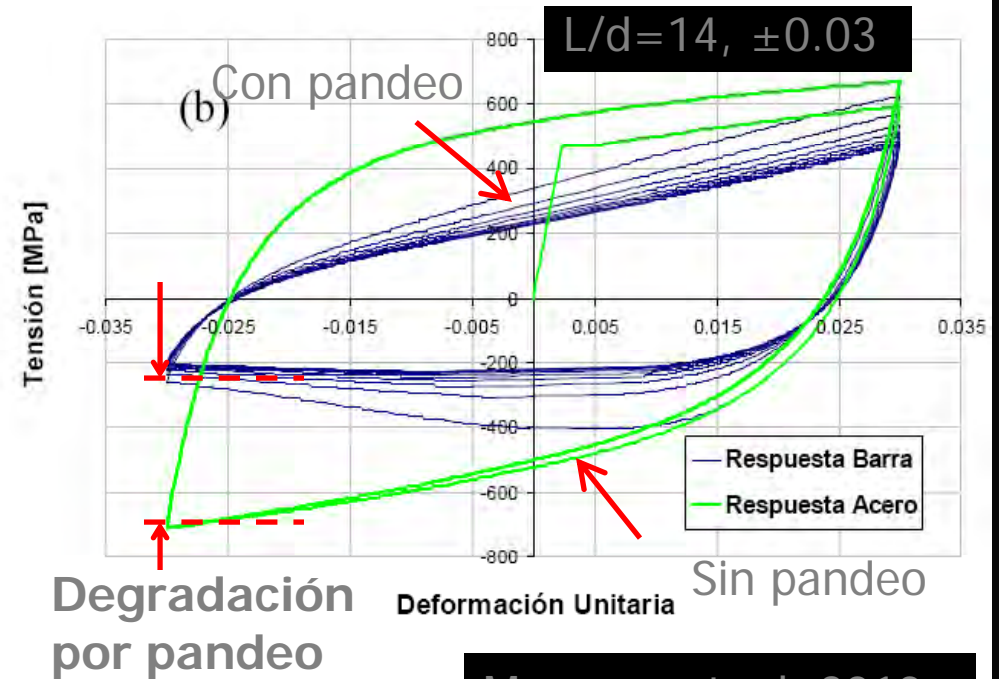
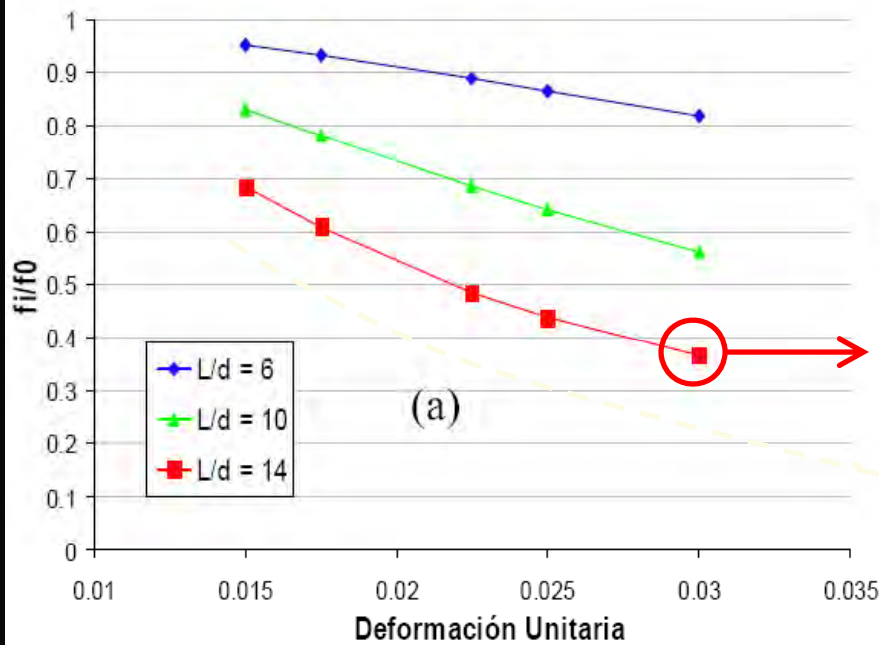
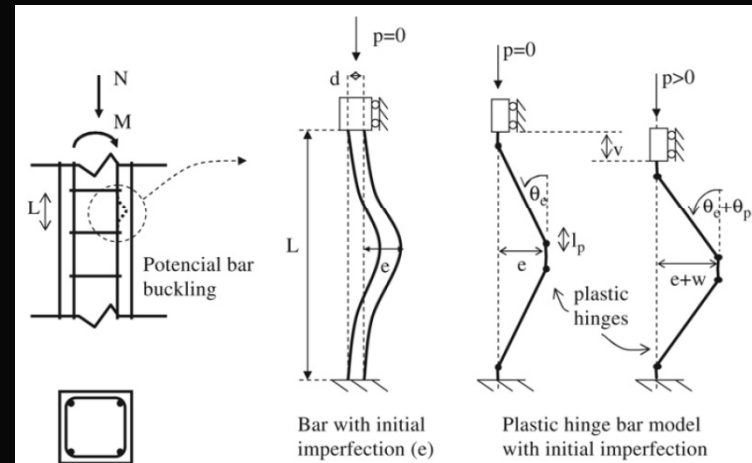
Edificio – Terremoto Chile 2010



# Pandeo - Analítico

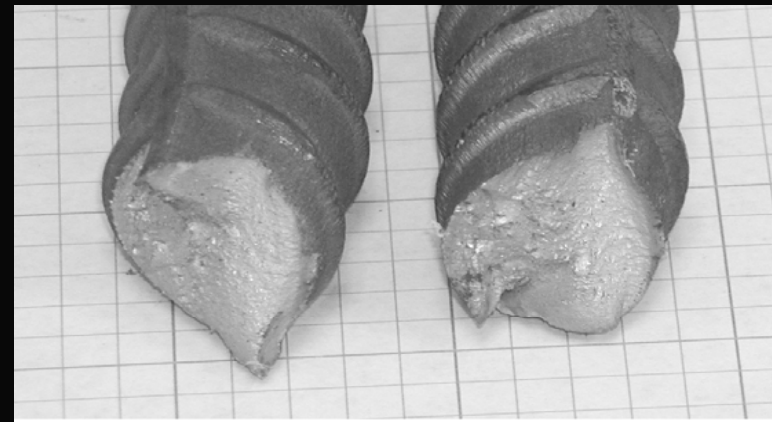
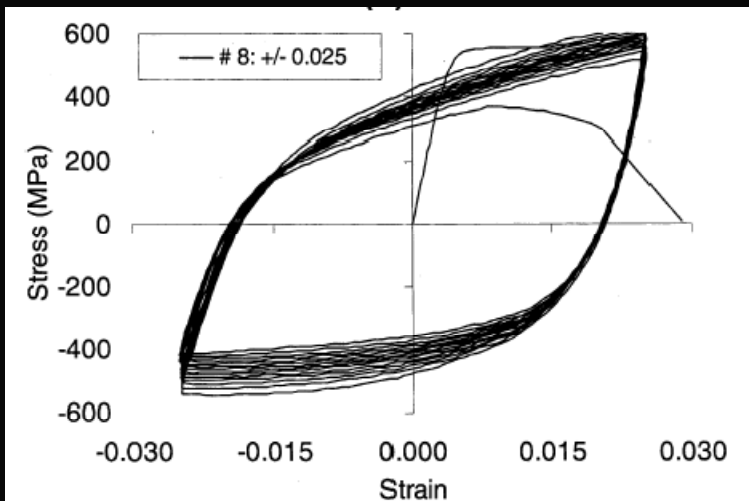
## Pérdida de capacidad en compresión por pandeo

- Modelo de plasticidad concentrada
- Variación de  $L/d$ ,  $\varepsilon_{max}$

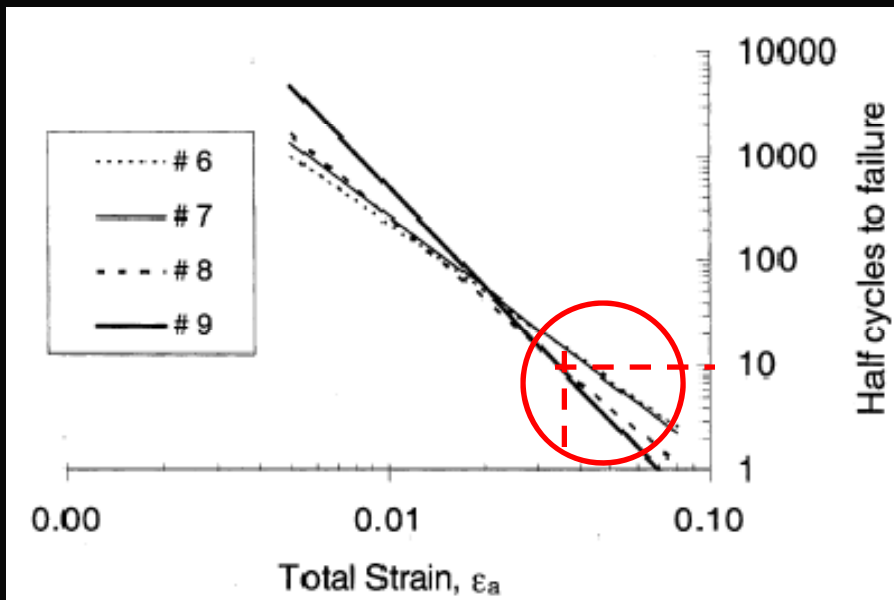


Massone et. al, 2010

# Fatiga de bajo ciclo

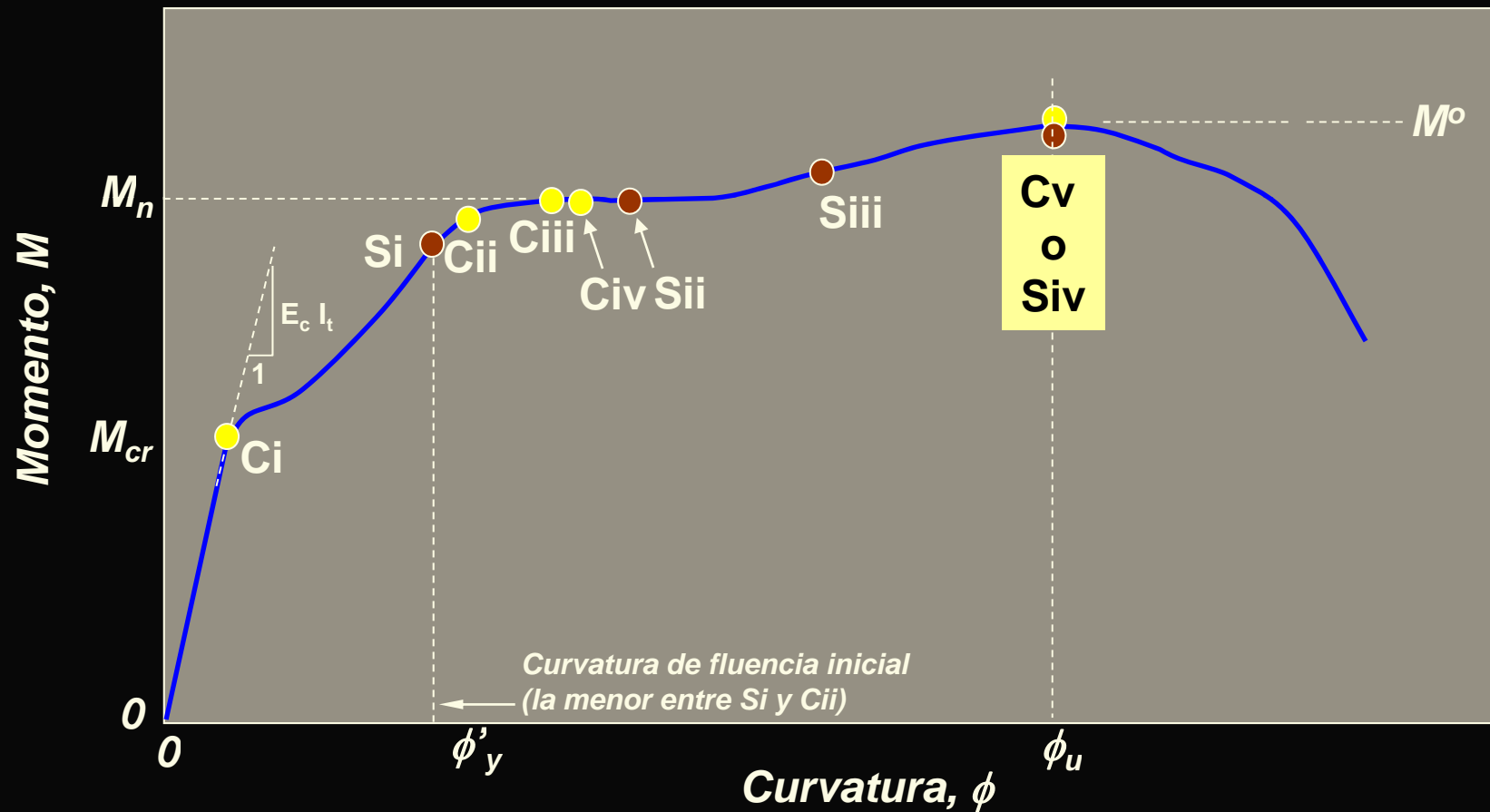


Brown & Kunnath (2004)



# Relación Momento-Curvatura

Carga axial constante

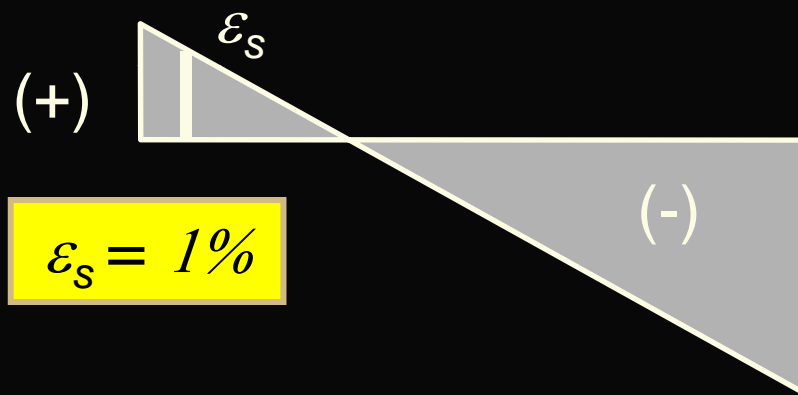




# Relación Momento-Curvatura

## Límites de Desempeño en el Refuerzo Longitudinal

Sii) Deformación unitaria del 1% en la barra extrema a tracción



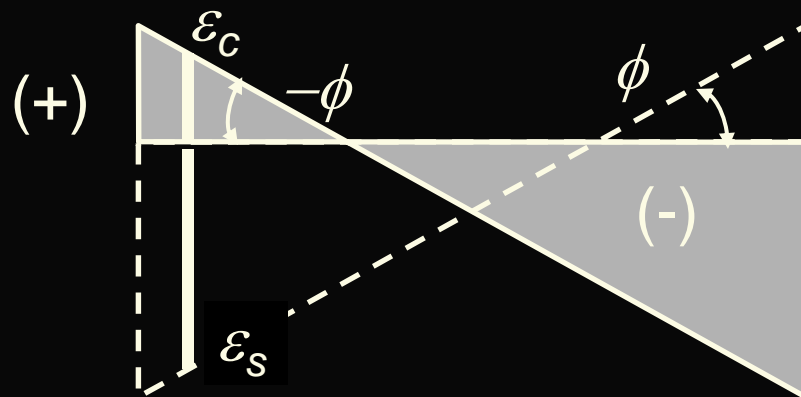
**Consecuencia:** grietas residuales pueden alcanzar 0.8 mm de ancho

**Acción requerida:** considere inyectar las grietas, especialmente si el medio ambiente es agresivo

# Relación Momento-Curvatura

## Límites de Desempeño en el Refuerzo Longitudinal

### Siii) Comienzo del pandeo



$$\epsilon_s - \epsilon_c \geq \frac{10 - \frac{s_h}{d_b}}{100}$$

$s_h$  – hoop spacing  
 $d_b$  = long. bar diameter

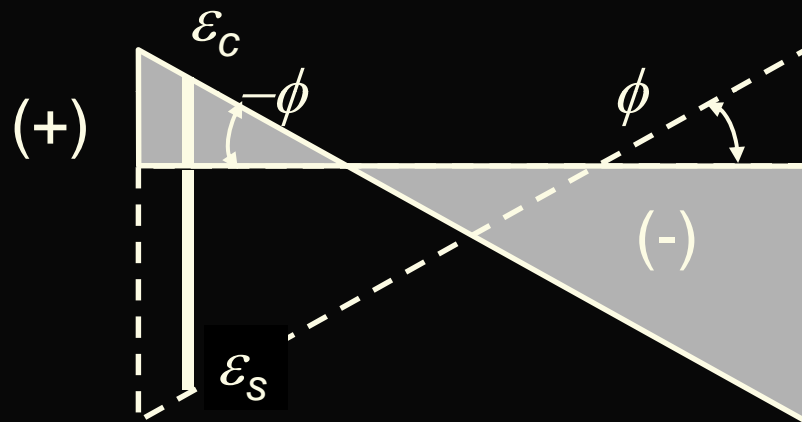
**Consecuencia:** ninguna, imperceptible, lo único que se nota es la pérdida del recubrimiento

**Acción requerida:** se necesita restaurar el recubrimiento

# Relación Momento-Curvatura

## Límites de Desempeño en el Refuerzo Longitudinal

### Siv) Fractura del refuerzo longitudinal



$$\epsilon_s - \epsilon_c = \frac{14 - \frac{4s_h}{3d_b}}{100} \leq \frac{\epsilon_{su}}{2} \text{ and } |\epsilon_c| \geq 0.004$$

