

América Latina y El Caribe

Estructuración y Diseño de Edificios de Hormigón Armado en Chile

Ian Watt - Jorge Carvallo

San Salvador, El Salvador 10 de octubre de 2025

www.codigomodelosismico.org





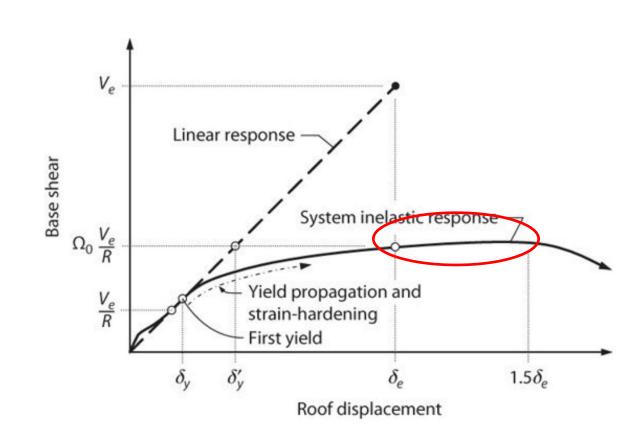




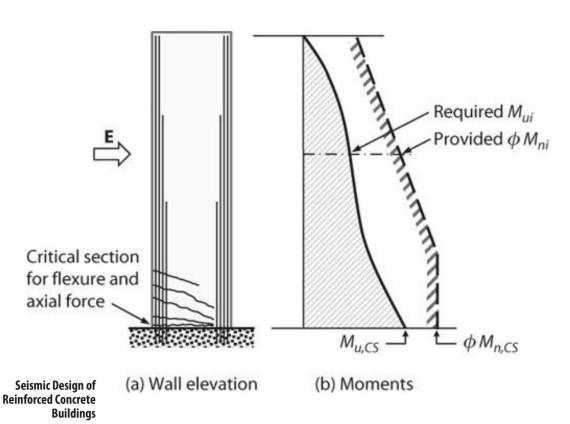
Para hoy...

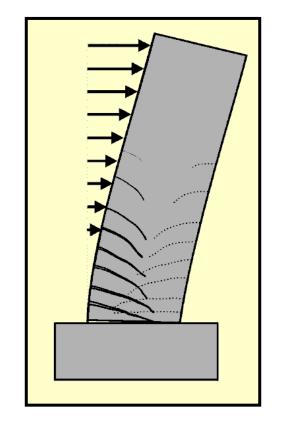


- Estructuración de Edificios Típica en Chile.
- Diseño de Muros "Chilean Way"...
- Un caso de ejemplo.

