

ANÁLISIS NÚMÉRICO PARA COMPATIBILIZAR DISEÑO PRELIMINAR SISMORRESISTENTE CON CÓDIGOS VIGENTES

Juan P. Ascheri, Oscar Möller, Pablo Sierra y Mauro Poliotti

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

Palabras clave: diseño sismorresistente, análisis dinámico no lineal, espectros de diseño.

Resumen. En la ingeniería sismorresistente actual está aceptado que el diseño estructural debe estar basado en desplazamientos, en lugar de fuerzas, siendo los parámetros directrices valores límites de ductilidad y distorsión de piso. Además debe considerarse más de un nivel de sollicitación sísmica, estableciendo como objetivo el tipo de respuesta para cada uno, sintéticamente expresado como “diseño basado en el desempeño”. También en la actualidad se encuentran en aplicación y desarrollo técnicas de control pasivo de la respuesta estructural, mediante dispositivos disipadores de energía, accionados por desplazamientos relativos de elementos estructurales con el objetivo de concentrar el daño en dichos dispositivos, reemplazables, y evitarlo en la estructura principal: pórticos, tabiques, etc. Basado en todos estos conceptos, en estos últimos años se ha desarrollado una metodología de diseño preliminar de estructuras sismorresistentes en donde se han ido incorporando paulatinamente los conceptos que hoy en día rigen a la ingeniería sismorresistente. En paralelo los reglamentos vigentes en nuestro país, INPRES CIRSOC 103 exigen cumplir con determinados procedimientos y requisitos que tuvieron su origen en fuentes conceptualmente diferentes a las enunciadas. Es de interés en este trabajo realizar un paralelismo entre estructuras diseñadas con ambas metodologías, pudiendo, como objetivo final, lograr utilizar la metodología de diseño preliminar para diseñar estructuras compatibles con los requerimientos de la reglamentación vigente. Ejemplos de aplicación en varios niveles tienen por fin avalar el análisis desarrollado y demostrar las ventajas de la utilización de esta metodología en sistemas con y sin control.

1 INTRODUCCIÓN

La filosofía del diseño basado en el desempeño (SEAOC Vision 2000, 1995; FEMA 356, 2000) incluye la elección del sistema estructural, tipo y ubicación de elementos resistentes, análisis, dimensionamiento y detallamiento de la estructura, y diseño de elementos no estructurales. Se definen objetivos de desempeño, que se deben cumplir con aceptable confiabilidad, cada uno representando niveles de desempeño, que son diferentes estados límites de daño, para cada nivel o intensidad del movimiento del terreno seleccionado (Hajirasouliha et al., 2012; Wei et al., 2012; Vamvatsikos, 2015; Catalán et al., 2015).

Es necesario comenzar el proceso con un diseño preliminar simple, conceptualmente claro, que verifique varios objetivos de desempeño, y que luego pueda ser mejorado a través de algún método más refinado.

En trabajos previos (Rubinstein et al., 2007, 2011, 2012) se ha presentado una metodología de diseño preliminar para construcciones sismorresistentes, incluyendo o no dispositivos de control pasivo de vibraciones, con dos niveles de desempeño, y utilizando espectros de diseño inelásticos. Esta metodología puede ser aplicada a estructuras cuya respuesta global, corte basal – desplazamiento en el último piso, puede ser representada por un sistema equivalente de un grado de libertad y donde el primer modo de vibración domina el comportamiento (Kilar et al., 2010; Dautaj et al., 2015).

En dichos trabajos previos, los espectros inelásticos se obtuvieron numéricamente a partir de la acción sísmica caracterizada en el estudio de Microzonificación Sísmica de Mendoza (INPRES, 1995). En este trabajo se proponen espectros inelásticos construidos a partir de acelerogramas con aceleración pico del suelo compatible con el reglamento actual INPRES-CIRSOC 103 Parte I (2013). También se incluye ahora la consideración de la sobrerresistencia del sistema estructural. Así, este proceso de diseño preliminar puede continuar luego con el dimensionamiento por capacidad del código INPRES-CIRSOC 103 Parte II (2005).

Se presentan ejemplos numéricos de sistemas estructurales de edificios de varios pisos, formado por tabiques resistentes aislados o acoplados, con y sin dispositivos de disipación de energía. Se muestra la simplicidad y eficiencia de la metodología y se extraen interesantes conclusiones de los resultados numéricos obtenidos.

2 METODOLOGÍA DE DISEÑO PRELIMINAR

La metodología de diseño preliminar utiliza el diagrama push-over en cada dirección resistente, que relaciona corte basal con desplazamiento del sistema equivalente de un grado de libertad. Se supone que el primer modo de vibración domina la respuesta, y permite la utilización posterior del dimensionamiento por capacidad.

La metodología está basada en desplazamientos, con estados límites asociados a ductilidad y a distorsión de piso (Paulay, 2002; Ayala et al., 2012, Caterino et al., 2013). Además, la metodología considera más de un nivel de demanda sísmica y, para cada uno, establece el nivel de desempeño requerido dentro de los objetivos del “diseño basado en el desempeño”.

En resumen, el método consiste en calcular la resistencia (corte en la base) para cada dirección de análisis, para el sistema estructural y para cada componente, a partir de los requerimientos impuestos sobre los desplazamientos. Luego, con la resistencia conocida, se consideran los efectos torsionales y se verifica que los desplazamientos totales resultantes de la traslación y la rotación no excedan los valores límites.

La Figura 1 muestra el diagrama de bloques del procedimiento, y una breve descripción de cada uno se realiza a continuación.

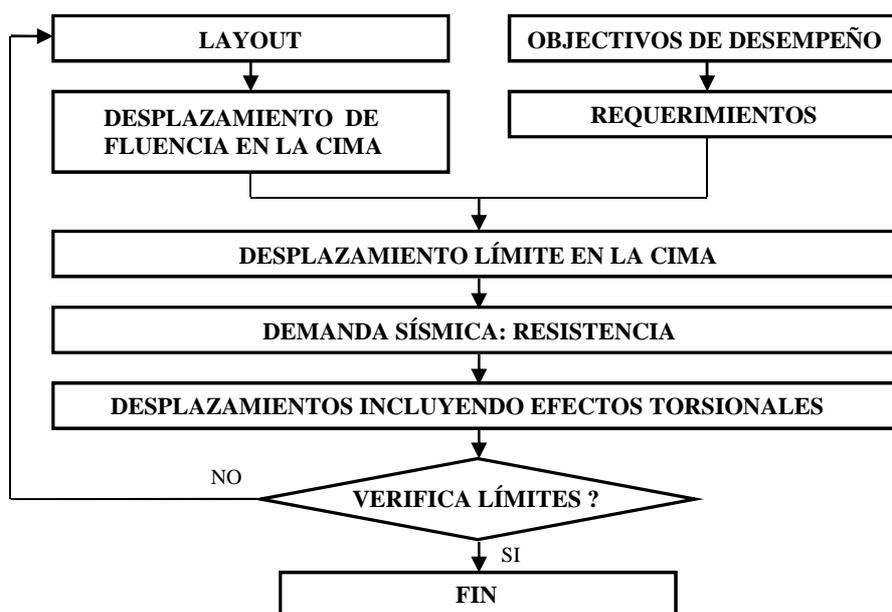


Figura 1: Proceso de diseño preliminar

El layout consiste en la propuesta inicial del sistema estructural, indicando el número y ubicación de los componentes o planos resistentes, tipo de estructura y materiales a utilizar. Este paso inicial es el más importante del diseño preliminar, debe tener en cuenta los requerimientos arquitectónicos y los conceptos fundamentales de la ingeniería sísmica de acuerdo con las demandas prescriptas.

2.1 Desplazamiento de fluencia en la cima y diagrama push-over

a) Sistemas sin control, tabiques (paredes de corte): El desplazamiento de fluencia en la cima para carga lateral con distribución triangular, que es aproximadamente consistente con el primer modo de vibración, resulta

$$D_{Yj} = \frac{11}{40} w_{Yj} H^2 = \frac{11}{40} \frac{2v_Y}{l_{Wj}} H^2 \quad (1)$$

Donde D_{Yj} es el desplazamiento de fluencia en la cima para el tabique j , w_{Yj} es la curvatura de fluencia en la base, v_Y es la deformación de fluencia de la armadura de refuerzo (hormigón armado), l_{Wj} es la longitud del tabique y H es la altura total. La Figura 2 muestra el diagrama push-over entre el corte en la base V y el desplazamiento en la cima D del sistema.