$s_h$  = hoop spacing  
 $d_b$  = long. bar diameter

**Consecuencia:** pérdida rápida de la resistencia a la flexión. Fin de la capacidad de rotación.

**Acción requerida:** reparaciones costosas, considere incluso la demolición del elemento

# Relación Momento-Curvatura

Límites de Desempeño en el Refuerzo Longitudinal

Siv) Fractura del refuerzo longitudinal  
luego del pandeo

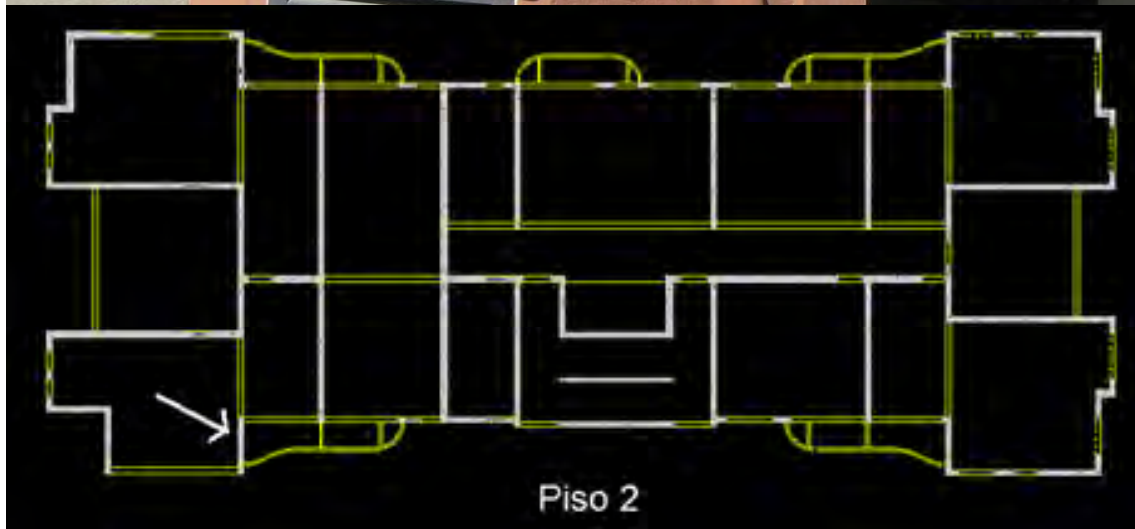
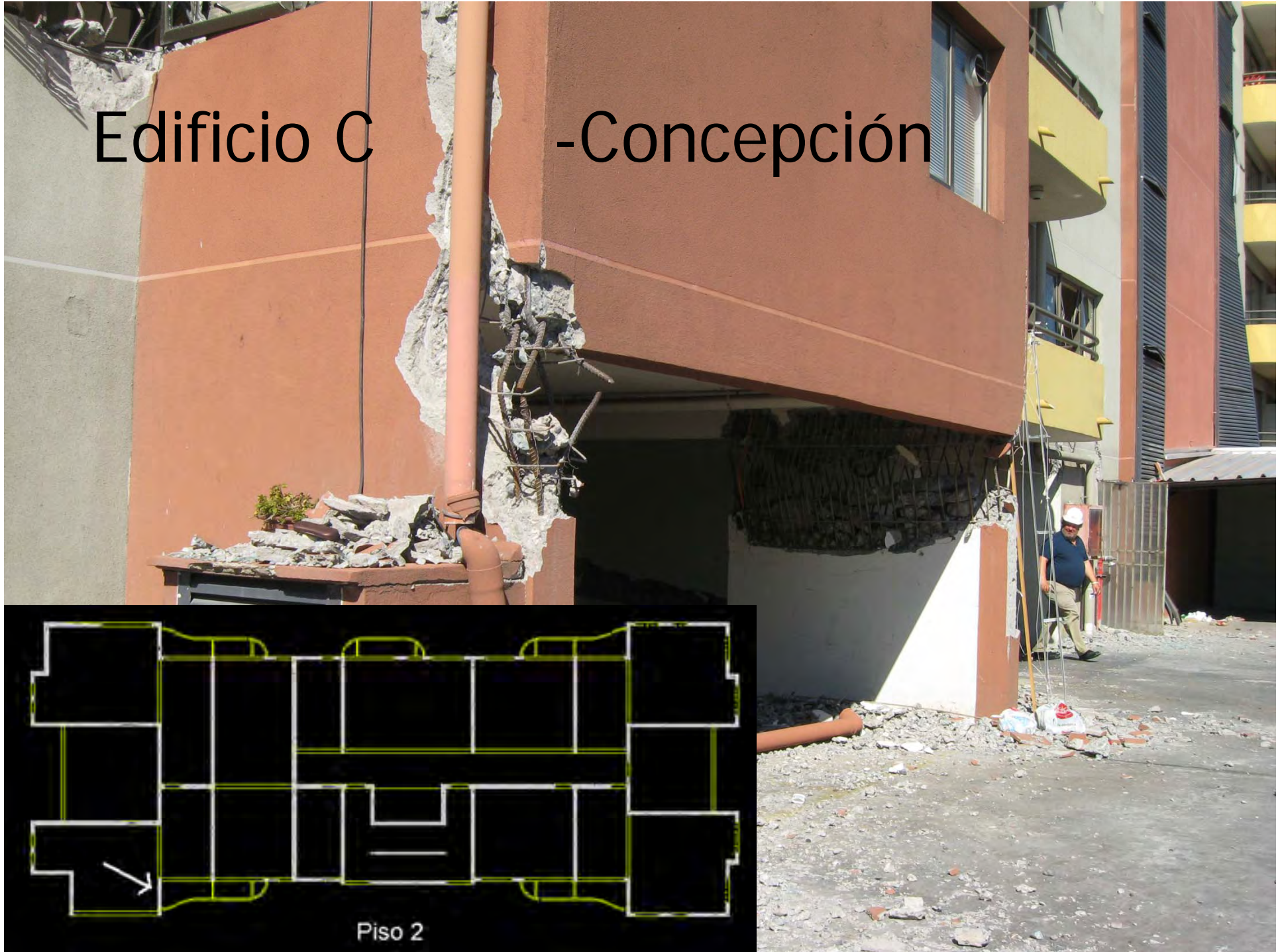


*Microgrieta*



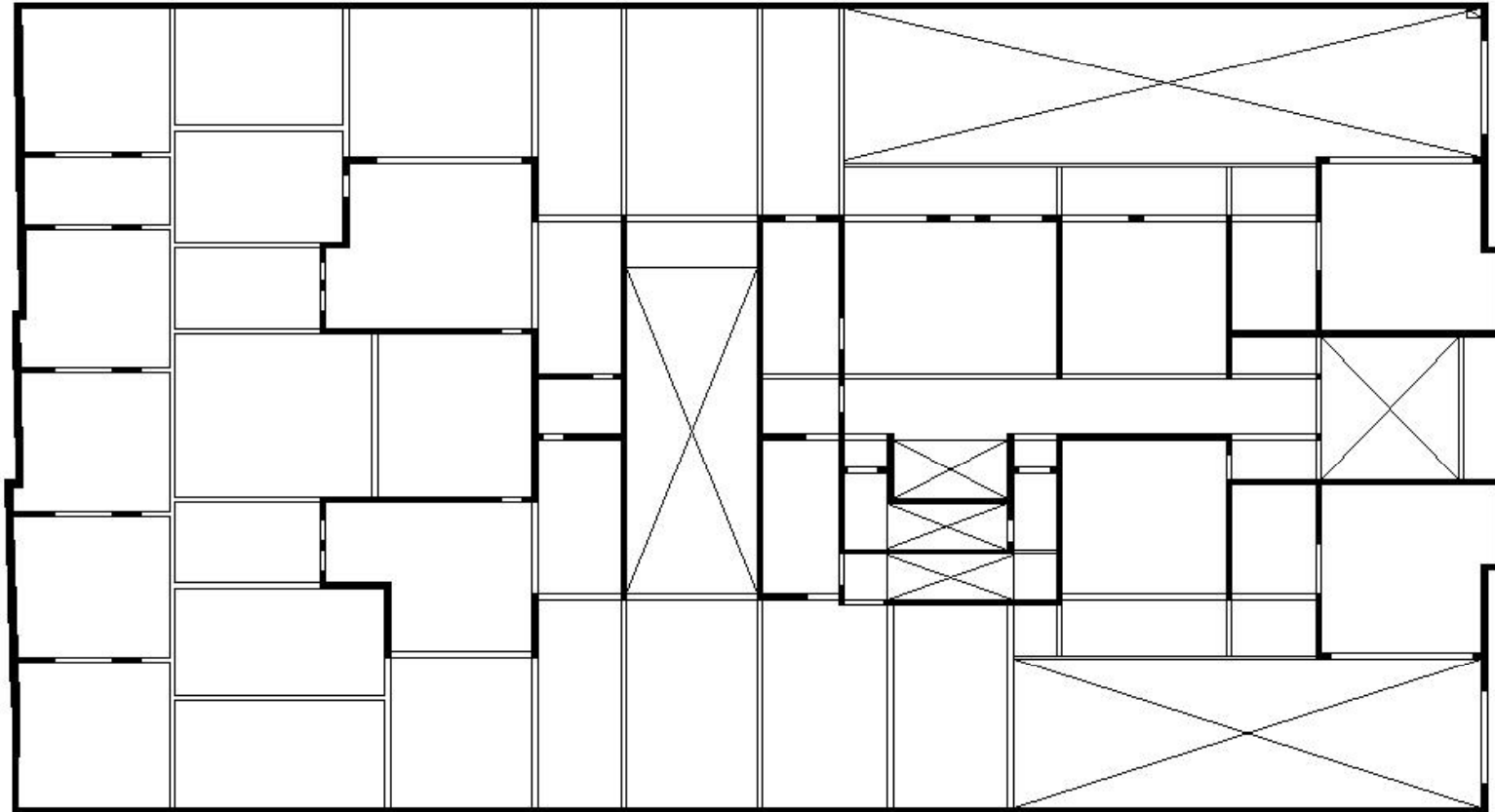
Edificio C

-Concepción



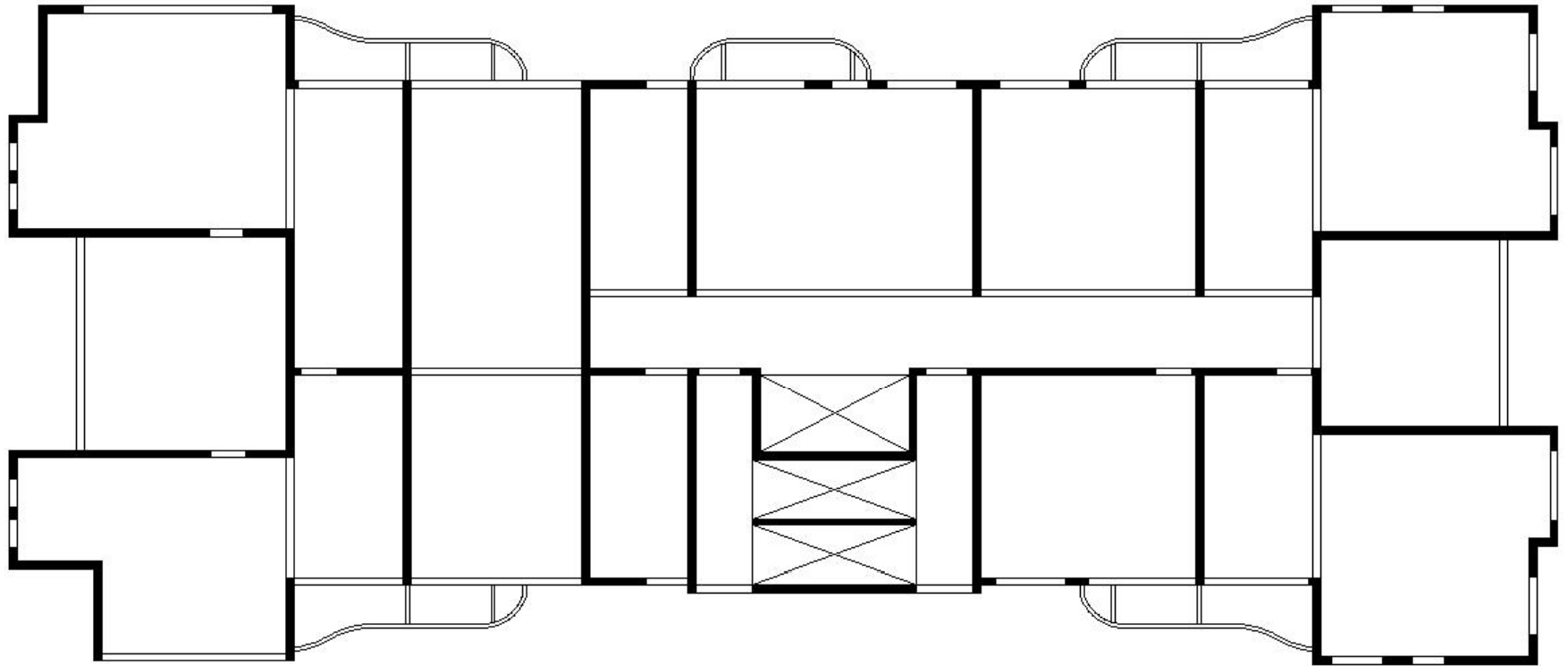


# Edificio Centro Mayor plantas



Primer piso

# Edificio Centro Mayor plantas



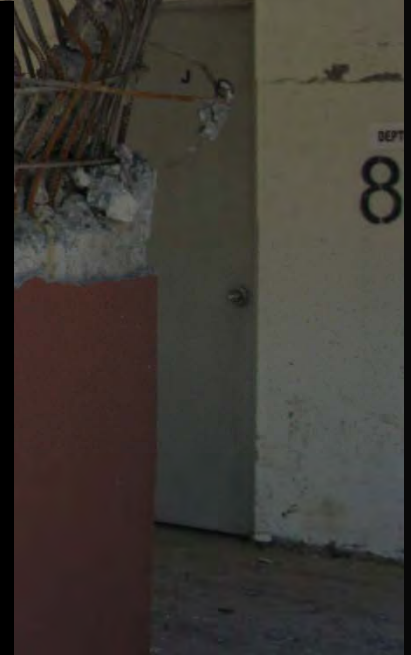
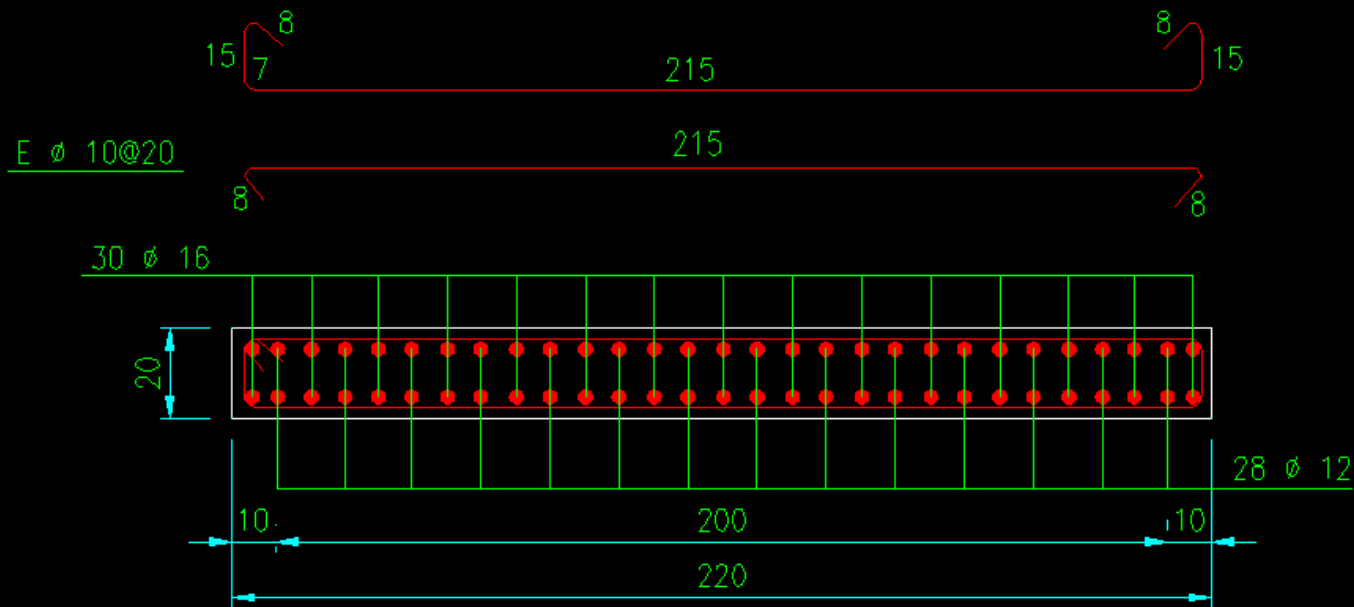
Segundo piso

