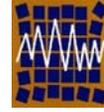




Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e
Ingeniería Antisísmica

A10-05 PROCEDIMIENTO DEMANDA-CAPACIDAD MULTIMODAL

J. Campbell¹, M. Durán¹ y T. Guendelman²

1.- Departamento de Ingeniería en Obras Civiles Universidad de La Serena

Benavente 980, 3^{er} Piso, La Serena, Chile

e-mail: jcampbel@userena.cl; mduran@userena.cl

2.- IEC Ingeniería S.A.

Dublé Almeyda 2580, Santiago, Chile

e-mail: iec@iec.cl

RESUMEN

Este trabajo muestra una alternativa para desarrollar el análisis estático no lineal de una estructura de marcos de hormigón armado. Esta técnica difiere de las ya existentes en cuanto a que considera, en el cálculo y determinación de la curva de capacidad de la estructura, la participación de varios modos y no sólo del primero, como usualmente ocurre en la actualidad. Esta modificación permite incorporar en el análisis el efecto del sismo en la capacidad, asociando el vector de cargas modales al vector de masas de la estructura y a la pseudo-aceleración espectral asociada al modo, además de considerar, optativamente, el factor de participación modal.

Palabras Clave: Análisis estático no lineal de marcos de hormigón armado, procedimiento demanda-capacidad multimodal.

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas estáticas no lineales, de empleo cada vez más frecuente en la práctica profesional, llevan implícitas la hipótesis de la presencia de un modo predominante en la respuesta de la estructura, lo que restringe de manera importante su campo de aplicación. Esta restricción ha sido parcialmente alzada por

Chopra con su proposición conocida como “Modal Pushover”, consistente en un análisis independiente para cada modo y la posterior combinación de las respuestas modales finales, exclusivamente, lo que excluye la consideración de la demanda inelástica y el consiguiente empleo del procedimiento “Demanda-Capacidad”.

La propuesta que se entrega en este trabajo, con la explícita participación de los diferentes modos de vibrar de la estructura y la acción del sismo de análisis, permite obtener la curva de capacidad de la estructura.

El procedimiento que se propone supone que la proporcionalidad entre las componentes de los vectores modales de carga permanece invariable a lo largo del proceso no lineal, por lo que es posible determinar y combinar los desplazamientos en cada etapa y obtener una curva de “Capacidad Multimodal” de la estructura. En la medida en que esta hipótesis sea razonablemente comprobada, podrá justificadamente emplearse la capacidad multimodal en el procedimiento “Demanda-Capacidad” tradicional, en reemplazo de las curvas de capacidad determinadas con una ley estática asociada al modo fundamental, exclusivamente.

Se muestran ejemplos de marcos planos rígidos de hormigón armado con diferentes número de pisos, sometidos a la acción de varios sismos, y se comparan los resultados con los obtenidos a través de análisis tiempo-historia no lineal y con los de los análisis de Demanda-Capacidad tradicionales asociados sólo a la curva de capacidad del primer modo.

2. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

El método que se presenta en este trabajo es básicamente el mismo que los ya conocidos en cuanto a que se determina un punto de desempeño de la estructura a partir del cruce de las curvas de capacidad de la estructura y demanda sísmica, de modo de lograr la igualación de ductilidades a través del desplazamiento de la curva de demanda para diferentes ductilidades.

La diferencia fundamental es que la forma de obtener la curva de capacidad de la estructura se basa en el uso de varios modos (tantos como se considere conveniente) y estos modos, con sus respectivos períodos (asociados a una determinada aceleración espectral), además de las masas por nivel, son usados para definir los vectores de cargas modales “ R_i ”. En este trabajo se han considerado dos alternativas de vectores de carga: uno que considera el factor de participación modal y el otro que no lo considera.

El proceso de carga se realiza individualmente para cada uno de los modos, de forma de obtener esfuerzos modales en la estructura. Con los esfuerzos asociados a cada modo se realiza la combinación (en este caso se usa SRSS) a partir de la cual se determina el elemento más solicitado y consecuentemente el factor de carga que produce la siguiente rótula. Habiendo definido la rótula se modifica la matriz de rigidez de la estructura y se vuelve a generar un incremento de cargas.

En este trabajo se ha considerado un modelo de plasticidad concentrada en los extremos de los elementos. La ley constitutiva del modelo de plasticidad se ha considerado elasto-plástica ideal, es decir, cuando una sección alcanza el esfuerzo de plastificación pierde toda capacidad estructural asociada a ese esfuerzo.

En cada uno de estos incrementos de carga se registra el corte basal y el desplazamiento del nudo elegido. Ambos valores se determinan también a través de la combinación indicada anteriormente (SRSS) de los distintos modos considerados. Con estos puntos se grafica la curva de capacidad en el formato Desplazamiento-Fuerza. Esta curva luego es transformada al formato Desplazamiento-Aceleración a través de la división de las fuerzas de corte basal por la masa equivalente acumulada de los modos considerados.