Si n es el número de planos resistentes o componentes en el sistema, luego

$$V_U = \sum_{j=1}^n V_{Uj}, \quad \frac{V_U}{D_Y} = \sum_{j=1}^n \frac{V_{Uj}}{D_{Yj}} \quad (2)$$

Como criterio de diseño, se adoptan los coeficientes de participación p_j definidos como

$$V_{Uj} = p_j V_U \quad \text{con} \quad \sum_{j=1}^n p_j = 1 \quad \rightarrow \quad D_Y = \left(\sum_{j=1}^n \frac{p_j}{D_{Yj}} \right)^{-1} \quad (3)$$

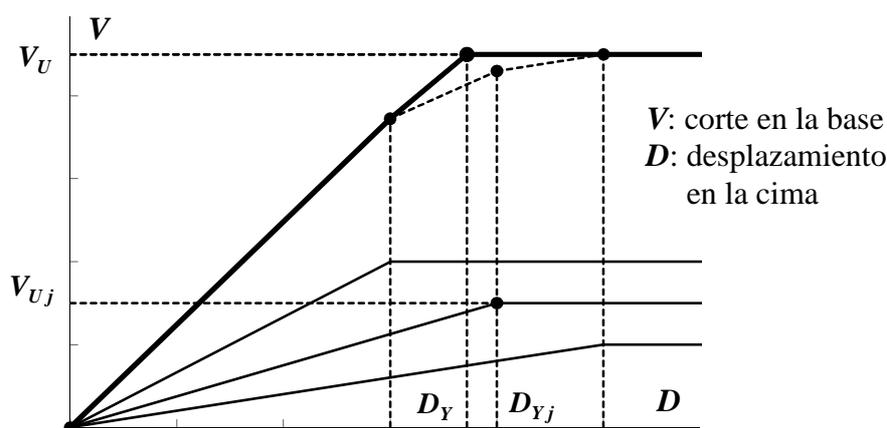


Figura 2: Diagrama push-over para sistema sin control

b) Sistemas con control: se consideran en este trabajo sistemas estructurales compuestos por estructuras planas, o planos resistentes, con dispositivos de disipación de energía por fluencia de acero ubicados como se muestra en la Figura 3.

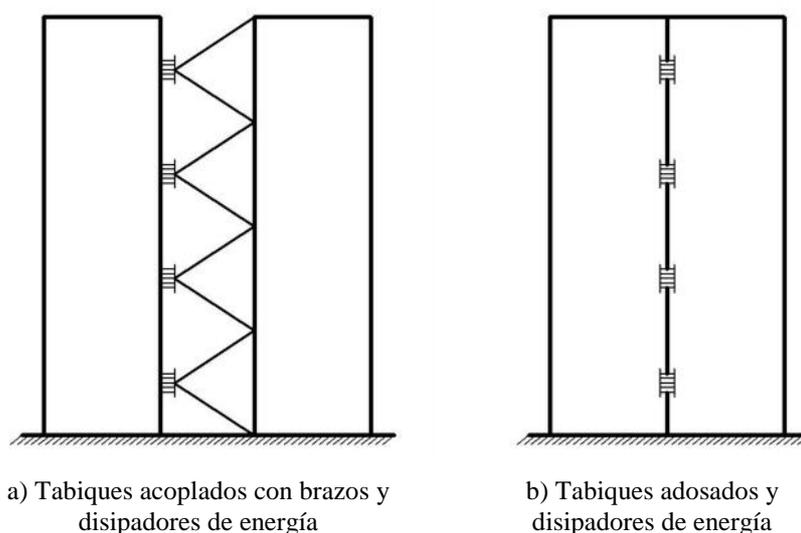


Figura 3: Planos resistentes con dispositivos de disipación de energía

El diagrama push-over de un componente j se muestra en la Figura 4. Presenta un primer tramo de comportamiento elástico que finaliza en el punto (D_{Ydj}, V_{Ydj}) en el que el disipador alcanza la fluencia. Luego continúa con otro segmento de comportamiento elástico de la estructura principal hasta alcanzar el desplazamiento de fluencia D_{Yj} .

Si la fuerza de corte máxima del plano resistente j es V_{mj} , y la fuerza en el disipador es V_{dj} , las siguientes relaciones se pueden definir entre resistencias y rigideces

$$v_j = \frac{V_{dj}}{V_{mj}}, \quad h_j = \frac{k_{2j}}{k_{1j}} \quad (4)$$

Luego, se puede obtener el desplazamiento de fluencia de los disipadores D_{Ydj} , y el del plano resistente D_{Yj} (Rubinstein et al., 2012)

$$D_{Yd j} = D_{Y j} \frac{v_j h_j}{1-h_j}, \quad D_{Y j} = \frac{11-2.33 v_j}{40} \frac{2v_y}{l_{Wj}} H^2 \quad (5)$$

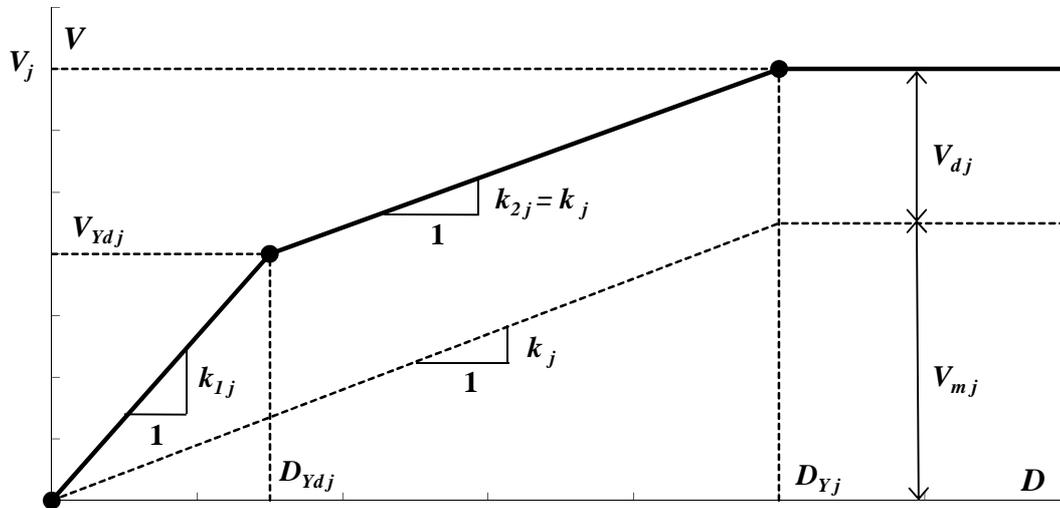


Figura 4: Diagrama push-over de un plano resistente con dispositivos de disipación de energía

El diagrama push-over para el sistema estructural se puede obtener por superposición de los respectivos diagramas de los planos resistentes como se muestra en la Figura 5.

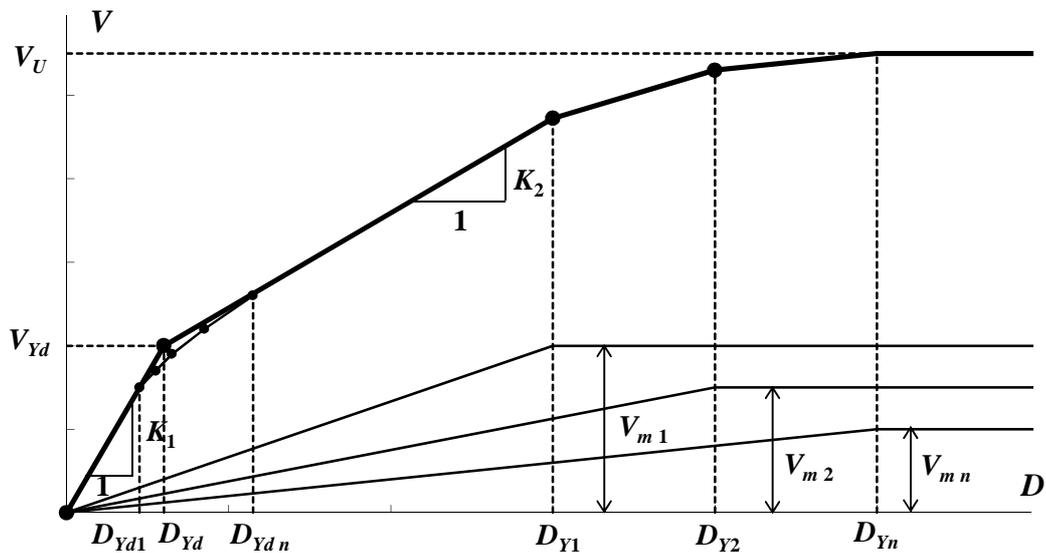


Figura 5: Diagrama push-over de un sistema con dispositivos de control

Se pueden adoptar las siguientes relaciones aproximadas

$$D_{Yd} = \frac{\sum_{j=1}^n D_{Yd j}}{n}, \quad h = \frac{K_2}{K_1} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j}{n} \quad (6)$$

