

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO NO LINEAL DE SISTEMAS DE TABIQUES SISMORRESISTENTES

Marcelo Rubinstein^a, Oscar Möller^a, Mauro Poliotti^a, Juan P. Ascheri^a, y Alejandro Giuliano^b

^aInstituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina, marub@fceia.unr.edu.ar

^bInstituto Nacional de Prevención Sísmica, Roger Balet 47N, 5400 San Juan, Argentina, giuliano@inpres.gov.ar

Palabras clave: tabiques sismorresistentes, análisis no lineal, diseño por desplazamientos.

Resumen. En este trabajo se estudia, utilizando análisis no lineal estático y dinámico, el comportamiento de diversos sistemas de tabiques sismorresistentes diseñados con los mismos requisitos establecidos en desplazamientos. Se consideran diversos parámetros de la respuesta, de interés para evaluar el desempeño correspondiente, efectos torsionales y la interacción entre tabiques de distinta longitud. Para el análisis dinámico no lineal se aplican treinta acelerogramas compatibles con la microzonificación sísmica del Gran Mendoza, obteniendo para cada parámetro el valor medio más un desvío estándar. Los resultados contribuyen a comprender aspectos del comportamiento de los sistemas de tabiques sismorresistentes, siendo útiles para su diseño basado en desplazamientos.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tabiques constituyen una tipología estructural típica para construcciones elevadas en la ingeniería sismorresistente. Actualmente está aceptado que su diseño debe estar basado en desplazamientos, en lugar de fuerzas (Paulay, 2002; Priestley et al., 2007), asegurando el cumplimiento de estados límites referidos a ductilidad, índices de daño y distorsiones de piso, ó comportamiento elástico. Por otra parte se debe tener en cuenta más de un nivel de sollicitación sísmica, estableciendo como objetivo el tipo de respuesta para cada uno, procedimiento conocido como “diseño basado en el desempeño” (Visión 2000, 1995). Con este marco se ha desarrollado una metodología de diseño preliminar (Rubinstein et al., 2012), seguido por “dimensionamiento por capacidad” (Paulay and Priestley, 1992), cuyos ejemplos han sido verificados con análisis no lineal, estático y dinámico.

En este trabajo se estudia, utilizando análisis no lineal estático y dinámico, el comportamiento de diversos sistemas de tabiques sismorresistentes, con longitudes uniformes o distintas, correspondientes a un edificio elevado de cinco pisos y diseñados aplicando la metodología de diseño preliminar, con los mismos requisitos establecidos en desplazamientos y dimensionamiento por capacidad. Se realiza un análisis comparativo de diversos parámetros de interés para evaluar el desempeño de los sistemas estructurales, tales como corte basal, desplazamiento en la cima de fluencia, distorsiones de piso, ductilidad requerida e índices de daño. También se estudia la variación de resultados debido a efectos torsionales y la interacción que, en el campo no lineal, tiene lugar entre tabiques de distinta longitud.

Para el análisis dinámico no lineal se utilizan treinta acelerogramas compatibles con la microzonificación sísmica del Gran Mendoza (INPRES, 1995), obteniendo para cada parámetro el valor medio más un desvío estándar.

Como conclusión se puede afirmar que se obtienen resultados que caracterizan el comportamiento de los sistemas estructurales compuestos por tabiques sismorresistentes, mejoran su comprensión y, en consecuencia, son de utilidad para el diseño basado en desplazamientos.

A continuación se encuentran la descripción de la sollicitación sísmica y del análisis no lineal empleado, los ejemplos utilizados, el análisis de resultados y las conclusiones obtenidas.

2 SOLICITACIÓN SÍSMICA

Se consideran dos niveles de sollicitación sísmica, sismos raros con período de recurrencia medio $T = 475$ años, y sismos frecuentes con $T = 43$ años, para los cuales se han construido espectros de diseño aplicando los resultados del análisis dinámico (valor medio más un desvío estándar) de respectivos conjuntos de treinta acelerogramas deducidos de un estudio de microzonificación sísmica del Gran Mendoza (INPRES, 1995).

Los espectros de diseño tienen formato de diagramas de capacidad (Ascheim and Black, 2000), son elásticos para sismos frecuentes e inelásticos, de ductilidad máxima constante, para sismos raros, constituyendo dos conjuntos en correspondencia con valores esperados de la aceleración máxima del suelo. Para los casos inelásticos la relación de reendurecimiento es 2%.

A título de ejemplo en la Figura 1 se muestra el espectro inelástico correspondiente a aceleración máxima del suelo 0.6 g.

