



ACIES

Asociación Colombiana de Ingeniería Estructural



Lecciones del terremoto del 2010 y nuevos cambios en el diseño de muros de hormigón armado en Chile

Leonardo Massone, Ph. D.

Profesor Titular

Universidad de Chile

ACIES – 17 Agosto 2022, Colombia

¿Qué aprendimos el 2010?

- 1 día después del Mw 8.8 Chile central 2010
- Gran cantidad de edificios modernos
- Permisos de construcción 1985 – 2009 (CChC)
 - 9.974 edificios ≥ 3 pisos (65% in Santiago)
 - 1.939 edificios HA ≥ 9 pisos



Daño en edificios de HA

- 1 edificio colapsado – Alto Rio (Concepción)
- Pocos (~10) edificios para ser demolidos
- Daño severo (~40) en edificios mayormente modernos (>2000)

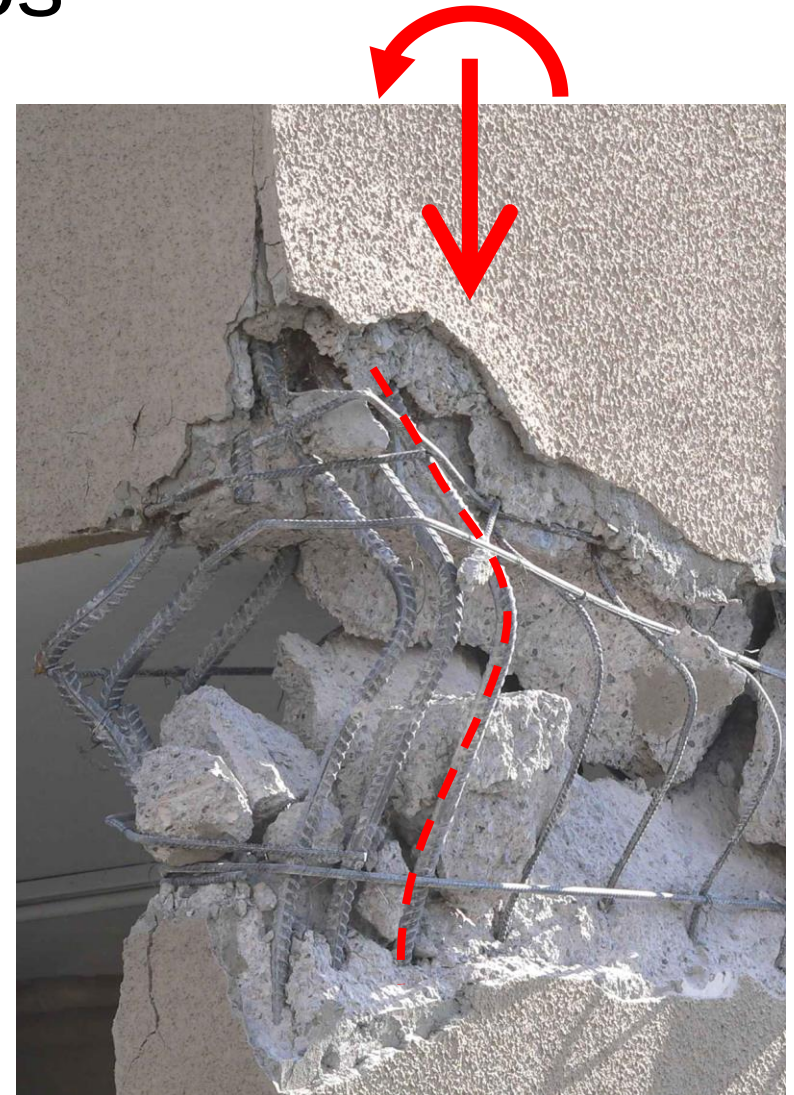


Muros

- Gran nivel de compresión en muros
- Discontinuidades: 1er piso o subterráneo
- Formación de muros en T
- Sin confinamiento en borde de muros



Santiago, 2010



Santiago, 2010

Modelo simple - muros

- Daño – edificio antiguo vs. nuevo
- Ej. EQ San Pedro, 2% amort., dir. Fuerte (GUC, 2010)

Sup.:

-lw=5m

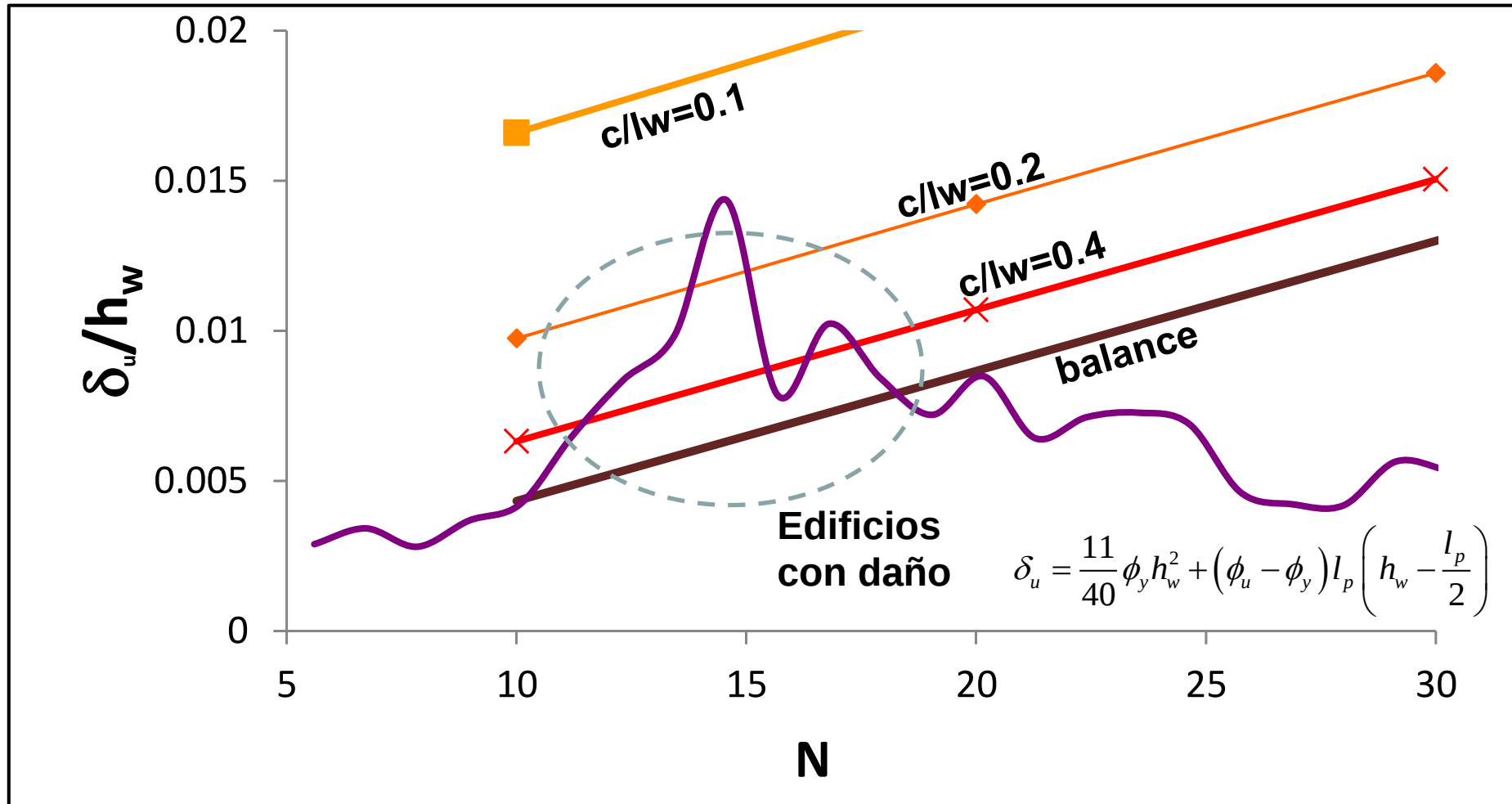
-dh = 2.5m

-Tcr=hw(m)/70*1.5

- $\Delta = S_d \cdot 1.5$

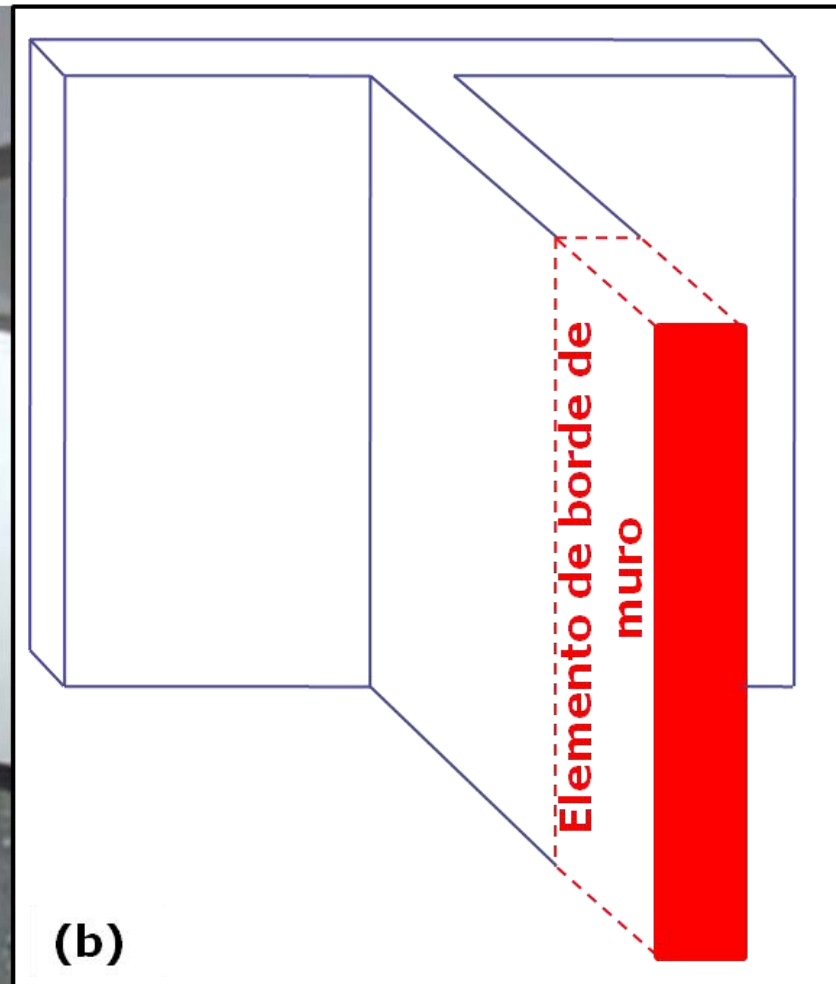
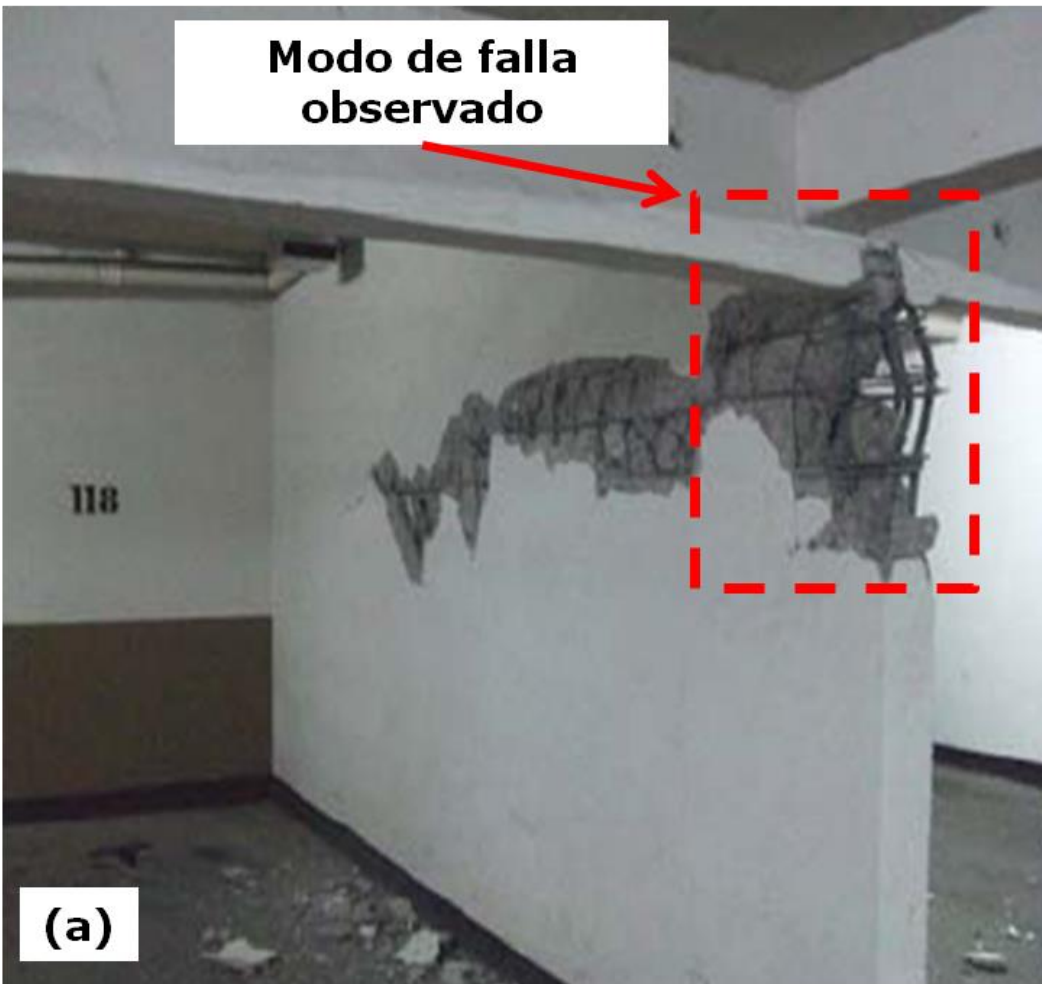
- d = dy + dp