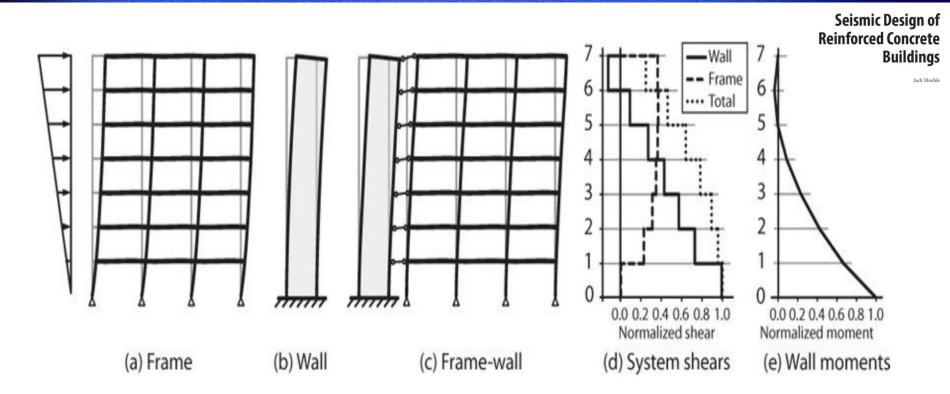




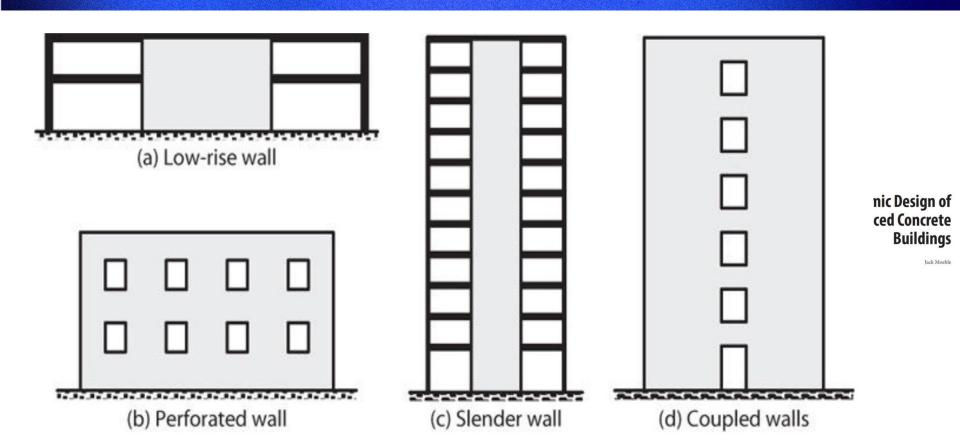




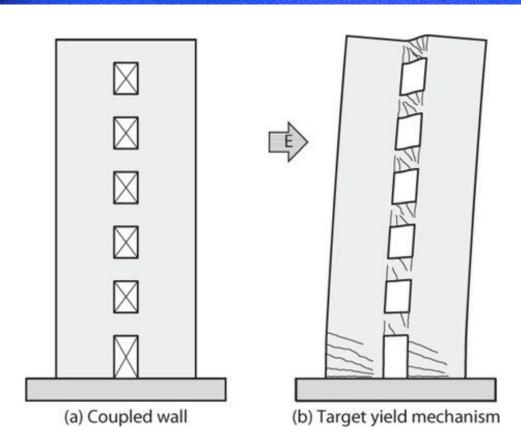








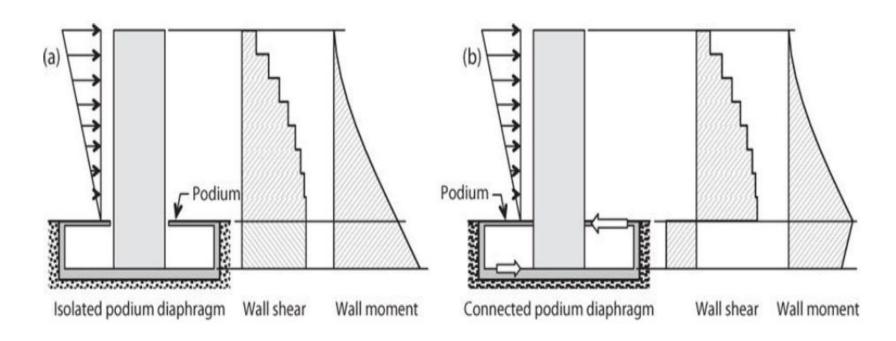




Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings

Jack Moehle





Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings



Estructuración Típica en Chile

Edificio Torre A de Tajamar



• Año de construcción : 1964

Cálculo Estructural : Ramírez - Mugli – Del Sol-Vogel

• N° de Pisos : 28

• Altura : 75 m

Densidad de muros : 4.4 % longitudinal

2.7 % transversal

Muros en primer piso : 10, 15, 30 y 45 cm

Período : 1.7 seg transversal

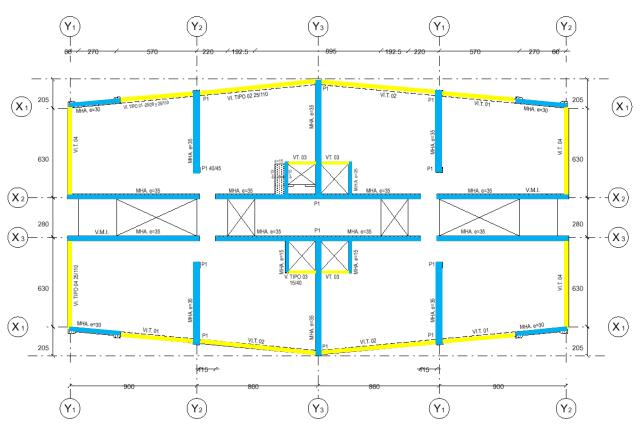
1.1 seg longitudinal

1.9 seg rotacional



Edificio Torre A de Tajamar





Edificio Torre A de Miramar



• Año de construcción : 1973

Cálculo Estructural : Mugli - Del Sol - Vogel

• N° de Pisos : 20

Tipología Estructural : Muros de Rigidez

Densidad de muros : 1.9 % longitudinal

2.5 % transversal

• Muros en primer piso : 40 cm

Período : 1.1 seg transversal

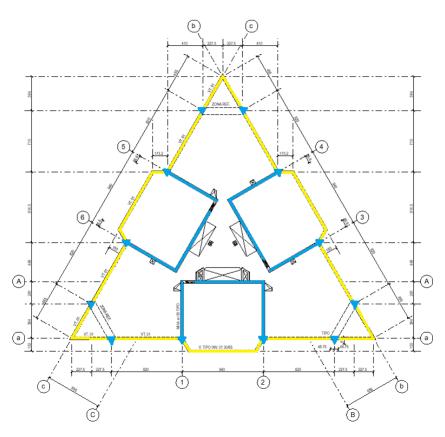
1.1 seg longitudinal

1.3 seg rotacional



Edificio Torre A de Miramar





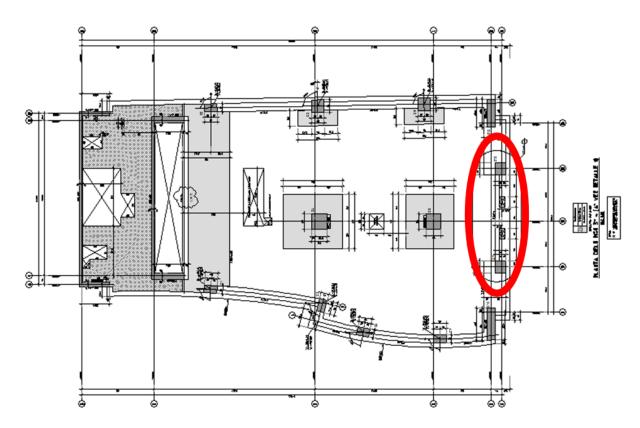
EDIFICIO NUEVA APOQUINDO TORRE 3



- EDIFICIO PARA OFICINAS, PLANTAS LIBRES, 24 PISOS DE ALTURA Y 5 NIVELES SUBTERRÁNEOS.
- SISTEMA DE AMORTIGUADORES VISCOSOS.
- REDUCEN LA TORSIÓN NATURAL DE UNA PLANTA EXCÉNTRICA.
- DISPUESTOS CADA DOS PISOS PARA MAXIMIZAR EL EFECTO DEL DESPLAZAMIENTO DE ENTREPISO.

EDIFICIO NUEVA APOQUINDO TORRE 3

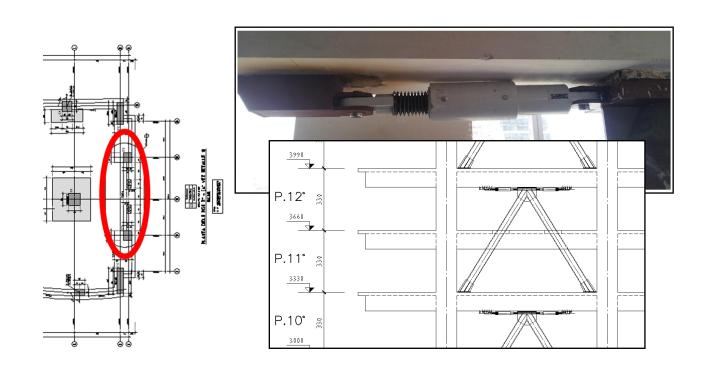




8ª Jornada de la Comisión Permanente del Código Modelo Sísmico para América Latina y El Caribe