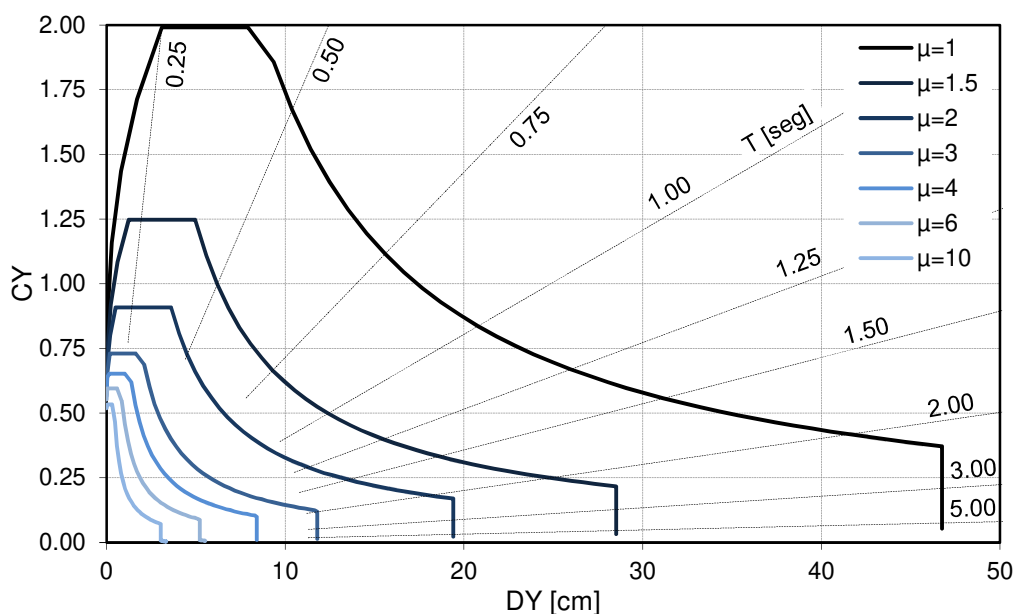


Figura 1: Espectro inelástico para sismos raros

3 ANÁLISIS NO LINEAL

Para modelar el sistema, la estructura es discretizada en planos resistentes verticales conectados en cada nivel por una losa rígida en su plano y flexible fuera de él, ver Figura 2. El modelo tiene tres grados de libertad por piso, dos horizontales y el giro alrededor del eje vertical (Möller et. al 2003).

Cada plano resistente es a su vez discretizado con elementos de barra para considerar los diferentes mecanismos que contribuyen al comportamiento histerético en las zonas críticas de las barras de hormigón armado (Möller and Foschi 2003). Cada elemento está compuesto por sub-elementos: (i) Sub-elemento elasto plástico, representa el comportamiento elástico de la barra y la respuesta no lineal en las regiones extremas con longitud variable de acuerdo con la historia de carga; (ii) Sub-elemento conexión, caracteriza la rotación en la interfaz barra-nudo debido a la degradación de la adherencia de la armadura anclada en el nudo. Extremos rígidos consideran nudos de dimensiones no despreciables.

La rigidez del sistema se calcula por ensamble de las rigideces de cada plano, que son obtenidas a partir de la rigidez de cada elemento de barra. Las masas están concentradas en cada piso, donde también se tiene en cuenta la inercia rotacional de la masa del piso y la excentricidad del centro de masa con respecto al eje vertical Y. Amortiguamiento proporcional de Rayleigh es asumido, con una combinación lineal de masa y rigidez, y relaciones de amortiguamiento especificadas para los dos modos que más participan en la respuesta. Las cargas gravitacionales son incluidas en cada plano, para considerar su influencia en los esfuerzos internos de cada barra, y en la evaluación de otros parámetros de respuesta. Las cargas laterales para el push-over, o el acelerograma para los análisis dinámicos, se aplican en el sistema global. Para considerar la torsión accidental se desplaza el centro de masa en dirección perpendicular a la analizada.

Este modelo combina suficiente precisión en los resultados y simplicidad para analizar sistemas espaciales de interés práctico en la ingeniería sismorresistente, y permite obtener todos los parámetros de respuesta necesarios para las verificaciones.