2.2 Objetivos de desempeño y requerimientos

Cada nivel de desempeño está asociado a un nivel de terremoto de diseño y a algunos requerimientos, que para los ejemplos numéricos de este trabajo se presentan en la Tabla 1.

| Nivel de desempeño | Totalmente operacional | Operacional | Seguridad de vidas |
|--------------------------------------|--|---|---|
| Sistemas sin control | | Sismo ocasional Requerimientos: Tabiques elásticos Distorsión de piso μ_{OP} | Sismo raro Requerimientos: Ductilidad \sim_j Distorsión de piso μ_{LS} |
| Sistemas con dispositivos de control | Sismo frecuente Requerimientos: Dispositivos elásticos | Sismo raro Requerimientos: Tabiques elásticos Ductilidad disp. \sim_d Distorsión de piso μ_{OP} | |

Tabla 1: Objetivos de desempeño y requerimientos

2.3 Desplazamiento límite en la cima

Los desplazamientos límites en la cima se pueden calcular a partir de los desplazamientos de fluencia en la cima y de los requerimientos de Tabla 1.

a) Sistemas sin control

- Sismos raros, nivel de desempeño seguridad de vidas

Para cada plano resistente j y en función de la ductilidad \sim_j , el desplazamiento límite en la cima D_{-j} se obtiene con

$$D_{-j} = \sim_j D_{Yj} \quad (7)$$

Para el sistema, la ductilidad \sim_s y luego el desplazamiento límite en la cima resulta

$$\sim_s = \frac{\min D_{-j}}{D_Y} \rightarrow D_{-s} = \sim_s D_Y \quad (8)$$

A partir de la distorsión de piso límite μ_{LS} , para un plano resistente genérico j de altura total H , y suponiendo un modo lineal de deformación lateral, el desplazamiento límite en la cima resulta

$$D_{\mu_{LS}j} = \mu_{LS} H \quad (9)$$

Para el sistema, el desplazamiento límite $D_{\mu_{LS}}$ es el promedio ponderado de los desplazamientos límites de los planos resistentes que componen el sistema, utilizando el coeficiente de participación de resistencia p_j (3) como factor de ponderación.

Finalmente, los desplazamientos límites en la cima para el plano resistente j y para el sistema son

$$D_{LSj}^L = \min(D_{-j}, D_{\mu_{LS}j}), \quad D_{LS}^L = \min(D_{-s}, D_{\mu_{LS}}) \quad (10)$$

- Sismos ocasionales, nivel de desempeño operacional

Con el requerimiento de respuesta elástica, el desplazamiento límite en la cima de un plano

resistente j es D_{Yj} . El desplazamiento límite en la cima asociado a la distorsión de piso máxima es

$$D_{n,OP} = n_{OP} H \quad (11)$$

Finalmente, el desplazamiento límite en la cima para el plano genérico j , resulta

$$D_{OPj}^L = \min(D_{Yj}, D_{n,OP}) \quad (12)$$

b) Sistemas con control

- Sismos raros, nivel de desempeño operacional

Para el plano resistente j , el desplazamiento límite en la cima es el mínimo entre el obtenido con la ductilidad de los dispositivos de control \sim_d y el que resulta de la distorsión de piso n_{OP}

$$D_{-dj} = \sim_d D_{Ydj}, \quad D_{n,OP} = n_{OP} H \quad \rightarrow \quad D_{OPj}^L = \min(D_{-dj}, D_{n,OP}) \quad (13)$$

Y para el sistema es

$$D_{OP}^L = \min(D_{OPj}^L) \quad (14)$$

- Sismos frecuentes, nivel de desempeño totalmente operacional

Con el requerimiento de respuesta elástica de los dispositivos, el desplazamiento límite en la cima para el plano resistente j resulta

$$D_{TO,j}^L = D_{Yd,j} \quad (15)$$

2.4 Demanda de resistencia sísmica

a) Sistemas sin control

- Sismos raros, nivel de desempeño seguridad de vidas

La capacidad de ductilidad es calculada con

$$\sim_L = \frac{C_T D_{LS}^L}{D_Y} \quad (16)$$

Donde C_T es un factor menor que 1 que se adopta para prever desplazamientos por torsión, los que serán calculados más adelante en el proceso. C_T puede ser ajustado iterativamente, y para sistemas con rotación limitada en general resulta $C_T = 0.8$.

Con la capacidad de ductilidad \sim_L y con el desplazamiento de fluencia D_Y convertido a un sistema equivalente de un grado de libertad, se obtiene el corte basal V_{LS} y el periodo a partir del espectro de diseño inelástico (YPS) para sismos raros, como se muestra esquemáticamente en la Figura 6. Con V_{LS} conocido, se hace equivalente a V_U en el diagrama push-over de la Figura 2, y utilizando (3) se determina la fuerza en cada plano resistente V_{Uj} y la rigidez global V_{Uj} / D_{Yj} .

- Sismos ocasionales, nivel de desempeño operacional

El periodo calculado en el paso anterior se utiliza con el espectro de diseño elástico para sismos ocasionales para calcular el desplazamiento en la cima D_{OP} y el corte basal V_{OP} , como se muestra en la Figura 7. Se debe cumplir que $D_{OP} \leq D_{OP}^L$ para verificar el comportamiento elástico. Sino, con el espectro elástico y D_{OP}^L se obtiene un nuevo periodo y corte basal V_{OP} . Se retorna al espectro inelástico para sismos raros, con el nuevo periodo y D_Y se obtiene la ductilidad requerida, que será menor que \sim_L , y un nuevo corte basal V_{LS} que ahora será

mayor.