- $\phi_u = 0.003/c$

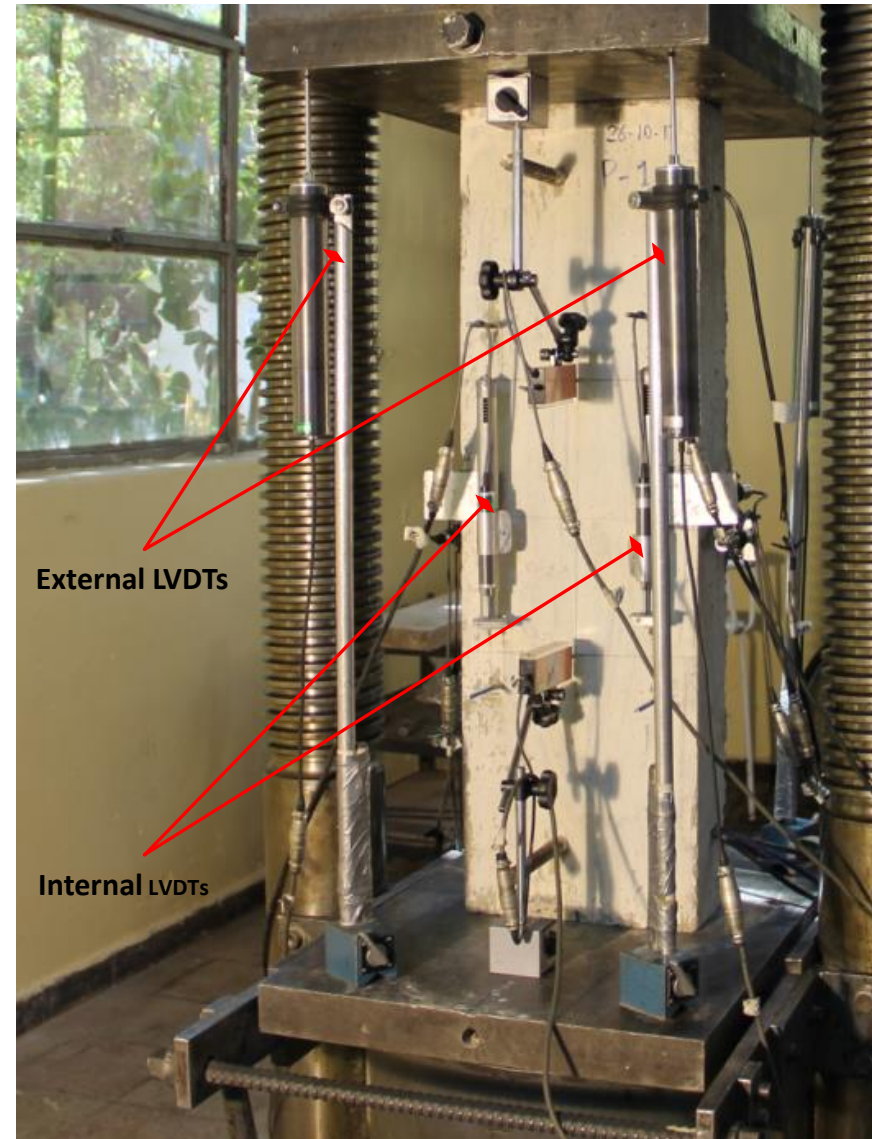


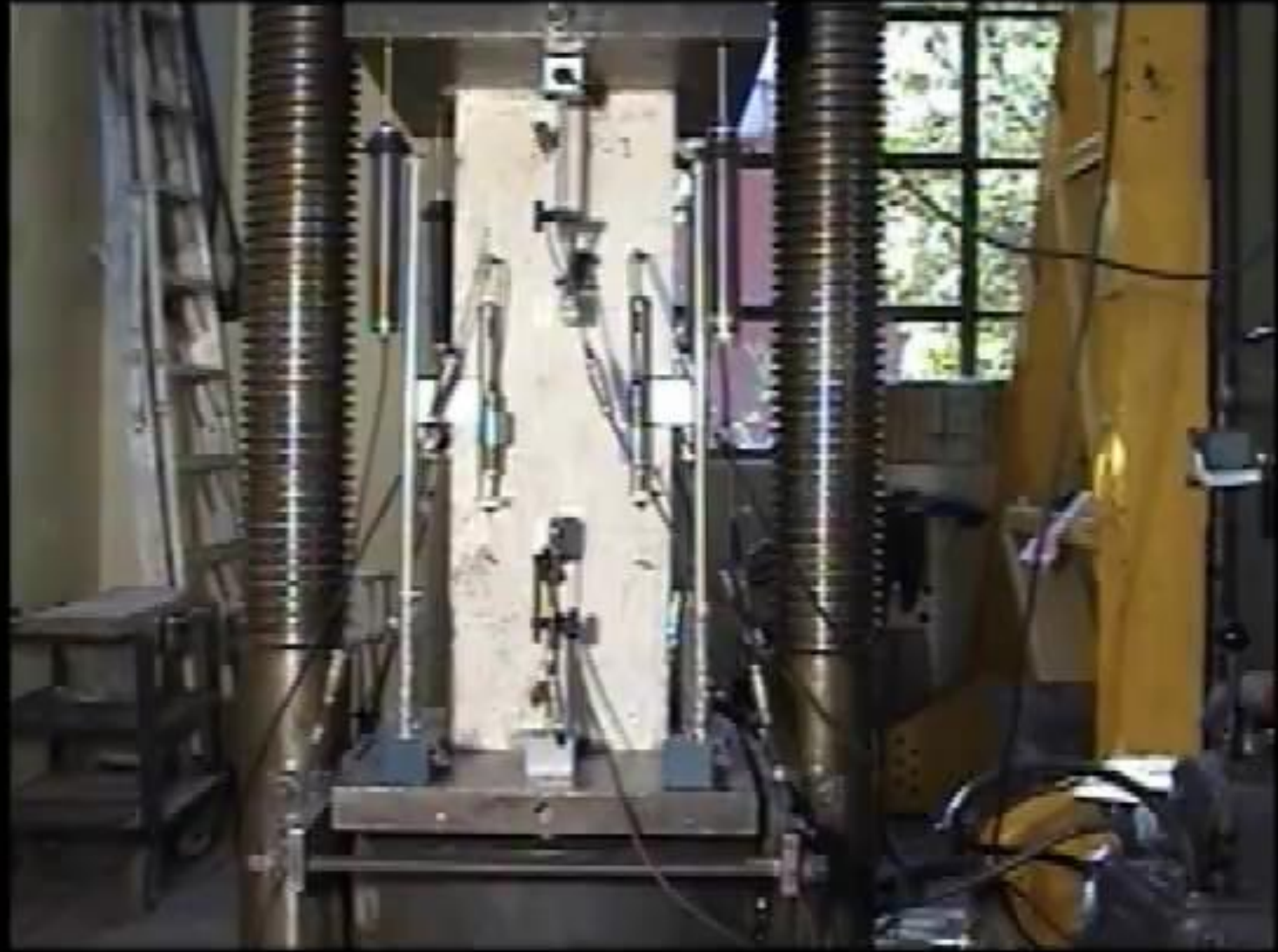
Comportamiento del Borde de Muro

Elemento de Borde



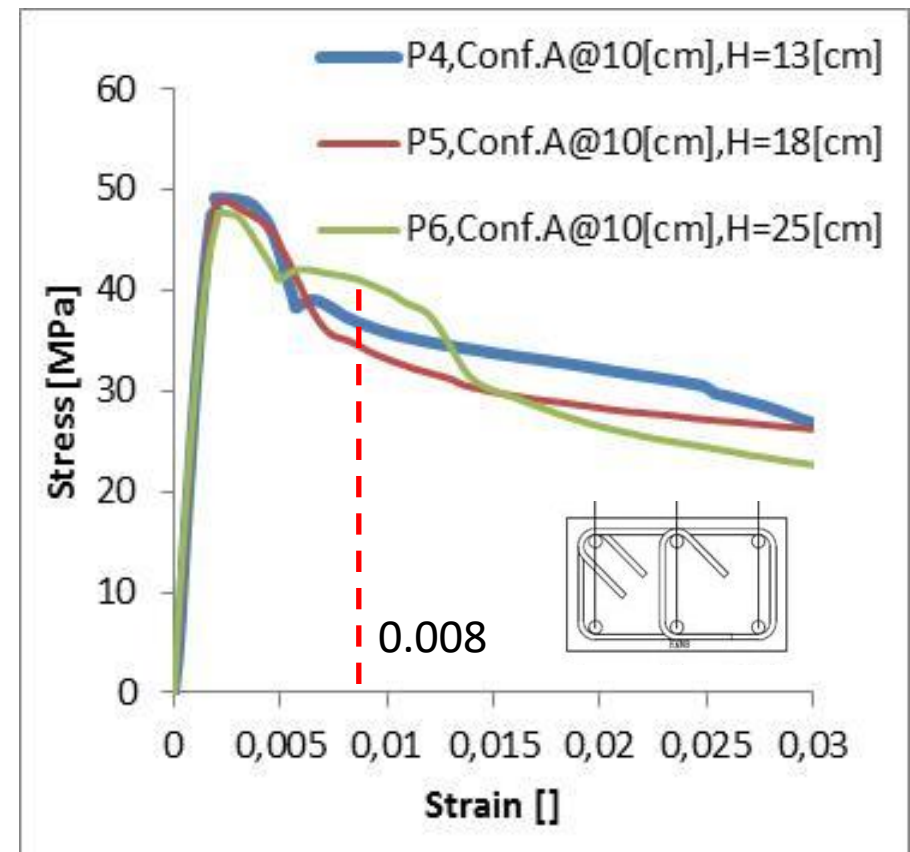
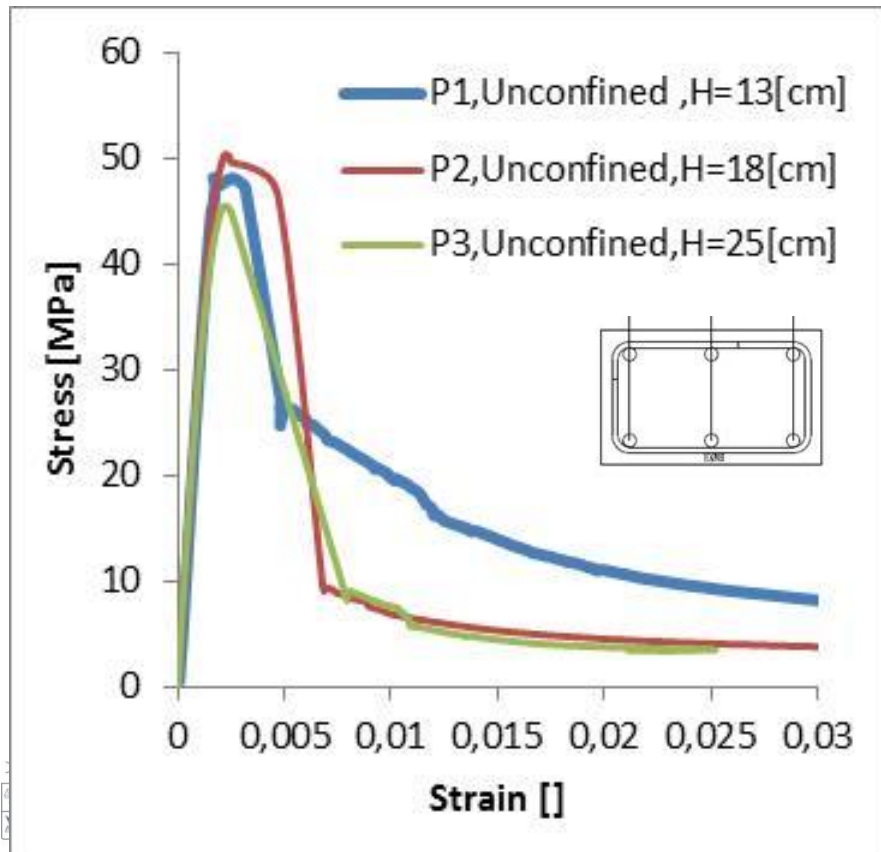
Montaje del Ensayo





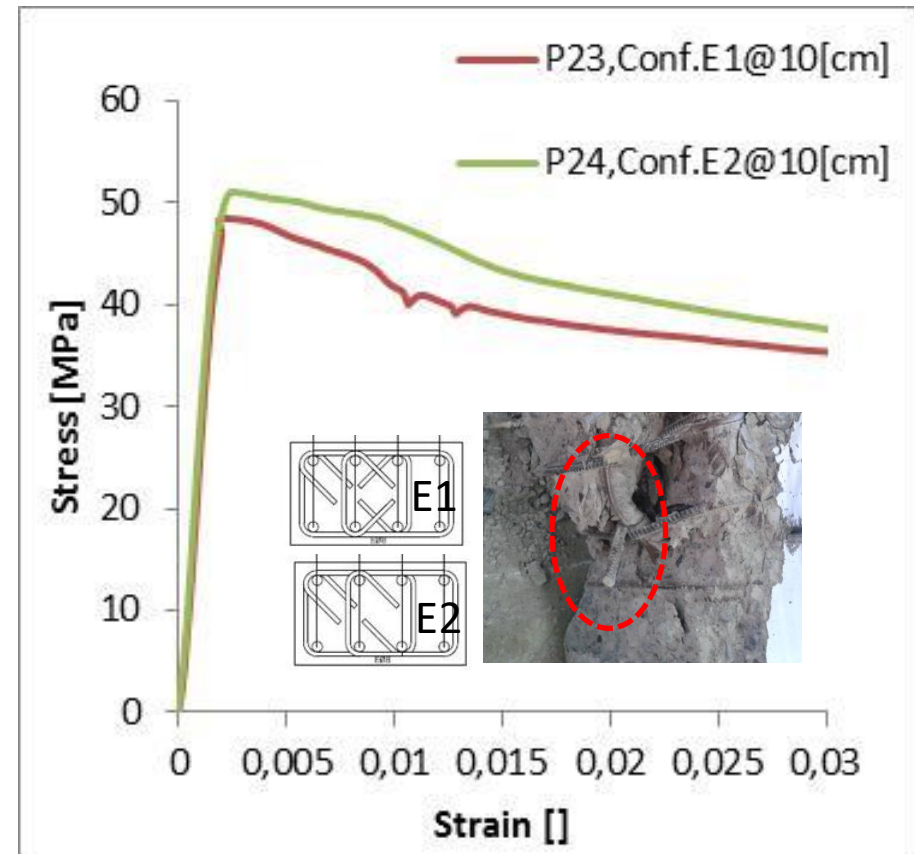
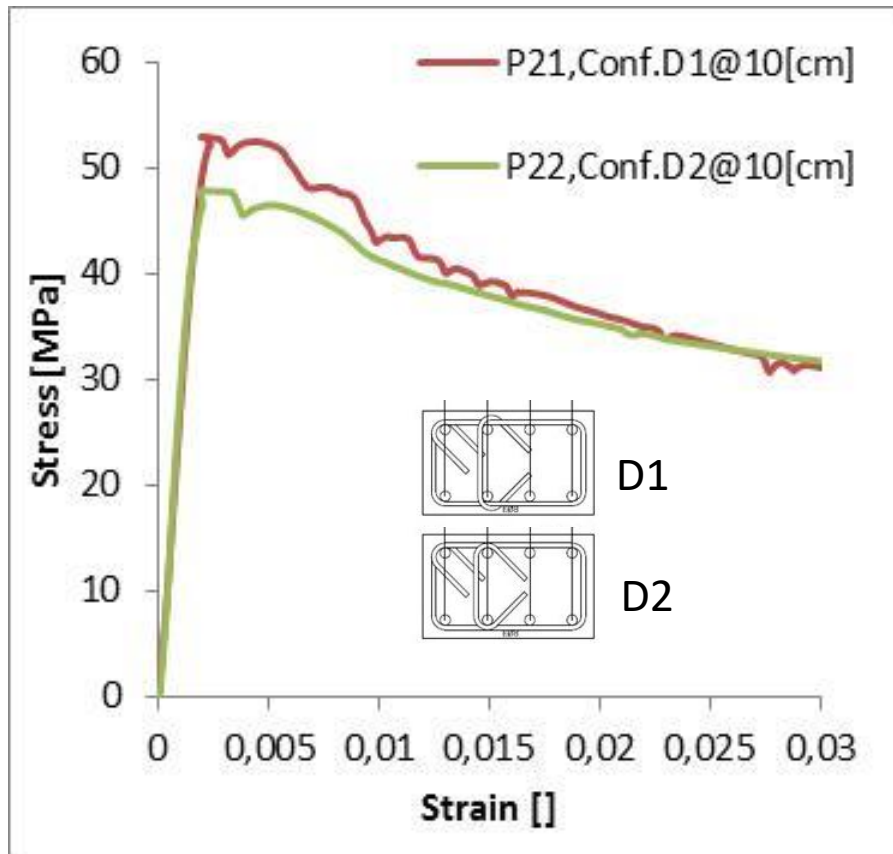
Efecto del Confinamiento

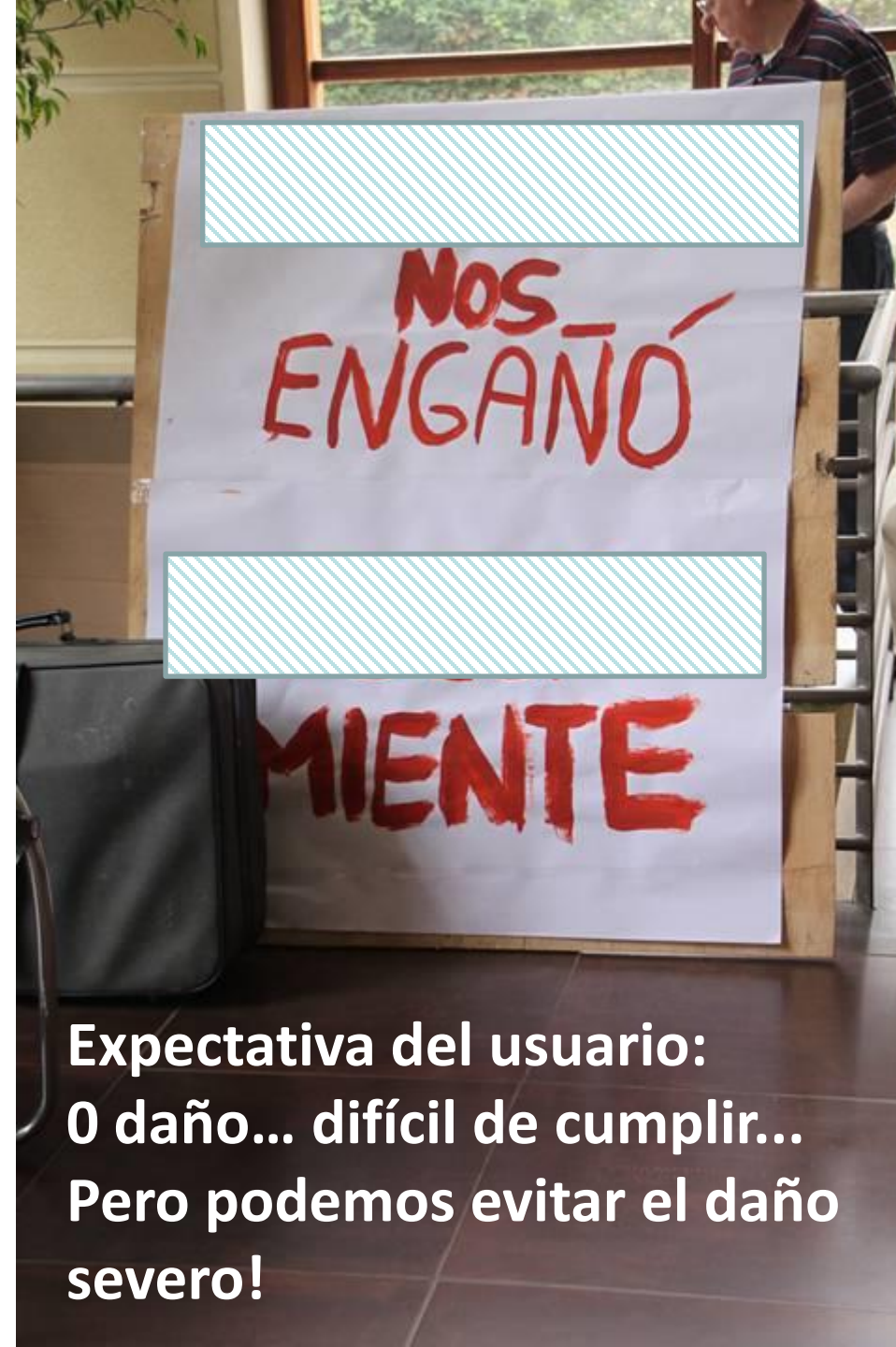
- Confinamiento aumenta la ductilidad
- Deformación medida en zona de daño



Características del Detallamiento

- ¿Amarro el estribo con el gancho? ¿Uso solo gancho 135°?
- Bajo efecto para sección pequeña (sección ~2:1)





**Expectativa del usuario:
0 daño... difícil de cumplir...
Pero podemos evitar el daño
severo!**

**Relevancia del
diseño y
no la resistencia**



Flexo-compresión en muros

- 1. Evitar falla frágil por flexo-compresión
 - Confinamiento si $\varepsilon_c > 0.003$ (similar a ACI 318)
 - Confinamiento adecuado - espesor $> 300\text{mm}$ y largo mínimo
 - “c” incorpora efecto asimetría
- 2. Limitar daño flexo-compresión ($\varepsilon_c \leq 0.008$)
 - Limitación directa e indirecta de carga axial
 - Daño menor en edificios antiguos (menor carga axial)
 - “c” incorpora efecto asimetría
- 3. Minimizar pandeo/fractura por tracción-compresión en barras
 - Uso de trabas si cuantía armadura long. $> 2.8/f_y$ (zona basado sólo en cuantía $\neq C_c$)

Conclusiones - 2010

- ¿Qué tenemos?
 - ✓ Confinamiento para deformaciones sobre 0.003
 - ✓ Evitar pandeo ($s \leq 6d_b$)
 - ✓ Limitar daño por compresión ($\epsilon_c \leq 0.008$)
- ¿Qué falta?
 - ✗ Efecto elongación de refuerzo
 - ✗ Estimación de deformación elástica e inelástica?
 - ✗ Acoplamiento, etc.
 - ✗ Discontinuidades
 - ✗ Amplificación dinámica
 - ✗ Corte, etc....