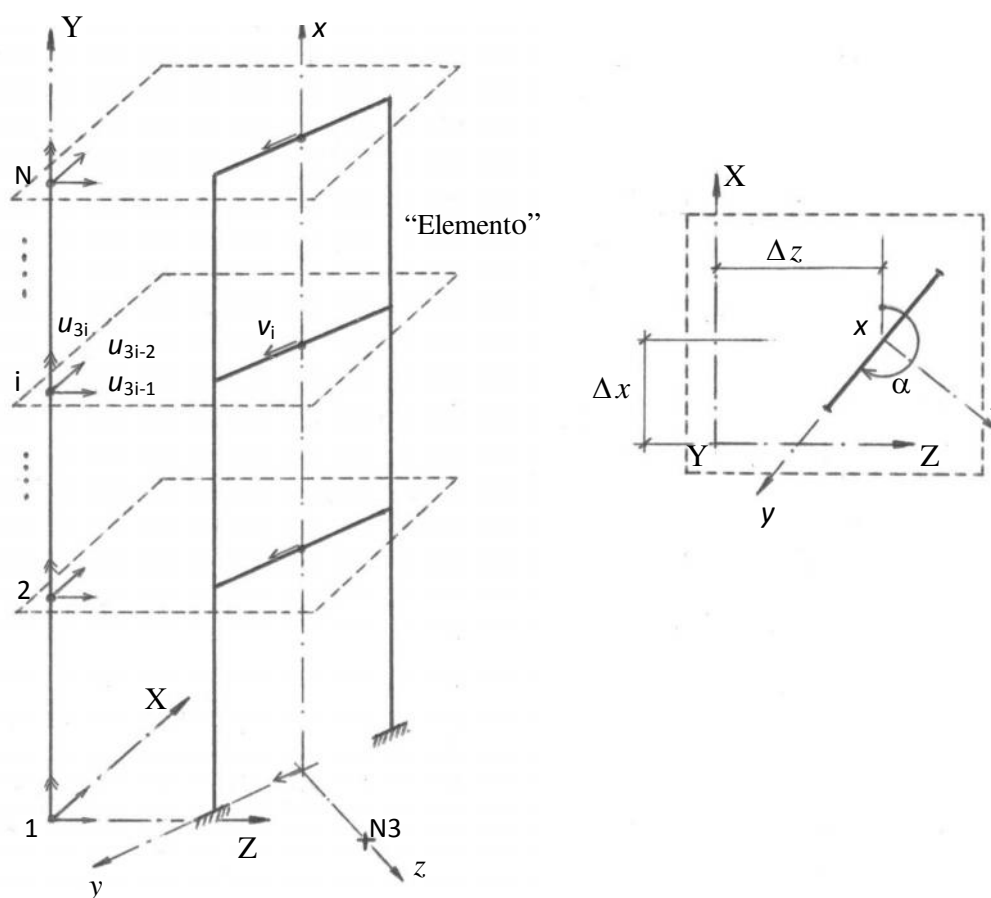


Figura 2: Modelo del sistema estructural

4 EJEMPLOS

4.1 Descripción y datos

Se consideran cuatro casos, correspondientes a construcciones de cinco pisos ubicadas en la ciudad de Mendoza, representados en planta en la Figura 3 y en elevación en la Figura 4, donde se encuentran datos de los materiales y las cargas gravitacionales.

4.2 Diseño

Para cada uno de los casos se realiza el diseño preliminar, basado en desplazamientos, con dos niveles de sollicitación sísmica y correspondientes objetivos de desempeño: sismos raros – seguridad de vidas y sismos frecuentes – desempeño operacional. Los requisitos establecidos son los siguientes

- a) Sismos raros, nivel de desempeño seguridad de vidas:

Para un plano resistente genérico: ductilidad global (INPRES, CIRSOC, 2005), índice de daño de Park y Ang ($ID = 0.8$), ductilidad equivalente función de los dos parámetros anteriores (Fajfar, 1992) y distorsión de piso máxima ($\theta_{sv} = 2 \%$).

Para el sistema estructural: índice de daño de Park y Ang ($ID = 0.6$).

- b) Sismos frecuentes, nivel de desempeño operacional:

Respuesta elástica y distorsión de piso máxima ($\theta_{op} = 0.7 \%$).

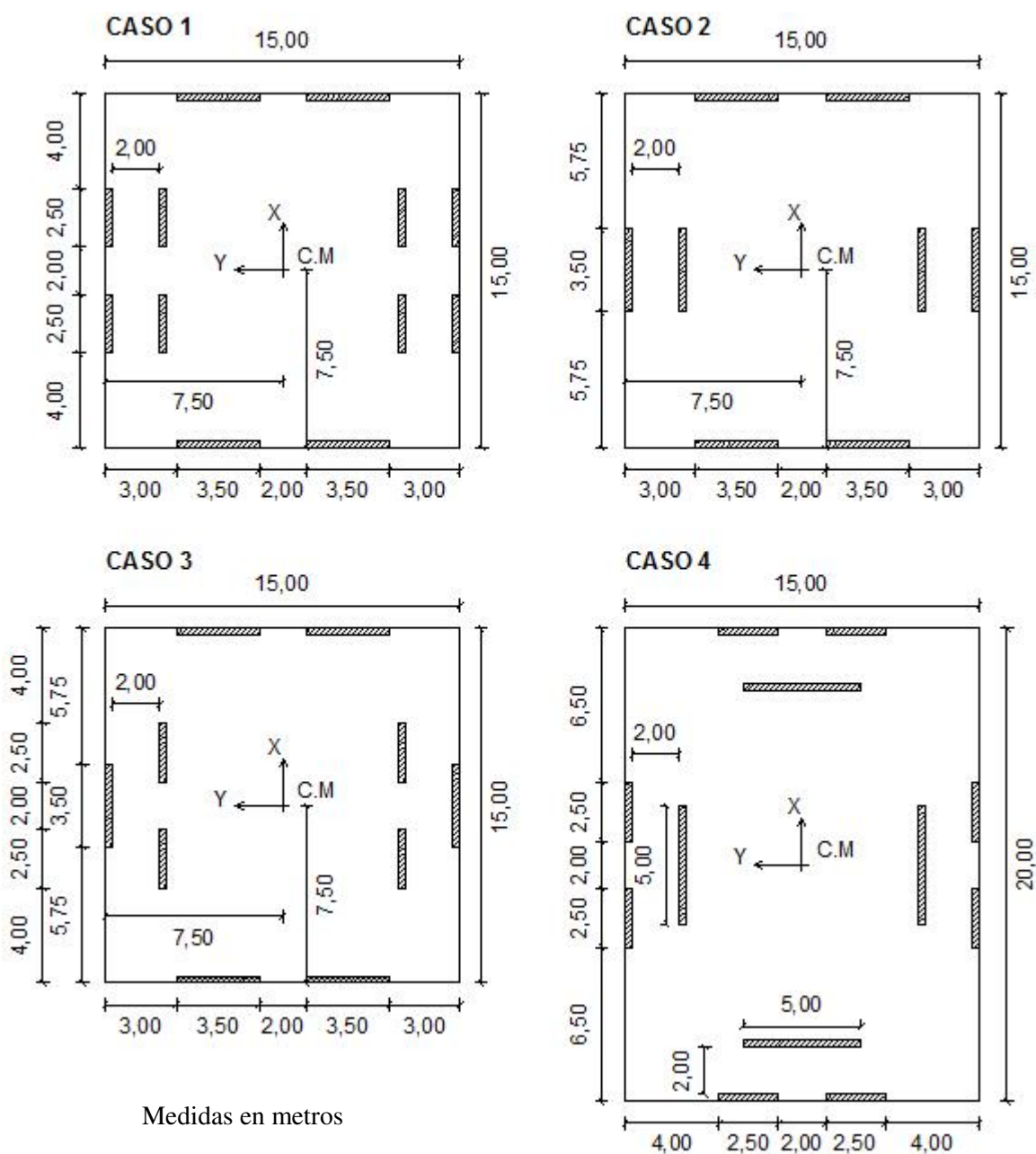
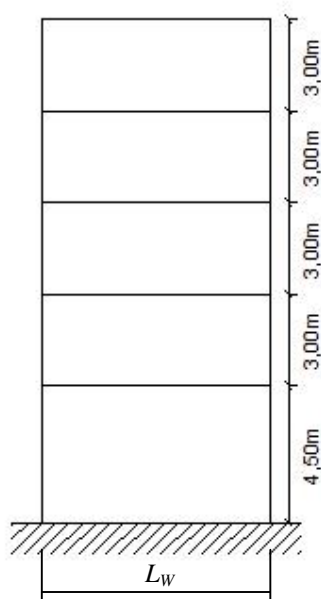