EDIFICIO NUEVA APOQUINDO TORRE 3





Nuevo Edificio de la CChC



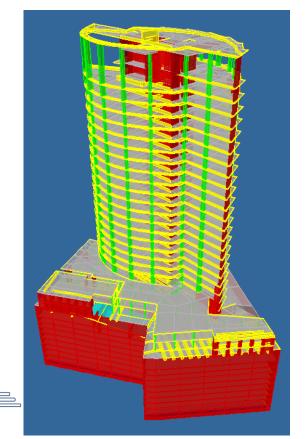
Arquitectura: A4

Diseño Estructural: VMB Ingeniería Estructural

Revisor Estructural: IEC

Constructora: Nahmias

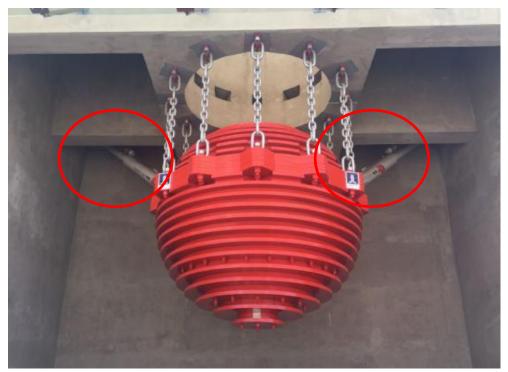
- 55000 m²
- 23 Pisos (82 m)
- +9 Subterráneos (29 m)
- Auditorio(h : 18 m)
- Amortiguador de masa sintonizada (150 ton, ubicado en pisos 22 y 23)



Amortiguador de Masa Sintonizada



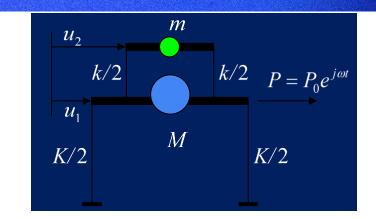
- 2 Amortiguadores Viscosos (FIP Industriale)
 - C=56.9 kN/(m/s)²
 - Alpha = 2
 - Amplitud 1.34 m
- > 247 Placas
- ▶ 12 Cadenas







AMS sin amortiguamiento



Ecuación de movimiento:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K+k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0 \\ 0 \end{bmatrix} e^{j \varpi t}$$

Solución con forma:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1(j\varpi) \\ H_2(j\varpi) \end{bmatrix} e^{j\varpi t}$$

SEMINARIO CDT SANTIAGO DE CHILE- 2019



Las funciones de transferencia $H_1(j \varpi)$ y $H_2(j \varpi)$ son:

$$\frac{H_1(j\varpi)}{u_{st}} = \frac{1 - \frac{\varpi^2}{\omega_a^2}}{\left(1 - \frac{\varpi^2}{\omega_a^2}\right)\left(1 + \frac{\omega_a^2}{\Omega_n^2}\mu - \frac{\varpi^2}{\Omega_n^2}\right) - \frac{\omega_a^2}{\Omega_n^2}\mu}$$

$$\frac{H_2(j\varpi)}{u_{st}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\varpi^2}{\omega_a^2}\right)\left(1 + \frac{\omega_a^2}{\Omega_n^2}\mu - \frac{\varpi^2}{\Omega_n^2}\right) - \frac{\omega_a^2}{\Omega_n^2}\mu}$$





Se observa que si $\varpi = \omega_a$ entonces $H_1(j\varpi) = 0$, y

$$H_2(j\varpi) = \frac{u_{st}}{-\frac{\omega_a^2}{\Omega_n^2}\mu} = -\frac{K}{k}u_{st} = -\frac{P_0}{k}$$

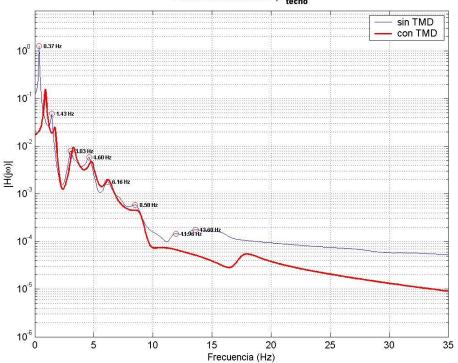
esto significa que:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{P_0}{k} \end{bmatrix} e^{j\varpi t} \qquad f_a = k(-P_0/k)e^{j\varpi t}$$



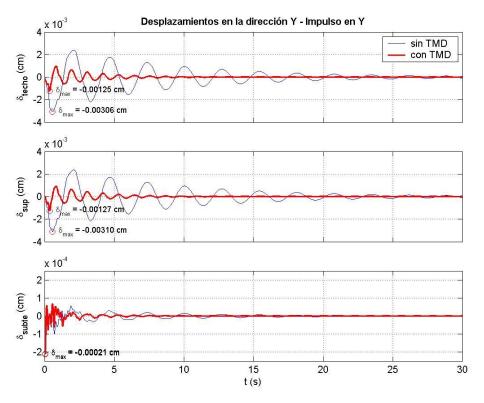
FRF del techo del edificio en dirección Y

Respuesta en frecuencia de los desplazamientos en la dirección Y - Impulso en Y Deformación del techo, δ_{techo}





Respuesta al impulso en dirección Y

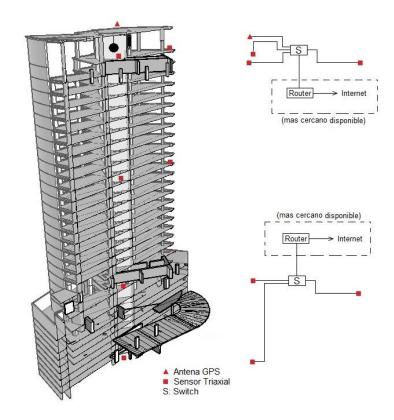


Acelerómetros: Características



Cómo nos Hablan las Estructuras Comportamiento del AMS

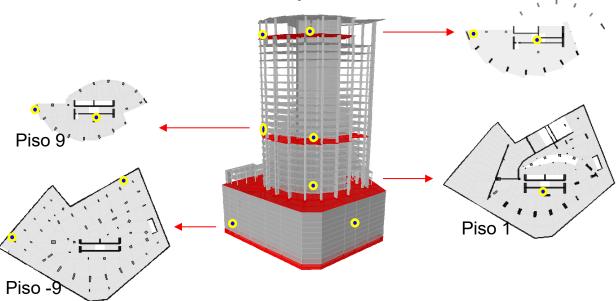
- •GPS para la obtención del tiempo
- •Escala ajustable de ±0.25g a ±4g
- •Resolución de 24 bit
- •Entre 10 y 1000 mediciones por segundo (200)
- Comunicación por Ethernet
- •8GB de memoria no volátil



Nuevo Edificio de la CChC



Ubicación de acelerómetros en puntos clave



Edificio Centenario



• Año de contrucción : 1998

Cálculo : Lagos, Contreras y Asoc.