¿Qué hemos aprendido en estos últimos 10 años?

Contribuciones – NCh 430

- F. Rojas
- M. Lafontaine
- A. Holmberg
- R. Perez
- J. Carvallo
- M. Kupfer
- C. Luders
- I. Watt
- P. Bonelli
- C. Delporte
- C. Sepúlveda
- M. Baeza
- M. Saavedra
- P. Quintana
- M. Hube
- H. Santa María
- P. Parra
- A. Larraín
- C. Magna
- F. Yáñez
- R. Lagos
- L. Bresci

Ductilidad de Muros

Muros - Diseño sísmico

- **Detallamiento de armadura de confinamiento de borde**
 - **Mejora capacidad de desplazamiento (ACI 318-19)**

- **Cumplir con espesor, O**

$$b \geq \sqrt{0.025cl_w}$$

- **Límite de degradación de capacidad**

$$\delta_c/h_w = \frac{1}{100} \left(4 - \frac{1}{50} \frac{l_w}{b} \frac{c}{b} - \frac{V_u}{0.67 \sqrt{f'_c} A_{cv}} \right) \geq \textcolor{red}{1.5} \delta_u/h_w$$

$$\delta_c/h_w \geq 0.015$$

- **Confinamiento y pandeo barras (adicional)**

- **Todas las barras de borde apoyadas**
- **Toda armadura distribuida vertical (alma) apoyada en zona crítica**
- **Separación armadura transversal max. 300 mm ($\phi_{\min 10}$)**
- **Capacidad a compresión en losa** $f'_{c,losa_borde} \geq 0.7 f'_{c,borde}$

Muros - Diseño sísmico

- **Detallamiento de armadura de confinamiento de borde**
 - Mejora capacidad de desplazamiento (ACI 318-19)

- Cumplir con espesor, **o**

$$b \geq \sqrt{0.025cl_w}$$

- ~~Límite de degradación de capacidad~~

$$\delta_c/h_w = \frac{1}{100} \left(4 - \frac{1}{50} \frac{l_w}{b} \frac{c}{b} - \frac{V_u}{0.67 \sqrt{f'_c} A_{cv}} \right) \geq 1.5 \delta_u/h_w$$

$$\delta_c/h_w \geq 0.015$$

?

- **Confinamiento y pandeo barras (adicional)**



- **Todas las barras de borde apoyadas**



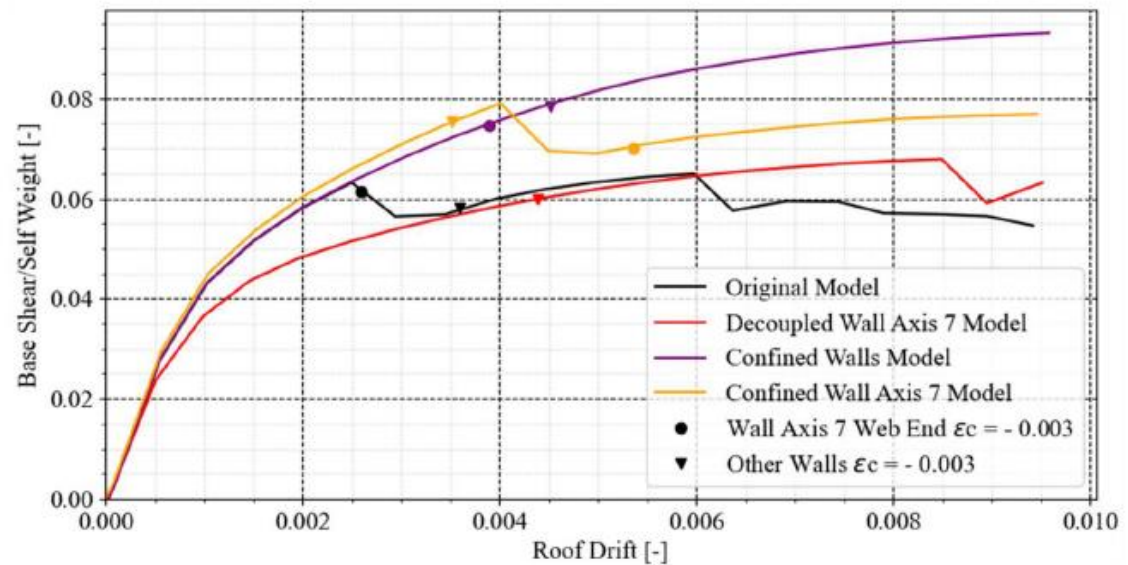
- **Toda armadura distribuida vertical (alma) apoyada en zona crítica**

- Separación armadura transversal max. 300 mm (ϕ_{min10})

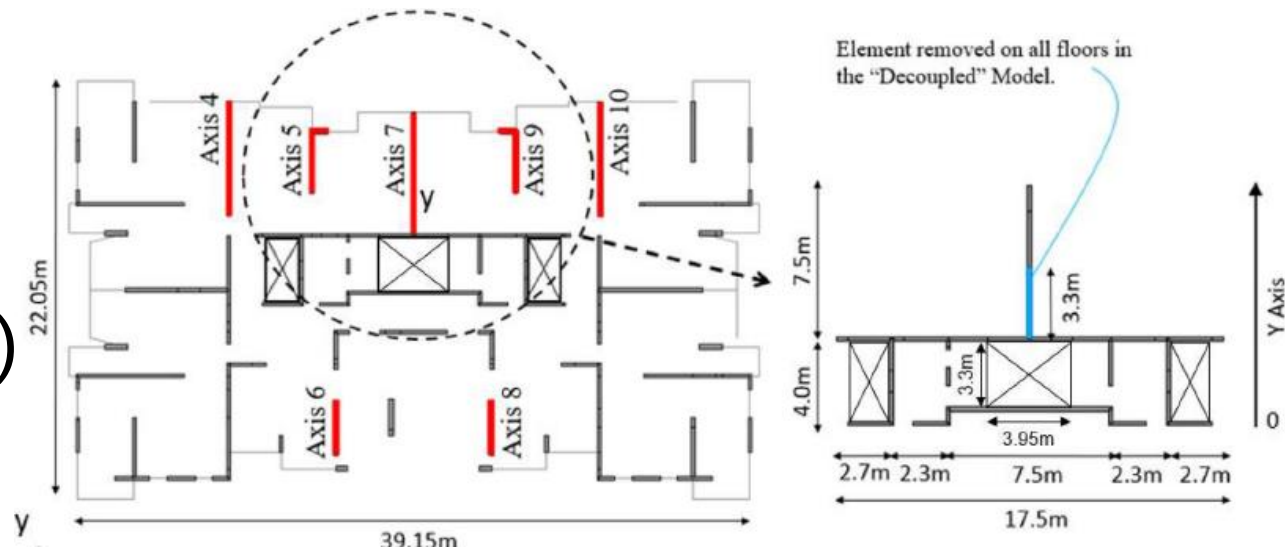
- Capacidad a compresión en losa $f'_{c,losa_borde} \geq 0.7 f'_{c,borde}$

Edificio con respuesta no lineal

- 23+2 pisos
- Daño 1er piso
- Borde no confinado
- Muro largo y acoplado
- Demanda estimada $\sim 0.3\%$
(registro Maipú)



Massone et al., 2021



Muros - Diseño sísmico

- **Detallamiento de armadura de confinamiento de borde**
 - Mejora capacidad de desplazamiento (ACI 318-19)

- Cumplir con espesor, **O**

$$b \geq \sqrt{25cl_w}$$

- Límite de relación de capacidad

$$\delta_c/h_w = \frac{1}{100} \left[4 - \frac{1}{b} \left(\frac{1}{0.6/\sqrt{f'_c}} - 1 \right) \right] \geq 1.5 \delta_u/h_w$$

$$\delta_c/h_w \geq 0.015$$

- **Confinamiento y pandeo barras (adicional)**



- **Todas las barras de borde apoyadas**



- **Toda armadura distribuida vertical (alma) apoyada en zona crítica**

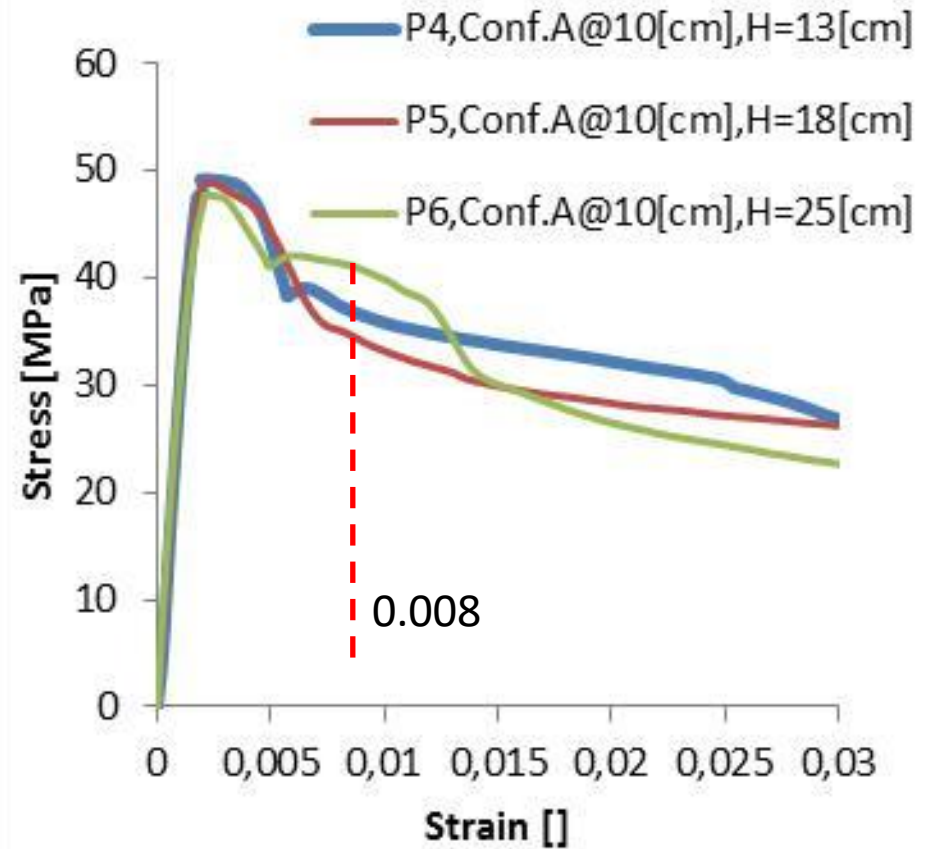
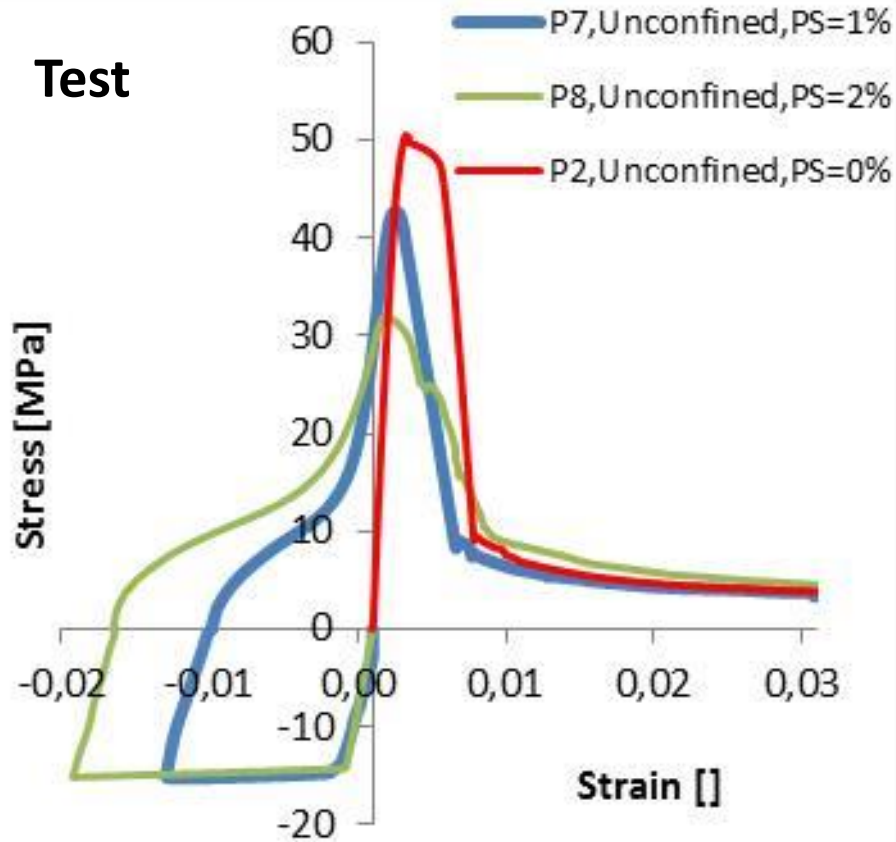
- Separación armadura transversal max. 300 mm (ϕ_{min10})