Figura 3: Plantas



Espesor de los tabiques: 30 cm

Materiales (CIRSOC 201):

Hormigón H-25, Acero ADN 420

Cargas gravitacionales en cada nivel

Permanentes: 8 KN/m^2

Sobrecarga: 2 KN/m^2

Factor de mayoración de sobrecarga

$f_1 = 0.50$

Figura 4: Elevación

Los porcentajes de participación en la resistencia (corte basal) de los tabiques se calculan proporcionales al cuadrado de sus respectivas longitudes (L_w), criterio que conduce a cuantía de armadura longitudinal uniforme, para solicitaciones axiales similares.

Al diseño preliminar sigue el “dimensionamiento por capacidad” (INPRES-CIRSOC 103, Parte II, 2005), que permite determinar las armaduras de cada tabique. En la Tabla 1 se encuentran las cuantías de armadura longitudinal correspondientes a cada caso.

CASO	L_w (m)					
	Dirección X			Dirección Y		
	2.50	3.50	5.00	2.50	3.50	5.00
1	1.0				1.4	
2		1.4			1.4	
3	1.1	1.1			1.4	
4	1.9		1.4	1.9		1.4

Tabla 1: Cuantías de armadura longitudinal (%)

4.3 Análisis no lineal

Para cada uno de los casos considerados se realizan análisis no lineales estático y dinámico en la dirección X. A continuación se encuentran los resultados correspondientes.

4.3.1 Análisis no lineal estático

En las Figuras 5, 6, 7 y 8 se muestran los diagramas push-over, corte basal vs. desplazamiento en la cima, de los tabiques componentes y del sistema estructural, para cada caso. Se incluyen los diagramas resultantes del diseño preliminar.