# Edificio C - -Concepción



Piso 2

# Edificio C - -Concepción





# Imaginación





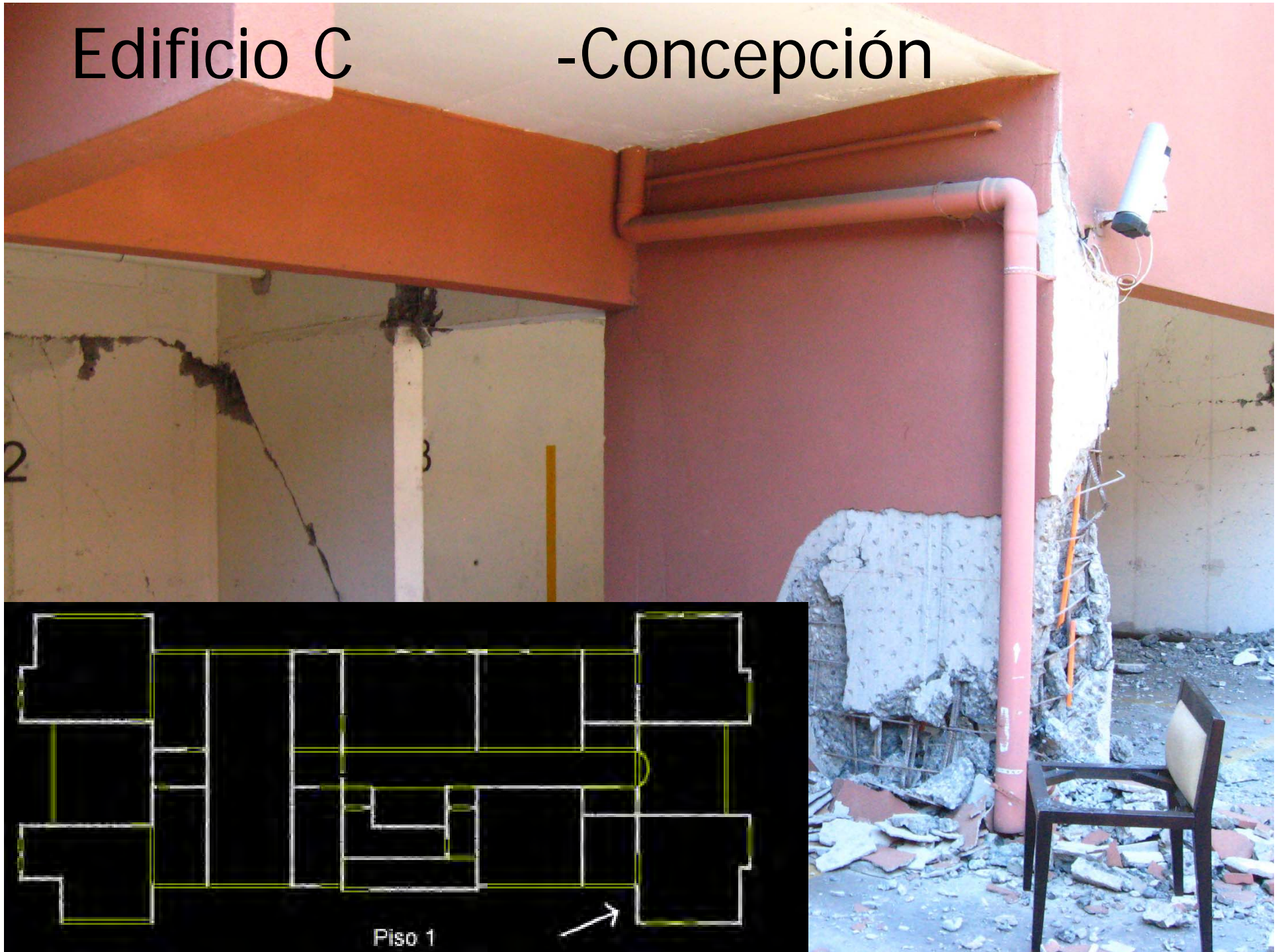
# Propagación de





# Edificio C

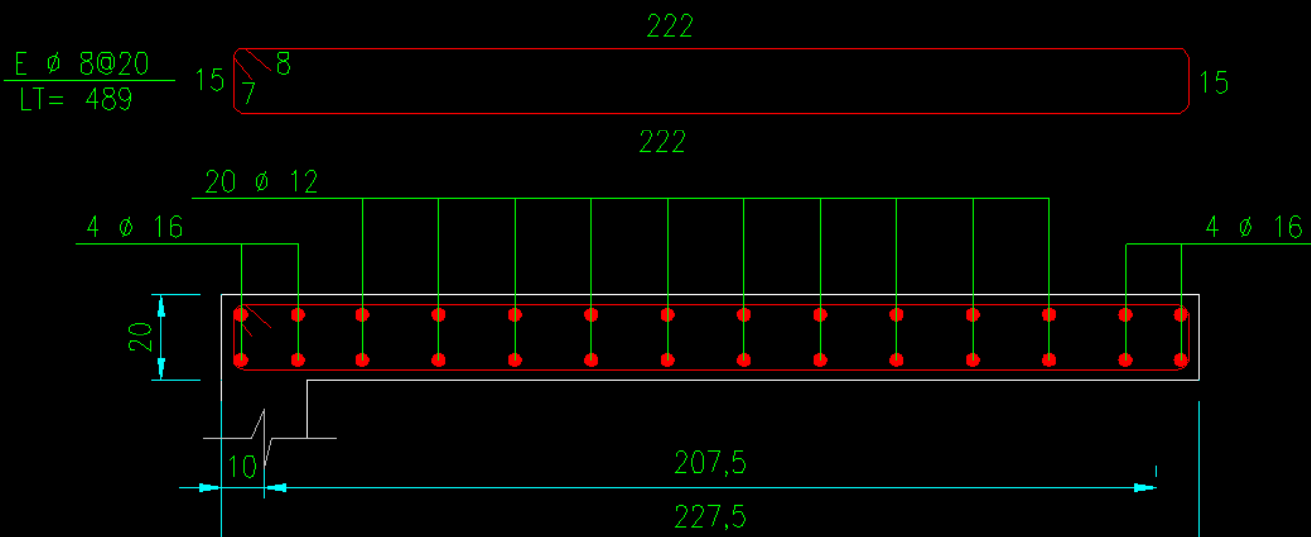
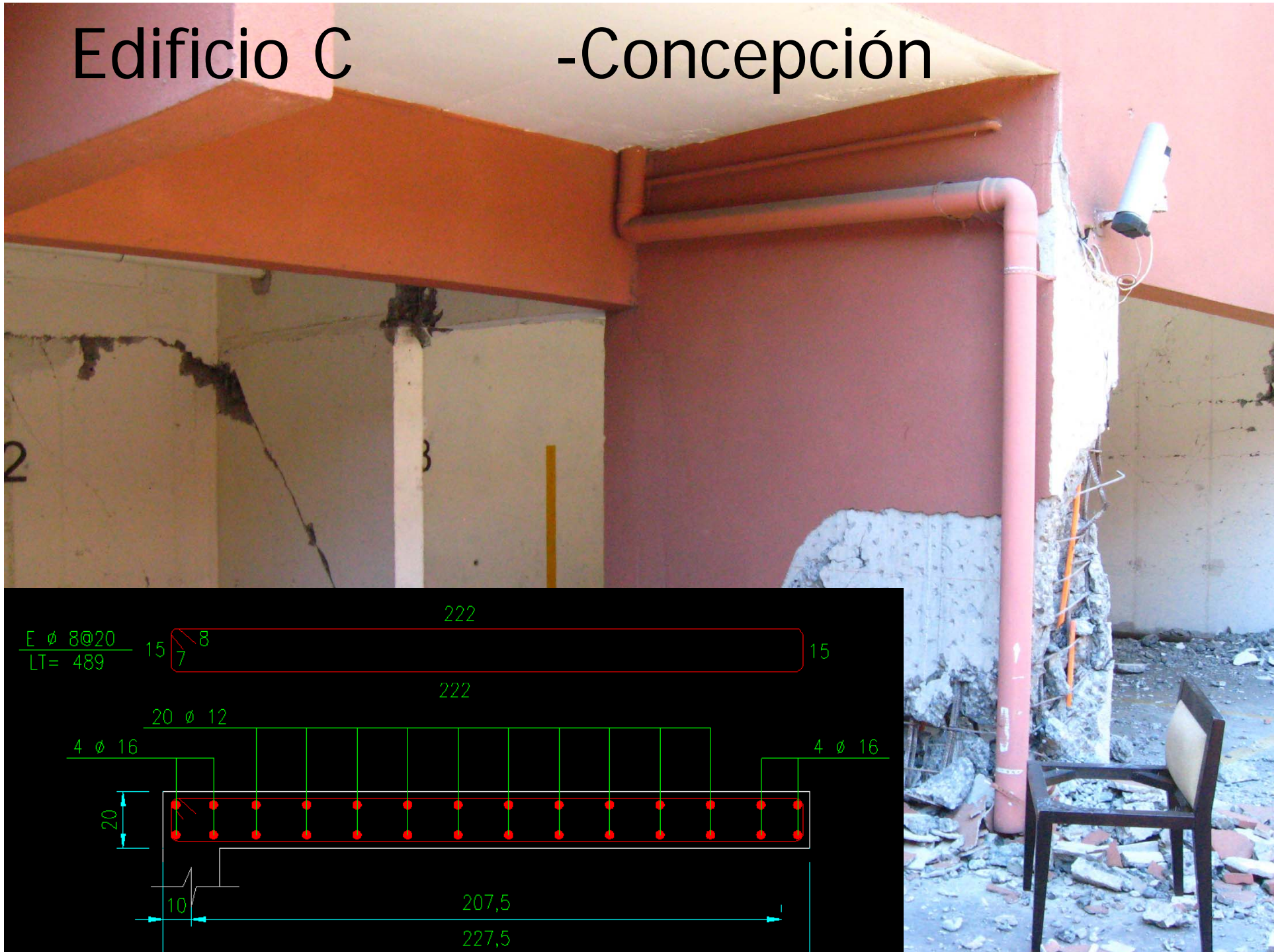
# -Concepción



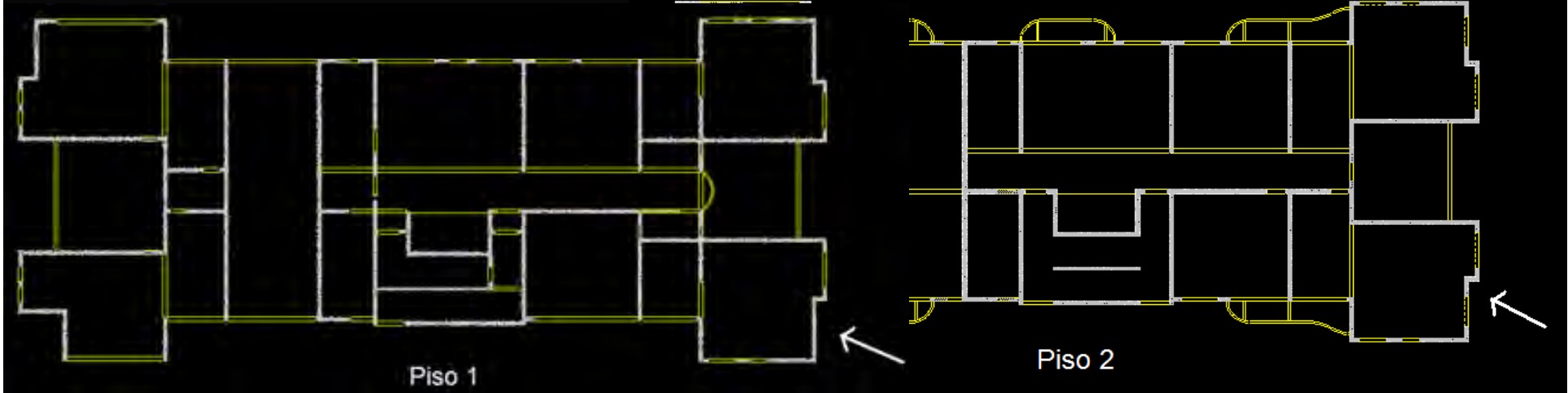


# Edificio C

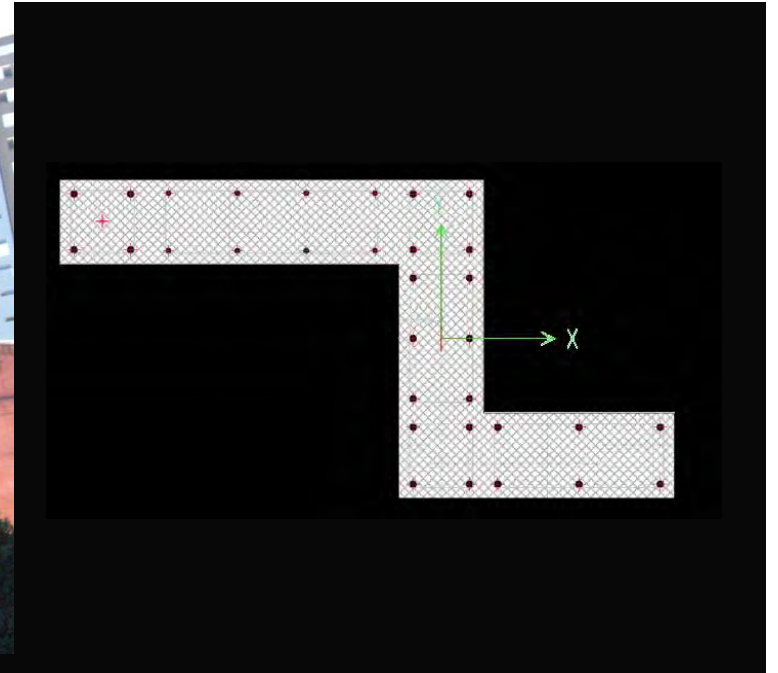
# -Concepción











# Muros

Daño acumulado en 1 nivel  
Inclinación de edificios





# Edificio E Viña del Mar







# Edificio F Viña del Mar





The image shows the interior of a room undergoing renovation or demolition. A large window with a black frame is the central feature, reflecting the bright light from the other side. The walls on either side of the window are in various states of disrepair; the left wall has large sections of white plaster missing, revealing a rough, greyish substrate, while the right wall is mostly intact but shows some peeling paint. The floor is covered in a thick layer of rubble, including broken tiles, concrete fragments, and pieces of wood. A single electrical outlet is visible on the right wall. The overall atmosphere is one of a space in transition.