- Capacidad a compresión en losa $f'_{c,losa_borde} \geq 0.7 f'_{c,borde}$

Comportamiento del Borde de Muro

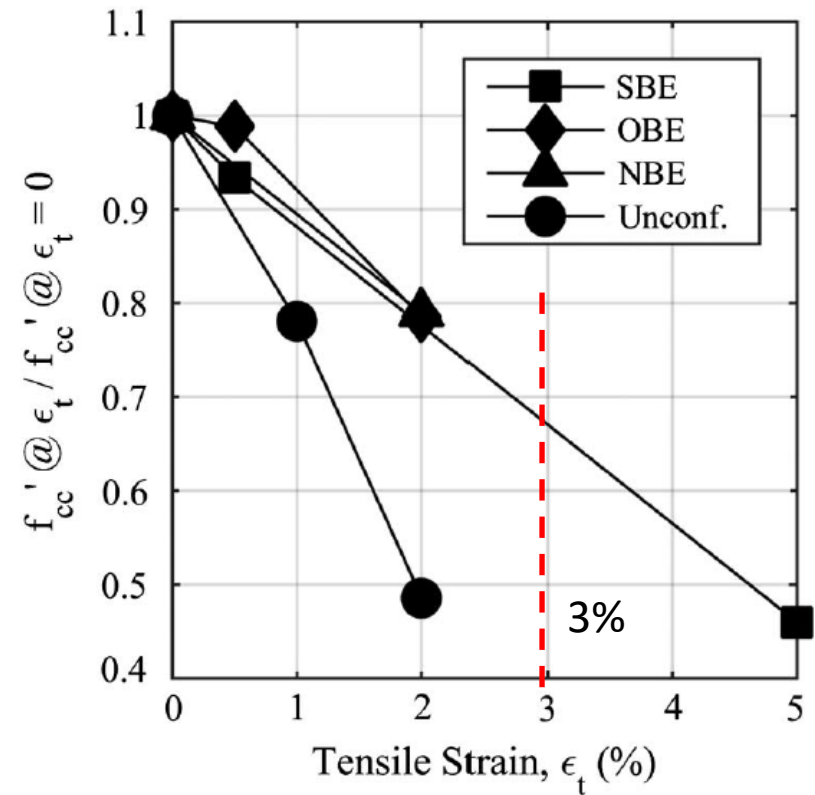
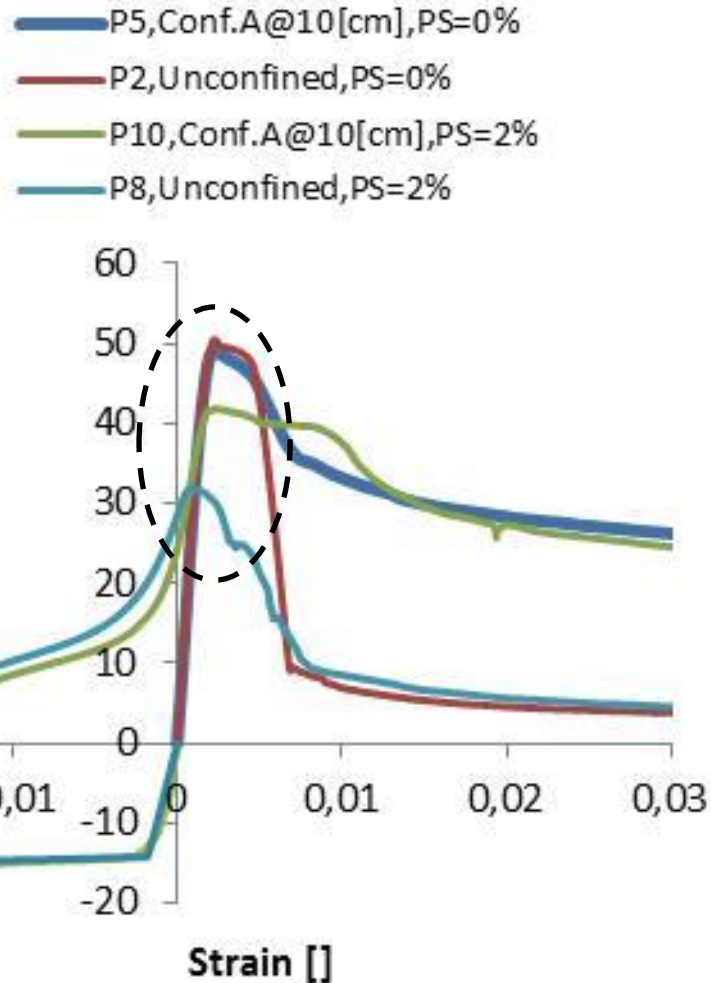
Pre-tracción & confinamiento

Test



Pre-tracción

Test



Limitación al daño en muros

Deformación unitaria máxima

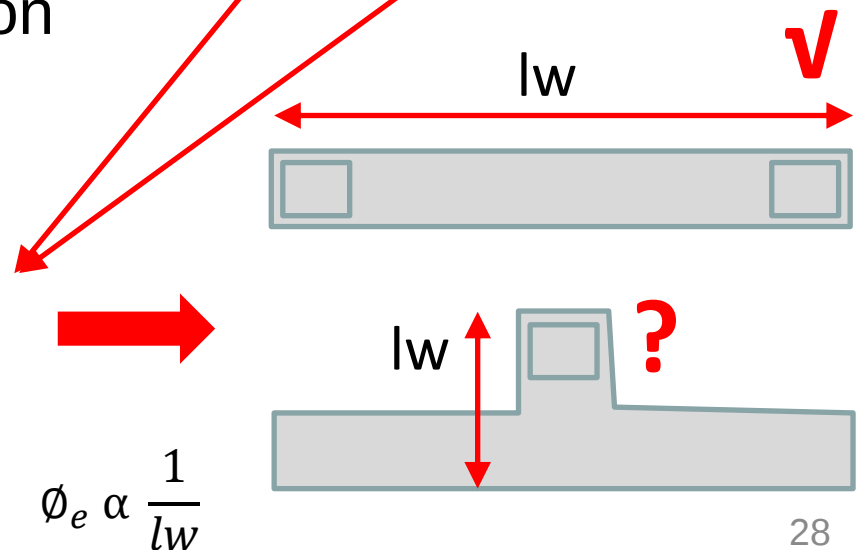
- Confinamiento
 - Confinar borde con deformaciones sobre 0.3%
- Daño por compresión
 - Limitación del 0.8%
- Daño por tracción
 - Limitación del 3% (limitación del pandeo y fractura por fatiga)
- **Cálculo de deformaciones permite incluir componente elástica (recomendaciones)**

$$\varepsilon_c = \frac{2\delta_u c}{H_t l_w} \leq 0.008$$

$$\varepsilon_c = \left(\frac{\delta_u - \delta_e}{l_p (H_t - l_p/2)} + \phi_e \right) c \leq 0.008$$

$$\varepsilon_s = \frac{2\delta_u (l_w - \bar{c})}{H_t l_w} \leq 0.03$$

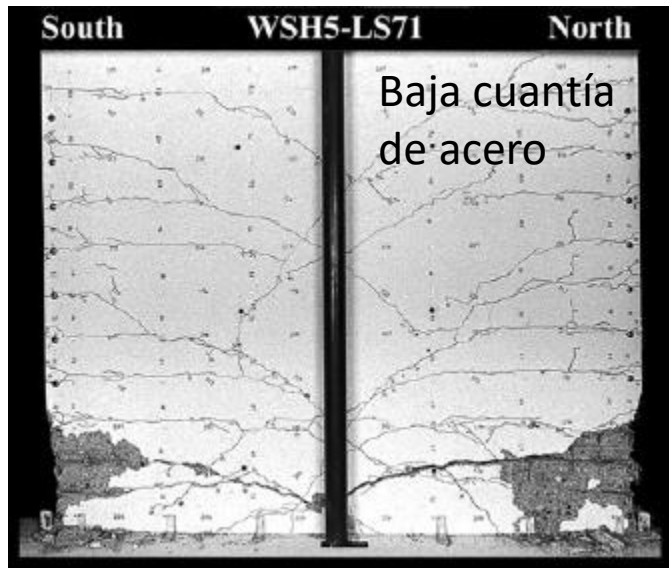
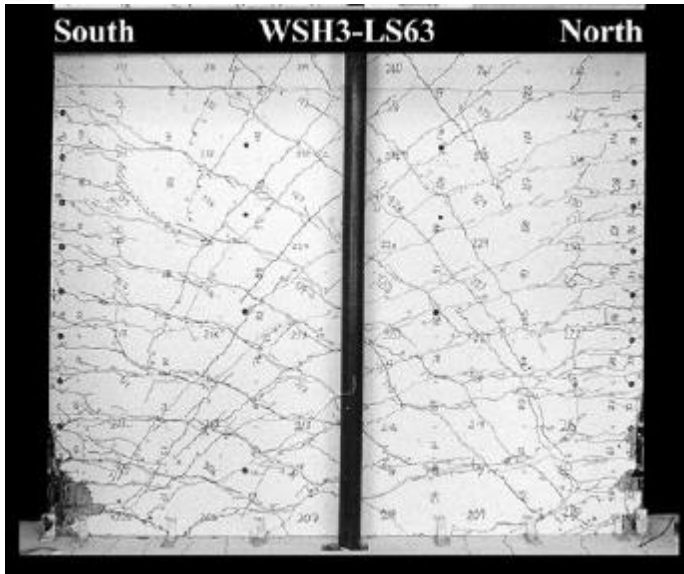
$$\varepsilon_s = \left(\frac{\delta_u - \delta_e}{l_p (H_t - l_p/2)} + \phi_e \right) (l_w - \bar{c}) \leq 0.03$$



Rótula Plástica

Ensayo

Edificio



Dazio et al. (2009)



Sritharan et al., 2014 (Christchurch, 2011)

Modelo vs Propuesta

$$\phi_u = \phi_y + \frac{(\delta_u - \widetilde{\delta}_y)}{\beta l_p \left(h_w - \frac{l_p}{2} \right)}$$

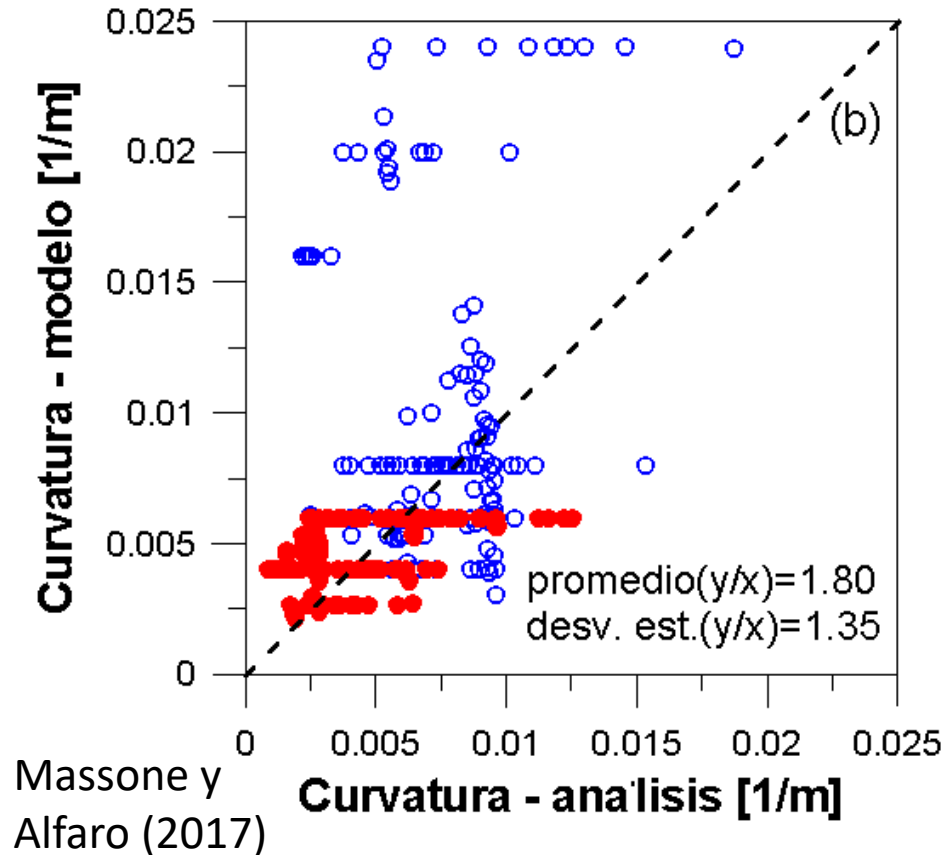
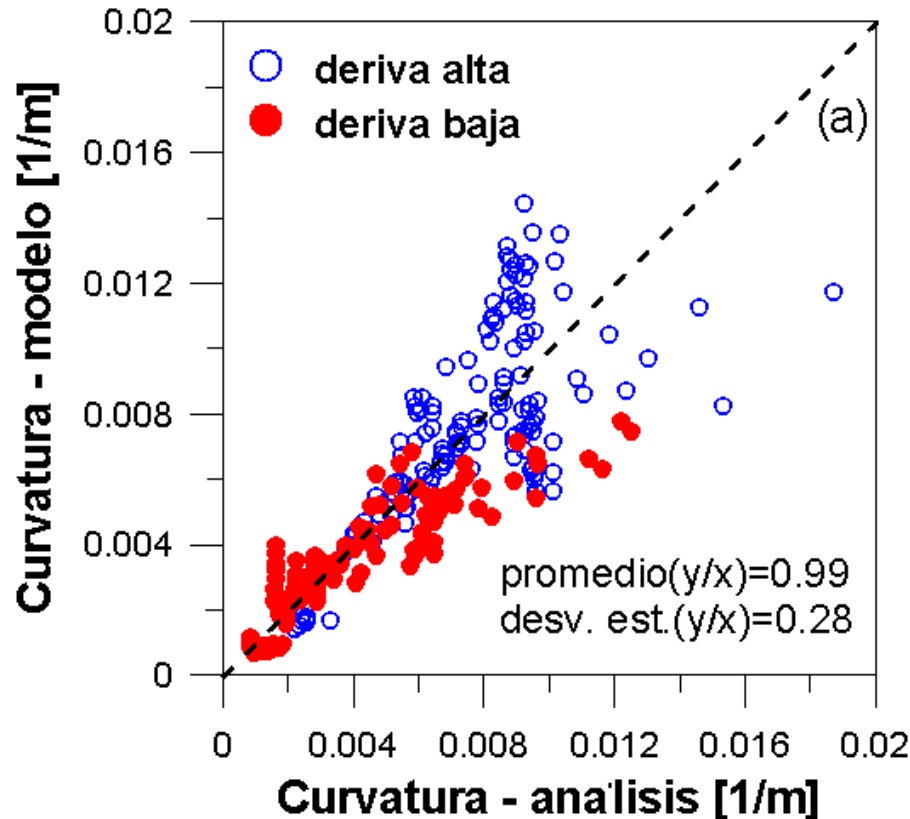
$$l_p = (0.2l_w + 0.05z) \left(1 - \frac{1.5P}{f'_c A_g} \right) (6.7\Delta_p^{0.3})$$

$$\beta = 10(b\rho_b)^{0.42} (1 - (\varepsilon_{sh} - \varepsilon_y)^{0.22})$$



$$\phi_u = \frac{\delta_u}{h_w l_p}$$

$$l_p = l_w / 2$$



Modelo vs Propuesta

$$\phi_u = \phi_y + \frac{(\delta_u - \widetilde{\delta}_y)}{\cancel{A}l_p \left(h_w - \frac{l_p}{2} \right)}$$

$$l_p = 0.3l_w$$

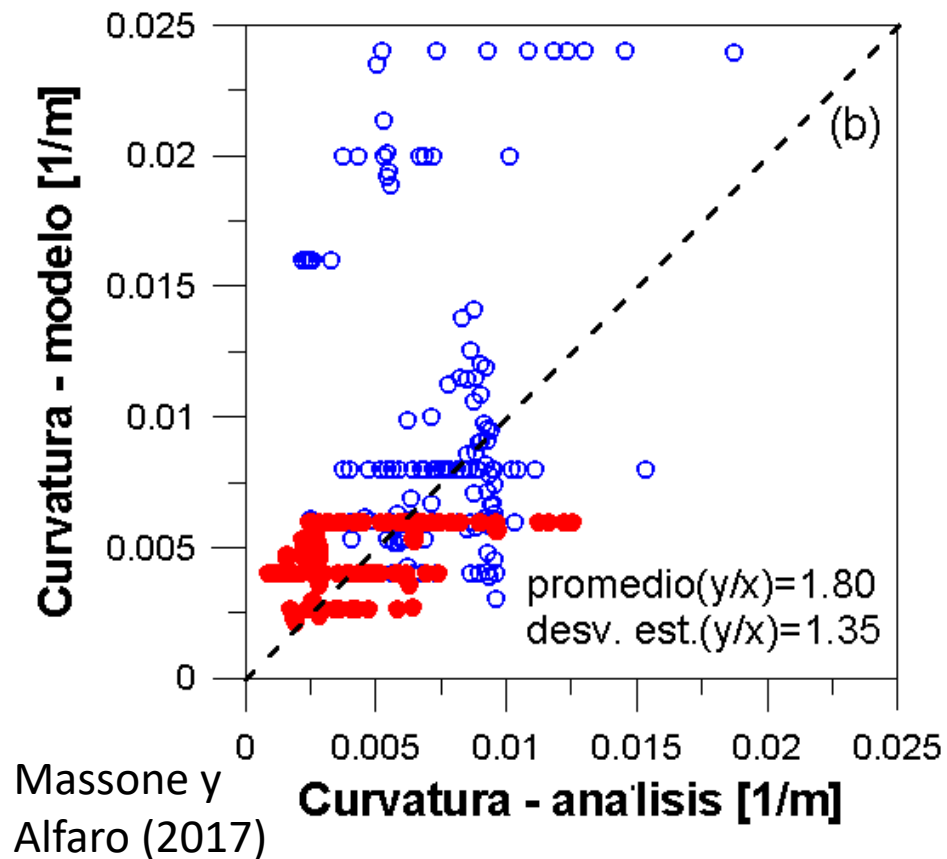
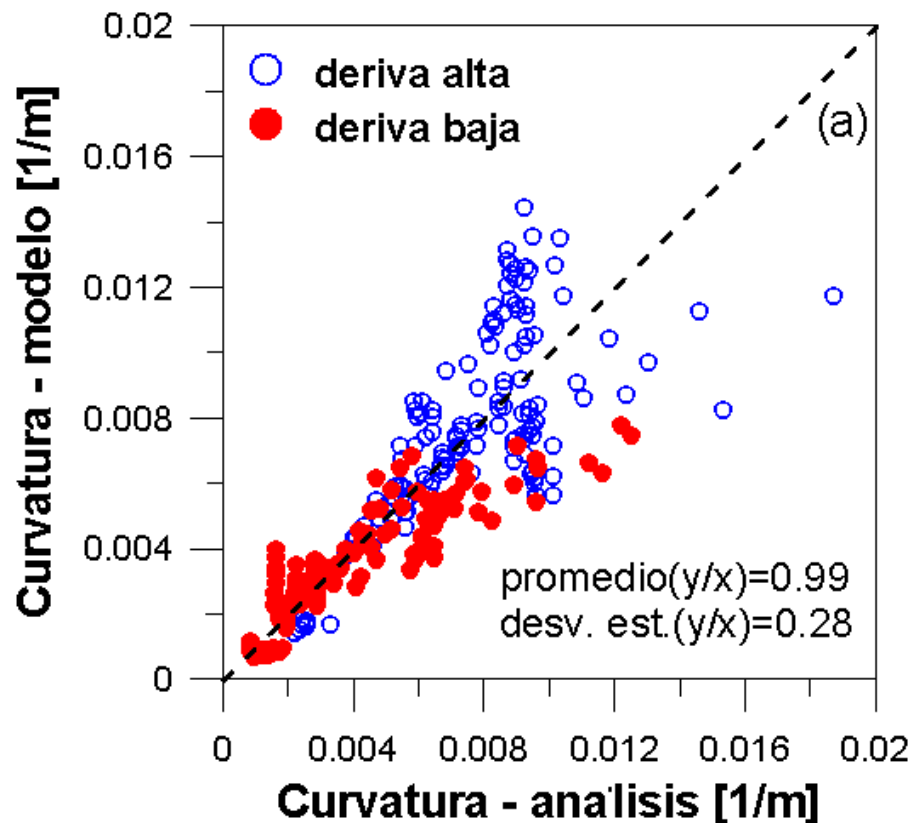
$$l_p = (0.21l_w + 0.05z) \left(1 - \frac{1.5P}{f'_c A_g} \right) (6.7\Delta_p^{0.3})$$