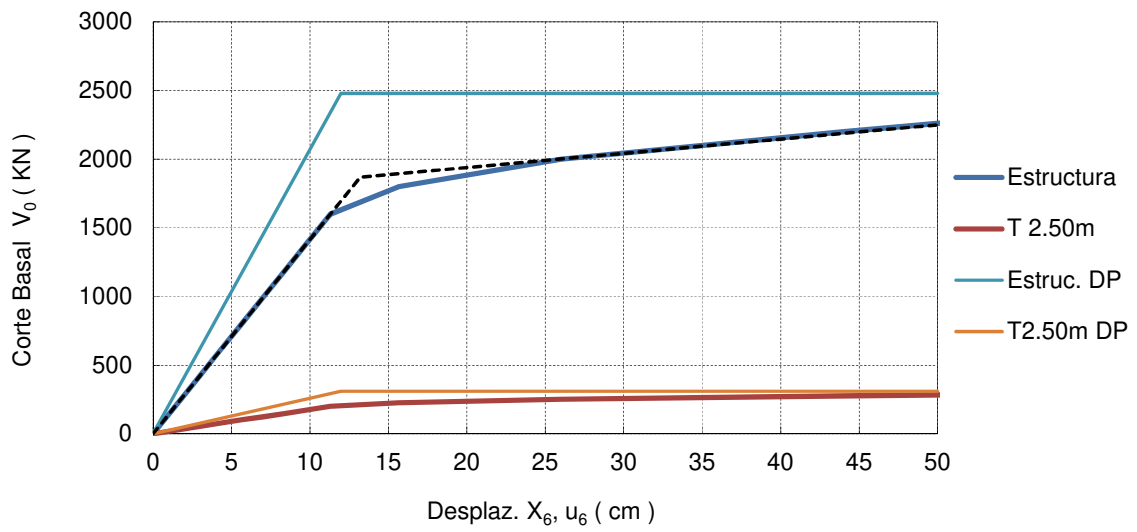


Figura 5: Diagramas push-over del caso 1

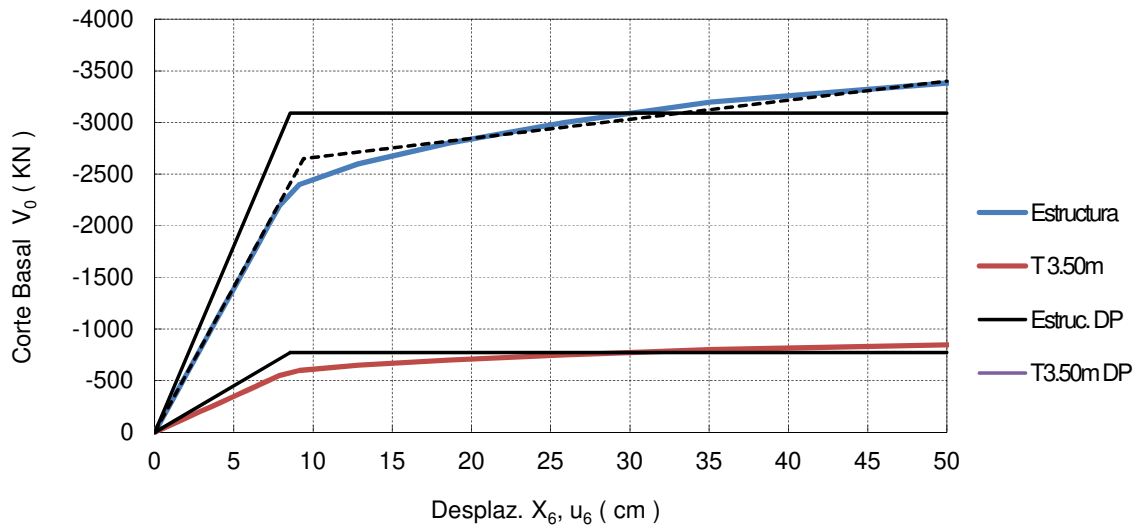


Figura 6: Diagramas push-over del caso 2

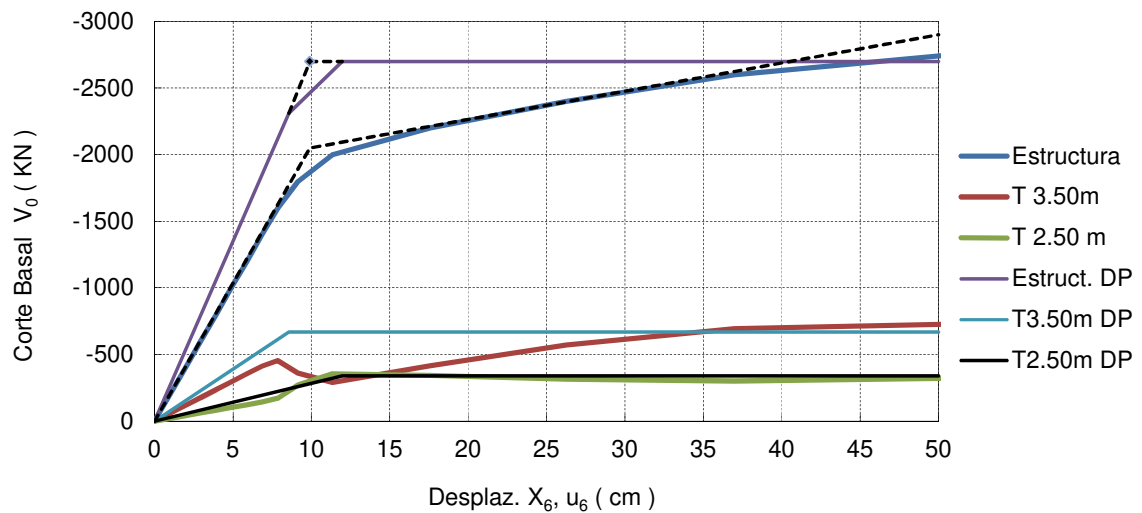


Figura 7: Diagramas push-over del caso 3

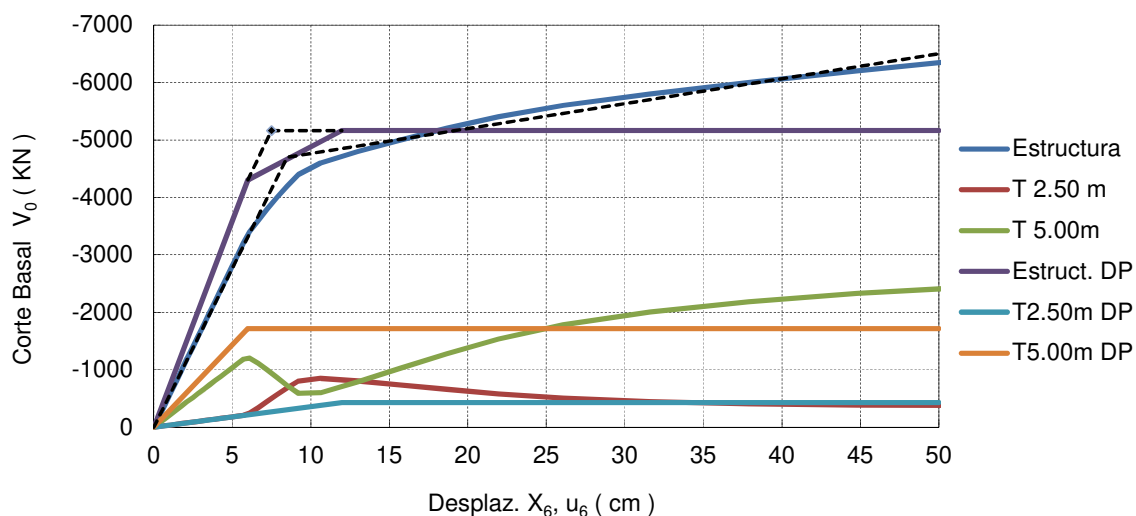


Figura 8: Diagramas push-over del caso 4

En la Tabla 2 se encuentran los valores del desplazamiento de fluencia en la cima D_Y y de la relación de rigideces (postfluencia vs. elástica) o reendurecimiento r que resultan de simplificar en forma bilineal el diagrama push-over del sistema estructural de cada caso. También, para comparar, figuran los valores del desplazamiento de fluencia en la cima calculados en el diseño preliminar.