Edificio F  
Viña del Mar



Edificio F  
Viña del Mar



# Edificio E Viña del Mar

Efecto de columna corta en borde muro





# Edificio E Viña del Mar

Efecto de columna corta en borde muro





## Edificio G 1985

Efecto de modos superiores

La plastificación se produce en pisos superiores



Viña del Mar, 1985





## **Edificio G 2010**

**Efecto de modos superiores**

**La plastificación se produce en pisos superiores**



**Viña del Mar, 1985**



Nuevos bordes  
agregándose  
armadura  
longitudinal

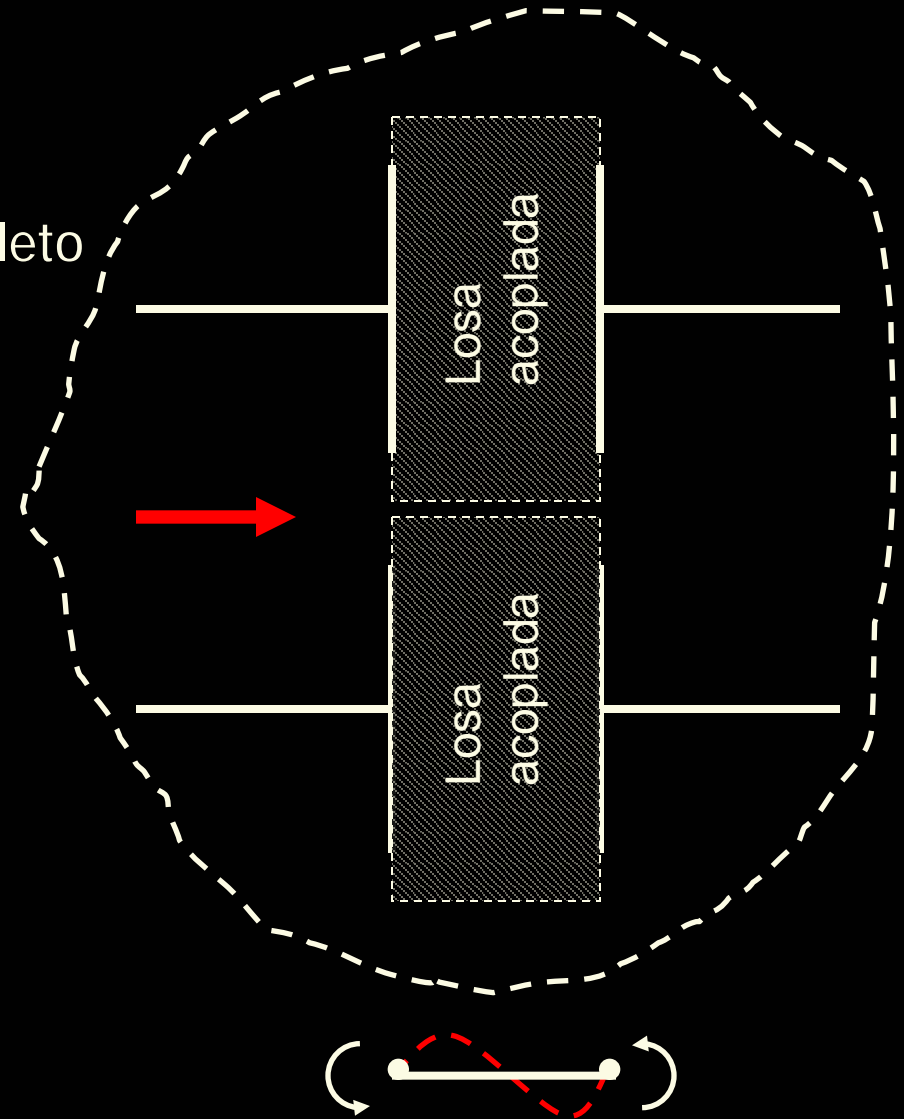
Edificio G



# Viña del Mar

## Acoplamiento de muros por Losas

- Sistema resistente de Esqueleto - Espinas

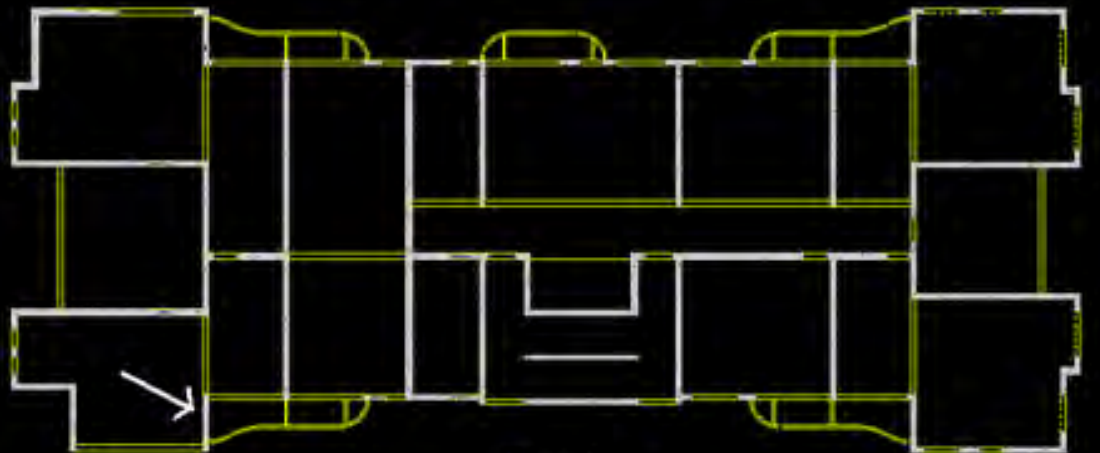
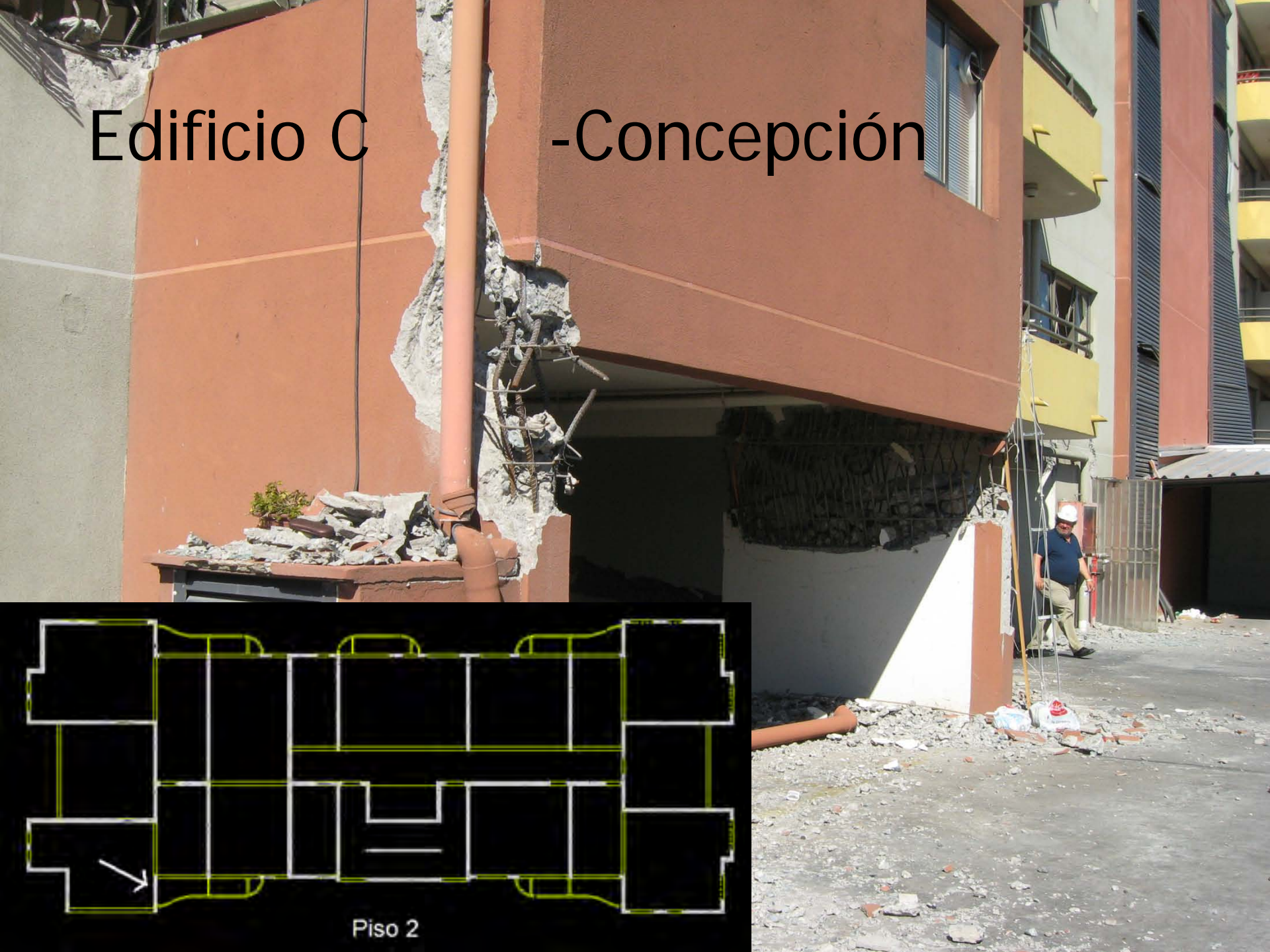




Fallas de compresión tracción en  
soportes de muros discontinuos

Edificio C

-Concepción



Piso 2









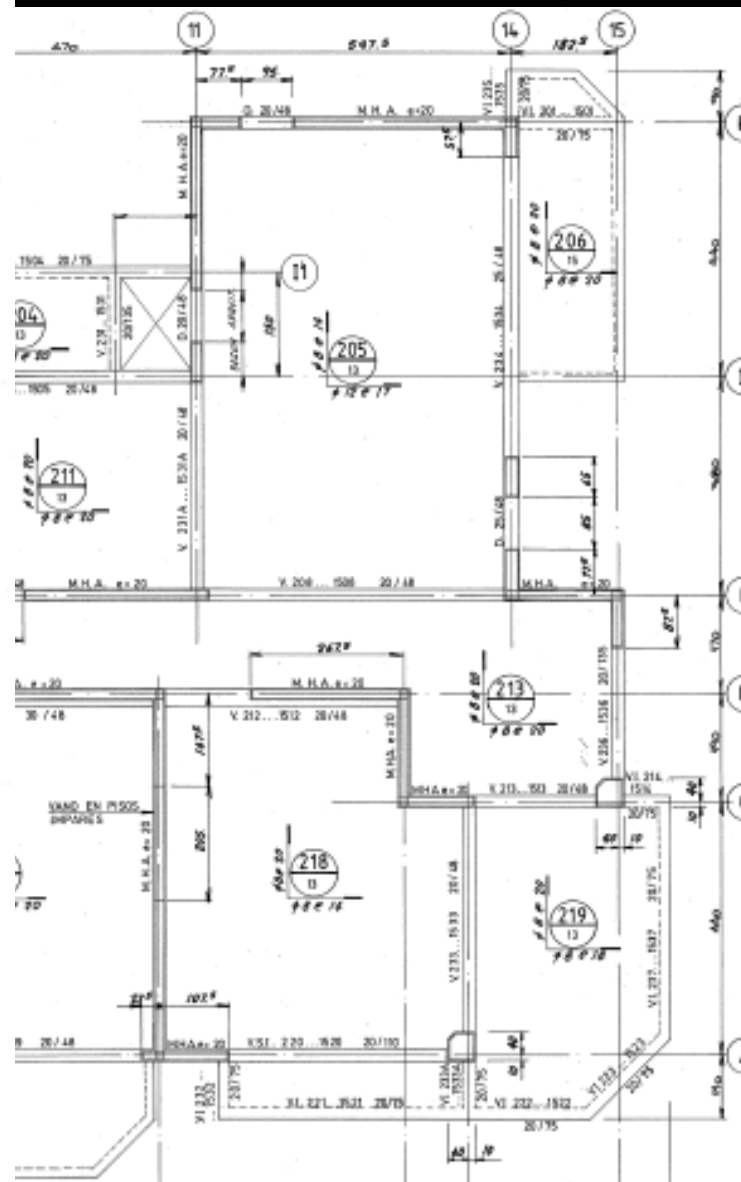
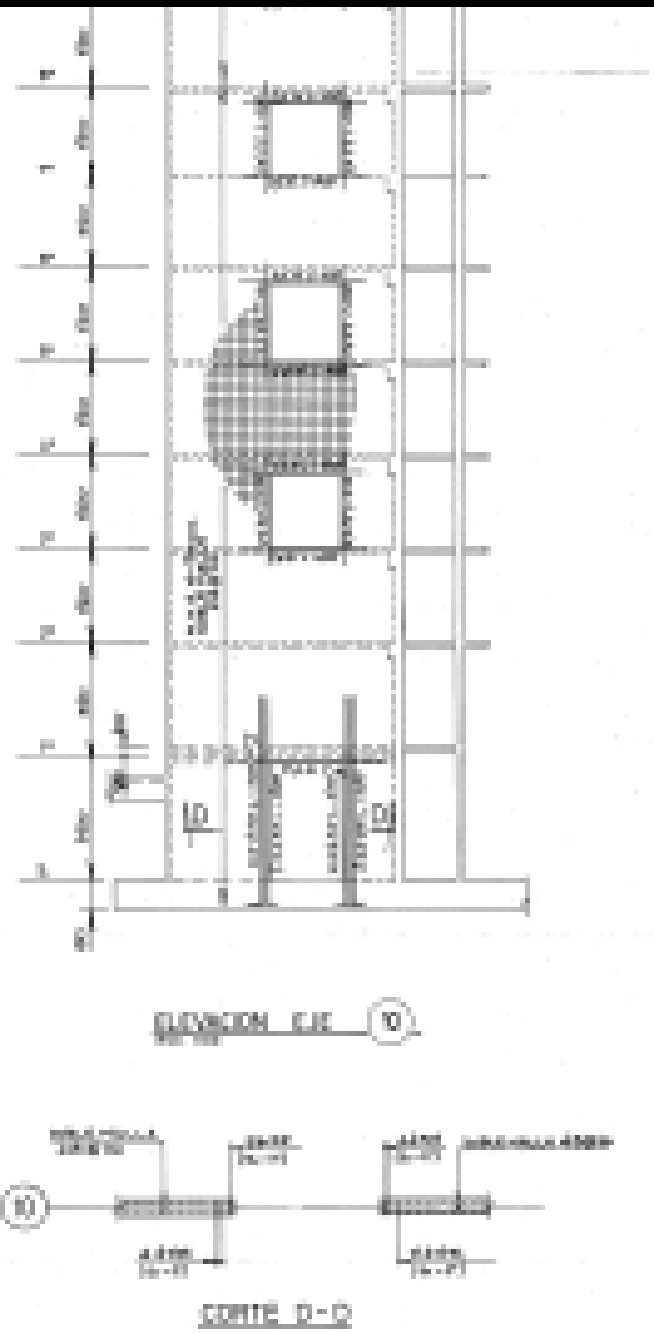
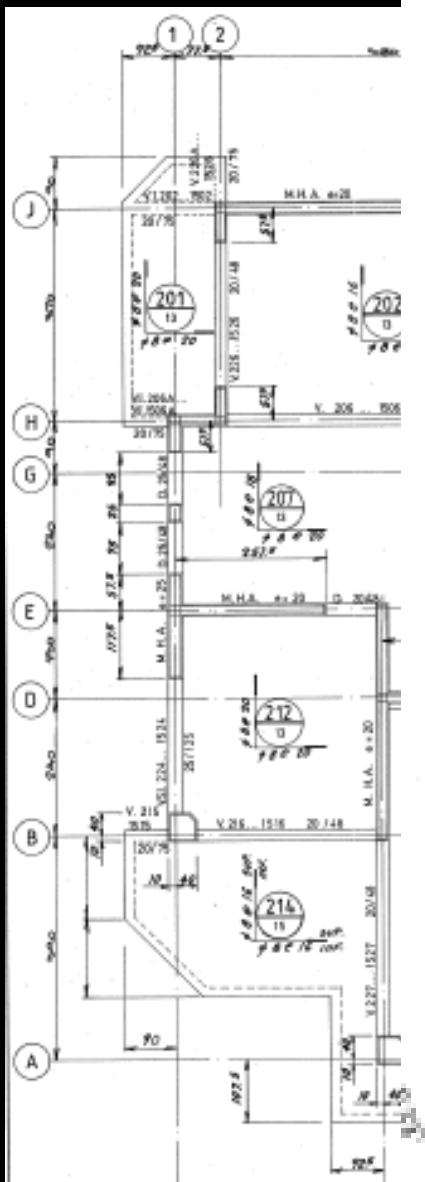




34



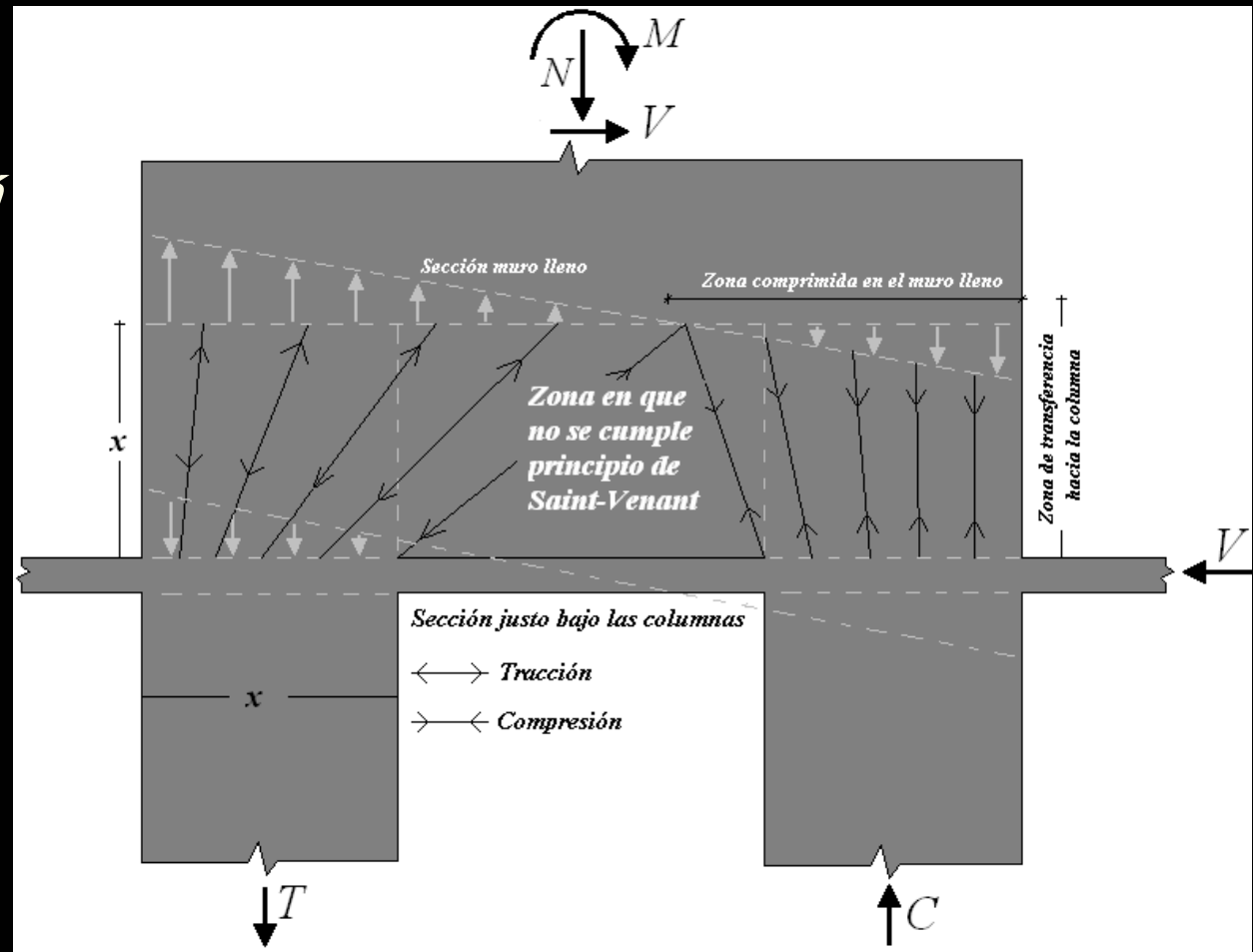




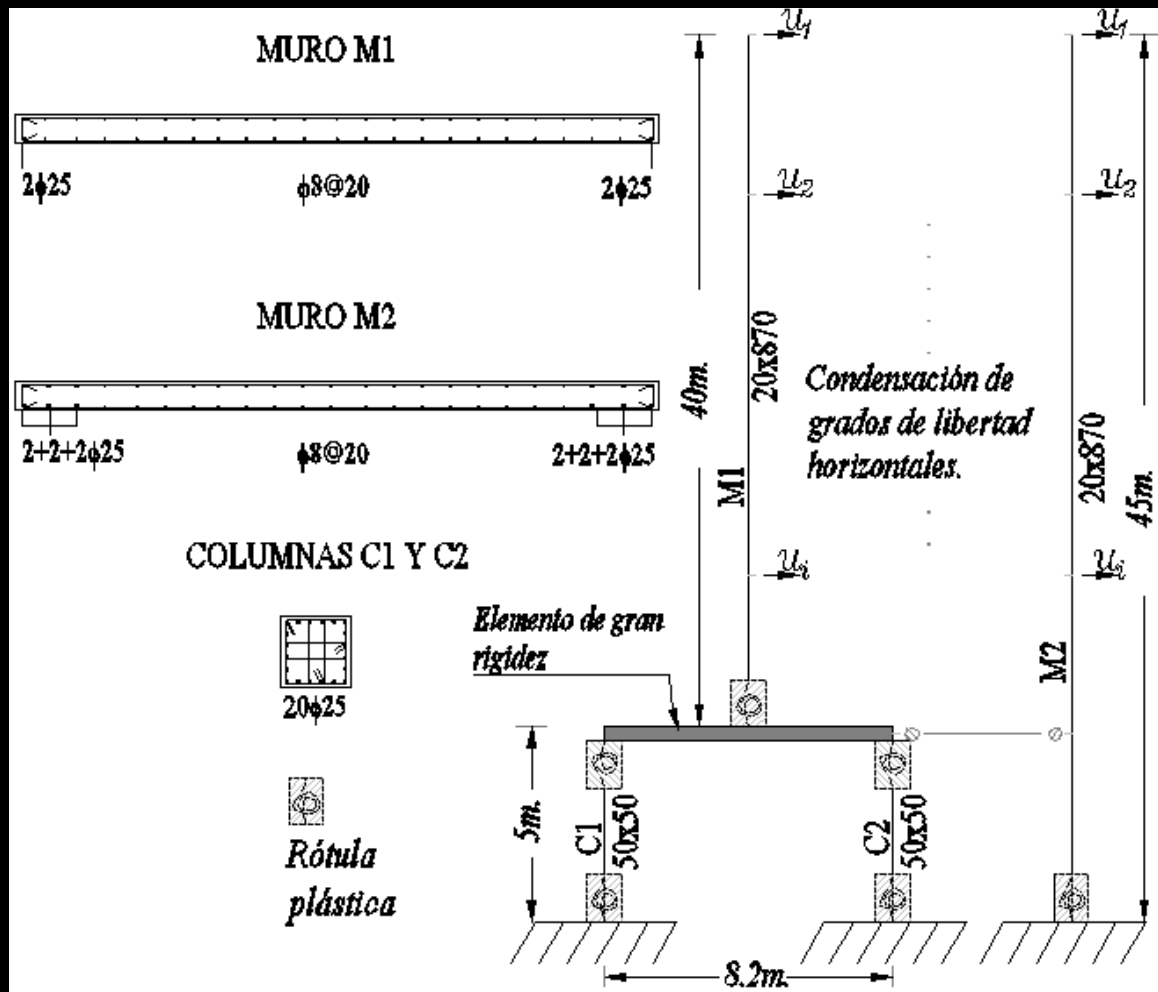
# Zona discontinua

El muro debe tener una deformación compatible con las deformaciones en las columnas.

La sección que está justo debajo de la losa se podría tratar como una sección de muro sin la parte que está entre las columnas, aplicando compatibilidad de desplazamientos.