$$\rho_{b,min} \text{ ACI 318-19}$$

$$\beta = 10(b\rho_b)^{0.42} (1 - (\varepsilon_{sh} - \varepsilon_y)^{0.22})$$

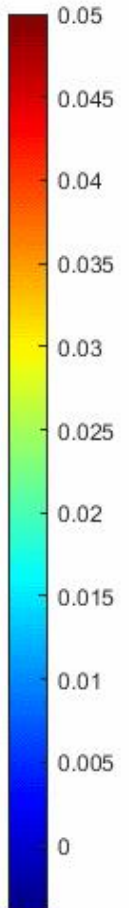
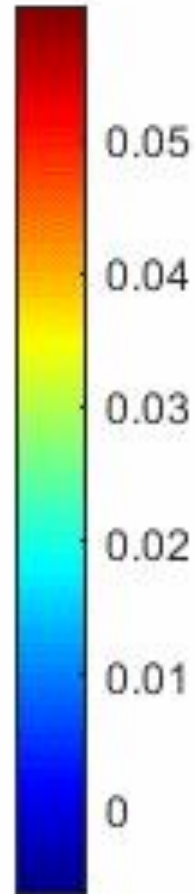
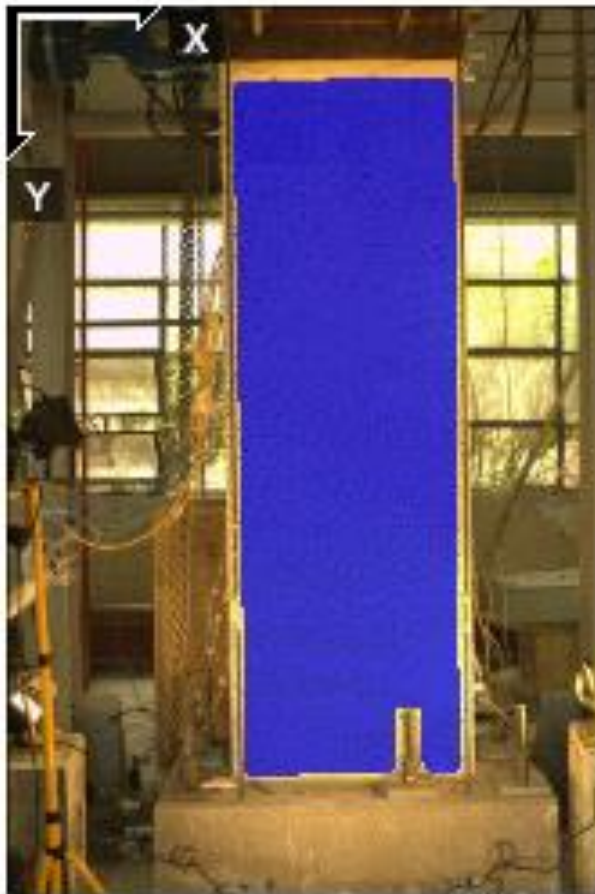
$$\phi_u = \frac{\delta_u}{h_w l_p}$$

$$l_p = l_w/2$$



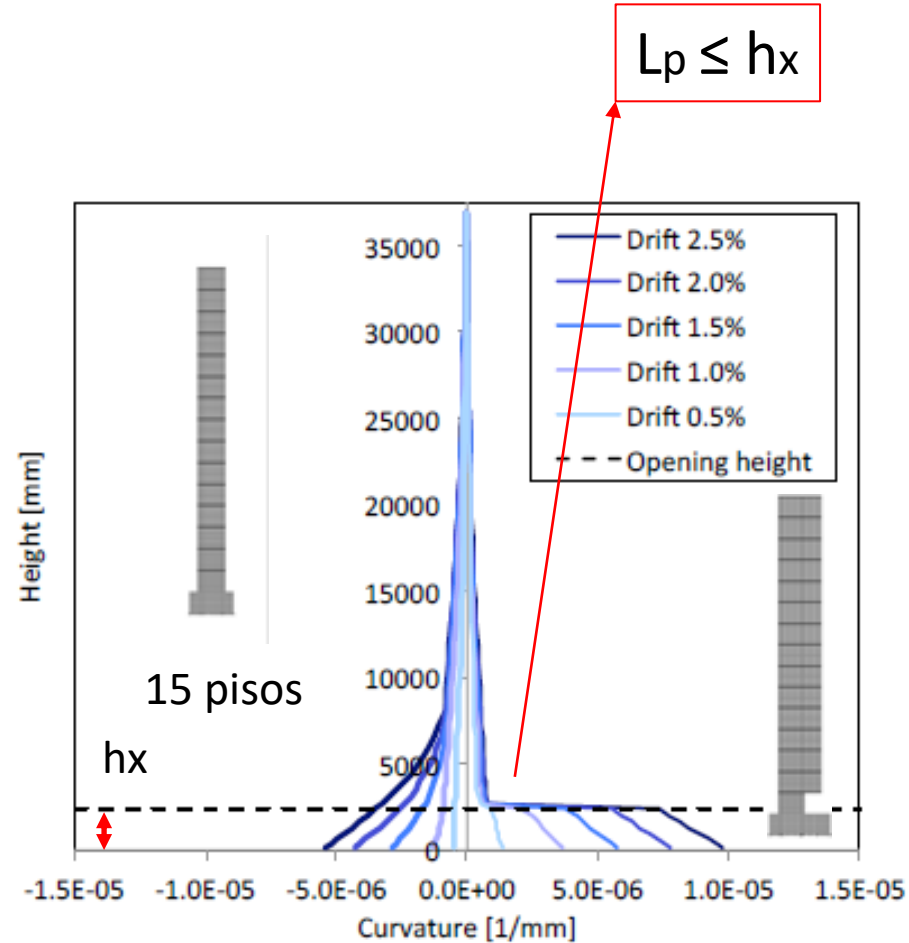
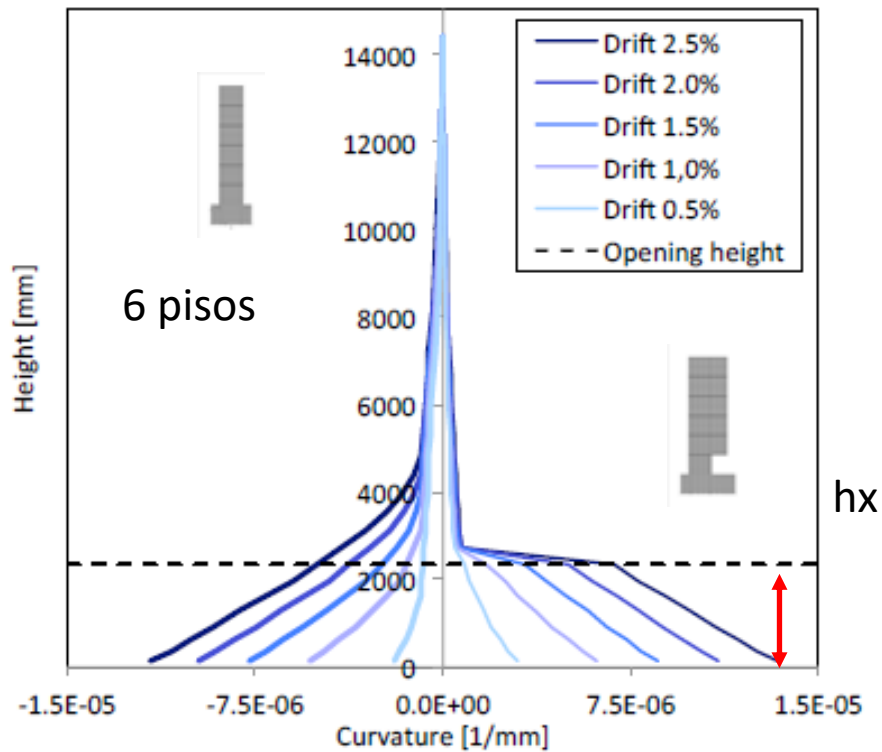
Discontinuidades





Muros Bandera

$$I_x/I_w=0.2$$



Diseño por capacidad y amplificación dinámica

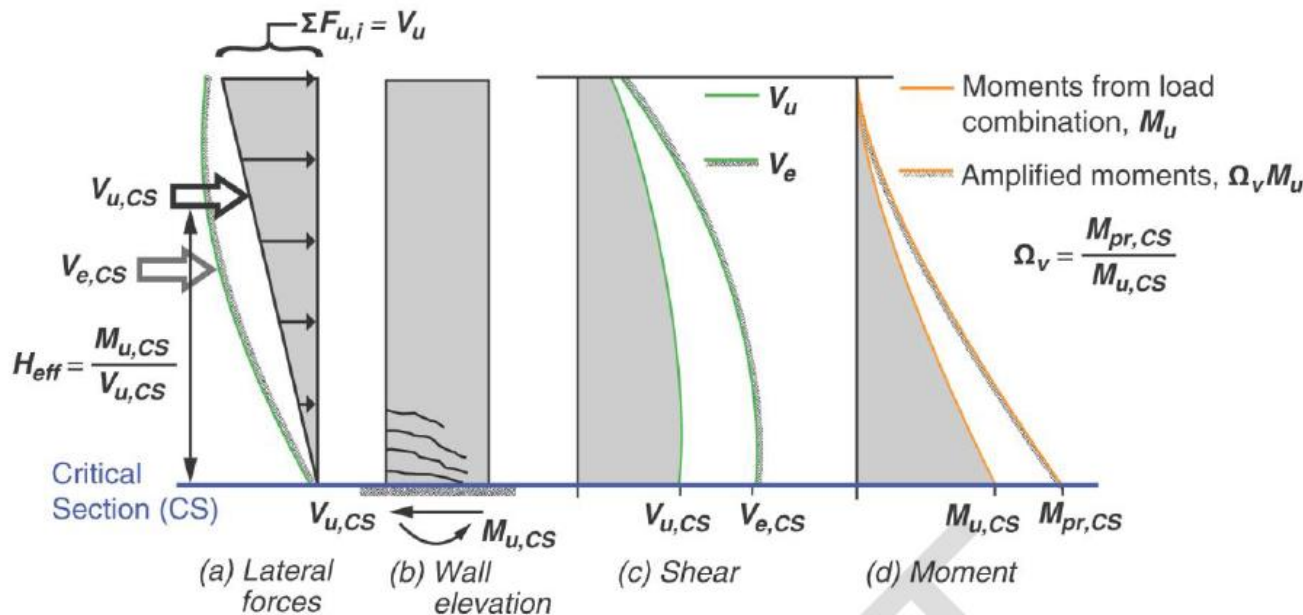
Diseño al corte – ACI 318-19

- Fuerza de corte: diseño por capacidad y amplificación dinámica

$$V_e = \Omega_v \omega_v V_u \leq 3V_u$$

$$\Omega_v = \begin{cases} 1, & \text{si } h_w/l_w \leq 1.5 \\ \max \left\{ \frac{M_{pr}/M_u}{1.5} \right\}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\omega_v = \begin{cases} 1.0, & \text{si } h_w/l_w < 2 \\ 0.9 + n_s/10, & n_s \leq 6 \\ 1.3 + n_s/30 \leq 1.8, & n_s > 6 \end{cases}$$



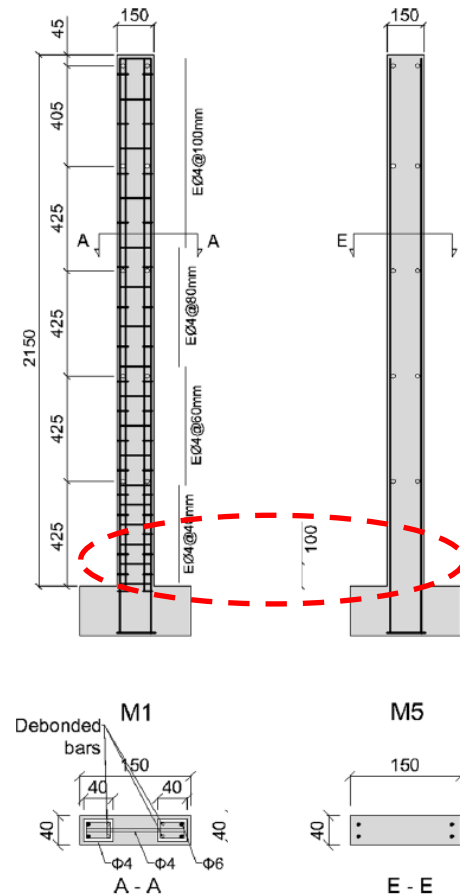
n_s = número de pisos sobre zona crítica $\geq 0.28h_w$ (m)

h_w = altura sobre zona crítica

Diseño por Capacidad

Ensayo Dinámico de Muros (Escalados)

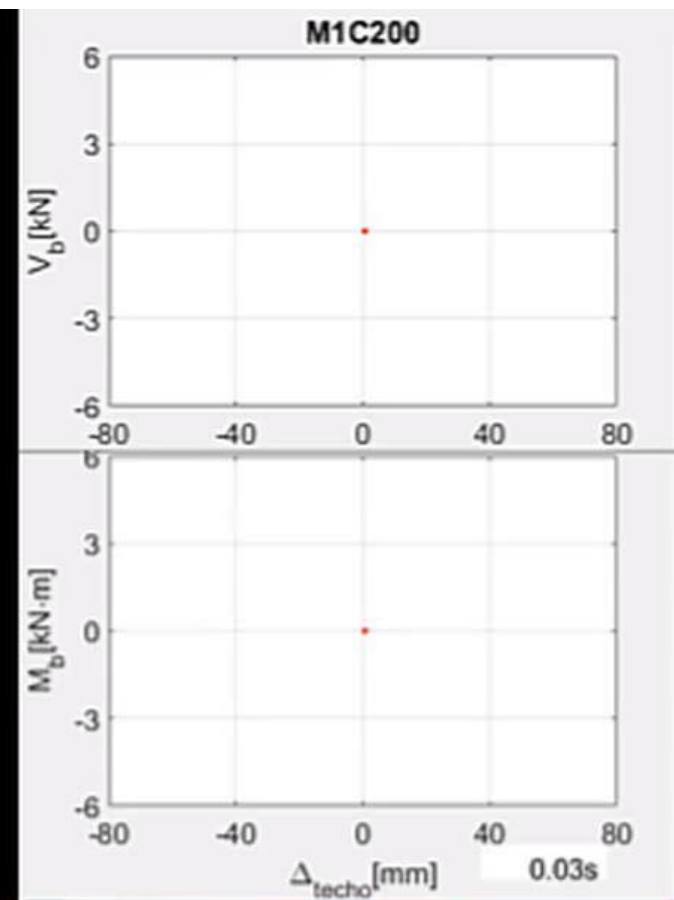
- Ensayos dinámicos
- 5 niveles (fuerzas inerciales)
- Serie de sismos escalados
- Idéntica armadura longitudinal (barras extras desadheridas) -> misma capacidad a flexión
- Variación de confinamiento y armadura de corte –
 - M1 incluye detallamiento de borde y armadura al corte
 - M5 no incluye detallamiento de borde, ni armadura al corte.