• N° de Pisos : 31

• Altura : 112.0 m

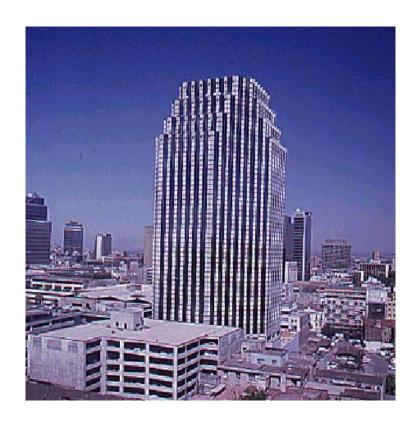
• Estructura : Marcos con muros

Densidad de muros :2.9 % longitudinal

2.2% transversal

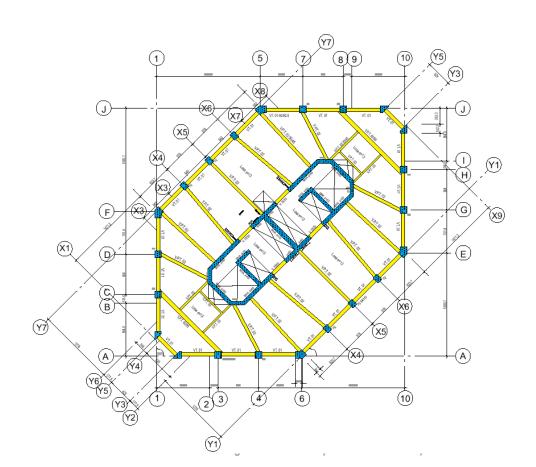
Muros en primer piso : 50, 60 y 70 cm

Columnas : 110/110 y 110/84 cm



Edificio Centenario





Suelos Blandos





Edificio 6 Norte

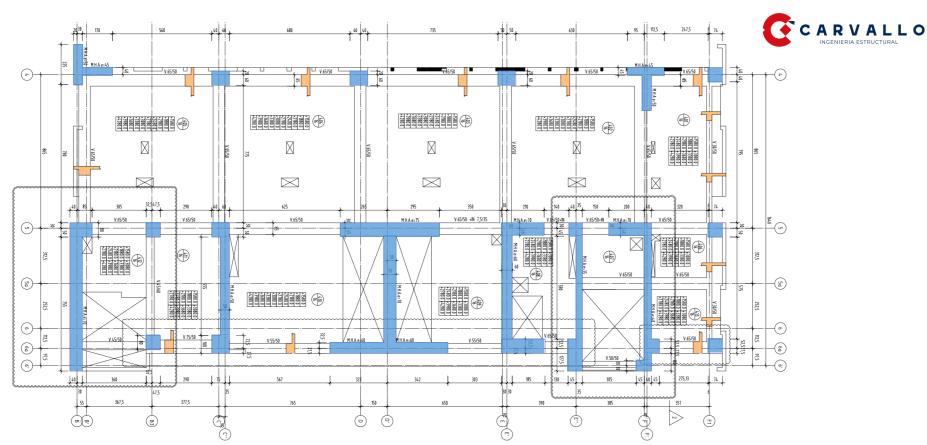


- Año de construcción : 2017
- Arquitecto: Francisco Vivanco
- Cálculo Estructural: Carvallo Ingeniería
- Altura: 70m
- Períodos: Tx = 1.52 s, Ty = 1.60 s
- Tipología Estructural: Muros y Marcos
- Muros en primer piso: 20, 40, 50, 75cm.
- Suelo D, Zona3.



Planta piso tipo





8ª Jornada de la Comisión Permanente del Código Modelo Sísmico para América Latina y El Caribe

Edificio Wind



- Año de construcción: 2025
- Arquitecto: Francisco Vivanco
- Cálculo Estructural: Carvallo Ingeniería
- N° de Pisos: 30
- Altura: 80m
- Tipología Estructural: Muros HA.
- Muros en primer piso: 30cm
- Suelo D, Zona 3.