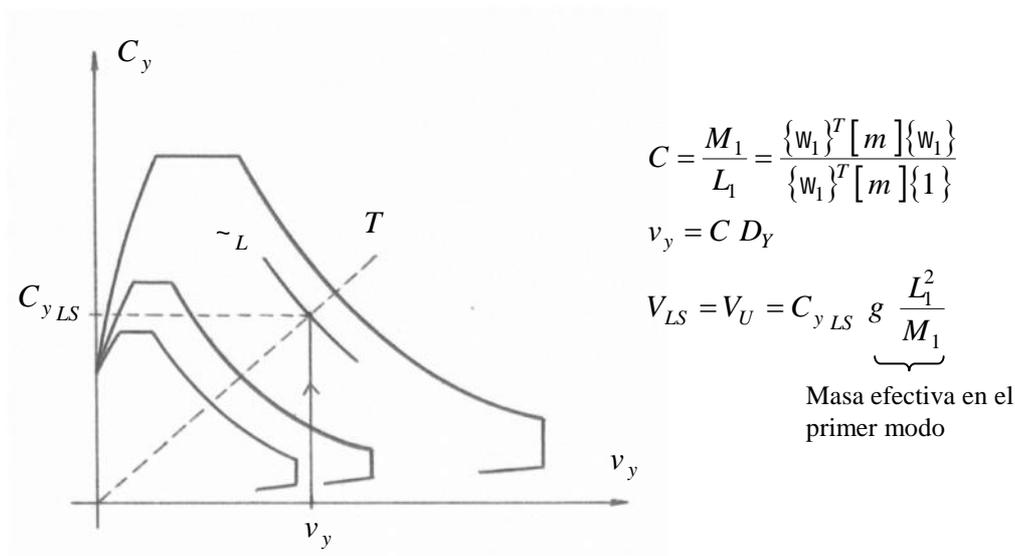


Figura 6: Espectros inelásticos para sismos raros

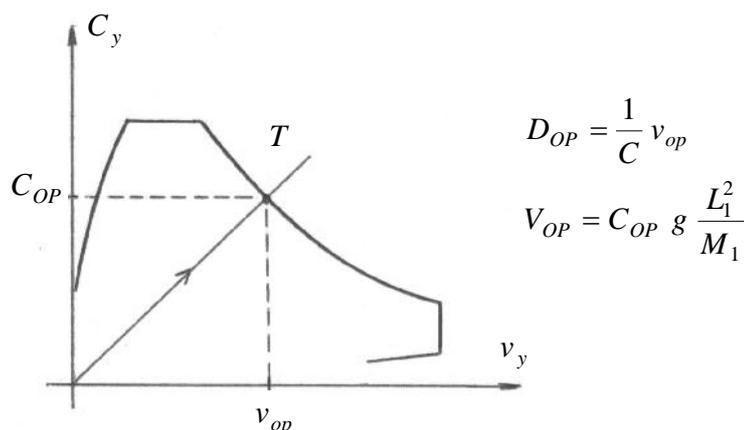


Figura 7: Espectro elástico para sismos ocasionales

b) Sistemas con control

- Sismos raros, nivel de desempeño operacional

La capacidad de ductilidad es calculada con

$$\tilde{L} = \frac{C_T D_{OP}^L}{D_Y} \tag{17}$$

Donde C_T es un factor menor que 1 que se adopta para prever desplazamientos por torsión. Con \tilde{L} y D_{Yd} convertido a un sistema equivalente de un grado de libertad, se obtiene el corte basal V_{OP} a partir del espectro de diseño inelástico (YPS) para sismos raros y para la relación de rigideces h definida en (6). Con V_{OP} conocido, la rigidez y resistencia para cada plano j son calculadas utilizando las siguientes ecuaciones a partir de los diagramas push-over en Figuras 4 y 5.

$$K_1 = \frac{V_{OP}}{D_{Yd}}, \quad K_2 = h K_1, \quad \sum_{j=1}^n V_{mj} = \frac{K_2}{\sum_{j=1}^n \frac{p_j}{D_{Yj}}} \quad (18)$$

Donde n es el número de planos resistentes en la dirección analizada, y p_j es el coeficiente de participación de la resistencia del plano j en la suma de todas las resistencias y adoptada de manera similar a la explicada para sistemas sin control, ver ec.(3). Luego

$$V_{mj} = p_j \sum_{j=1}^n V_{mj}, \quad k_{1j} = \frac{v_j p_j / (1-h_j)}{D_{Yd j}} \sum_{j=1}^n V_{mj}, \quad (19)$$

$$k_{2j} = \frac{(1+v_j) p_j - v_j p_j / (1-h_j)}{D_{Yj} - D_{Yd j}} \sum_{j=1}^n V_{mj}$$

- Sismos frecuentes, nivel de desempeño totalmente operacional

Se calcula primero el periodo T con la rigidez K_1 y la masa asociada al primer modo. Del espectro de diseño elástico para sismos frecuentes y con el periodo T , se obtienen el desplazamiento D_{TO} y el corte basal V_{TO} .

2.5 Desplazamientos incluyendo efectos de torsión

Para el plano resistente genérico j con o sin control pasivo, y para cada nivel de desempeño considerado, se calcula el desplazamiento total en la cima incluyendo efectos de traslación y de torsión

$$D_{Total j} = D_{Tras j} + D_{Rot j} = D_{Tras j} + \frac{M_T}{K_T} d_j \quad (20)$$

Donde $D_{Tras j}$ es el desplazamiento en la cima por traslación para el plano resistente j calculado con las expresiones desarrolladas en la sección 2.3 incluyendo el factor C_T explicado en la sección 2.4. M_T es el momento torsor calculado con el corte basal multiplicado por la excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez (sismos frecuentes) ó el centro de resistencias (sismos raros), más la excentricidad accidental requerida por el código, si corresponde. K_T es la suma de las rigideces multiplicadas por el cuadrado de sus distancias, aportada por todos los planos resistentes (sismos frecuentes) ó solamente por los ubicados en dirección transversal al análisis (sismos raros). d_j es la distancia desde el plano j al centro de rigidez o resistencia según corresponda.

2.6 Verificación de límites

Finalmente, para cada plano resistente j con o sin control pasivo, y para cada nivel de desempeño considerado, el desplazamiento total en la cima (20) debe ser menor o igual que el desplazamiento límite explicitado en la sección 2.3.

Si esas condiciones no son satisfechas, se deben modificar datos geométricos propuestos en el layout inicial y realizar una iteración en los cálculos.

El diseño preliminar finaliza cuando las condiciones son satisfechas. Luego, utilizando el corte basal V_{mj} para cada plano resistente se continúa con la aplicación de los criterios del dimensionamiento por capacidad, y se diseñan los dispositivos de disipación de energía con (D_{Ydj}, V_{Ydj}) .

3 COMPATIBILIDAD CON EL REGLAMENTO INPRES-CIRSOC 103

La metodología de diseño preliminar descrita en la sección 2 es general, es decir que puede utilizarse con cualquier caracterización de la acción sísmica y definiendo valores límites para los requerimientos mencionados en la Tabla 1 de acuerdo con las características de la construcción.

En este trabajo se pretende realizar las aplicaciones numéricas con datos que sean compatibles con las prescripciones del reglamento INPRES-CIRSOC 103 Parte I, teniendo en cuenta especialmente la intensidad de la acción sísmica y la consideración explícita de la sobrerresistencia.

3.1 Acción sísmica

La acción sísmica se caracteriza con espectros de diseño inelásticos en el formato fuerza de fluencia por unidad de peso C_Y en función del desplazamiento de fluencia D_Y , denominado habitualmente espectro de punto de fluencia (YPS).

Para construir estos espectros de diseño se generan 30 acelerogramas artificiales, miembros de un proceso estocástico tipo ruido blanco filtrado en función de parámetros del suelo, no estacionario en amplitudes, con corrección de línea de base, y escalados a la aceleración máxima a_G . La duración se adoptó 30 seg para sismos raros y 12 seg para sismos frecuentes.

Para cada acelerograma se obtiene el espectro de respuesta inelástico. Se construyen para varios niveles de ductilidad hasta un máximo de 10, y con regla de histéresis de Clough para diferentes relaciones de rigidez post-fluencia / inicial elástica (K_p / K_e), desde 0.02 para estructuras sin control de vibraciones, hasta un máximo de 0.60, con intervalos de 0.10. Esto último permite realizar un diseño preliminar más realista para las estructuras con disipadores de energía, que tienen la primera fluencia cuando plastifican los disipadores y luego mantienen la rigidez de la estructura sola, ver Figura 5.

El análisis estadístico consiste en calcular el valor medio y desvío estándar sobre los 30 resultados, obtener el valor medio más un desvío estándar, y finalmente rectificar y suavizar con funciones matemáticas simples para tener así los espectros de diseño.

Si se supone que la aceleración máxima efectiva a_s del INPRES-CIRSOC 103 Parte I (2013) tiene una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, y que el arribo de terremotos se puede modelar como un proceso de Poisson, es posible calcular las aceleraciones máximas para otras probabilidades de excedencia siguiendo un procedimiento de FEMA 356, ver Méndez (2012). Los resultados para la zona sísmica 4 de mayor intensidad (Mendoza, San Juan) se presentan en la Tabla 2.

| Nivel de terremoto de diseño | Probabilidad de excedencia | Intervalo de recurrencia \bar{T} (años) | Aceleración máxima efectiva a_s (g) |
|------------------------------|----------------------------|---|---------------------------------------|
| Frecuente | 50% en 30 años | 43 | 0.10 |
| Ocasional | 50% en 50 años | 72 | 0.14 |
| Raro | 10% en 50 años | 475 | 0.35 |
| Muy raro | 5% en 50 años | 975 | 0.47 |

Tabla 2: Aceleraciones máximas para diferentes probabilidades de excedencia

3.2 Sobrerresistencia

La metodología de diseño preliminar presentada en la sección 2 tiene en cuenta la

ductilidad en la evaluación de los desplazamientos límites que debe satisfacer el sistema y los componentes estructurales, porque justamente se utilizan espectros inelásticos por ductilidad.

Otro factor que reduce las fuerzas sísmicas obtenidas de los espectros inelásticos es la sobrerresistencia que incluye varias fuentes: (i) Desarrollo secuencial en la formación de rótulas plásticas incrementando la resistencia desde la primera rótula plástica hasta que se forma el mecanismo completo de disipación de energía; (ii) La sobrerresistencia de los materiales por sobre los valores nominales utilizados en el dimensionamiento, que en general son valores con gran probabilidad de ser excedidos, del orden de 90 a 95%; (iii) La capacidad de los componentes se calcula con un factor de reducción de resistencia w , típicamente 0.9 para secciones controladas por tracción; (iv) Las secciones elegidas suelen ser algo mayores que las estrictamente requeridas debido al ajuste a dimensiones constructivas y diámetros comerciales de barras, como así también por requisitos mínimos de los reglamentos y envolvente de las diferentes combinaciones de acciones necesarias de considerar.