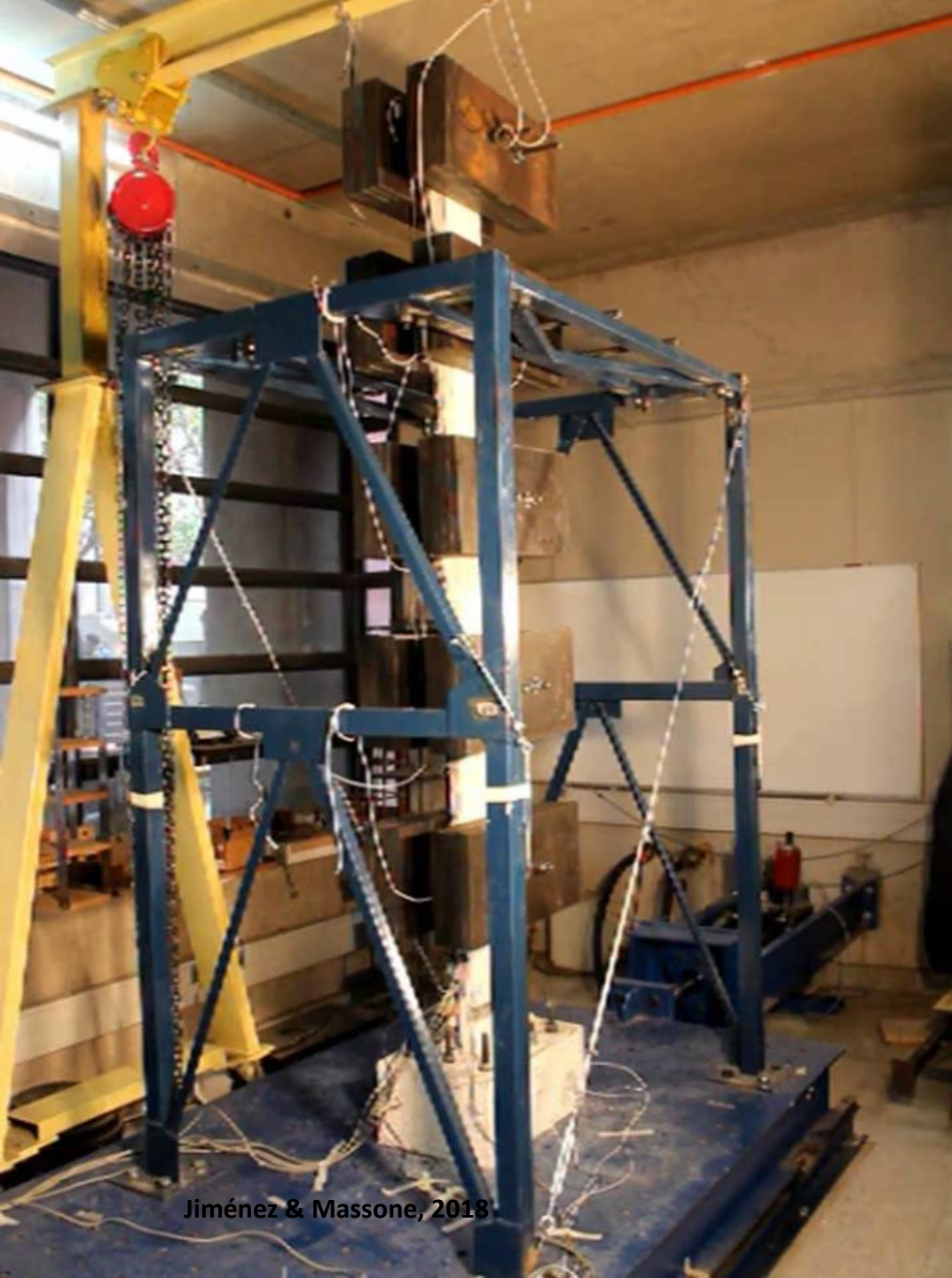


Jiménez y Massone, 2018

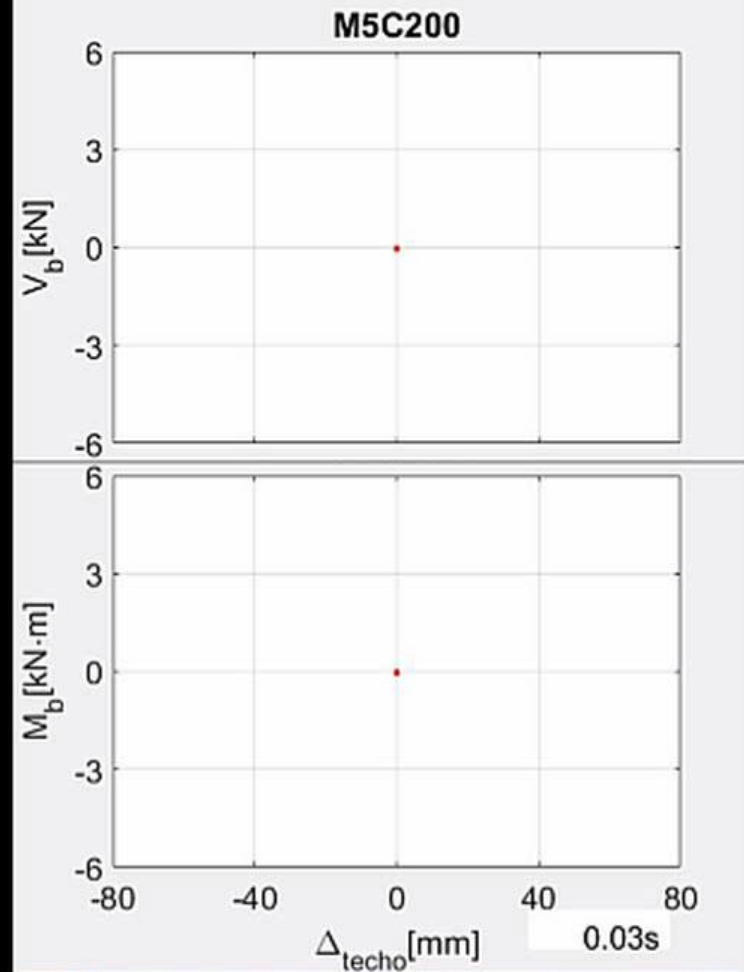


Jiménez & Massone, 2018



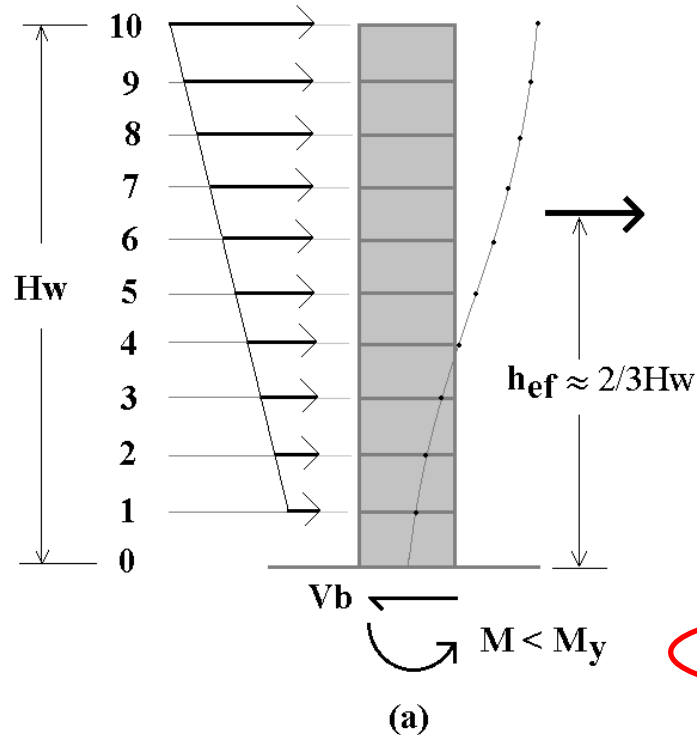


Jiménez & Massone, 2018

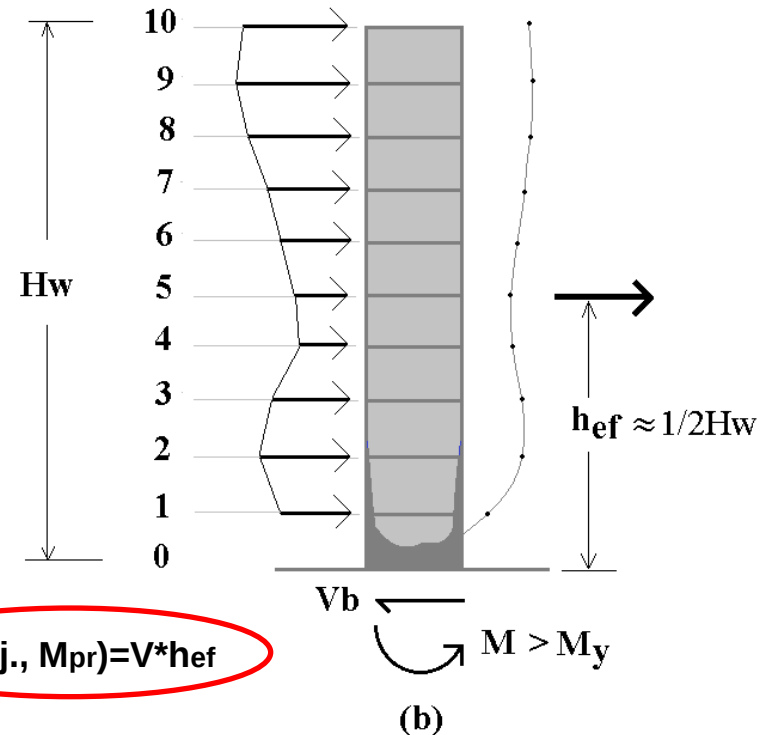


¿Qué es la amplificación dinámica?

- Análisis modal espectral captura modos superiores (lineal)
- Plastificación (ej. base) “activa” modos superiores
- Modos superiores “reducen” brazo de palanca y aumenta el corte



$$M = (e_j, M_{pr}) = V \cdot h_{ef}$$

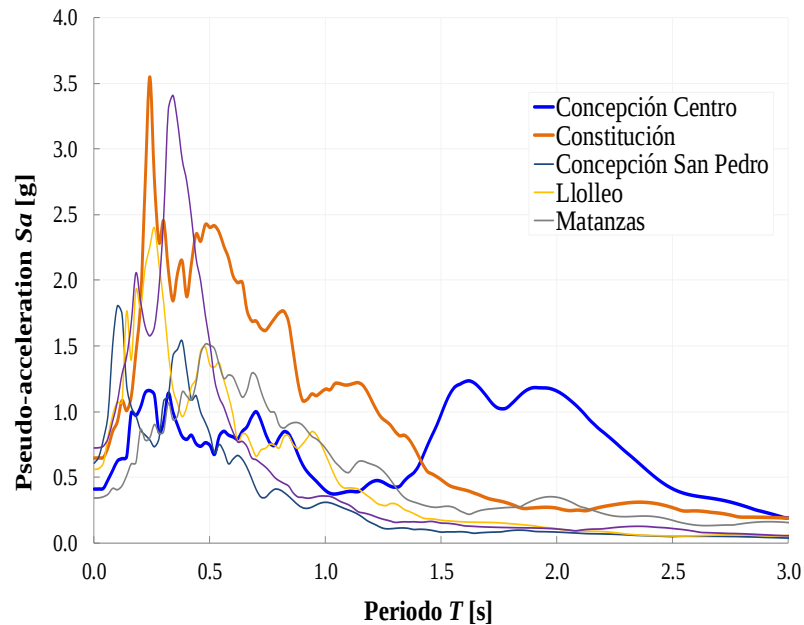


Amplificación dinámica en muros acoplados

Muros acoplados

Massone y Bass, 2020

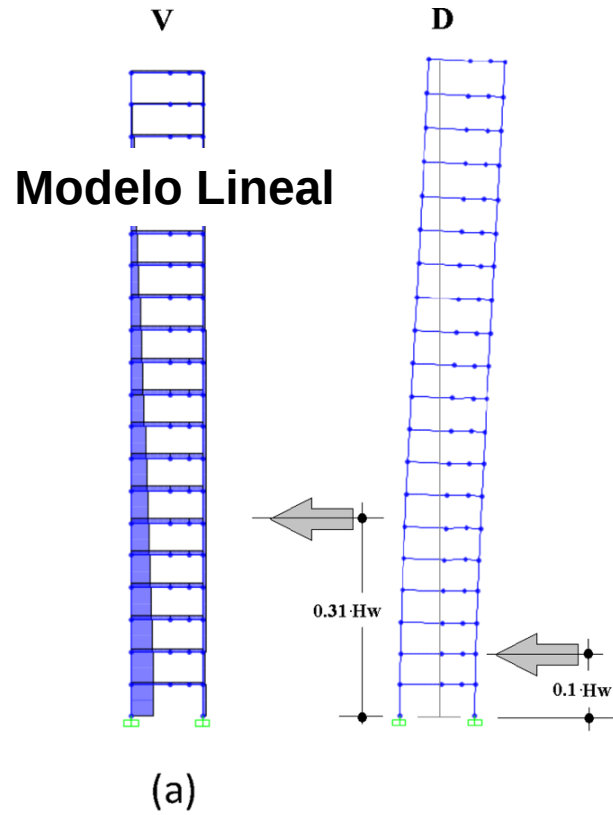
- Efecto del acoplamiento
- Efecto del contenido de frecuencias
- Efecto del tamaño del muro
- Efecto del número de pisos



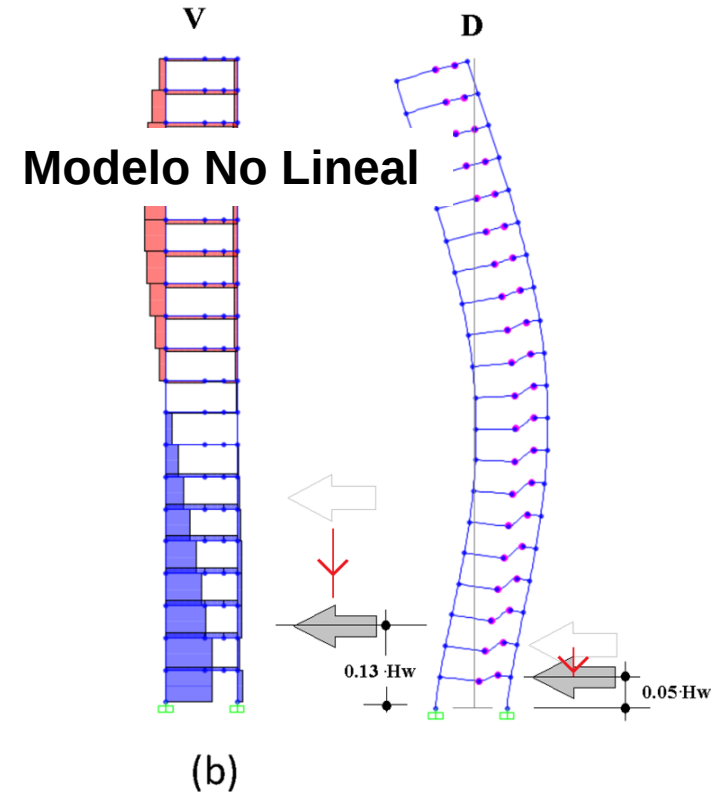
Fundamental period and characteristics of models.