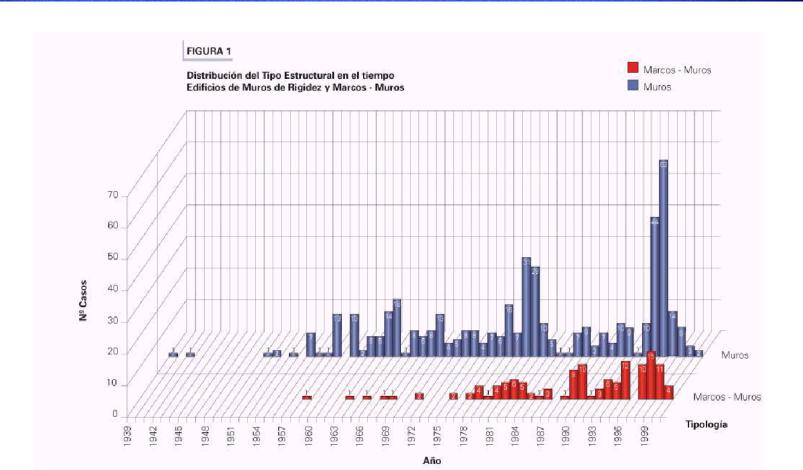
Planta piso tipo





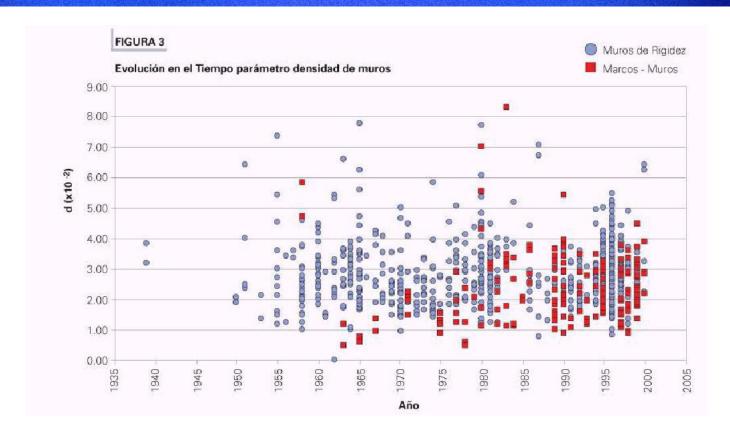
Evolución de Tipologías





Evolución de Densidad de Muros







Diseño de Muros HA en Chile

Respuesta Observada.... FRÁGIL

8ª Jornada de la Cor





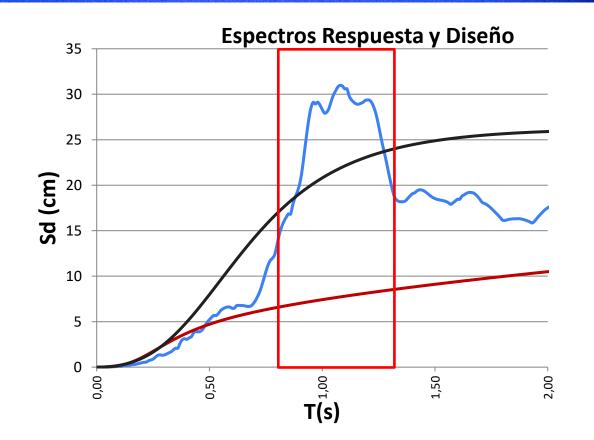
mérica Latina y El Caribe

Espectro de respuesta (Sd) Viña del Mar



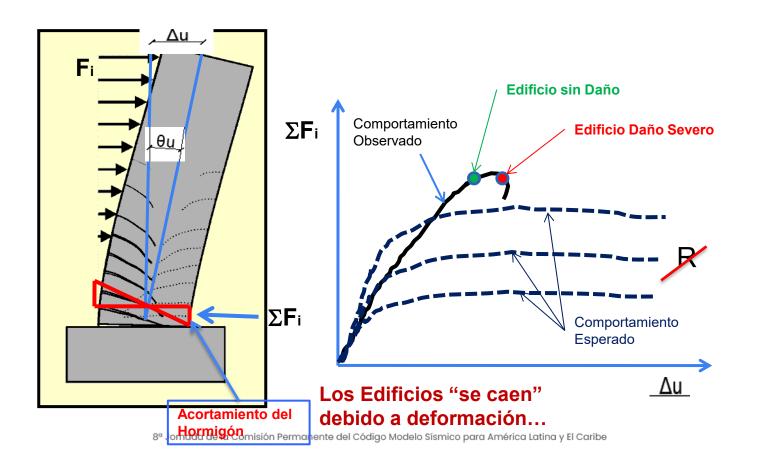
Sd [cm]

Enfoque de diseño por desplazamiento



Respuesta Observada.... FRÁGIL





Relación entre deformación de techo, φ y ε_{cmáx}.

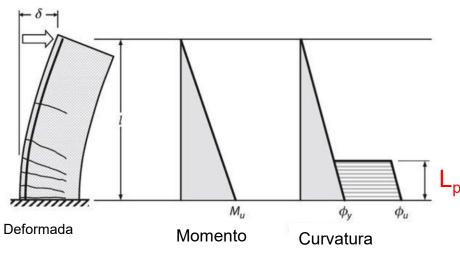


Deformación Plástica

M_{cr} ϕ_{cr}

Momento

Modelo de Rótula Plástica



Rotación según el modelo:

Deformada

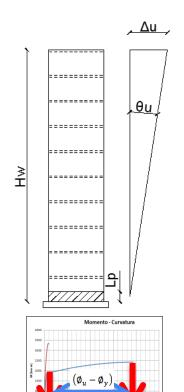
$$\theta_p = (\phi_u - \phi_y)l_p \longrightarrow \delta_u = \delta_y + \theta_p \left(l - \frac{l_p}{2}\right) = \frac{\phi_y l^2}{3} + \left(\phi_u - \phi_y\right)l_p \left(l - \frac{l_p}{2}\right)$$

"L_p" es el valor de rótula plástica que permite estimar de manera razonable la deformación

Curvatura

Decreto Supremo 60





Deformación total.

$$\Delta_y = \frac{11}{40} * \emptyset_y * H_w^2$$

$$\Delta_p = (\phi_u - \phi_y) \left(H_w - \frac{L_p}{2} \right) L_p$$

$$\Delta_u = \Delta_p + \Delta_y$$

$$\phi_u = \frac{\delta_u - \delta_e}{l_p (H_t - l_p / 2)} + \phi_e = \frac{\varepsilon_c}{c} \le \frac{0.008}{c} (21 - 7b)$$

Modelo Simplificado

•
$$\theta_u = \varphi_u \cdot L_p$$

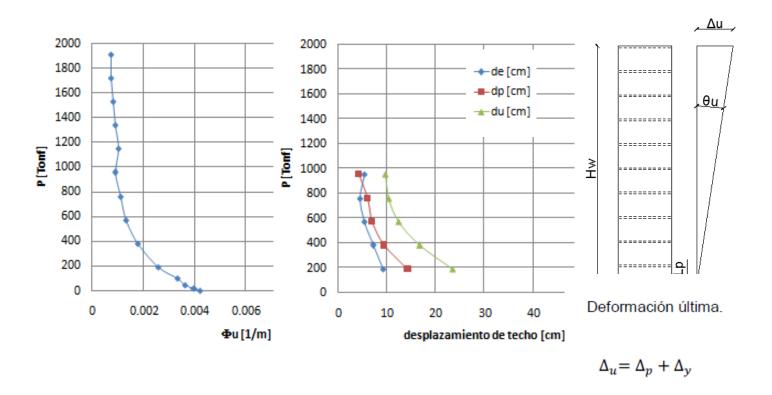
• $\Delta_u = \theta_u \cdot H_w$

•
$$\Delta_u = \theta_u \cdot H_w$$

$$\phi_u = \frac{2\delta_u}{H_t l_w} = \frac{\varepsilon_c}{c} \le \frac{0.008}{c} \tag{21-7a}$$

Capacidad de deformación de los muros.