CASO	D_Y (cm)		r (%)
	Push-over	Diseño preliminar	
1	13.2	12.0	7.3
2	9.4	8.6	6.6
3	10.5	10.0	8.2
4	9.0	7.2	5.7

Tabla 2: Desplazamientos de fluencia en la cima y reendurecimiento.

En la Figura 9 se observa, a modo de ejemplo para el caso 1, la configuración deformada en altura para valores crecientes del desplazamiento en la cima. Para los otros casos la respuesta correspondiente resulta similar.

4.3.2 Análisis no lineal dinámico

El análisis no lineal dinámico se realiza utilizando treinta acelerogramas que fueron los utilizados en la construcción de los espectros de diseño de sismos raros. Los resultados obtenidos corresponden a los respectivos valores medios más un desvío estándar. Para cada caso se consideran dos situaciones del centro de masa: Subcaso (a): coincidente con el centro geométrico de la planta; Subcaso (b): desplazado 1.00 m en la dirección Y con respecto a dicho centro.

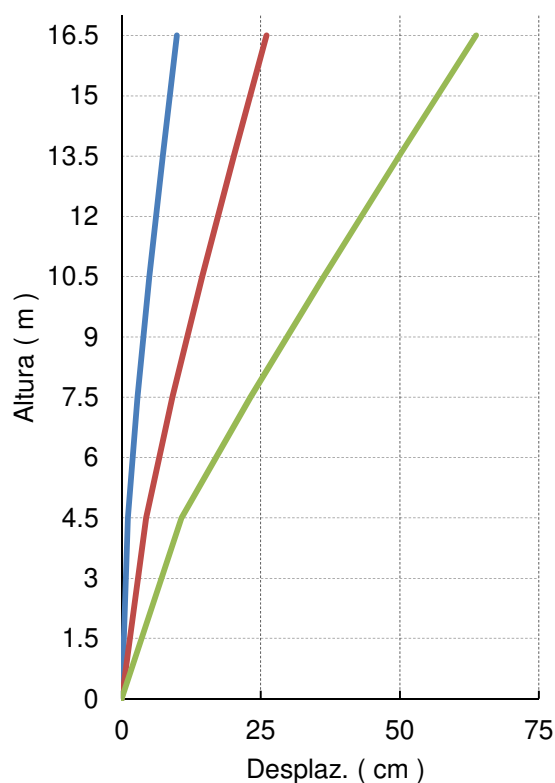


Figura 9: Deformadas progresivas del caso 1

Se presentan en la Tabla 3 los siguientes resultados para el sistema estructural:

$D_{m\acute{a}x}$: desplazamiento máximo en la cima, del centro geométrico.

$D_{m\acute{a}x} / D_Y$: ductilidad máxima requerida, donde D_Y es el desplazamiento de fluencia en la cima determinado con análisis no lineal estático. Los valores entre paréntesis que en la tabla acompañan a estos resultados, corresponden a la ductilidad equivalente disponible utilizada en el diseño preliminar.

$V_0 \text{ máx}$: corte basal máximo.

$ID_{m\acute{a}x}$: índice de daño máximo global del sistema, calculado como suma ponderada de los índices de daño global máximo de los planos resistentes.

$DIST_{m\acute{a}x}$: distorsión máxima de piso.

CASO		$D_{m\acute{a}x}$ (cm)	$D_{m\acute{a}x} / D_Y$	$V_0 \text{ máx}$ (KN)	$ID_{m\acute{a}x}$	$DIST_{m\acute{a}x}$ (%)
1	a	33.9	2.57 (2.65)	3344	0.21	2.6
	b	35.0		3309	0.21	2.7
2	a	28.7	3.05 (2.65)	3938	0.17	2.1
	b	26.1		3855	0.31	2.0
3	a	30.9	2.94 (2.65)	3545	0.32	2.4
	b	29.7		3495	0.27	2.3
4	a	21.1	2.35 (2.65)	6324	0.20	1.6
	b	21.1		6226	0.66	1.6

Tabla 3: Resultados del sistema estructural.

Los resultados para los tabiques componentes se presentan en la Tabla 4, donde:

$D_{m\acute{a}x}$: desplazamiento máximo en la cima.

$V_{0\ m\acute{a}x}$: corte basal máximo.

$ID_{m\acute{a}x}$: ndice de daño máximo global del plano.

$IDLOM$: ndice de daño local máximo del plano.

Para el subcaso (b) los resultados de la Tabla 4 corresponden al tabique con mayor índice de daño.