El INPRES-CIRSOC 103 define un único factor de reducción R debido al comportamiento inelástico incluyendo la ductilidad R_d y la sobrerresistencia R_s a aplicar a las fuerzas que se generarían con comportamiento elástico V_E . Con estas fuerzas reducidas V_0 se realiza luego el dimensionamiento por capacidad utilizando las combinaciones de acciones establecidas también en el reglamento. Las expresiones son

$$V_0 = \frac{V_E}{R}, \quad R = R_d R_s \quad \rightarrow \quad V_Y = \frac{V_E}{R_d}, \quad V_0 = \frac{V_Y}{R_s} \quad (21)$$

Con la metodología de diseño preliminar presentada se obtiene V_U que es el equivalente a V_Y de reglamento. Para completar el procedimiento se debe calcular la fuerza de diseño o corte basal de diseño con

$$V_0 = \frac{V_U}{R_s} \quad (22)$$

El corte basal del nivel de desempeño operacional V_{OP} es siempre menor a V_U debido al requerimiento de comportamiento elástico, ver Tabla 1.

En esta metodología de diseño preliminar la formación secuencial de rótulas plásticas está considerada en forma simplificada al evaluar el desplazamiento de fluencia de los componentes y del sistema. Entonces, en el factor de sobrerresistencia se incluye la referida a la sobrerresistencia de los materiales, al factor de minoración de resistencia w , y los ajustes por secciones algo mayores. Siguiendo los lineamientos del IC 103 Parte II resulta

$$R_s = \frac{1.40}{0.9} = 1.56 \cong 1.6 \quad (23)$$

4 EJEMPLOS NUMÉRICOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se considera una construcción de 100 m^2 de planta, ubicada en la ciudad de Mendoza, Argentina. La misma será evaluada y diseñada en 3, 5, 8, 10 y 12 plantas realizando la comparación de los requisitos reglamentarios exigidos por el IC 103 y los resultantes de la metodología propuesta. Además los mismos ejemplos serán diseñados siguiendo la misma metodología empleando dispositivos de control pasivo mediante disipadores de energía de fluencia de acero.

En la tabla 3 se describen los requisitos numéricos adoptados para la metodología de diseño preliminar, los mismos se basan en los criterios especificados en el IC 103 y en el punto 3.1.

| DESEMPEÑO | | SIN CONTROL | | CON CONTROL | |
|------------|------------|-------------------|--------------------|--------------|------------------------|
| | | Seguridad de vida | Operacional | Operacional | Totalmente operacional |
| REQUISITOS | a_{max} | Sismos raros | Sismos ocasionales | Sismos raros | Sismos frecuentes |
| | | 0.35 g | 0.14 g | 0.35 g | 0.10 g |
| | $\sim j1$ | $\sim L1$ | 1 | 1 | - |
| | ~ 1 | 1.50% | 0.50% | 0.50% | 0.20% |
| | $\sim dL1$ | - | - | 8 | 1 |

Tabla 3: Requisitos numéricos adoptados

4.1 Sistema estructural sin control

En la Figura 8 se muestra el lay-out de los planos sismorresistentes propuestos.

En cada dirección se han dispuesto un par de tabiques 2.00m de longitud y un par de tabiques de 2.30m de longitud. En la Figura 9 se muestran los planos resistentes en elevación y datos de materiales, cargas gravitacionales y masas para el caso de cinco pisos siendo idéntico formato en los restantes casos.

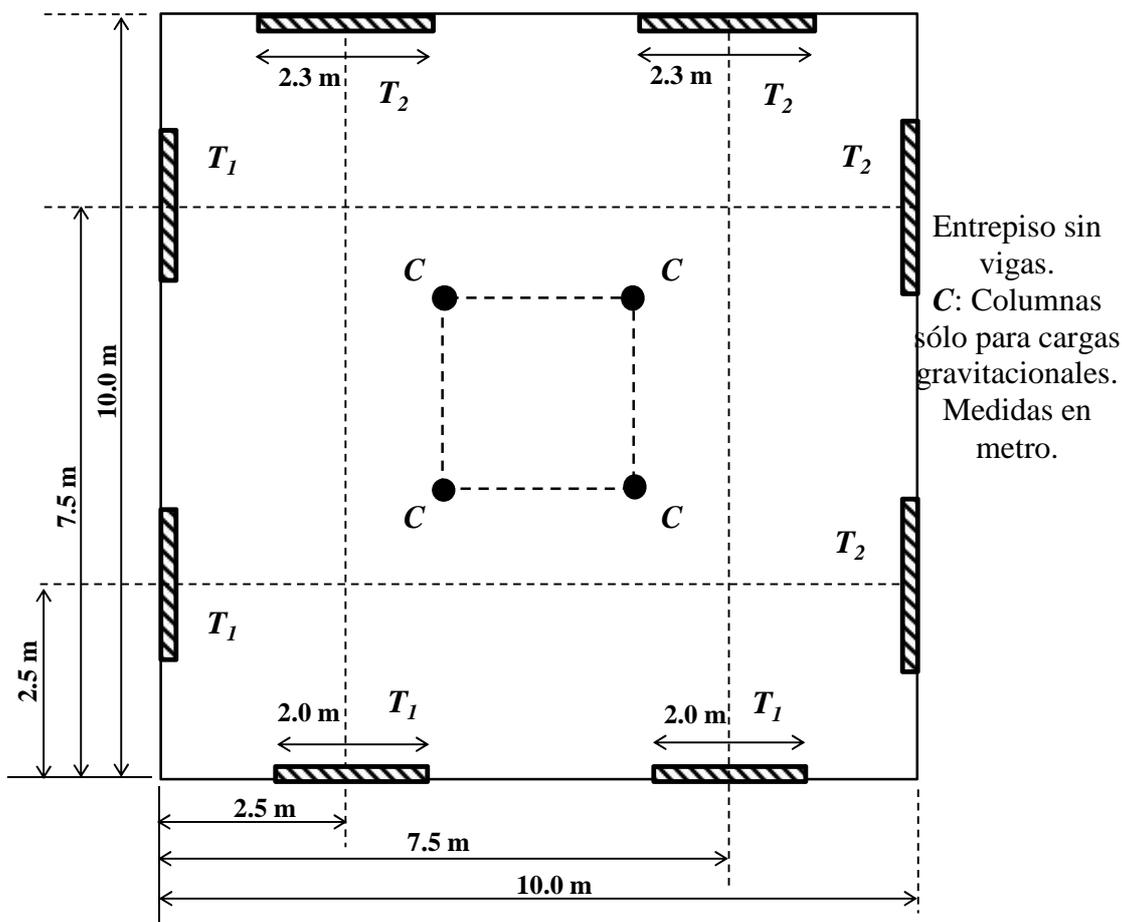


Figura 8: Lay out de planos sismorresistentes

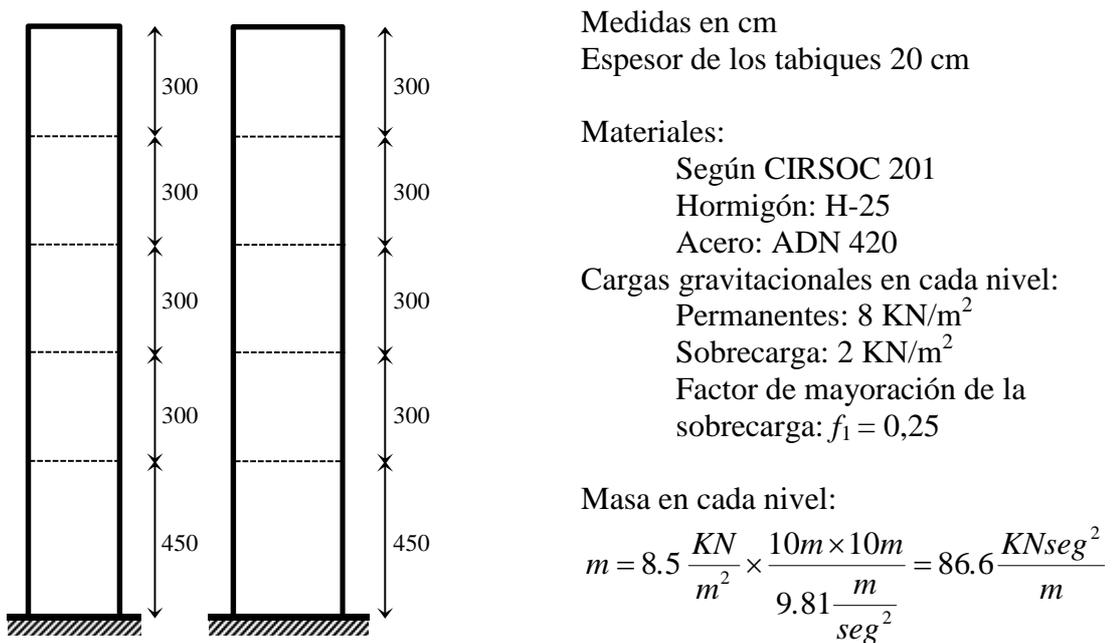


Figura 9: Vista lateral de los planos resistentes

Los resultados del diseño preliminar se ilustran en los diagramas push-over de la Figura 10 para el caso de ocho pisos como ejemplo de la información que maneja el proyectista en la metodología.