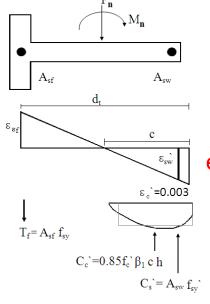


Decreto Supremo 60



21.9.5.3 – El máximo valor de **P**_u actuando en la sección transversal definida en 21.9.5.2 debe ser menor o igual que **0.35f**'_c**A**_g.

B 21.9.5.3 – El límite que se impone a la carga axial pretende asegurar una mínima capacidad de deformación plástica del muro. En secciones asimétricas (ej.: armadura asimétrica, secciones tipo T, etc.) este límite podría ser insuficiente.

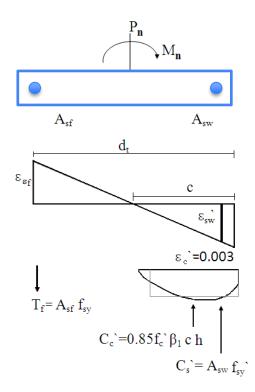


ecu ≤ 0.008

21.9.5.4 – La sección crítica de todo muro con razón de aspecto \mathbf{H}_t/ℓ_w mayor o igual a 3 debe tener una capacidad de curvatura, ϕ , mayor que la demanda de curvatura, ϕ_u , calculada a partir de la expresión (21-7a). Alternativamente se permite calcular ϕ_u con la expresión (21-7b). Esta verificación se debe hacer considerando la mayor carga axial \mathbf{P}_u consistente con δ_u . La deformación unitaria, ε_c , en la fibra mas comprimida de la sección crítica del muro deberá ser menor o igual que 0.008.

Límite para la carga axial





Sección simétrica, armadura sólo en los bordes:

$$C_c + C_s - T_f = P$$

$$C_c = P + (T_f - C_s)$$

$$T_f = C_s$$

$$C_c = P \to 0.85 f_c' \beta_1 c e_w = P$$

$$P = 0.35 L_w e_w f_c' \to 0.85 f_c' \beta_1 c e_w = 0.35 L_w e_w f_c'$$

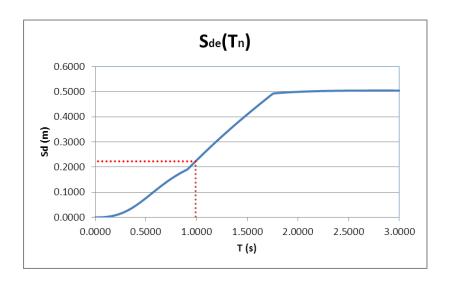
$$\frac{c}{L_w} = \frac{0.35}{0.85 \beta_1} \approx 0.48$$

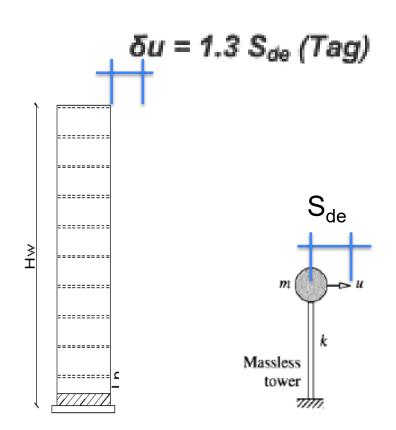
Estimación de la Demanda de Techo



$$\phi_u = \frac{2\delta_u}{H_r l_w} = \frac{\varepsilon_c}{c} \le \frac{0.008}{c} \tag{21-7a}$$

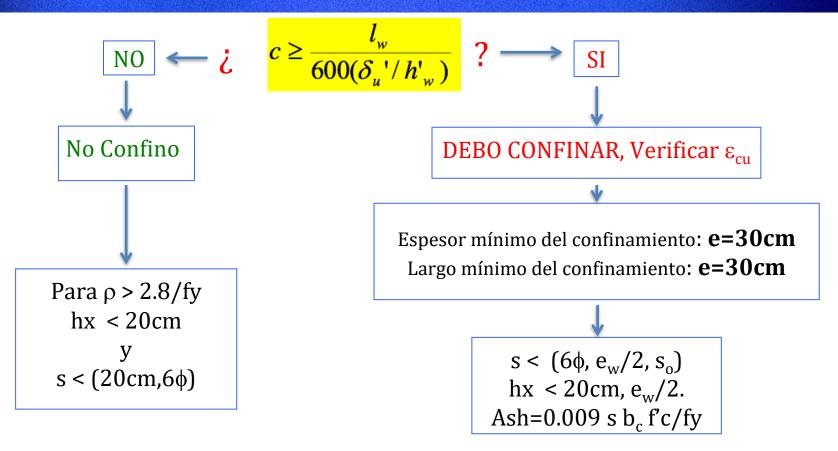
$$\phi_u = \frac{\delta_u - \delta_e}{l_p(H_t - l_p/2)} + \phi_e = \frac{\varepsilon_c}{c} \le \frac{0.008}{c} (21 - 7b)$$