CASO		L_w (m)	$D_{m\acute{a}x}$ (cm)	$V_{0\ m\acute{a}x}$ (KN)	$ID_{m\acute{a}x}$	$IDLOM$
1	a	2.50	33.9	382	0.21	0.30
	b		35.1	515	0.26	0.36
2	a	3.50	28.7	914	0.17	0.26
	b		26.7	1834	0.42	0.52
3	a	2.50	30.9	599	0.20	0.30
	b		29.4	679	0.24	0.36
	a	3.50	30.9	1332	0.40	0.54
	b		30.3	1490	0.36	0.49
4	a	2.50	21.1	1273	0.18	0.24
	b		21.9	1538	0.74	0.82
	a	5.00	21.1	2757	0.22	0.32
	b		21.4	3902	0.41	0.53

Tabla 4: Resultados de los tabiques componentes.

5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1 Respuesta esttica

- Desplazamiento en la cima de fluencia:

En los diagramas push-over obtenidos con análisis no lineal estático resulta notoria, para todos los casos, el cambio de rigidez del sistema estructural, atribuible a la fluencia de las armaduras ubicadas en los extremos traccionados de las secciones de empotramiento. Luego se observa una disminución progresiva y lenta de rigidez, acompañando a la progresiva fluencia de las armaduras distribuidas a lo largo de las secciones que van conformando la rótula plástica.

En la Tabla 2 se observa que los desplazamientos de fluencia en la cima calculados en el diseño preliminar presentan, a los fines de dicho diseño, valores acordes con los obtenidos con una aproximación bilineal de los diagramas push-over.

- Corte basal:

En los diagramas push-over se observan, en el período inelástico, valores crecientes del corte basal de acuerdo con los valores del reendurecimiento de la Tabla 2, que pueden superar el valor utilizado en el diseño preliminar.

- Interacción entre tabiques:

En los diagramas push-over de los casos 3 y 4 se observa la interacción que se produce en el campo inelástico entre tabiques de diferentes longitudes. El tabique de mayor longitud que es el primero en entrar en el campo inelástico, se apoya o descarga en el de menor longitud

hasta que éste también entra en el campo inelástico produciéndose luego un notorio reendurecimiento del tabique de mayor longitud y ablandamiento del más corto tendiendo ambos a alcanzar valores del corte basal del orden de los previstos en el diseño preliminar.

5.2 Respuesta dinámica

▪ Subcaso (a):

- Comparando los resultados de la distorsión de piso máxima para los tres primeros casos, se observa en la Tabla 3 que, para valores similares de corte basal, la intervención en el sistema de tabiques de mayor longitud conduce a una disminución progresiva de dicho parámetro (de 2.6 % a 2.1 %).

- El índice de daño máximo alcanza, para estos casos, un valor máximo para el caso 3 (L_W : 2.50 m y 3.50 m) y mínimo para el caso 2 (L_W : 3.5 m). En la Tabla 2 se puede observar que en el valor máximo del caso 3 influye el valor del índice de daño del tabique de mayor longitud ($ID_{máx} = 0.40$) atribuible a su ingreso prematuro en el campo inelástico con respecto al tabique de menor longitud. Lo expresado se confirma en el caso 4 (L_W : 2.50 m y 5.00 m) para el que se observa, en la Tabla 3, el menor valor de la distorsión del piso máxima (1.6 %) y, en la Tabla 4, que al tabique de mayor longitud le corresponde un valor mayor del índice de daño, con respecto al de menor longitud (0.22 vs. 0.18).

- La distorsión de piso máxima supera, excepto en el caso 4, el valor límite establecido en el diseño preliminar (2.0 %). Esto es atribuible a que en el diseño preliminar se asume una configuración recta en altura en lugar de la deformada curva que se observa en la Figura 9.

- En la Tabla 3 se ve que los valores obtenidos para la ductilidad máxima (2.35 a 3.05) son del orden del valor (2.65) de la ductilidad equivalente disponible, utilizada en el diseño preliminar.

- Los valores $V_{0máx}$ del sistema estructural, para los cuatro casos, son mayores a los respectivos valores que se encuentran en los diagramas push-over en correspondencia con los valores $D_{máx}$. Esta aparente contradicción se explica porque la distribución de fuerzas de inercia en altura difiere de la ley tipo triángulo invertido utilizada en la construcción de los diagramas push-over, de modo que una disminución del brazo de palanca de la resultante o corte basal con respecto al empotramiento implica un incremento de su valor para lograr el mismo momento flector en la base. A título de ejemplo en la Figura 10 se muestra la distribución de fuerzas de inercia en altura para el sistema estructural del caso 1 y para el instante en que para el acelerograma que contribuye con el mayor valor en el cálculo de $V_{0máx}$, se obtiene el corte basal máximo. El brazo de palanca de la resultante o corte basal, con respecto al empotramiento es 8.38 m, inferior a dos tercios de la altura (11 m), valor de la distribución tipo triángulo invertido.

▪ Subcaso (b):

Los resultados del subcaso *b*, que incluyen efectos torsionales, son en general del mismo orden que los del subcaso *a*, excepto en el índice de daño máximo. Para este parámetro se observa, en la Tabla 3, incrementos significativos en los casos 2 y 4. De acuerdo con esto, en la Tabla 4 se encuentran en dichos casos, para los tabiques componentes, aumentos importantes en el índice de daño máximo, el índice de daño local máximo y el corte basal.