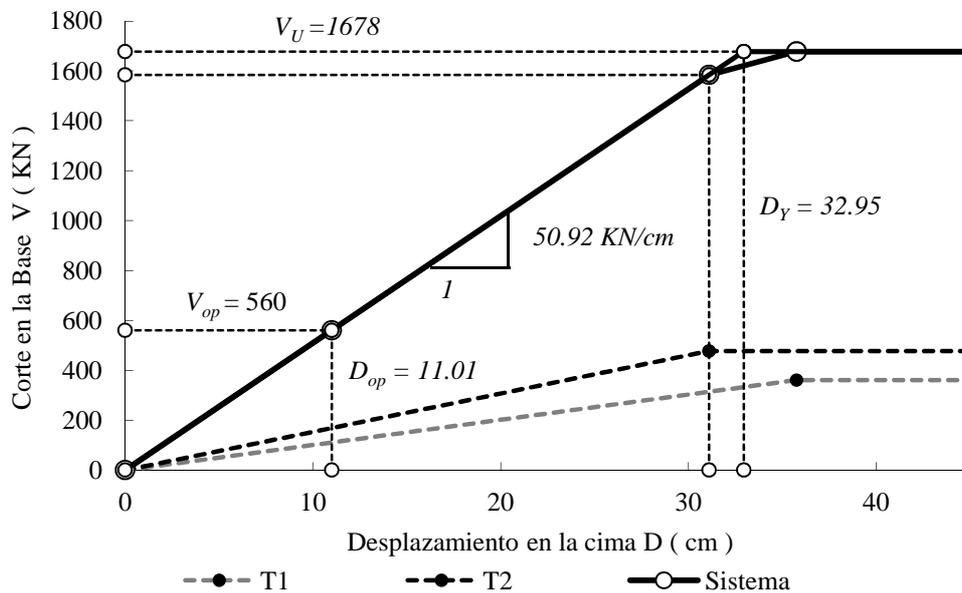


Figura 10: Diagramas push-over resultantes del diseño preliminar

En la Tabla 4, se muestra para cada caso desarrollado, 3, 5, 8, 10 y 12 niveles, el período calculado según el reglamento IC 103 y el resultante de la aplicación de la metodología propuesta (T), el corte en la base de diseño según el reglamento IC 103 (V_0), el corte de diseño según la metodología de diseño preliminar (V_{sv}/R_s) resultante de la división del corte en la base correspondiente al desempeño seguridad de vida por la sobrerresistencia, los desplazamientos límites y totales máximos tanto para las condiciones de seguridad de vida

como operacional y la ductilidad que alcanzaría el sistema en las condiciones de diseño seguridad de vida (μ).

| NIVELES | IC 103 | | DISEÑO PRELIMINAR - SIN CONTROL | | | | | | |
|---------|-----------|----------------------|---------------------------------|--|------------------------|------------------------|------|------------------------|------------------------|
| | T seg. | V ₀ KN | T seg. | V _{sv} / R _s KN | D _{Lsv} cm | D _{Tsv} cm | ~1 | D _{Lop} cm | D _{Top} cm |
| 3 | 0.22 | 510 | 0.79 | 584 | 15.75 | 7.03 | 1.42 | 5.25 | 5.25 |
| 5 | 0.55 | 850 | 1.14 | 842 | 24.75 | 15.12 | 1.16 | 8.25 | 8.25 |
| 8 | 1.30 | 741 | 1.63 | 1049 | 38.25 | 27.46 | 0.84 | 12.75 | 12.72 |
| 10 | 1.98 | 608 | 1.91 | 1098 | 47.25 | 34.53 | 1.00 | 15.75 | 15.73 |
| 12 | 2.80 | 686 | 2.17 | 1146 | 56.25 | 41.84 | 1.00 | 18.75 | 18.75 |

Tabla 4: Resultados de diseño sin control

Se observa claramente que las condiciones impuestas por el desempeño operacional condicionan los diseños en todos los casos analizados, ya que los desplazamientos totales son iguales a los máximos para este nivel de desempeño y son mucho menores a sus límites para el nivel seguridad de vida. Bajo estas condiciones, solo los casos de 3 y 5 niveles llegan a incurrir en el campo plástico con los requisitos de seguridad de vida, alcanzando ductilidades poco mayores de la unidad.

En cuanto a los cortes de diseño, son similares para las estructuras más bajas, pero la metodología exige valores notablemente mayores para aquellas de más altura, determinados para cumplir con las condiciones del nivel de desempeño operacional.

Es interesante ver que los valores del período fundamental aproximado previsto por el IC 103 son mucho más bajos de los calculados para los casos de menos altura y son sobre estimados en los casos de mayor altura.

Las simplificaciones asumidas en el marco del diseño preliminar, tales como el modelo equivalente de un grado de libertad y la variación lineal en altura para los desplazamientos de piso, hacen aconsejable mantener una reserva para los desplazamientos totales frente a los límites.

4.2 Sistema estructural con control

Con el fin de demostrar la extensión de la metodología propuesta a estructuras con control pasivo con dispositivos de fluencia de acero, se muestran los resultados de los mismos ejemplos anteriores pero diseñados con estos dispositivos, siguiendo los criterios de la tabla 3.

En este caso no se puede hacer comparación con los requisitos del reglamento IC 103 ya que el mismo no considera este tipo de estructuras.

En la Figura 11 se muestra el lay-out de los planos sismorresistentes con control pasivo mediante disipadores de energía por fluencia de acero.

En cada dirección se han dispuesto un par de tabiques adosados y un par de tabiques acoplados. En la Figura 12 se muestran los planos resistentes en elevación para el caso de cinco niveles y datos de materiales, cargas gravitacionales y masas.

Los resultados del diseño preliminar, para el caso de ocho niveles, se ilustran en los diagramas push-over de las Figuras 13 y 14 para los planos tanto de tabiques adosados como de tabiques acoplados y de la Figura 15 para el sistema.