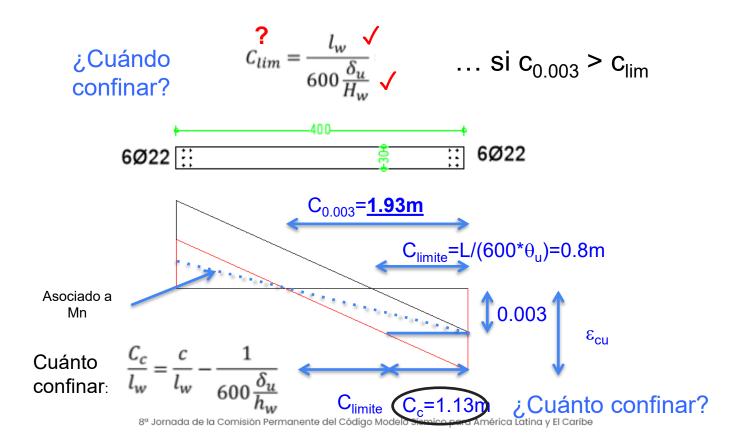
Estimación de la Demanda de Techo





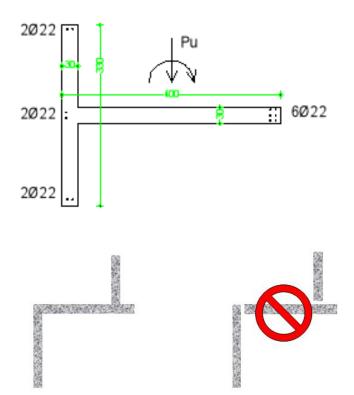
Muro rectangular y armadura simétrica





Secciones Compuestas: "T", "L", "Z", etc.

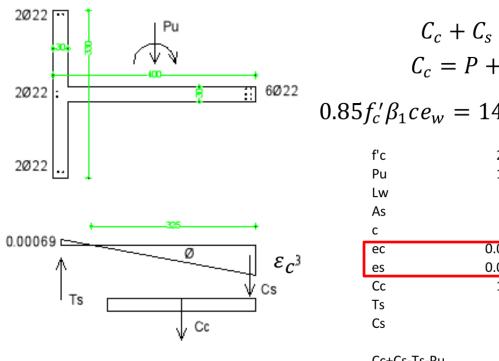




21.9.5.2 - Al verificar el diseño de las secciones transversales compuestas (L,T, C, u otras formas) se debe considerar la sección completa con armaduras todas especificadas. Alternativamente, se puede verificar utilizando el ancho efectivo del ala. El ancho efectivo del ala en secciones con alas debe extenderse desde la cara del alma una distancia igual al menor valor entre la mitad de la distancia al alma de un muro adyacente y el 25% de la altura total del muro.

Muro "T" y armadura simétrica





$$C_c + C_s - T_f = P$$
 $C_c = P + (T_f - C_s)$
 $0.85 f_c' \beta_1 ce_w = 1470 \ ton - 62.61 \ ton$

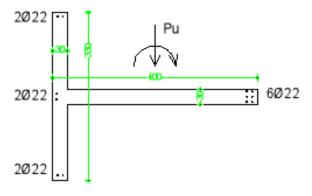
$$\begin{array}{cccccc} f'c & 2000 & & & & \\ Pu & 1470 & & & & \\ Lw & 4 \ ew & 0.30 & & \\ As & 23 \ cm2 & & & \\ c & & 3 & & \\ ec & 0.0030 & & \\ es & 0.0007 & & \\ Cc & 1404 & & \\ Ts & 33 & 63 & 1407 & \\ Cs & 96 & & & \\ & & & & & \\ \end{array}$$

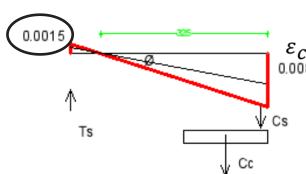
0.00092 1/m

fiu

Muro "T" y armadura simétrica







Estimación del giro unitario de fluencia:

$$\phi_y = \frac{1.7\varepsilon_y}{L_w} = \frac{0.0034}{4} = 0.00085 \frac{1}{n}$$

Giro unitario último:

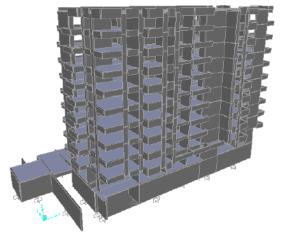
Se mantiene "c" y aumenta "εςц".

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{0.008}{3.25} = 0.0024 \frac{1}{m}$$

$$\theta_u = \frac{L_w}{2} * \emptyset_u = 0.0024 \frac{1}{m} * \frac{4m}{2} = 0.48\%$$

Edificio de 10 pisos + 1 sub. – Daño severo 27F





Peso	•	•
sísmico	5373.1493	[Ton]

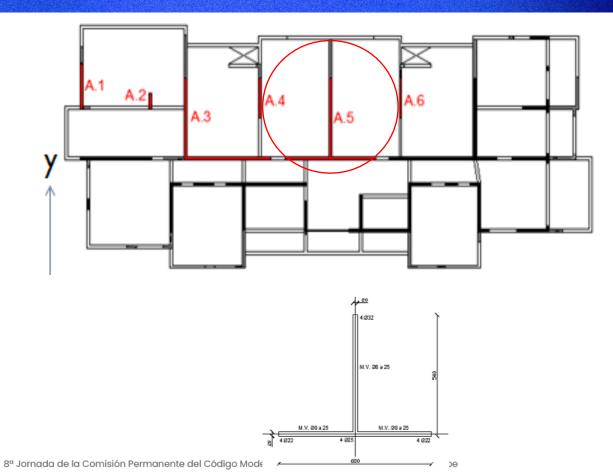
Sentido X		
Sx	3059.977	
T*,x	0.397	
R*	8.01	
Sx/R*	382.07	
Cmin	0.067	
Q min	358.210	
Cmax	0.140	
Qmax	752.24	
Q usado	382.07	
Refectivo	8.01	

Sentido Y		
Sy	1987.285	
T*,y	0.667	
R*	9.36	
Sy/R*	212.35	
Cmin	0.067	
Q min	358.210	
Cmax	0.140	
Q max	752.24	
Qusado	358.21	
R efectivo	5.55	

S LA ELEWION E/E(3)

Muro A.5.