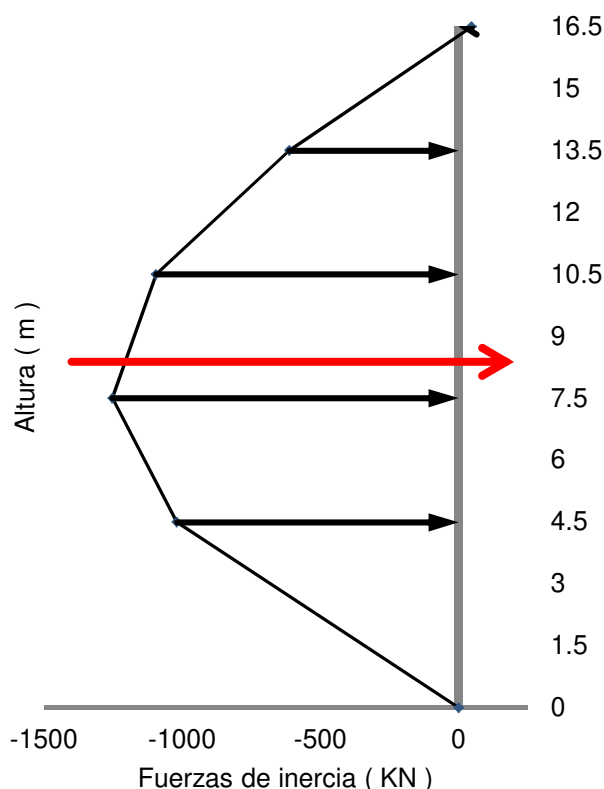


Figura 10: Distribución de fuerzas de inercia en altura para el caso 1 y acelerograma con mayor contribución a $V_{0máx}$

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado el comportamiento no lineal estático y dinámico de sistemas de tabiques sismorresistentes, utilizando cuatro casos, dos con tabiques de longitud uniforme y otros dos integrados por tabiques de diferente longitud, manteniendo constante la ubicación y la altura de la construcción.

Los cuatro sistemas estudiados fueron diseñados aplicando dos objetivos de desempeño, sismos raros – desempeño seguridad de vidas y sismos frecuentes – desempeño operacional, diseño preliminar basado en desplazamientos y diseño por capacidad.

Las conclusiones más significativas son las siguientes:

- Respuesta estática
 - La rama inelástica de los diagramas de push-over presenta un reendurecimiento del orden del 7 % debido a la entrada en fluencia progresiva de las armaduras distribuidas a lo largo de las secciones de los tabiques.
 - Los valores de los desplazamientos de fluencia en la cima obtenidos con una aproximación bilineal de los diagramas push-over son acordes con los calculados en el diseño preliminar.
 - En los sistemas integrados por tabiques con longitudes diferentes se pudo observar en los diagramas push-over de cada tabique los efectos de la interacción consistente en la descarga del tabique que entra primero en el campo inelástico sobre el que lo hace luego, seguido de un proceso inverso cuando este último también entra en el campo inelástico. Los efectos de esta interacción prácticamente se compensan y no son notorios en el diagrama push-over del sistema.

- Respuesta dinámica.
 - Para valores similares del corte basal la inclusión en el sistema de tabiques de mayor longitud provoca una disminución de la distorsión de piso máxima.
 - En los sistemas compuestos por tabiques de longitudes diferentes se produce concentración de daño en el tabique de mayor longitud, que es el de menor desplazamiento de fluencia en la cima.
 - El valor de la distorsión de piso máxima, en general, supera el límite requerido debido a que en el diseño preliminar se aproxima a una recta la configuración deformada curva.
 - Los valores de la ductilidad máxima son del orden del valor de la ductilidad equivalente disponible utilizada en el diseño preliminar.
 - El corte basal máximo, en todos los casos, supera el valor calculado en el diseño preliminar debido a que la correspondiente distribución en altura de las fuerzas de inercia se aparta de la ley tipo triángulo invertido asumida por dicho diseño.
 - La inclusión de efectos torsionales da lugar, en ciertos casos, a aumentos significativos del índice de daño máximo en los tabiques componentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Nacional de Rosario y al Instituto Nacional de Prevención Sísmica por el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Ascheim, M.; Black, E.F. Yield point spectra for seismic design and rehabilitation, *Earthquake Spectra*, 16:2, 2000.
- Fajfar, P. Equivalent ductility factors taking into account low cycle fatigue, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21, 837-848, 1992.
- INPRES Microzonificación Sísmica del Gran Mendoza, *Publicación Técnica N° 19*, Instituto Nacional de Prevención Sísmica, 1995.
- INPRES-CIRSOC. Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes Parte II, Construcciones de Hormigón Armado, *INPRES – CIRSOC 103*, 2005.
- Möller, O., Rubinstein, M., Cóceres, H. Combinación de planos sismorresistentes para análisis dinámico no lineal de estructuras espaciales. *Mecánica Computacional Vol. XXII*, 997-1011, AMCA, 2003.
- Möller, O., Foschi, R.O. Reliability evaluation in seismic design: a response surface methodology. *Earthquake Spectra*, 19 (3), 579-603, 2003.
- Paulay, T. An estimation of displacement limits for ductile systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 583-599, 2002.
- Paulay, T.; Priestley, M.J.N. *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley and Sons, Inc, 1992.
- Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J. *Displacement – Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, 2007.
- Rubinstein, M., Möller, O., Ascheri, J.P., Giuliano, A., Methodology for the seismic design of structural systems, including passive control, *15th World Conference on Earthquake Engineering 15WCEE*, ID 1084, Lisboa, 2012.
- SEAOC Vision 2000 Committee. Performance based seismic engineering of buildings. *Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, U.S.A.*, 1995.