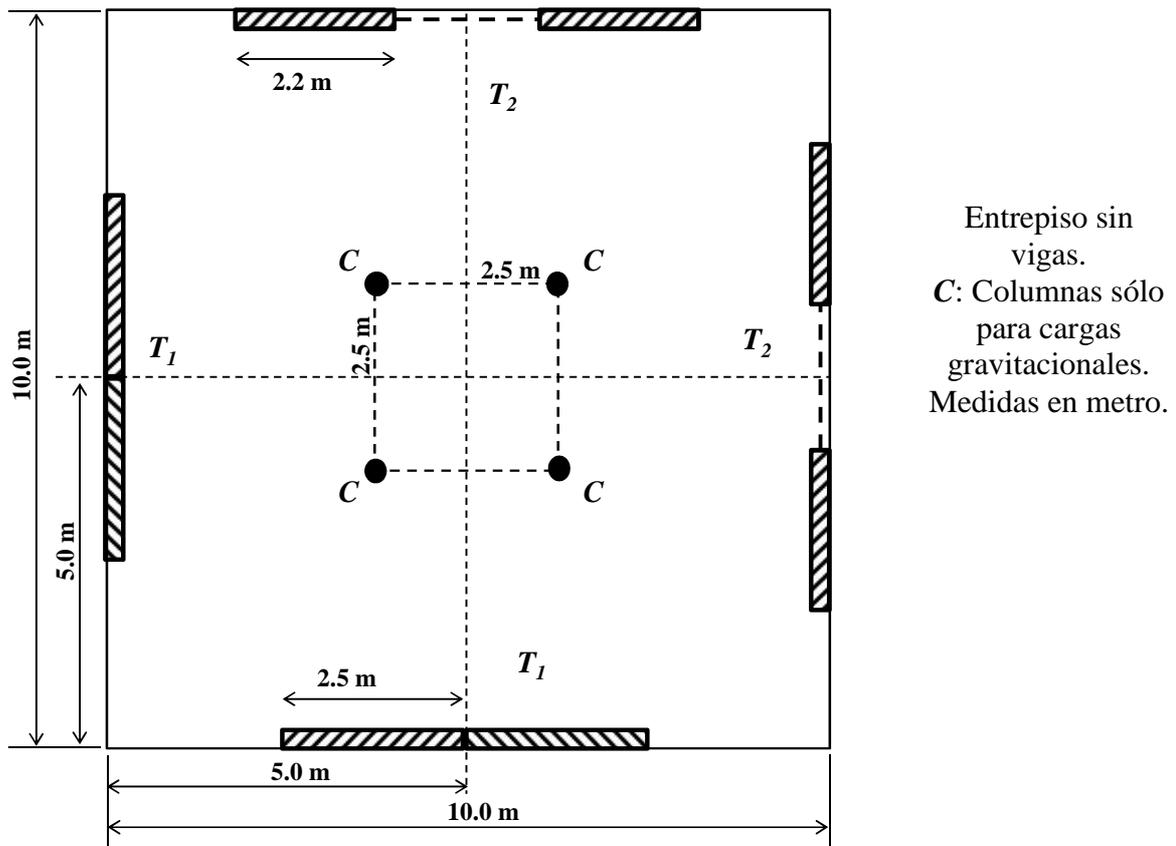


Figura 11: Lay out de planos sismorresistentes

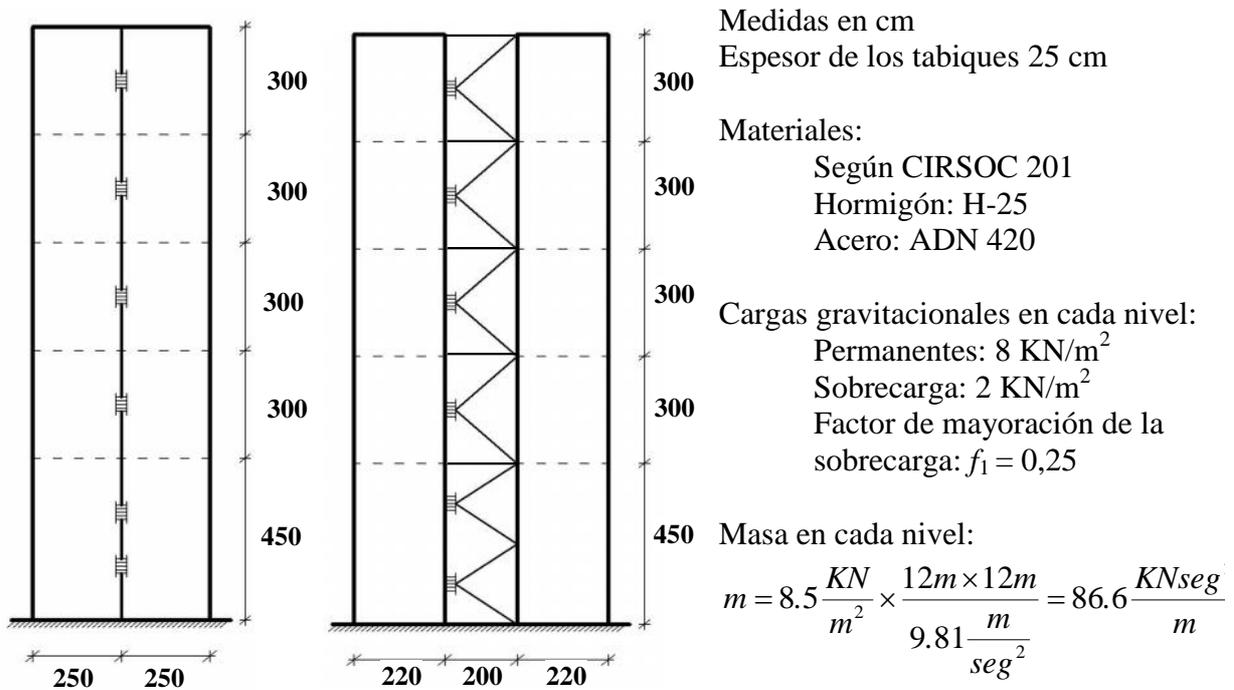


Figura 12: Vista lateral de los planos resistentes

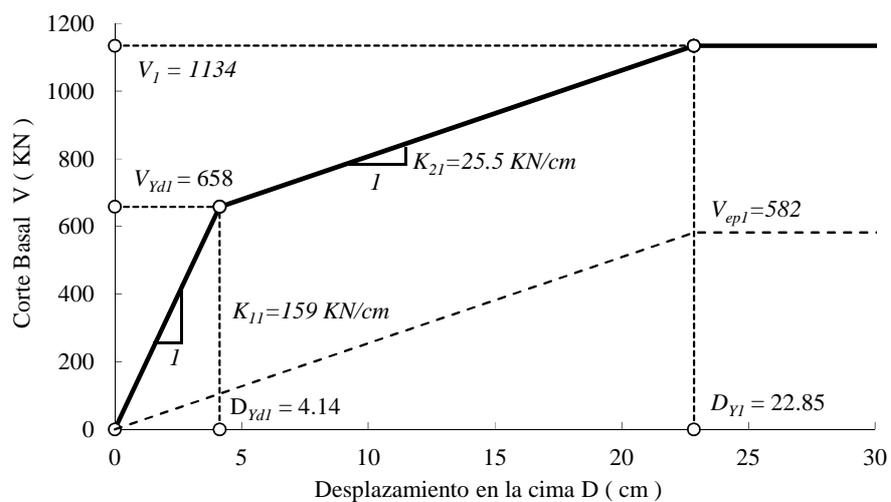


Figura 13: Diagramas push-over resultantes del diseño preliminar para los tabiques adosados

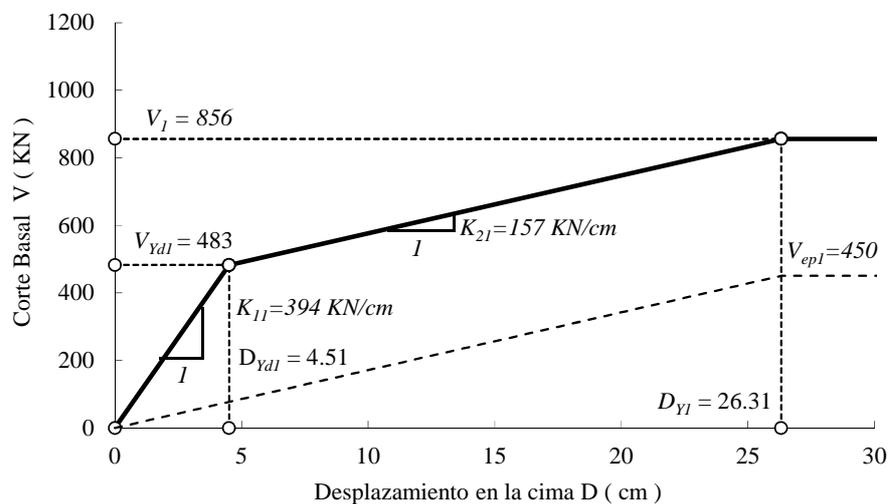


Figura 14: Diagramas push-over resultantes del diseño preliminar para los tabiques acoplados

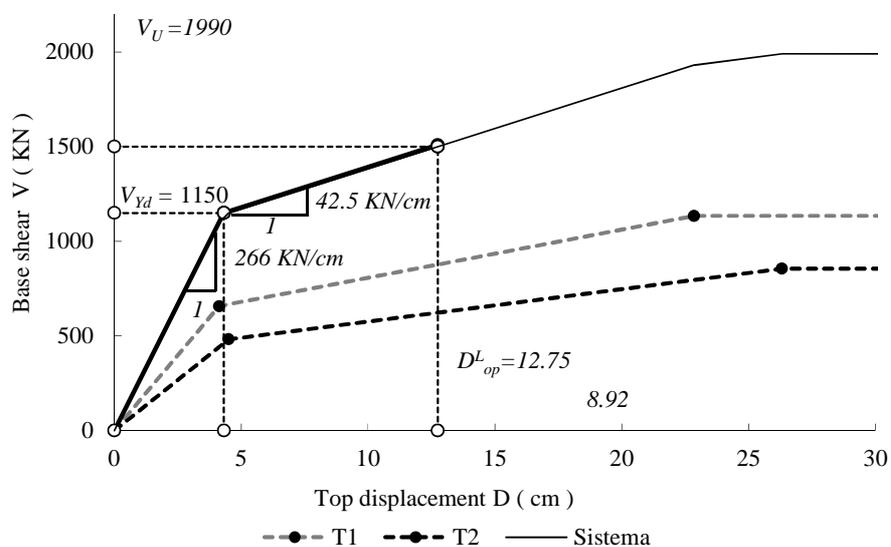


Figura 15: Diagramas push-over resultantes del diseño preliminar para el sistema

En la Tabla 5, se muestra para cada caso desarrollado, 3, 5, 8, 10 y 12 niveles, el período (T), los cortes en la base de diseño para la estructura principal y el corte en la base en el momento de entrada en fluencia de los dispositivos disipadores de energía, dato necesario para el diseño de los mismos.