La definición de la curva de capacidad se realiza a través de un programa computacional que ha sido desarrollado por los autores especialmente para este trabajo.

Habiendo definido la estructura, sus masas por nivel y el espectro elástico del sismo que se desea considerar, el programa realiza lo siguiente:

- 1.- Se determinan los periodos propios y formas de vibrar de la estructura (los que se desee considerar en el análisis).
- 2.- Con los periodos propios se determinan las pseudo-aceleraciones asociadas del espectro elástico del sismo considerado.
- 3.- Se definen los vectores de cargas modales como:

$$\text{Caso (1): } R_i = a_i \cdot S_{ai} \cdot m_i \cdot \Phi_i$$

$$\text{Caso (2): } R_i = S_{ai} \cdot m_i \cdot \Phi_i$$

Donde:

R_i : Vector de cargas modales

a_i : Factor de participación modal

S_{ai} : Aceleración Espectral asociada al Modo

m_i : Vector de masas por nivel de la estructura

Φ_i : Modo

Es importante aclarar que el Caso 2 de vector de carga se ha considerado como una alternativa a estudiar para verificar la importancia del factor de participación modal en el análisis.

- 4.- La estructura es cargada individualmente para cada modo con el vector indicado anteriormente. De este análisis resultan esfuerzos en cada elemento, un corte basal y un desplazamiento del nudo elegido para cada modo.
- 5.- Se combinan (mediante SRSS) los esfuerzos de cada elemento y se realiza la comparación de estos esfuerzos con los plásticos asociados de modo de determinar cuál es el elemento crítico (el de mayor razón de agotamiento), luego de lo cual las cargas son redefinidas de manera tal de producir el agotamiento total de ese elemento (rótula). De esta forma se obtiene un factor de carga que en definitiva es el que agota el elemento crítico.
- 6.- Se calculan los esfuerzos combinados de todos los elementos para este factor de carga, además del corte basal y del desplazamiento del nudo elegido (también combinados).
- 7.- Luego de esto se redefine la matriz de rigidez de la estructura.
- 8.- Se repite el proceso desde el paso 4, con la nueva matriz de rigidez y con cada elemento con un determinado grado de agotamiento.
- 9.- Cuando la estructura se encuentra degradada de forma tal que no admite más cargas o cuando se ha alcanzado un desplazamiento mayor al que se defina como máximo, el programa se detiene.

Luego de esto, se grafican los puntos Desplazamiento-Corte Basal. Esta es la curva de capacidad de la estructura en formato Desplazamiento-Fuerza. Para traspassarla al formato Desplazamiento-Aceleración se dividen los Cortes Basales por la Masa Equivalente Acumulada de los modos considerados.

Por otra parte, para definir las curvas de demanda sísmica se ha trabajado con un programa computacional desarrollado en el Departamento de Ingeniería en Obras Civiles de la U.L.S. (Figuroa, Durán y Campbell, 2005). Este programa determina espectros elásticos e inelásticos para diferentes ductilidades, rigidez post-fluencia y porcentajes de amortiguamiento a partir de un acelerograma determinado. Con los resultados de este programa se determinan las curvas de demanda sísmica suavizadas en formato Desplazamiento-Aceleración. Estas curvas son suavizadas a través de una Macro EXCEL.

Queda claro que el procedimiento tiene la ventaja de considerar al sismo tanto en la demanda como en la capacidad de la estructura.

Teniendo las curvas de demanda y capacidad definidas para un determinado sismo no hace falta más que determinar el punto de desempeño de la estructura.

Este punto de desempeño es aquel en donde se intersectan la curva de capacidad de la estructura, la cual está asociada a un determinado sismo, y la curva de demanda sísmica, asociada a un determinado sismo y ductilidad. Como existen varias curvas de demanda, interesa encontrar la intersección antes indicada de

modo que se igualen las ductilidades entre la capacidad y la demanda. Para esto se debe realizar un proceso iterativo hasta encontrar la mejor solución. Es necesario indicar que las curvas de capacidad han sido bi-linearizadas redefiniéndolas como las rectas predominantes de la rama elástica y del tramo no lineal, en cuya intersección se define el punto de fluencia.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS MARCOS

Los marcos considerados en este trabajo han sido extraídos de “Comparación de Programas de Análisis Sísmico No-Linear de Estructuras de Hormigón Armado” (Berríos y Rivera, 2004). Estos edificios son estructurados en base a pórticos de hormigón armado de 3, 4 y 12 pisos, con una altura entre pisos de 3,0 m. La estructura sismorresistente está conformada por marcos viga-columna con dos vanos de 4,0 m. en los edificios de 3 y 4 pisos y dos vanos de 6,4 y 4,8 m. en el edificio de 12 pisos. En la Figura 3.1 se muestran estos marcos.