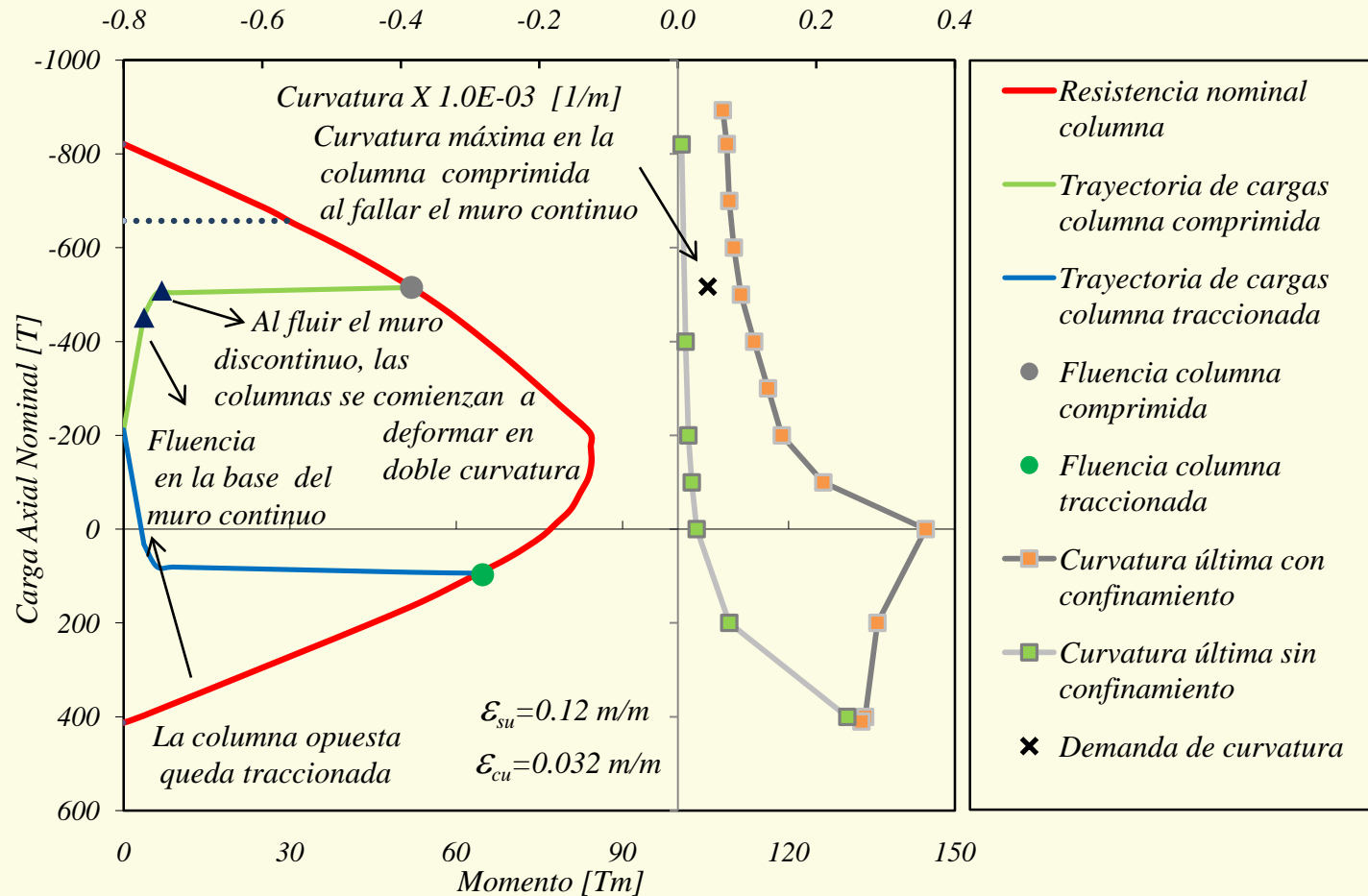


# Modelo de análisis

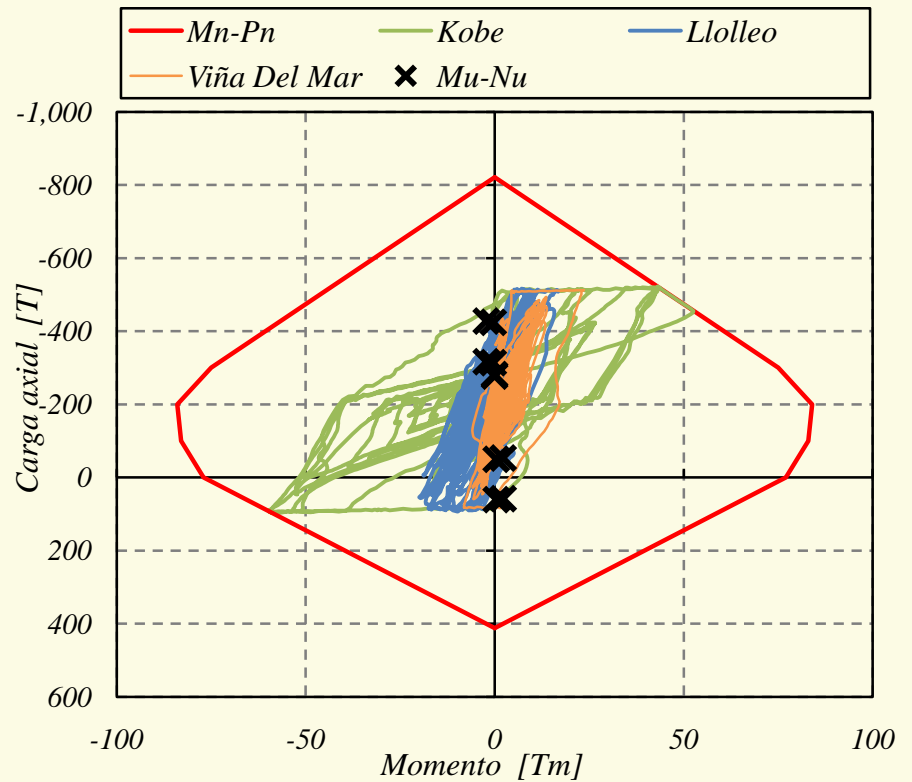
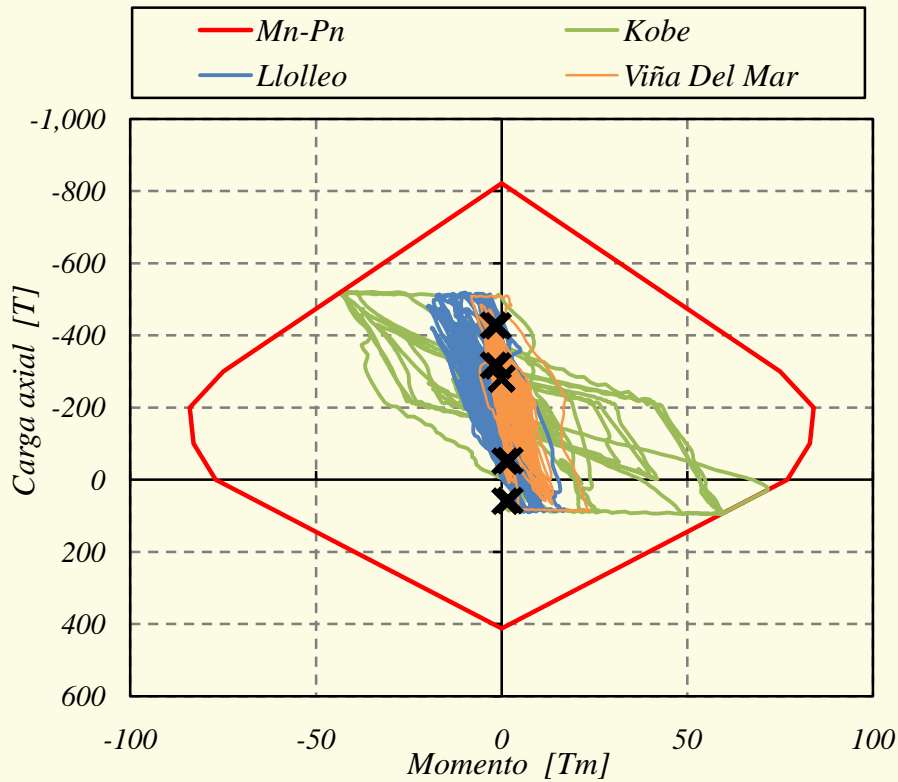




# Diagrama de interacción y curvatura



# Diagrama de interacción



**Takeda con degradación**

# Machones



# Edificio H Concepción



# Concepción

Muros esbelto de hormigón armado con aberturas

- Muros cortos (perforaciones en muros y ventanas)
- Falla en dinteles y machones



Edificio O'Higgins



# Edificio I



# Edificio H





# Muro-viga o Spandrel – Leonardo Massone

## Ej., Test 1

- Pocas fisuras diagonales
- Pequeñas fisuras atravesando la junta de inicio de fisuración
- ~50% caída de carga después del peak de capacidad
- Grandes deformaciones (2%)
- Capacidad residual (~10 kips @ 2% deformación)

Test 1



0.3% def.



0.8% def.



1.2% def.



2% def.

# Transferencias

# Transferencias







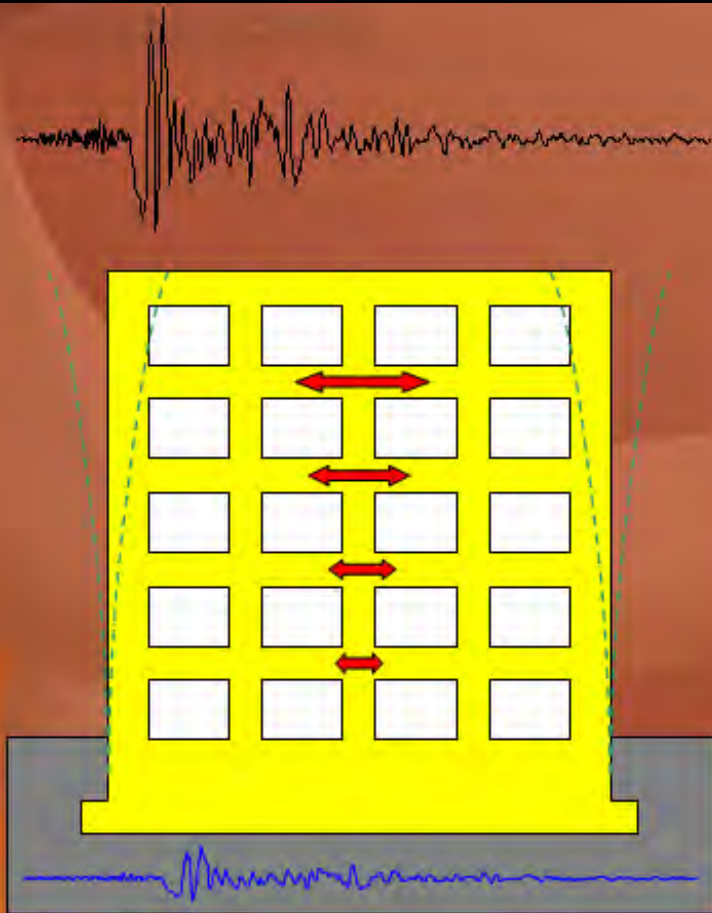
Primer piso



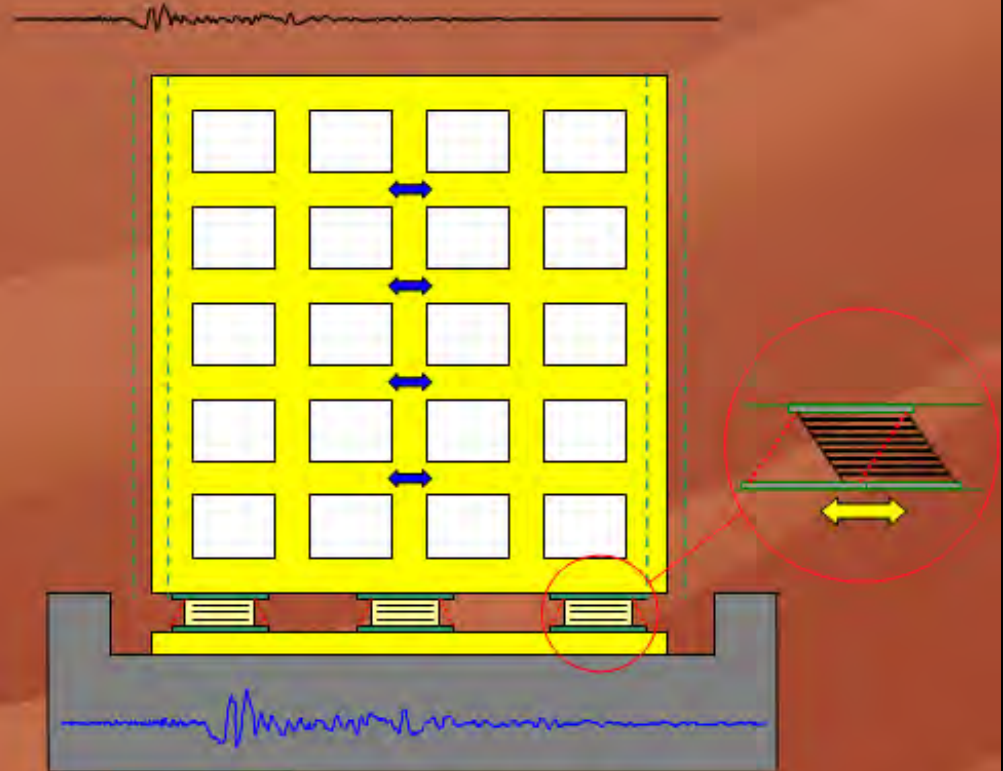


Subterráneo

# Aislación en la Base



**Estructura convencional**



**Estructura aislada**



Edificio J  
Viña del Mar























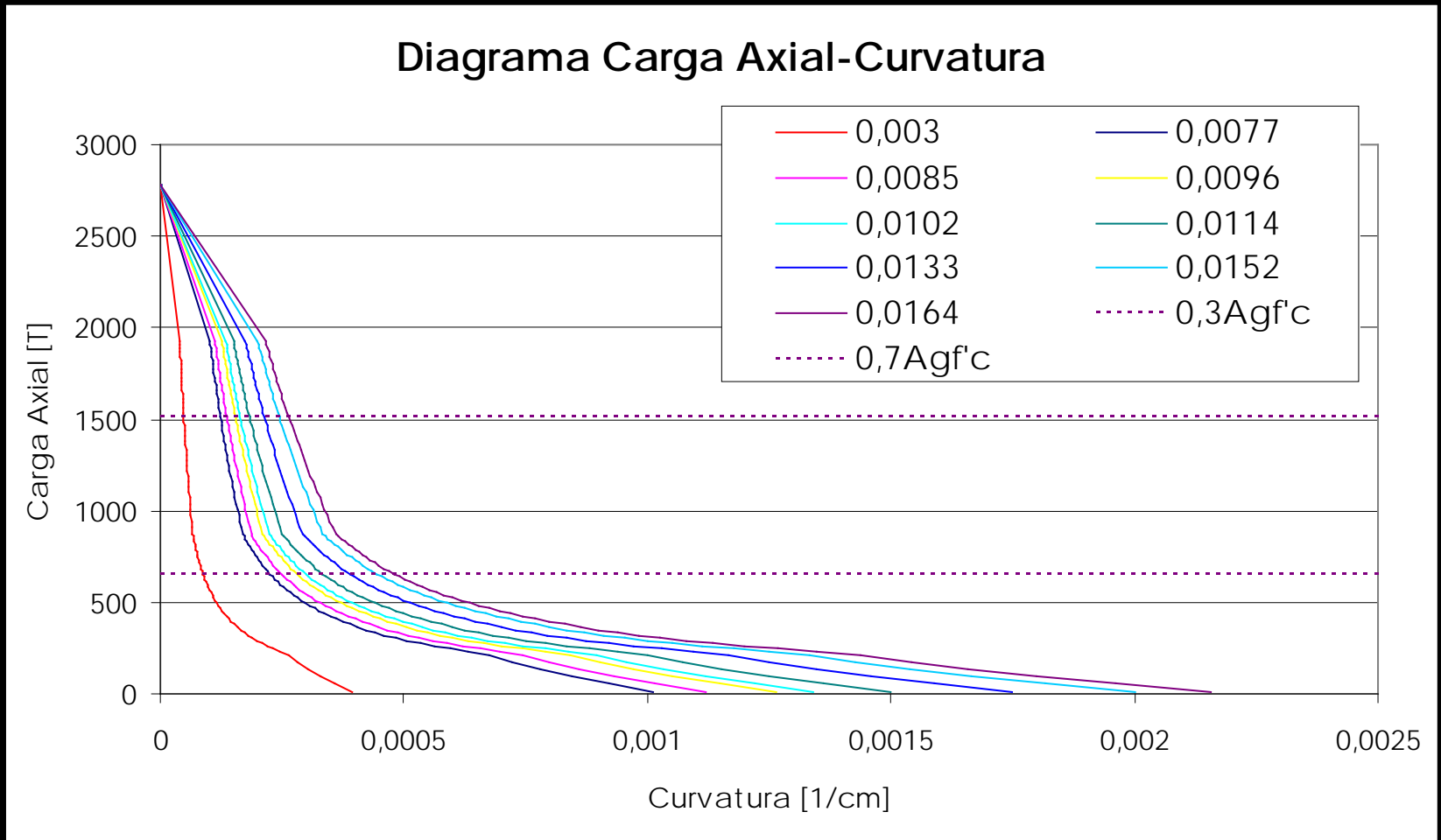
# Modificaciones inmediatas

Limitar carga axial en elementos que deben sostener desplazamientos laterales:

$-0.25 f_c' A_g$  en muros

$-0.50 f_c' A_g$  en muros

# Capacidad de rotación en función de la carga axial y de la cantidad de armadura transversal





# Modificaciones inmediatas

Si la carga axial en muros es menor que  $0.25 f_c' A_g$ , no es necesario confinar los bordes en los muros, pero debe restringirse el pandeo de las armaduras longitudinales.

Para ello se recomienda utilizar armadura transversal que amarre todas las armaduras verticales que estén a menos de  $0.15 l_w$  de los bordes.