Fundamental Period (T_1)			Characteristics		
10 stories	20 stories	30 stories	lw1	ρ_b	ρ_s
[s]	[s]	[s]	[m]	%	%
1.25	3.85	—	2	1	0.0
0.53	1.36	—	2	1	0.3
0.53	1.36	—	2	1	0.6
1.22	3.75	—	2	3	0.0
0.53	1.34	—	2	3	0.3
0.53	1.34	—	2	3	0.6
1.19	3.67	—	2	5	0.0
0.52	1.33	—	2	5	0.3
0.52	1.33	—	2	5	0.6
0.73	2.23	4.47	4	1	0.0
0.42	1.08	2.05	4	1	0.3
0.42	1.08	2.05	4	1	0.6
0.70	2.13	4.28	4	3	0.0
0.41	1.06	2.02	4	3	0.3
0.41	1.06	2.02	4	3	0.6
0.67	2.05	4.12	4	5	0.0
0.41	1.05	1.99	4	5	0.3
0.41	1.05	1.99	4	5	0.6
0.48	1.46	2.94	6	1	0.0
0.34	0.89	1.70	6	1	0.3
0.34	0.89	1.70	6	1	0.6
0.46	1.40	2.80	6	3	0.0
0.34	0.87	1.67	6	3	0.3
0.34	0.87	1.67	6	3	0.6
0.44	1.34	2.69	6	5	0.0
0.33	0.86	1.64	6	5	0.3
0.33	0.86	1.64	6	5	0.6

Muros acoplados



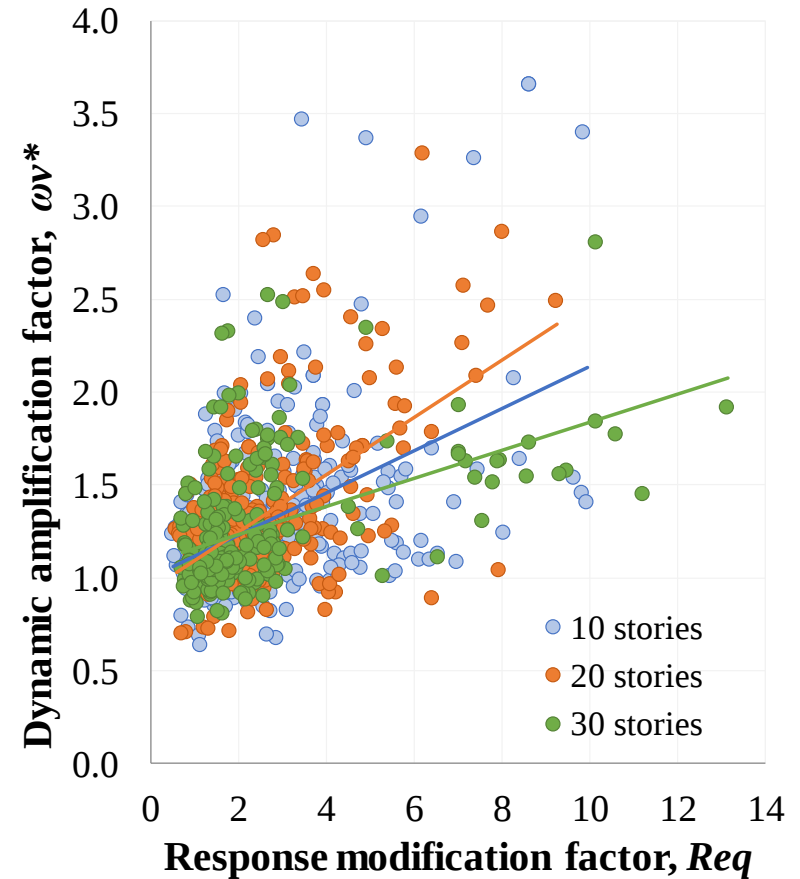
Massone y Bass, 2020



Altura de Muros

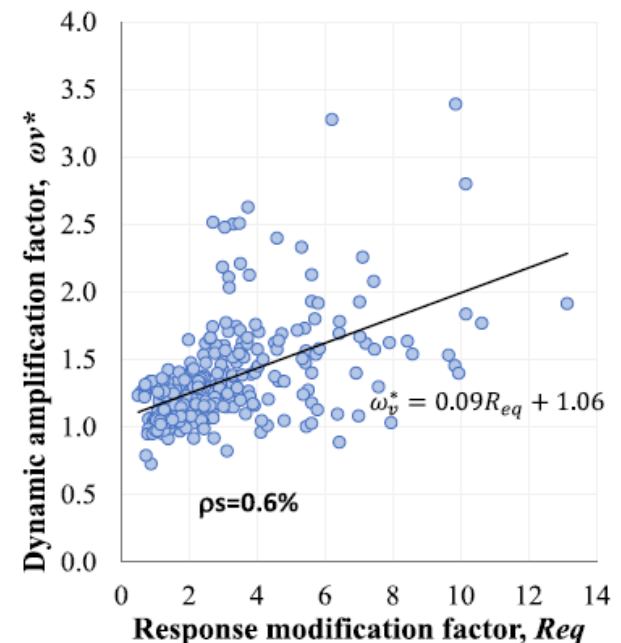
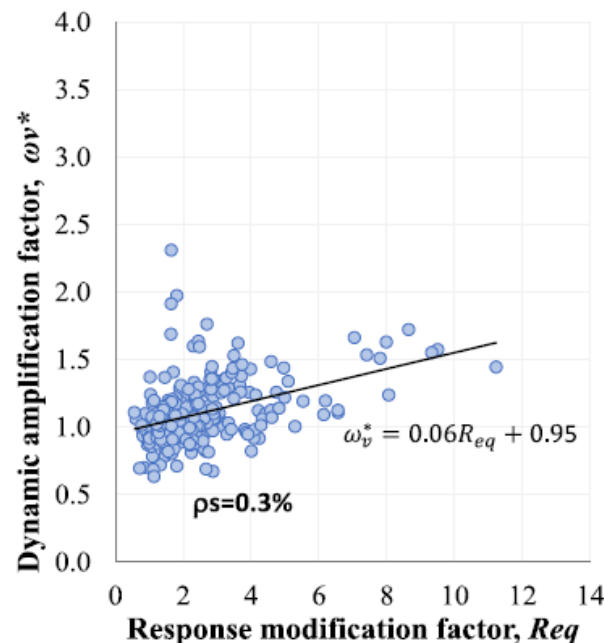
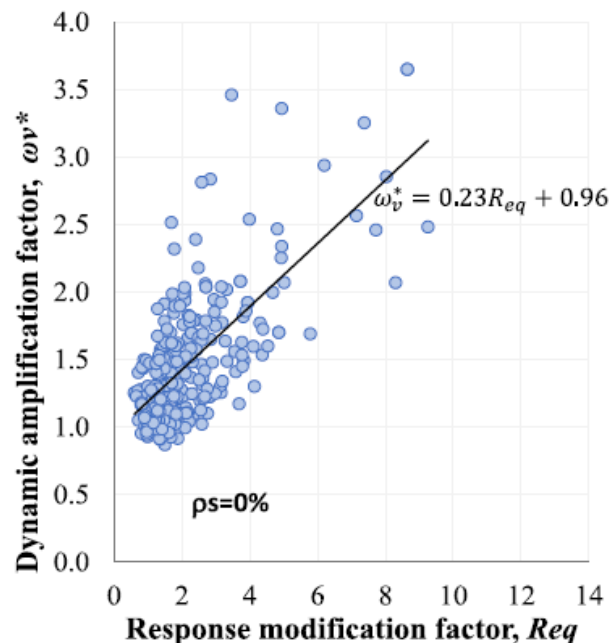
ACI 318-19
(basado en norma NZ)

$$\omega_v = \begin{cases} 1.0, & \text{si } h_w/l_w < 2 \\ 0.9 + n_s/10, & n_s \leq 6 \\ 1.3 + n_s/30 \leq 1.8, & n_s > 6 \end{cases}$$

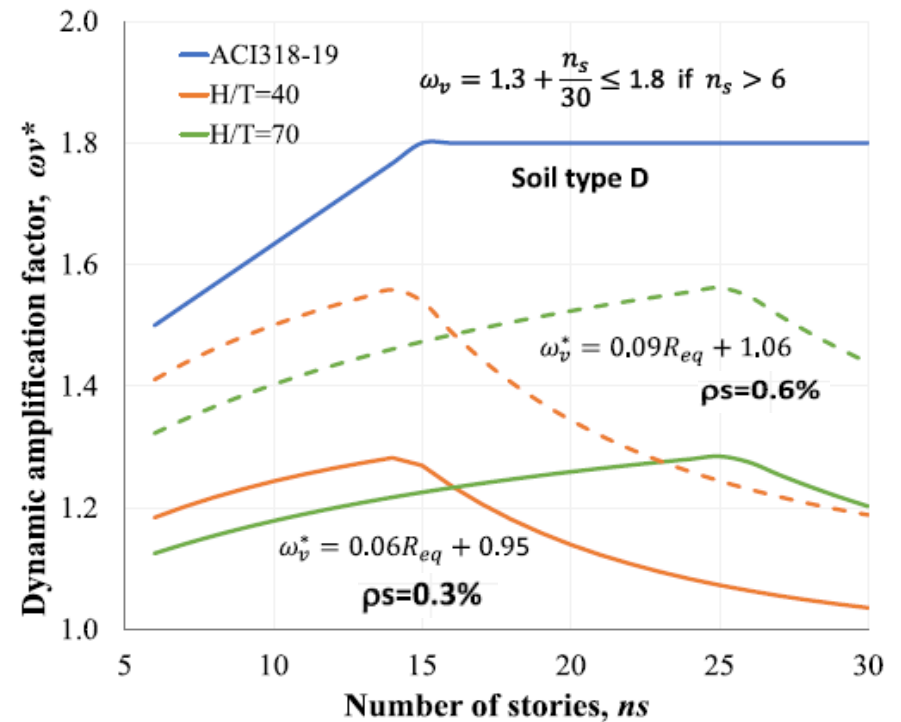
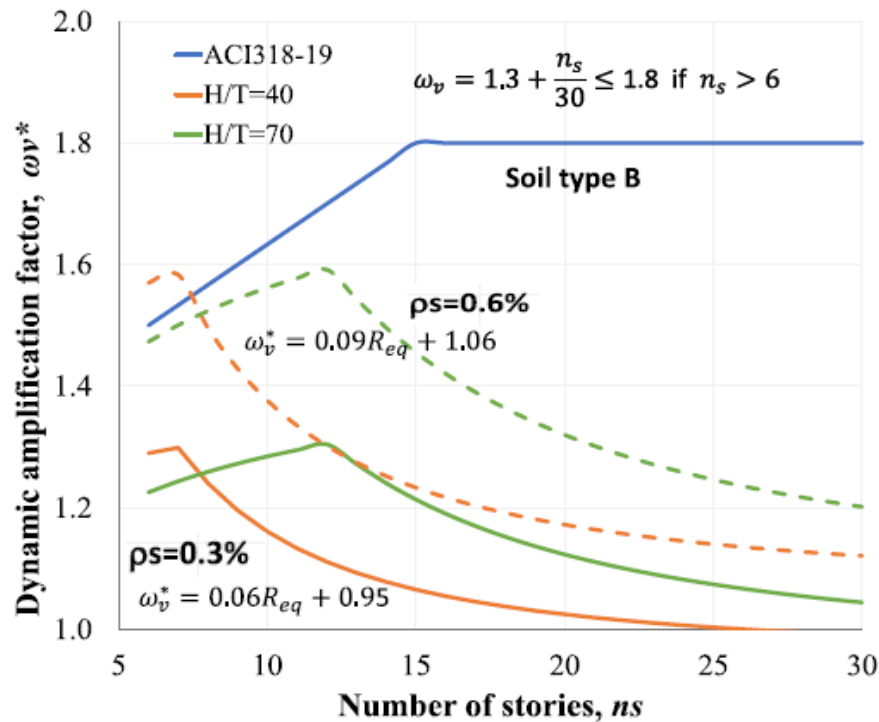


Nivel de acoplamiento

- Acoplamiento 0%, 0.3% y 0.6% (cuantía de losas)
- Efecto incursión inelástica (R_{eq} – respecto de respuesta lineal)



Amplificación por acoplamiento vs ACI



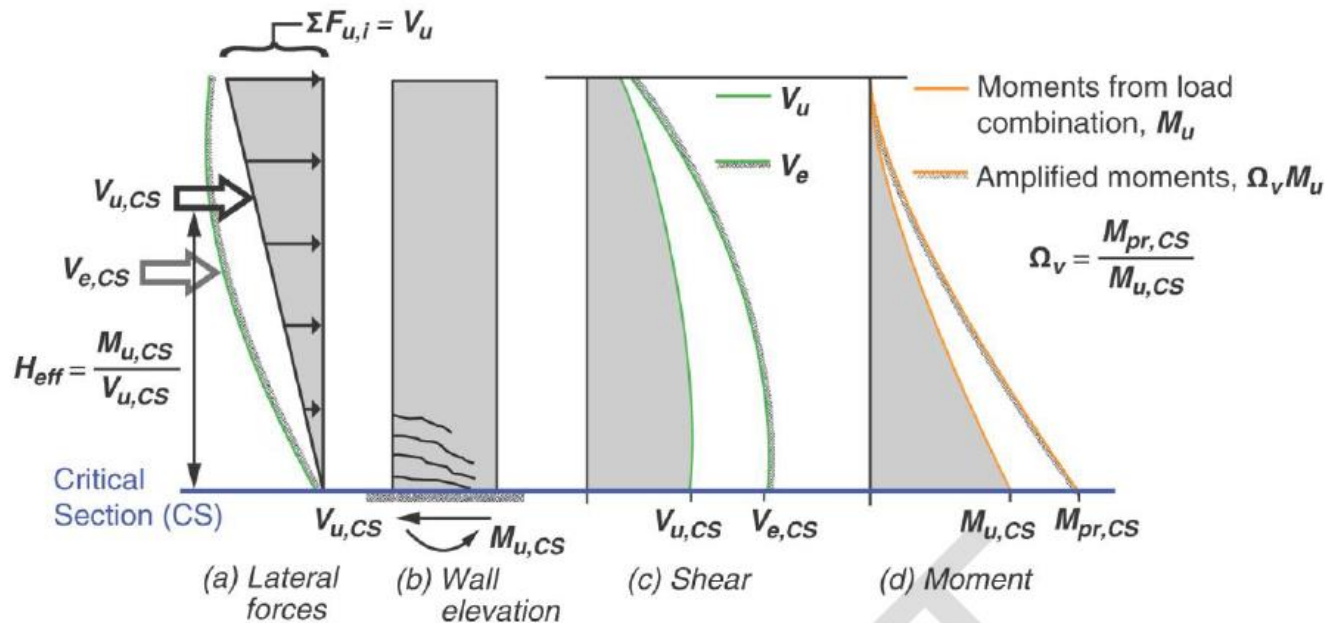
Diseño al corte en muros

– ACI 318-19 vs NCh430 (propuesta)

Diseño al corte

- Fuerza de corte: diseño por capacidad y amplificación dinámica (ACI 318-19)**

$$V_e = \Omega_v \omega_v V_u \leq 3V_u \quad \Omega_v = \begin{cases} 1, \text{ si } h_w/l_w \leq 1.5 \\ \max \left\{ \frac{M_{pr}/M_u}{1.5} \right\} \end{cases} \quad \omega_v = \begin{cases} 1.0, \text{ si } h_w/l_w < 2 \\ 0.9 + n_s/10, n_s \leq 6 \\ 1.3 + n_s/30 \leq 1.8, n_s > 6 \end{cases}$$



n_s = número de pisos sobre zona crítica $\geq 0.28h_w$ (m)

h_w = altura sobre zona crítica

Diseño al corte

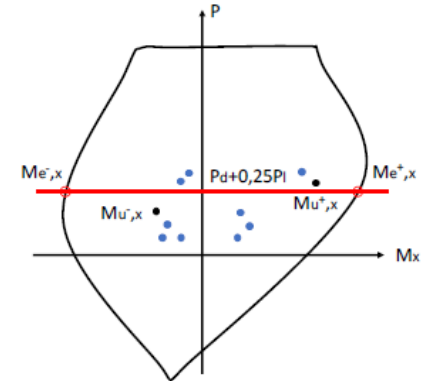
- Diseño por capacidad (**Propuesta NCh430**)

$$V_e = \Omega_v \omega_v V_u \leq 1.4 V_{elastico}$$

- Se debe diseñar al corte para alcanzar δu .**
- Mesperado dependiente de incursión inelástica. Se puede considerar $\delta y = 0.004h$.

$$M_{esperado} = \begin{cases} < M_n, si \mu < 1 \\ M_n, si \mu = 1 \\ M_{pr}, si \mu \geq 2 \end{cases}$$

- Mesperado (ej., M_{pr} , M_n) para $P_u = P_d + 0.25P_l$ (evitar sobre-resistencia ficticia por acoplamiento).
- Considerar directividad del corte y momento (diagrama P-M)



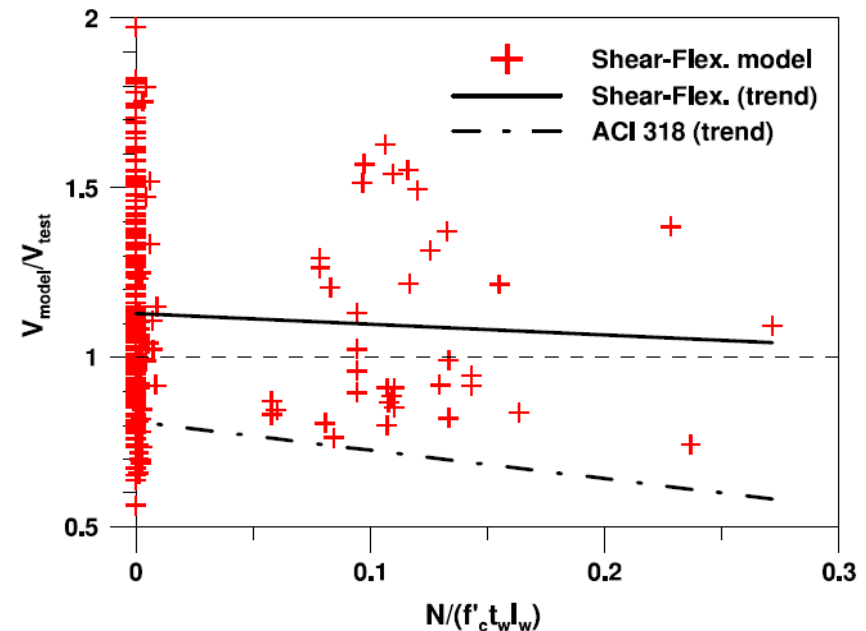
Condición	Ω_v ^{[1] [2]}		
$h_{wcs}/l_w > 1.5$	El mayor entre	Para $\mu < 1$	$M_{\phi u,sc}/M_{u,sc}$
		Para $\mu = 1$	$M_{n,sc}/M_{u,sc}$
		Para $1 < \mu < 2$	Interpolación lineal entre $M_{n,sc}/M_{u,sc}$ y $M_{pr,sc}/M_{u,sc}$
		Para $\mu \geq 2$	$M_{pr,sc}/M_{u,sc}$
		2.0	
$h_{wcs}/l_w \leq 1.5$	2.0		