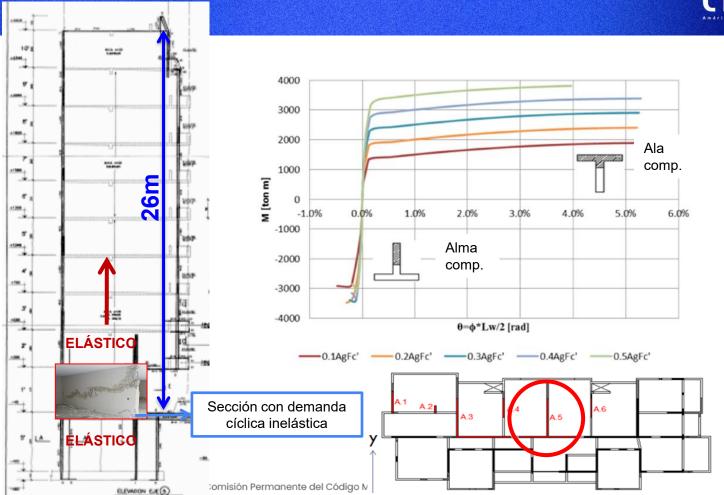










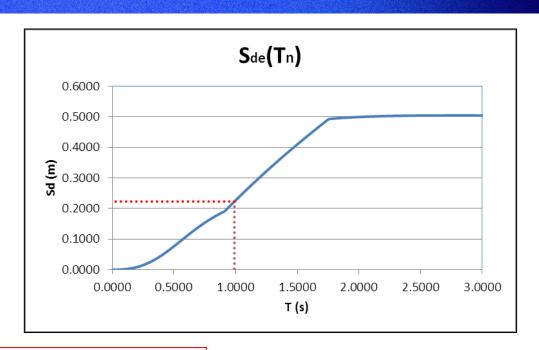


Muro A.5. - Estimación de la demanda de deformación



$$T_{ag} = 1.5 \cdot T_{bruto}$$

 $T_{ag} = 1.5 \cdot 0.66 (s)$
 $T_{ag} = 0.99 (s)$
 $\delta_u = 1.3 \cdot S_d(T_{ag})$
 $\delta_u = 0.286(m)$



$$\theta_u = \frac{\delta_u}{H_w} = \frac{0.286 \; (m)}{26 \; (m)} = 1.1\%$$

Muro A.5. – Estimación de la Demanda de rotación



Demanda de "\phi" según DS 60

$$\phi_u = \frac{\delta_u - \delta_e}{L_p(H - \frac{L_p}{2})}$$
 21-7 (b)

D.S. 60	Suelo D
Фи 27-7 (a) (1/m)	0.0041
Фи 27-7 (b) (1/m)	0.0030

Donde:

$$\delta_e = \frac{11}{40} \cdot H^2 \cdot \emptyset_y = 0.138 \ (m)$$

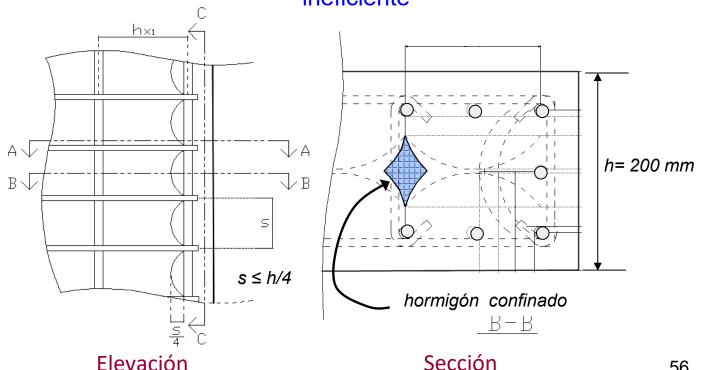
$$\emptyset_y = \emptyset_e = \frac{2 \cdot \varepsilon_y}{L_w} = 0.74 E - 3 (\frac{1}{m})$$

$$L_p = \frac{L_w}{2} = 2.7 \ (m)$$

Efecto del confinamiento, εc.



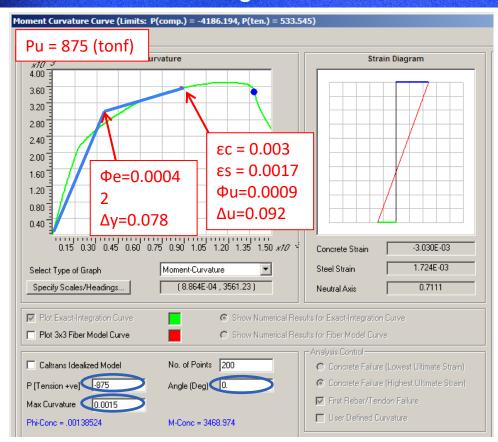
El confinamiento en muros delgados es inherentemente ineficiente

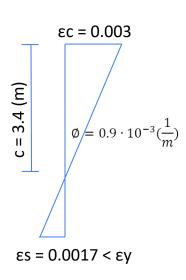


56

Curva M-φ Sección Original Hormigón No confinado H-22.5 e =20 (cm)

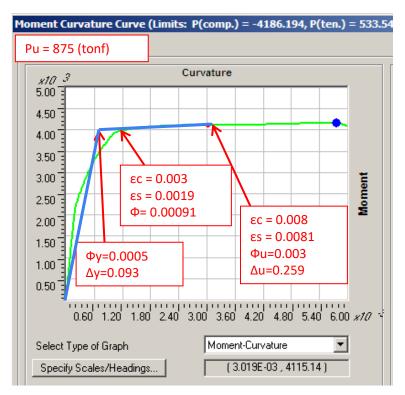


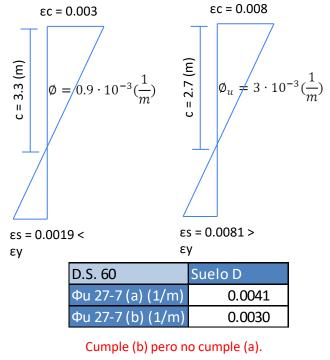




$$C_{lim} = \frac{l_w}{600 \frac{\delta_u}{H_w}} = 0.81m$$
 $3.4 > C_{lim} :$ $necesita\ confinamiento$







Muro A.5. – Comportamiento real v/s esperado



Corte vs Desplazamiento de Techo