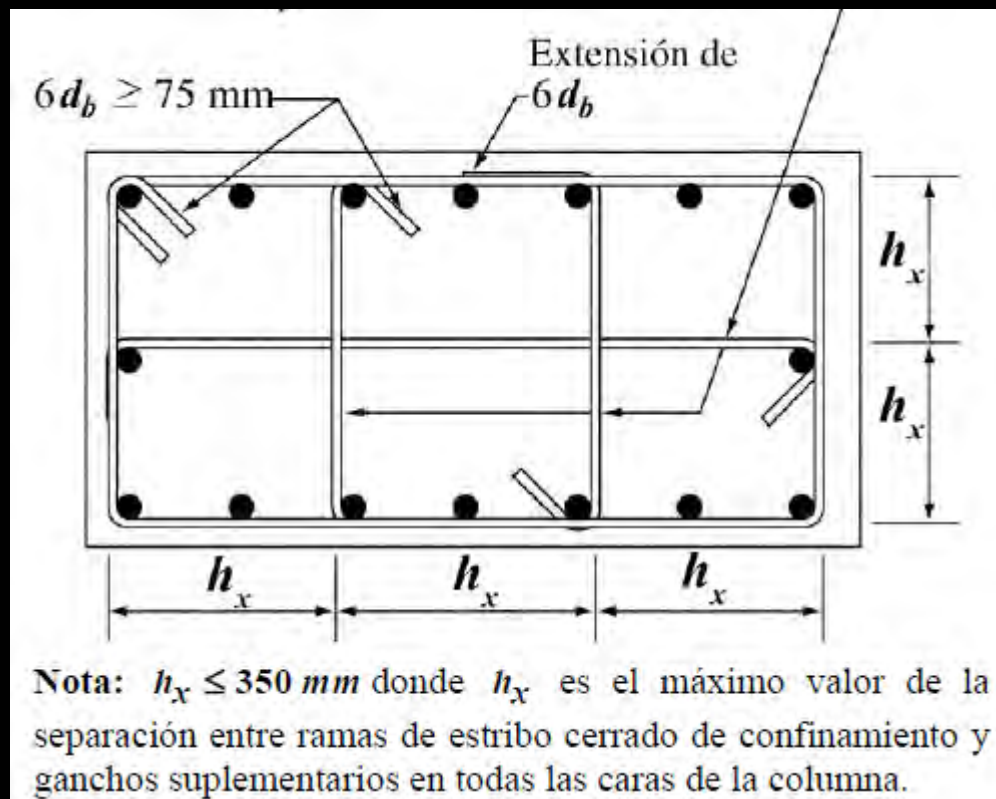
# Modificaciones inmediatas

Si la carga axial en muros es menor que  $0.25 f_c' A_g$ , no es necesario confinar los bordes en los muros, pero debe restringirse el pandeo de las armaduras longitudinales.

Las armaduras transversales que amarran las armaduras verticales que están a menos de  $0.15 l_w$  de los bordes deben tener un espaciamiento menor que seis veces el diámetro de la barra que amarran.

# Modificaciones inmediatas

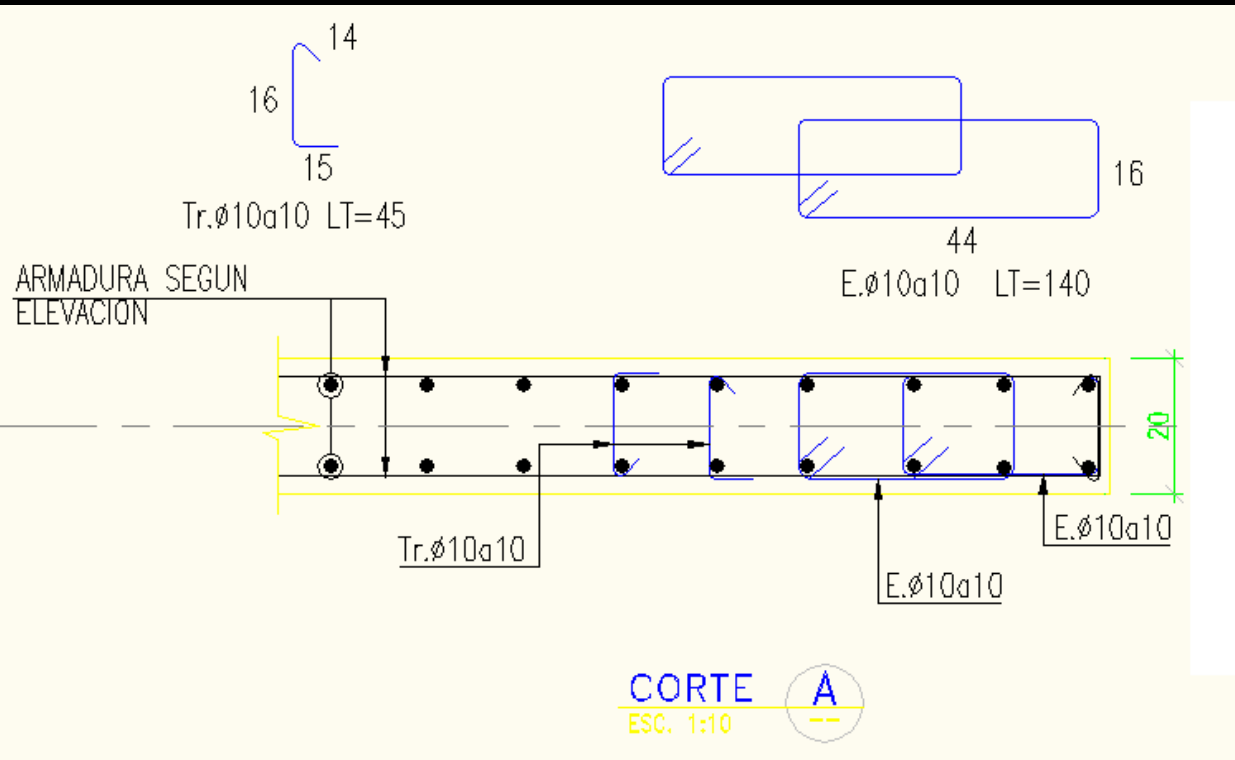
Todos los ganchos de estribos y amarras de confinamiento deben ser a 135 grados.





# Confinar así

# No confina



# Modificaciones inmediatas

Si la carga axial es mayor que  $0.25 f_c' A_g$  es necesario verificar la capacidad de deformación y confinar donde se esperen acortamientos unitarios en el hormigón mayores que 0.004.

Un método simplificado para decidirlo está en el ACI318-08, Art.21.9.6.2.

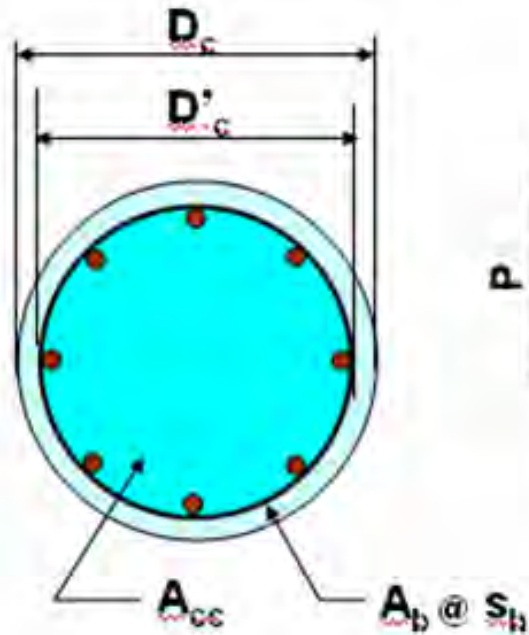
# Modificaciones inmediatas

Si la carga axial es mayor que  $0.25 f_c' A_g$  es necesario verificar la capacidad de deformación y confinar donde se esperen acortamientos unitarios en el hormigón mayores que 0.004.

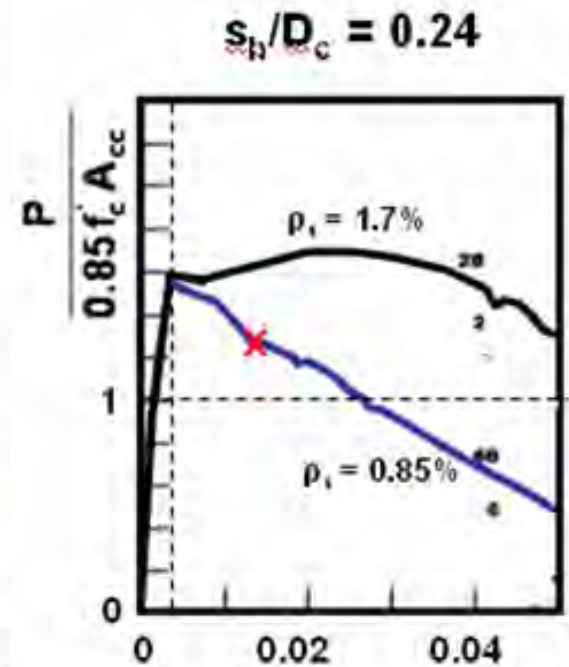
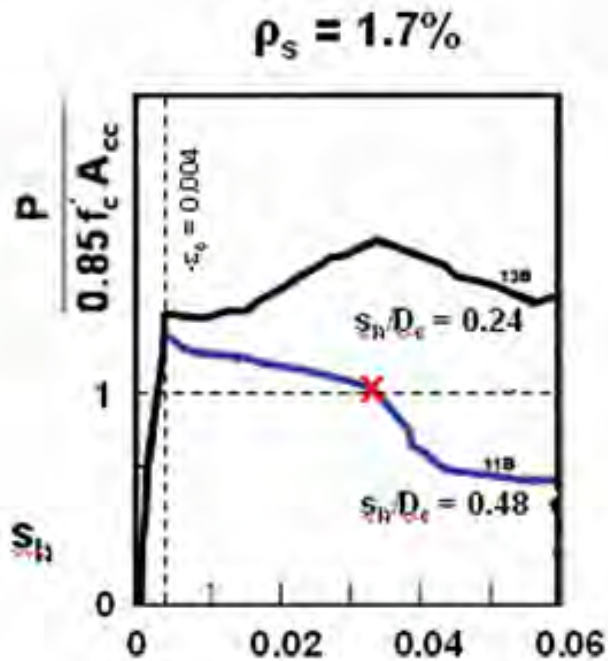
Si no se hace, se obtienen diseños muy frágiles, con fallas a desplazamientos relativos menores que 0.007



# Cantidad de armadura de confinamiento y espaciamiento

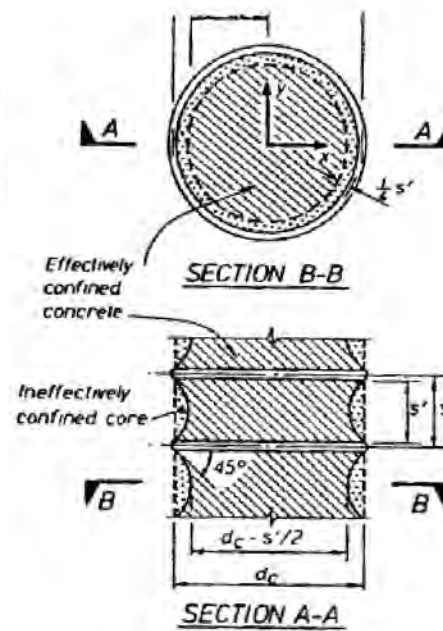
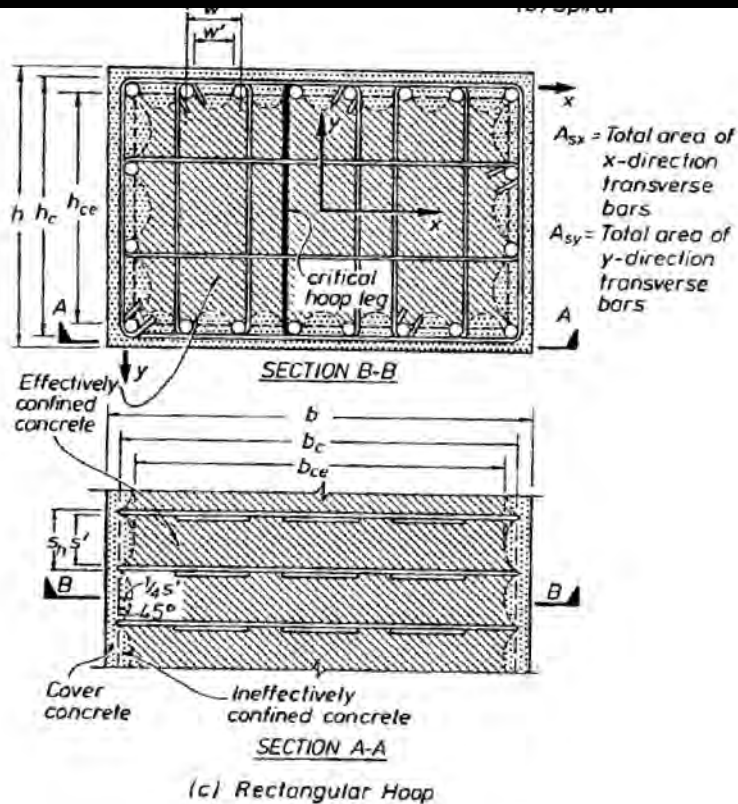


Cuantía volumétrica:

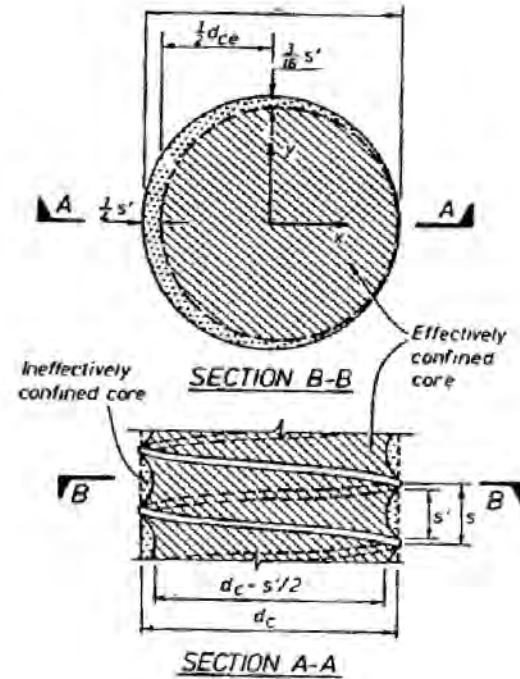


# Cantidad de armadura de confinamiento

## Comportamiento del Concreto – Eficiencia de la Sección Confinada

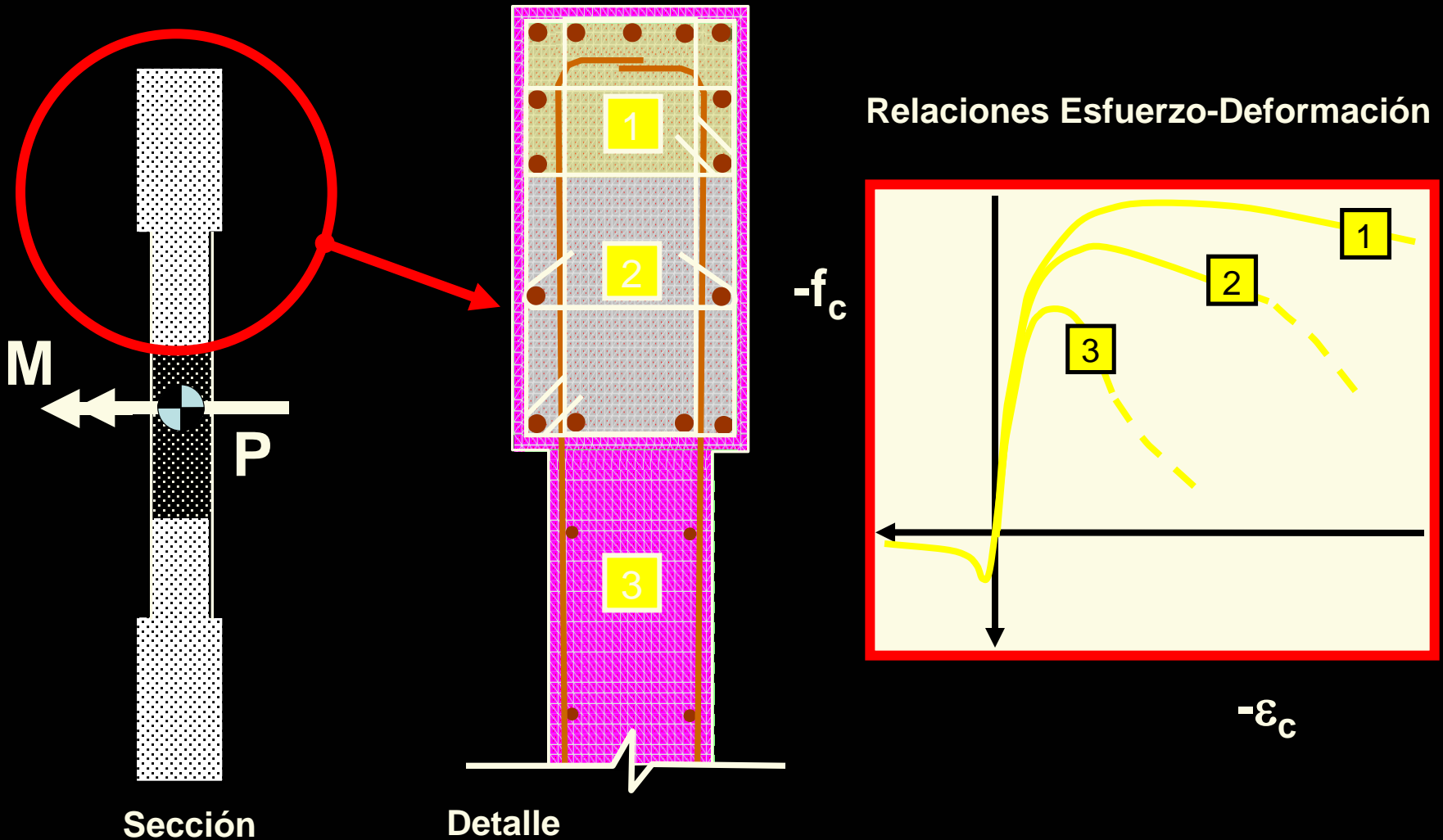


(a) Circular Hoop



(b) Spiral

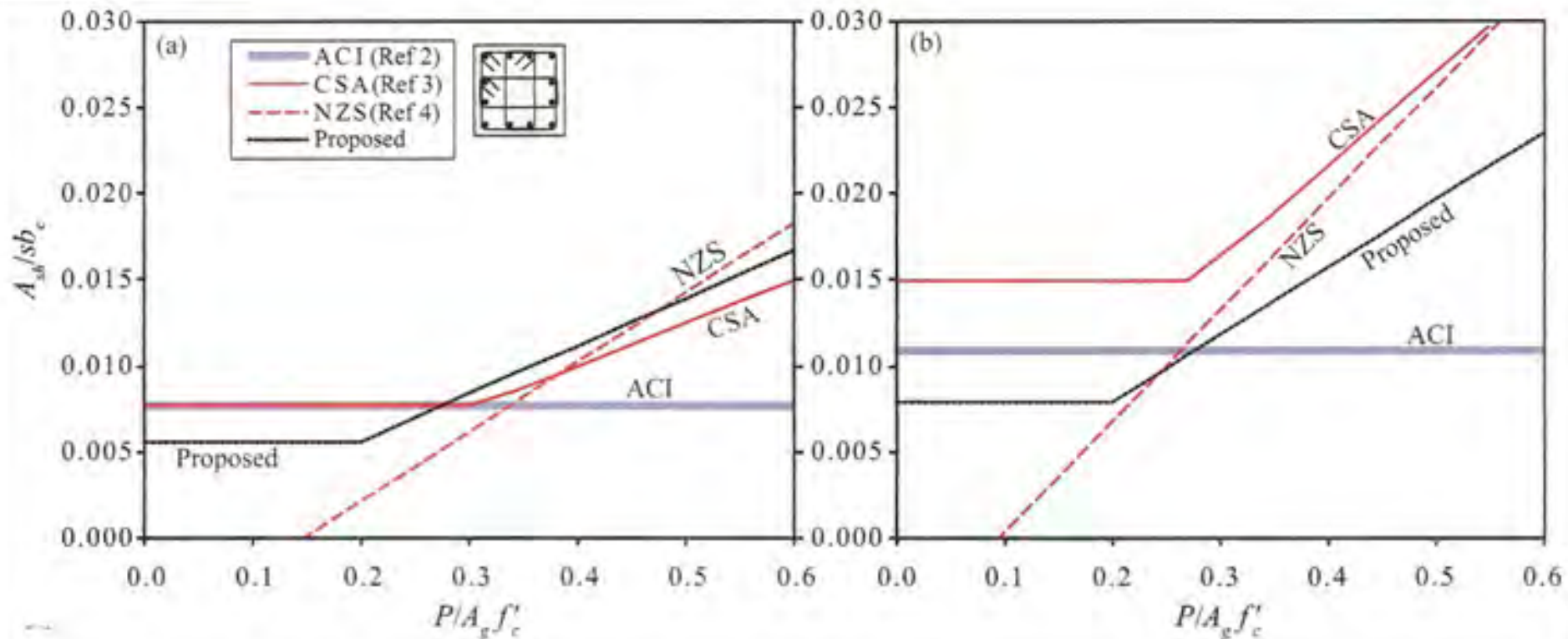
# Cantidad de armadura de confinamiento





# Modificaciones propuestas al ACI318-08

## Concrete International, nov-dic 2009.



# Modificaciones propuestas para el ACI318

Aplicar diseño por capacidad para determinar la carga axial y el corte en muros, considerando el efecto de acoplamiento de las losas.

# Modificaciones inmediatas

Agregar restricciones de esbeltez para evitar el pandeo transversal del elemento de borde y el panel

Para ello estudiar recomendaciones de la norma neozelandesa y canadiense



# Modificaciones inmediatas NCh433

Ya está escrito el borrador de la nueva NCh433.

Revisar espectros de desplazamientos.

Evitar aumentar la resistencia suministrada en zonas críticas, aumenta las demandas.

Estudiar el efecto de la resistencia en la demanda de desplazamientos.

Se introduce un Apéndice que permite el diseño por desplazamientos

# Modificaciones de emergencia a la NCh433Of.96

Se sustituyen los espectros de diseño por los contenidos en la norma de aislación basal NCh2745.

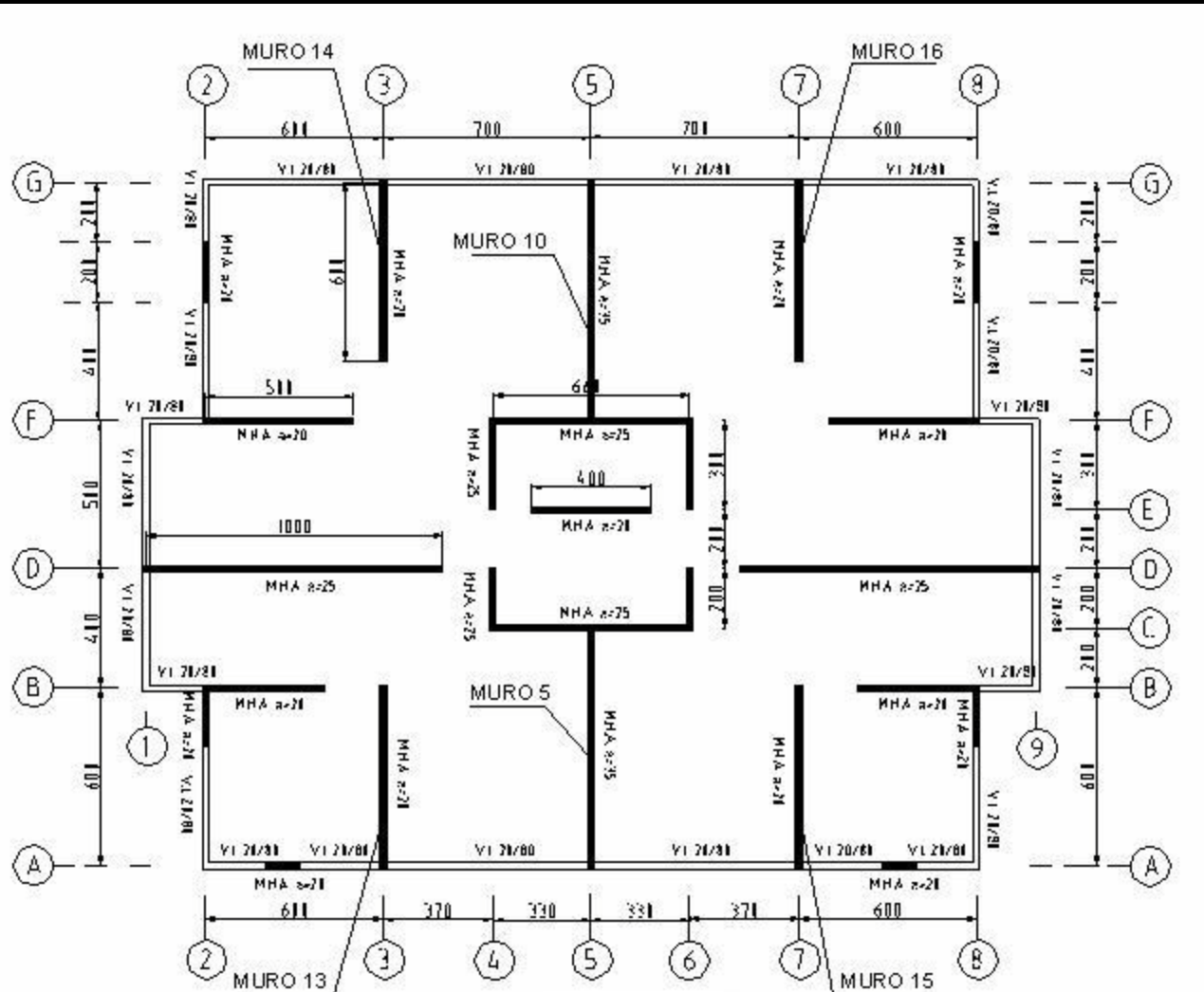
Se introduce el término  $C_d$  del ASCE7-05 para calcular los desplazamientos de diseño,  $C_d$  se toma igual al factor de reducción de respuesta resultante.

Se limita la deriva de diseño a 0.01 para lograr un buen desempeño.

Efecto de la resistencia en los desplazamientos y en los daños

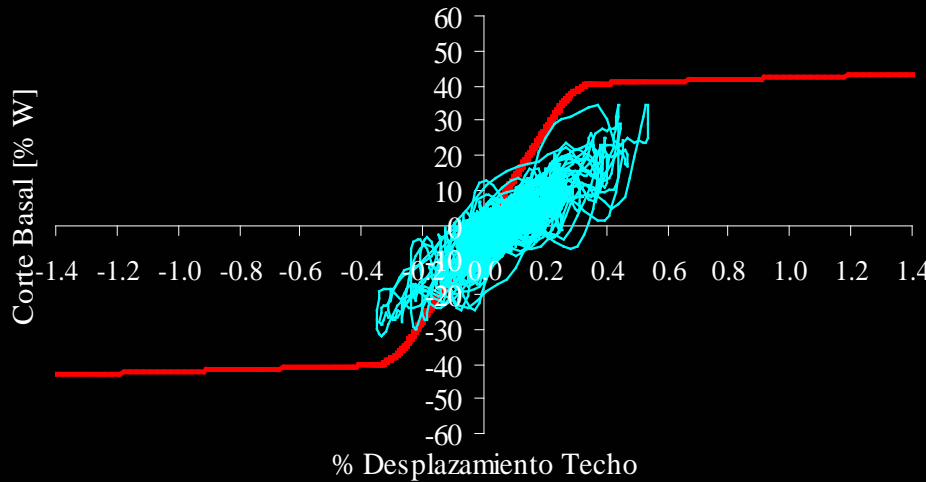


# PLANTA PISO Tipo Edificio de doce pisos

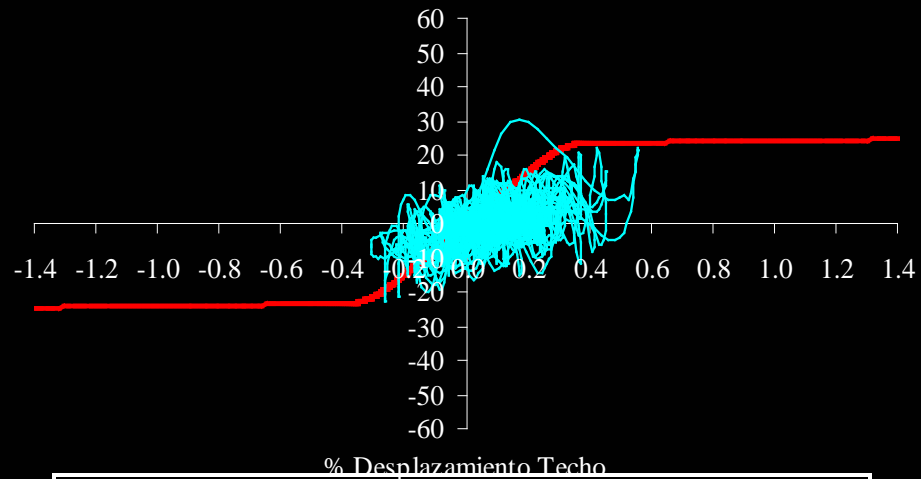


# ***Demanda global de resistencia***

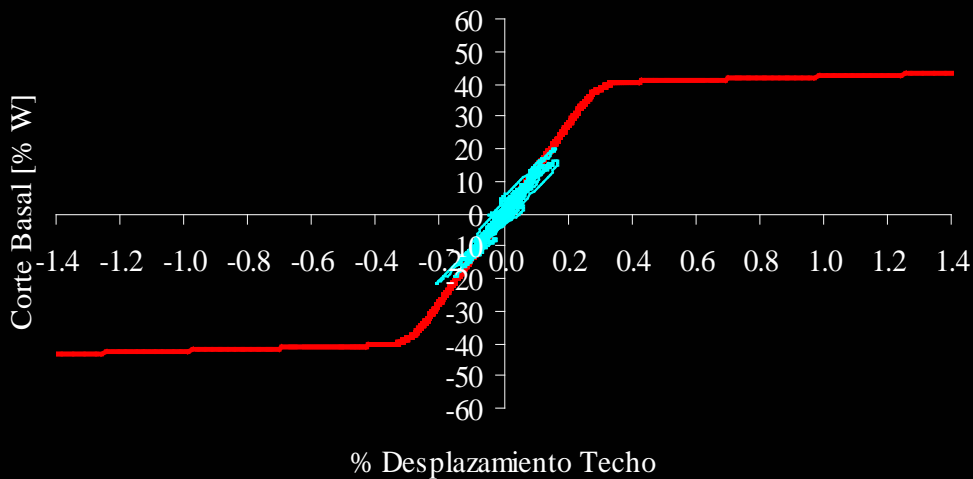
VIÑA S20W E1



VIÑA S20W E2



MÉXICO E1

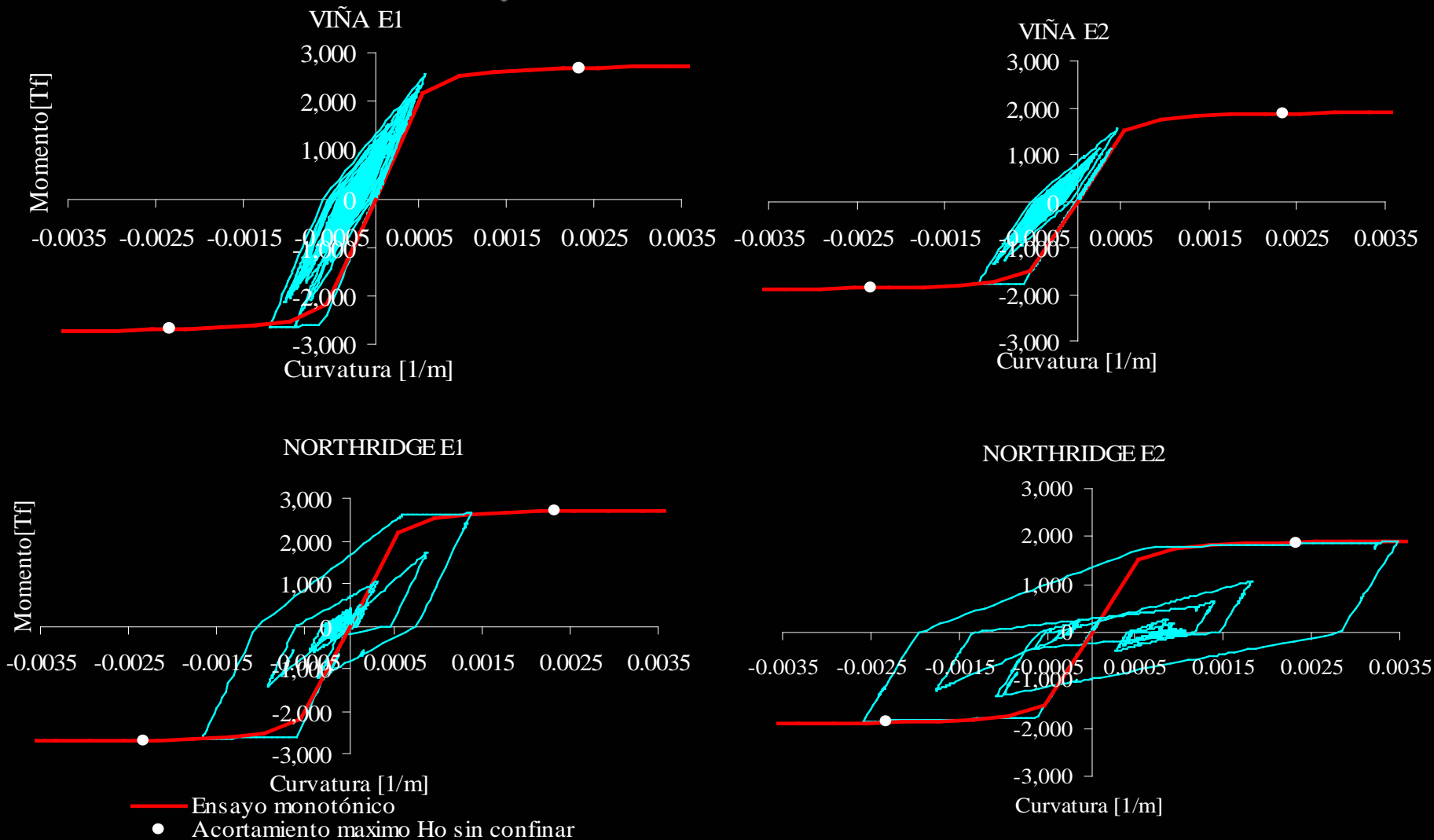


Registro	Diseño según NCh433.Of96		Diseño por desplazamientos	
	[Tf]	[% W]	[Tf]	[% W]
Viña	2,414	34.56	2,131	30.51
Llolleo	3,695	52.91	3,179	45.52
México	1,504	21.53	1,488	21.31
North.	3,492	50.00	2,582	36.97
Kobe	3,096	44.33	2,715	38.87

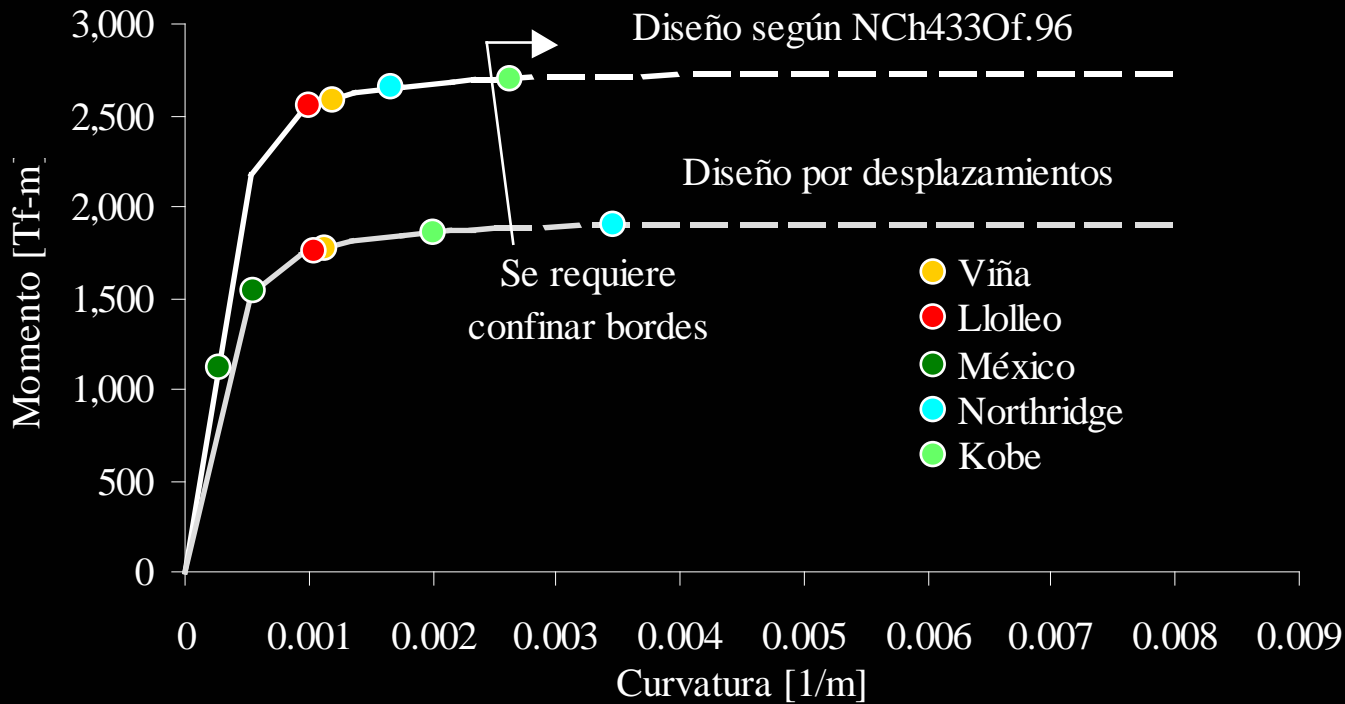
# ***Demanda local en muros rectangulares – 12***