Diseño al corte

- Diseño por capacidad y amplificación dinámica (**Propuesta NCh430**)

$$V_e = \Omega_v \omega_v V_u \leq 1.4 V_{elastico}$$

- $\omega_v=1$ (bajos efectos para acoplamiento moderado) por simplicidad. El efecto de Ω_v en general es mayor.
- ACI 318 (no considera nueva expresión al corte) subestima la capacidad en ~20% en muros, pero la subestimación es más relevante para la carga axial.
- Diseño por desempeño (Achisina), se puede considerar sobre-resistencia al corte:
 $f'_{c,esperado}=1.3f'_c$, $f_{y,esperado}=1.17f_y$, $\phi=1$.
- Permite análisis más detallado (ej. Pushover, tiempo-historia no lineal)



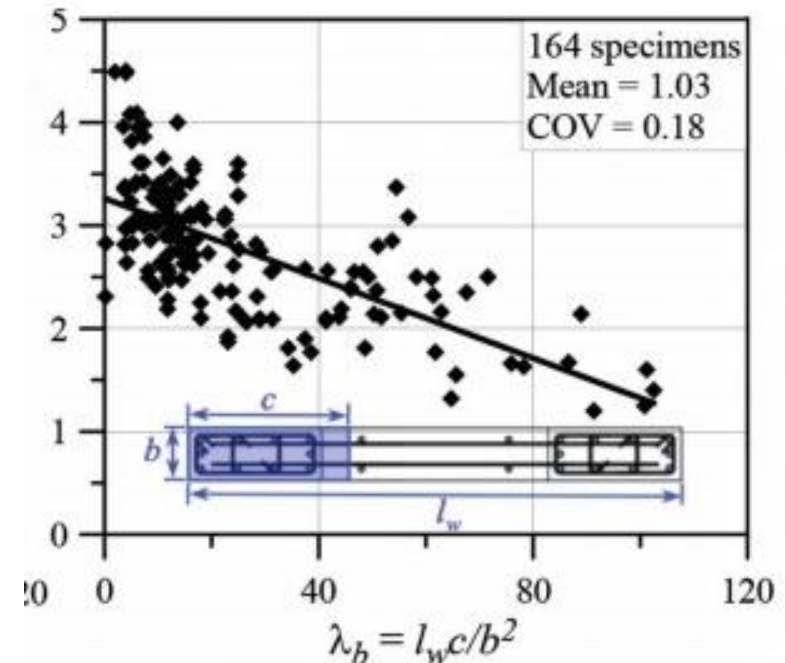


Gracias!

Estabilidad lateral de muros

- Recopilación de base de datos (Abdullah y Wallace, 2019)
- Variabilidad de parámetros
- Ensayos en muros
- ¿es λ_b estabilidad?

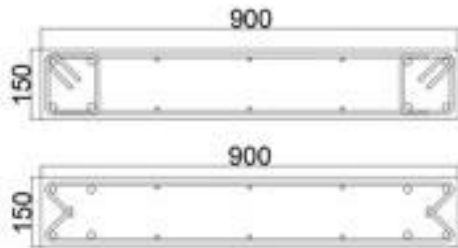
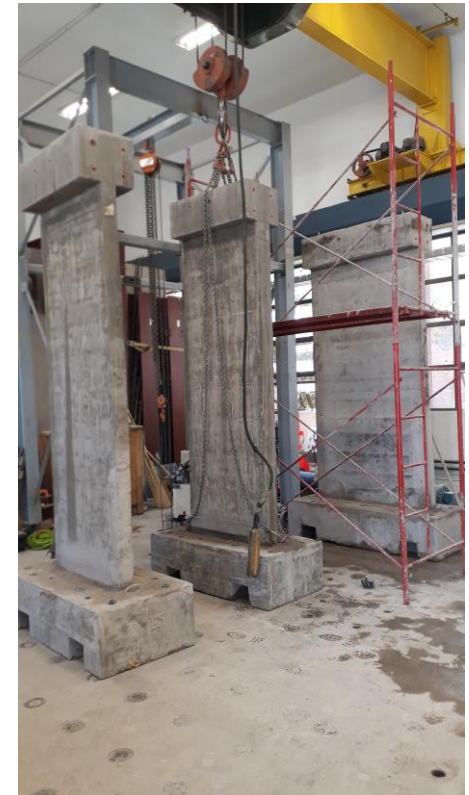
$$\frac{\delta_c}{h_w} = 4.0 - \frac{\lambda_b}{\alpha} - \frac{v_{max}}{0.83\sqrt{f'_c MPa}}$$



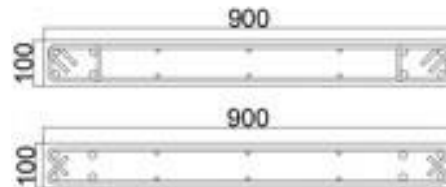
Estabilidad lateral de muros

- Ensayo muros (Jara, 2022)
- Apoyo lateral superior (sin restricción de giro)
- Variando espesor y largo
- c/l_w constante (nivel carga axial)
- Control de estabilidad (algunas normas)
 $b > h_w/16$

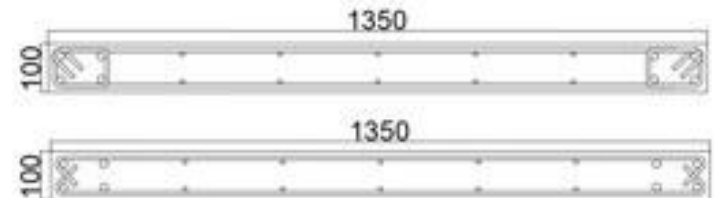
$$\lambda_b = l_w \frac{c}{b^2} = \frac{c}{l_w} \left(\frac{l_w}{b} \right)^2$$



Probeta M1
 $E\Phi 8@70\text{mm}$

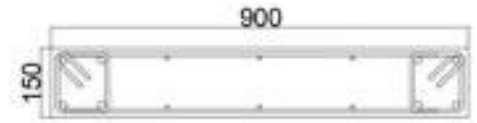


Probeta M2
 $b = 100 \text{ mm}$

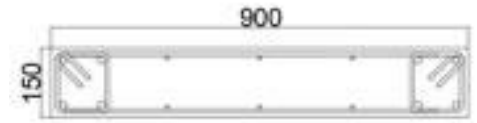


Probeta M3
 $l_w = 1350 \text{ mm}$

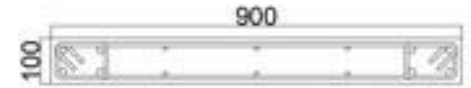
Muro 1



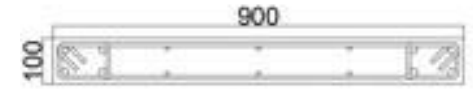
Muro 1



Muro 2



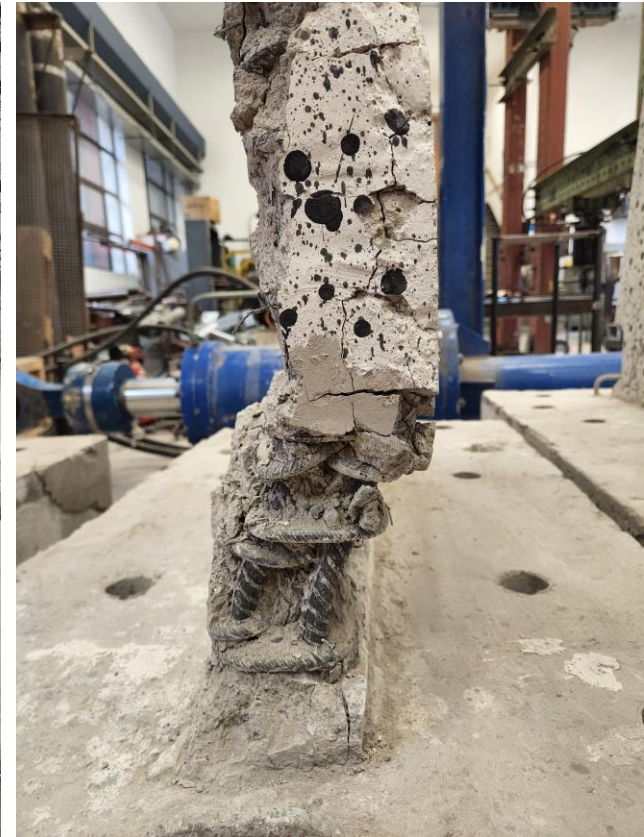
Muro 2



Borde Oeste

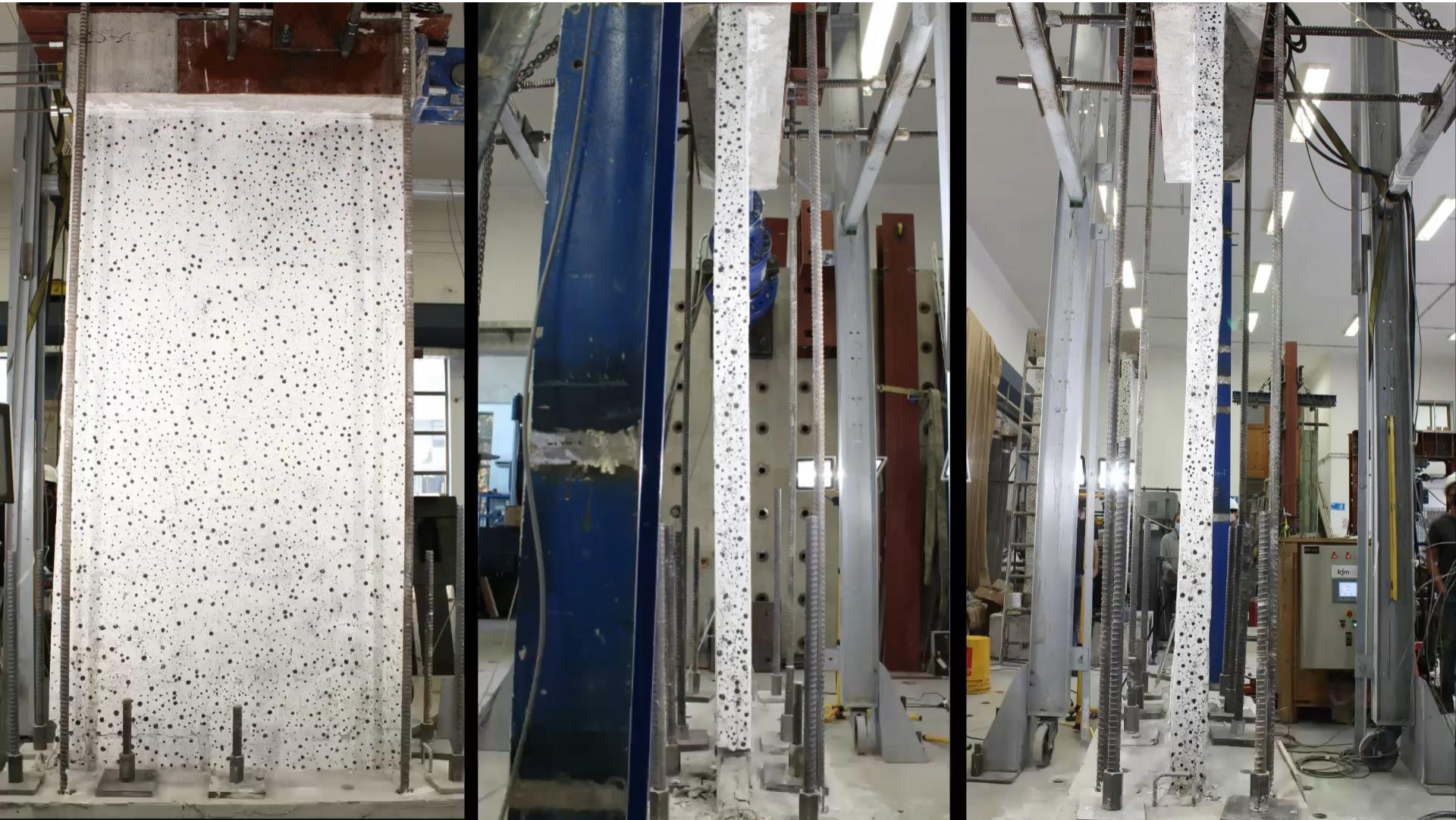
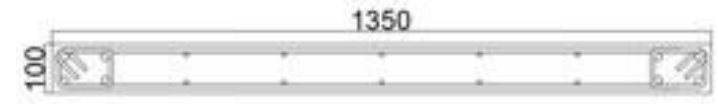


Borde Este



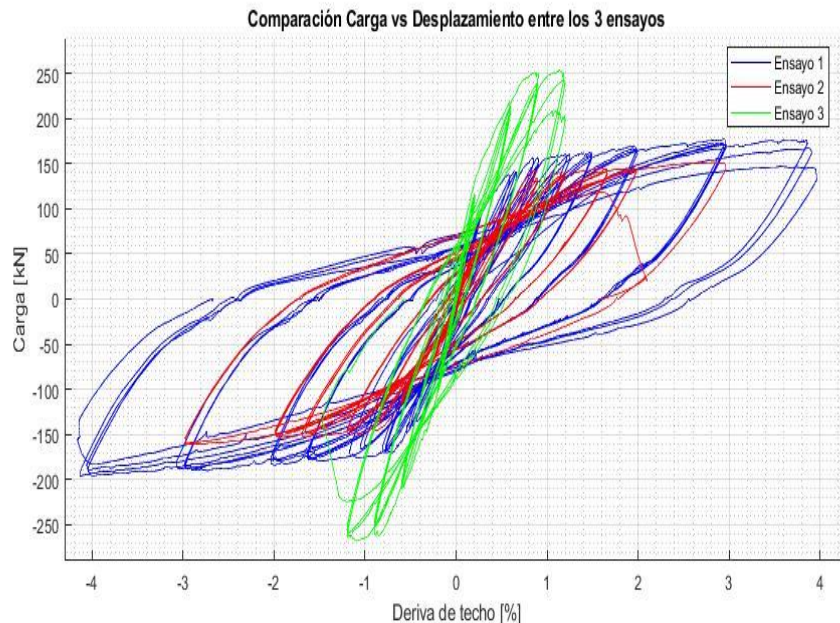
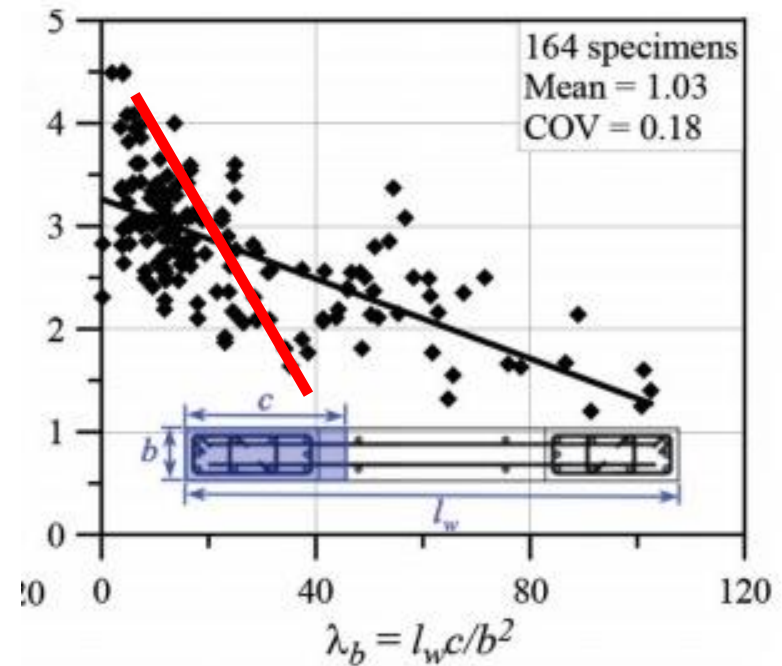
Borde Este

Muro 3



Comparación

- Estabilidad controlada por espesor y largo del muro
- Reducción importante de ductilidad
- Control de estabilidad (algunas normas) $b > h_w/16$, require revisión



	Muro 1	Muro 2	Muro 3
l_w [mm]	900	900	1350
b [mm]	160	100	100
c [mm]	186,3	200,4	278,3
l_w/b [-]	5,6	9,0	13,5
c/l_w [-]	0,21	0,22	0,21
c/b [-]	1,2	2,0	2,8
λ_b [-]	6,5	18,0	37,6
drift max [%]	4,19	3,00	1,29