También se muestran los parámetros ν y h adoptados en cada caso y los desplazamientos límites y totales tanto para las condiciones de seguridad de vida como operacional en cada tabique, y la ductilidad que alcanzaría el sistema en las condiciones de diseño seguridad de vida (μ).

| NIVELES | | DISEÑO PRELIMINAR - CON CONTROL | | | | | | | | | |
|---------|----|---------------------------------|----------|----------------------|-----------------|-------|------|-----------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
| | | T seg. | ~ 1 | V_{-j} / R_s KN | V_{Ydj} KN | ν | h | D_{Lop} cm | D_{Top} cm | D_{Lco} (D_{Ydj}) cm | D_{Tco} cm |
| 3 | T1 | 0.29 | 3.33 | 281 | 460 | 0.80 | 0.23 | 4.03 | 3.35 | 0.96 | 0.95 |
| | T2 | | | 218 | 350 | 0.80 | 0.21 | 4.58 | 3.41 | 0.97 | 0.97 |
| 5 | T1 | 0.51 | 2.49 | 390 | 643 | 0.78 | 0.25 | 8.25 | 6.95 | 2.60 | 2.58 |
| | T2 | | | 302 | 446 | 0.70 | 0.25 | 8.25 | 7.13 | 2.71 | 2.67 |
| 8 | T1 | 0.78 | 2.36 | 364 | 648 | 0.95 | 0.16 | 12.75 | 10.81 | 4.14 | 4.07 |
| | T2 | | | 282 | 452 | 0.90 | 0.16 | 12.75 | 11.11 | 4.51 | 4.22 |
| 10 | T1 | 0.97 | 2.45 | 373 | 546 | 0.85 | 0.15 | 15.75 | 13.29 | 5.37 | 4.91 |
| | T2 | | | 289 | 474 | 0.90 | 0.12 | 15.75 | 13.60 | 4.93 | 4.93 |
| 12 | T1 | 1.15 | 2.49 | 443 | 572 | 0.70 | 0.14 | 18.75 | 15.82 | 6.01 | 5.95 |
| | T2 | | | 343 | 465 | 0.75 | 0.12 | 18.75 | 16.18 | 6.05 | 6.02 |

Tabla 5: Resultados de diseño sin control

Con respecto a la elección de valores para los parámetros de relación de rigideces h , y relación de resistencias ν se consideraron distintas combinaciones en cada caso dando alternativas para variar el período de la estructura y su ductilidad, eligiéndose la combinación más conveniente.

Es de hacer notar la facilidad del procesamiento de la totalidad de las combinaciones debido a la sencillez del procedimiento implementado en una planilla de cálculo.

En estos casos también se observa que los requerimientos de las condiciones de desempeño completamente operacional dominan el problema sobre las condiciones de desempeño operacional, ya que los desplazamientos en la cima en el momento de entrada en fluencia de los dispositivos disipadores de energía tienen que cumplir con dichas limitaciones.

A pesar de ello los desplazamientos totales para las condiciones de desempeño operacional se acercan bastante a los límites establecidos haciendo más eficiente el diseño. Esto es factible ya que en estos sistemas el proyectista tiene más variables para poder modificar como los parámetros ν y h .

5 CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología para el diseño preliminar de sistemas estructurales sismorresistentes de varios pisos, sin control o con control pasivo mediante disipadores de energía. El procedimiento es el mismo para ambos casos, está basado en desplazamientos, en el desempeño para distintos niveles de sollicitación sísmica y aplicable a sistemas estructurales

en cuya respuesta predomina el primer modo de vibración. La metodología desarrollada es conceptualmente clara, presenta bloques diferenciados y articulados entre sí correspondientes a capacidad, requisitos y demandas y su aplicación es sencilla.

Se plantearon algunos criterios para compatibilizar dicha metodología con el reglamento INPRES CIRSOC 103 que permiten la utilización de la metodología propuesta en dicho marco.

Los ejemplos realizados para las estructuras sin control de vibraciones demostraron que las condiciones establecidas en el desempeño operacional con sismos ocasionales en general dominan los requisitos de diseño. El reglamento IC 103 solo contempla un nivel de terremotos de diseño que corresponde a sismos raros, con nivel de desempeño seguridad de vidas, y en consecuencia las acciones de diseño (corte basal) resultan algo menores.

En el caso de los ejemplos de las estructuras con control, las cuales quedan afuera de los alcances del reglamento, se demostró la facilidad para optimizar los diseños variando los parámetros v y h .

REFERENCIAS

- Ayala, G., Castellanos, H., Lopez, S., A displacement-based seismic design method with damage control for RC buildings, *Earthquakes and Structures*, 3(3), 413-434, 2012.
- Catalán, A., Foti, D. Multilevel performance-based procedure applied to moderate seismic zones in Europe, *Earthquakes and Structures*, 8(1), 57-76, 2015.
- Caterino, N., Cosenza, E., Azmoodeh, B.M. Approximate methods to evaluate story stiffness and inter story drift of RC buildings in seismic area, *Structural Engineering and Mechanics*, 46(2), 245-267, 2013.
- Dautaj, A., Kabashi, N., Sadiku, H., Method N2 according to Fajfar, *CSCE 2015, Regina Canada*, ISBN: 978-1-63248-042-2, 2015.
- FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, *American Society of Civil Engineers (ASCE), Federal Emergency Management Agency*, 2000.
- Hajirasouliha, I., Asadi, P., Pilakoutas, K. An efficient performance-based seismic design method for reinforced concrete frames, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41, 663-679, 2012.
- INPRES, Microzonificación sísmica del Gran Mendoza, *Publicación técnica N° 19, INTI*, 1995.
- Kilar, V., Koren, D. Simplified inelastic seismic analysis of base-isolated structures using the N2 method, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39, 967-989, 2010.
- Mendez, J. Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes existentes de hormigón armado, *Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural*, Universidad Nacional de Tucumán, 2012.
- Paulay, T. An estimation of displacement limits for ductile systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 583-599, 2002.
- Rubinstein, M., Möller, O., Ascheri, J.P., Giuliano, A. Diseño preliminar de estructuras sismorresistentes con o sin control pasivo, *9no. Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción 9-EIPAC-2011*, ID-E02-04, 2011.
- Rubinstein, M., Möller, O., Ascheri, J.P., Giuliano, A. Methodology for the seismic design of structural systems, including passive control, *15th WCEE, Lisboa, Portugal*, ID 1084, 2012.
- Rubinstein, M., Möller, O., Giuliano, A. Preliminary design and inelastic assessment of earthquake-resistant structural systems, *Structural Engineering and Mechanics*, 26(3), 297-313, 2007.
- SEAOC Vision 2000 Committee, Performance based seismic engineering of buildings,

- Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, U.S.A., 1995.*
- Vamvatsikos, D., Kazantzi, A., Aschheim, M. *Performance-Based Seismic Design: Avant-Garde and Code-Compatible Approaches*, ASCE-ASME J. Risk Uncertainty Eng. Syst., Part A: Civ. Eng. C4015008, 2015.
- Wei, L., Qing-Ning, L. Performance-based seismic design of complicated tall building structures beyond the code specification, *Struct. Design Tall Spec. Build.*, 21, 578–591, 2012.