***pisos***

**Historia en el tiempo de Momento-Curvatura en la base**

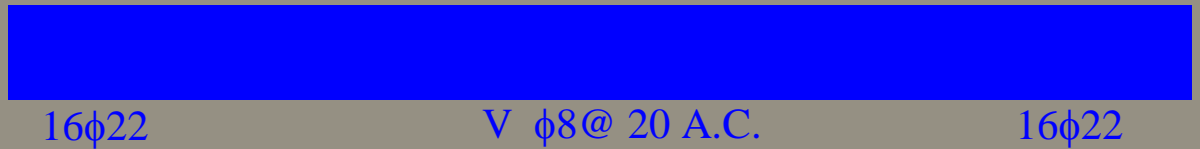




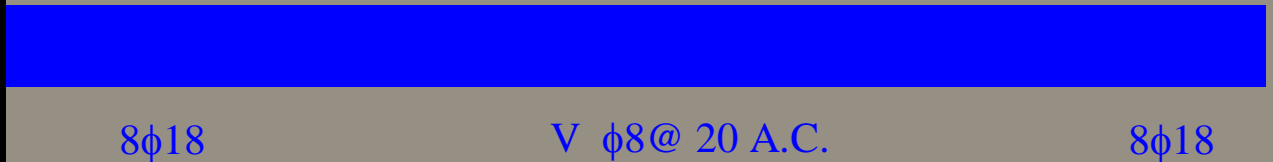


**Muro rectangular edificio de 12 pisos**

Diseño según NCh433Of.96

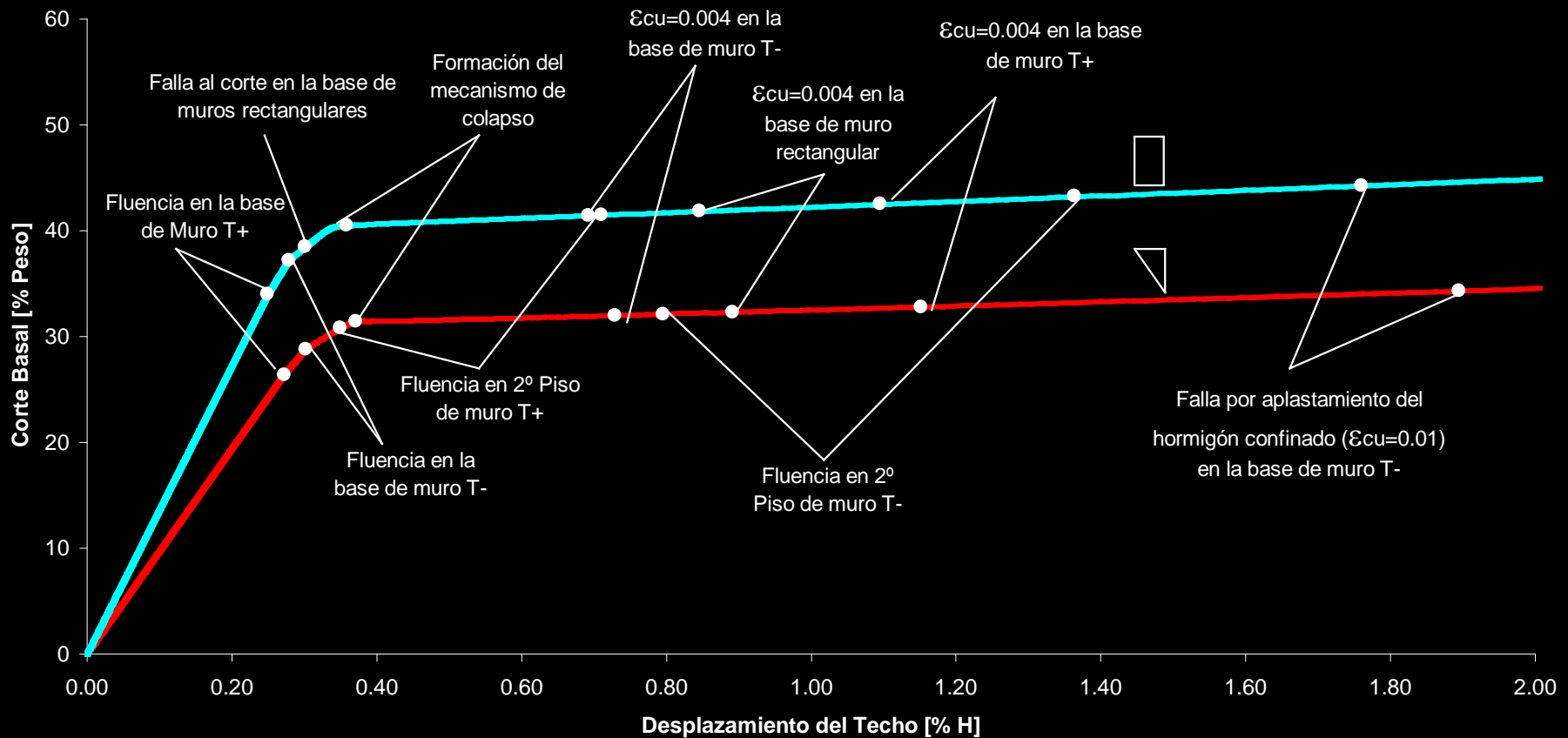


Diseño por desplazamientos



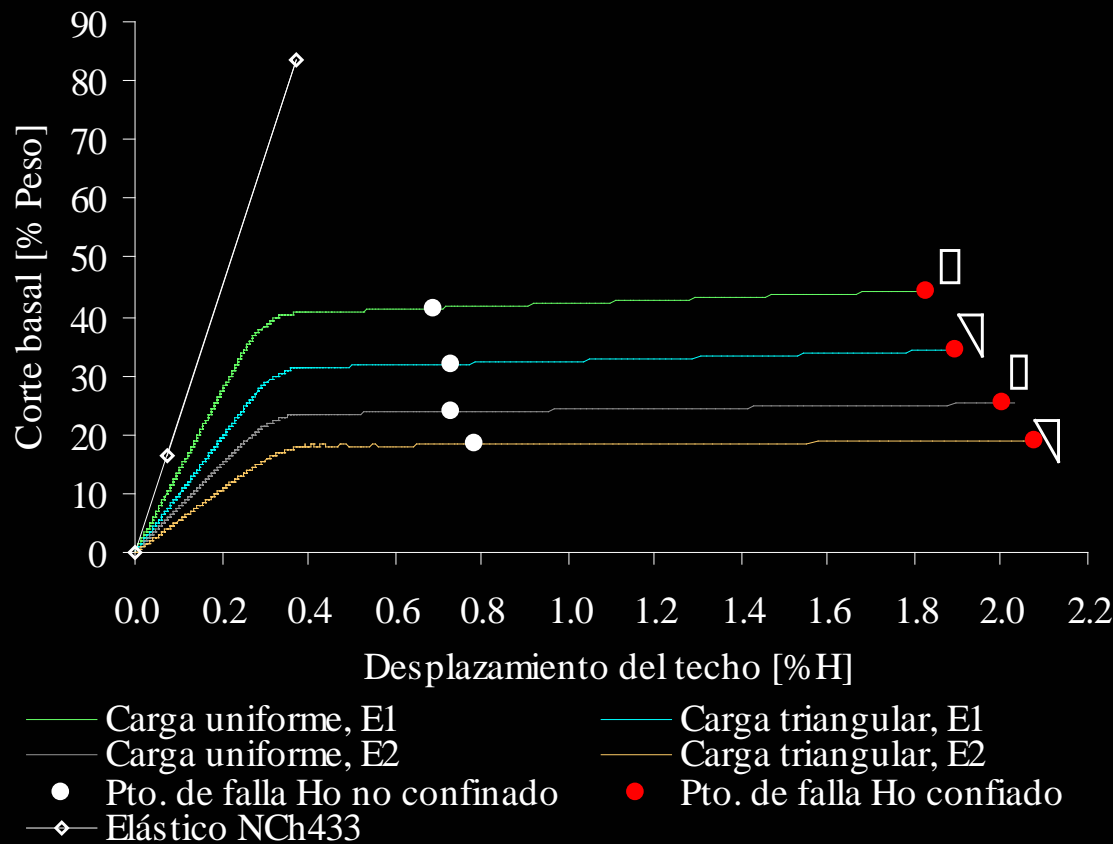
# CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN Y RESISTENCIA

## Edificio de doce pisos



Edificio diseñado según la norma NCh433Of.96

## Edificio de 12 pisos

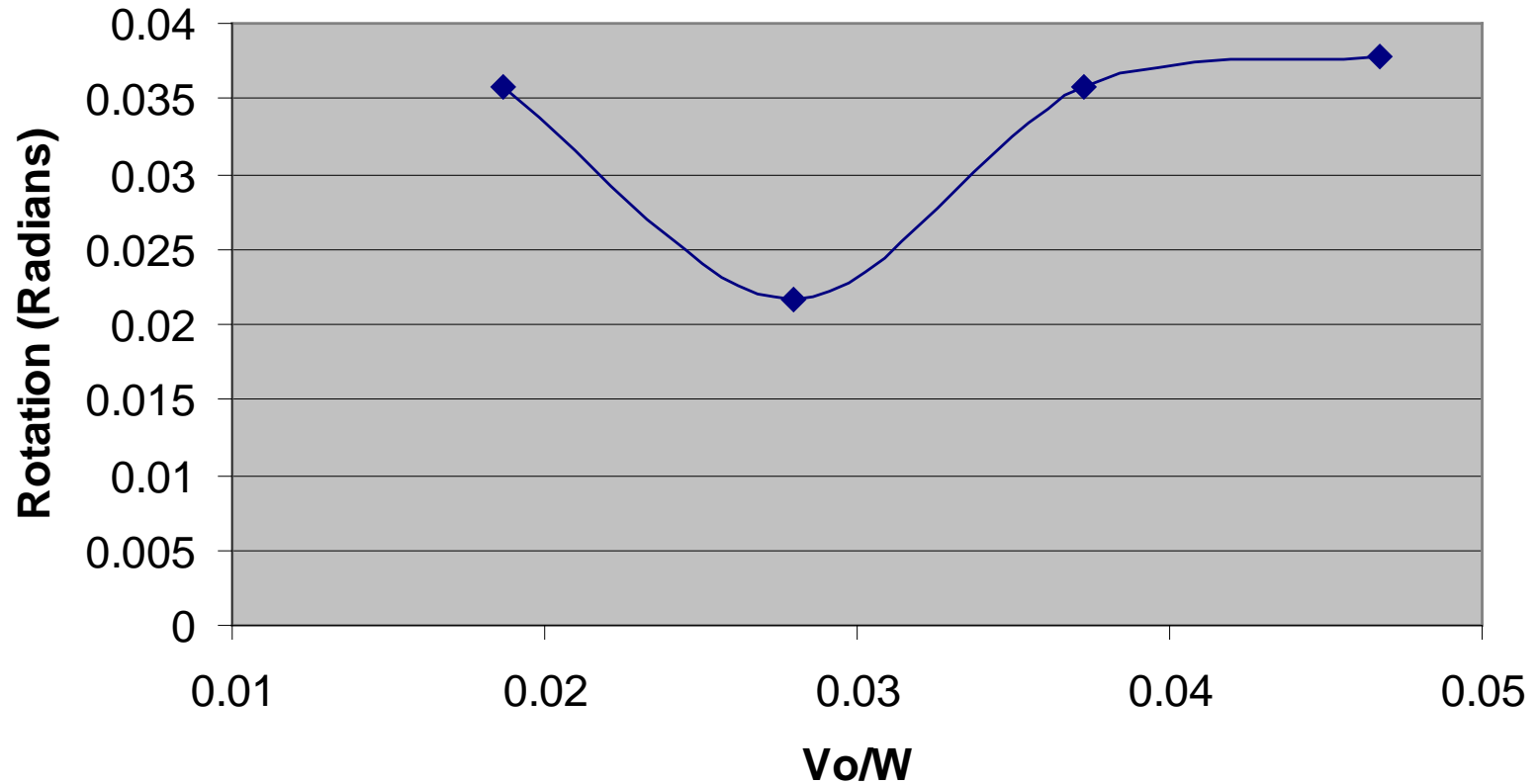


- La capacidad de deformación no cambia con la resistencia.
- Los factores de reducción a la fluencia global son del orden de 2.1 a 2.7 en el diseño con la norma chilena
- En el diseño por desplazamientos resultan entre 3.6 y 4.6.

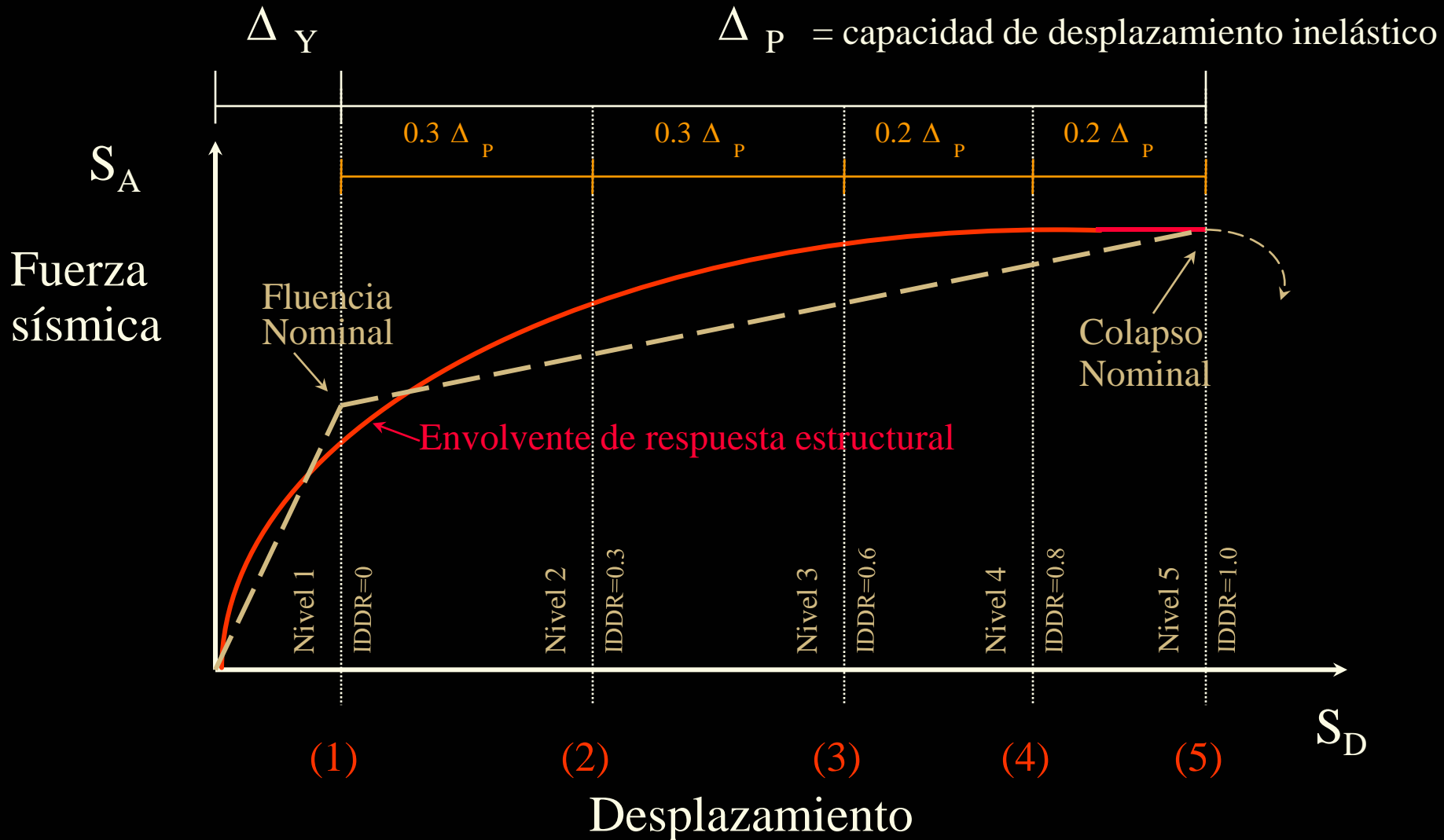
Valor	V <sub>basal</sub> % W	R**
Corte elástico NCh433	83.61	1.00
Corte Reducido NCh433	16.23	5.15
Diseño con NCh433	Triangular	31.40
	Uniforme	40.49
Diseño por desplazamientos	Triangular	18.10
	Uniforme	23.31



## 20-floor concrete frame beam rotation vs base shear coefficient



# Niveles de comportamiento estructural.



(IDDR: índice de demanda de desplazamiento inelástica)

# reflexiones

En el estudio de edificios dañados y en los proyectos de reparación o de refuerzo, los estudios deben ser analíticos, con métodos no lineales, basándose en resultados experimentales.

Los resultados analíticos deben compararse con lo observado y en caso necesario, con nuevos ensayos que confirmen o rechacen las explicaciones propuestas.



# reflexiones

El edificio responde al sismo con la estructura como está construida y con las propiedades de los materiales que tienen en ese instante

Muchas gracias por la atención

*FIN*