En el estudio se ha considerado hormigón H-25 y acero A63-42H. Las calidades de los materiales son:

Hormigón:	Acero:
$f'_c=200 \text{ kgf/cm}^2$	$f_y=4200 \text{ kgf/cm}^2$
$E_c=300.000 \text{ kgf/cm}^2$	$E_c=2.100.000 \text{ kgf/cm}^2$

Los momentos plásticos se han determinado a través del programa RESPONSE 2000 (Bentz, 2001). En la determinación de los momentos plásticos de las columnas se ha considerado la fuerza normal de compresión asociada a la descarga estática. Para los cortes se ha usado el corte nominal de las secciones armadas con estribos $\Phi 10@20$ calculado con ACI 318-95. Estos esfuerzos también han sido recopilados del trabajo de Berríos y Rivera (2004).

Estos marcos tienen una masa asociada al primer modo que es mayor al 75% aproximadamente (84,1% en MHA 03, 82,7% en MHA 04 y 76,1% en MHA 12).

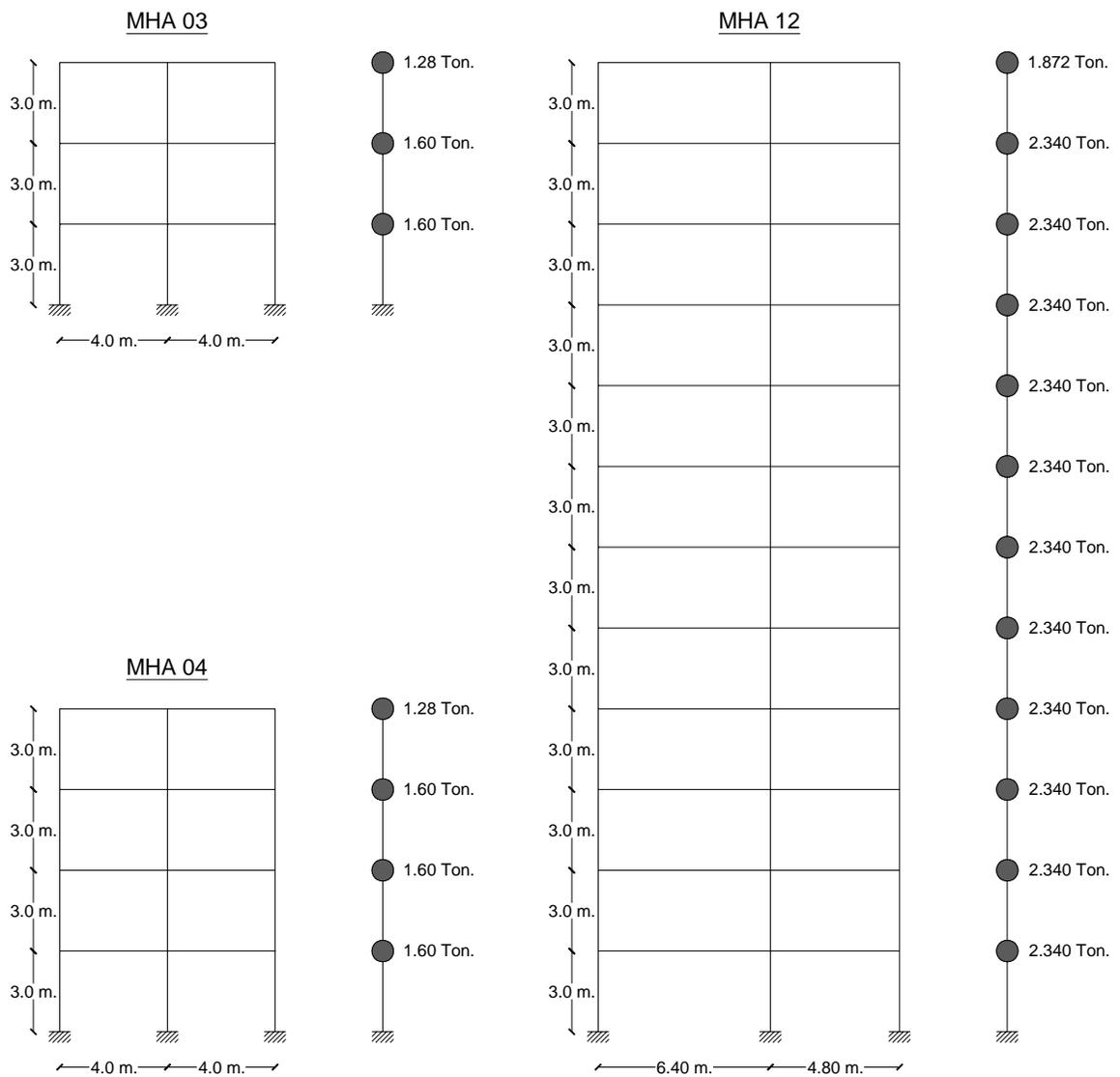


Figura 3.1: Marcos considerados en el estudio y respectivas masas por nivel.

4. SISMOS CONSIDERADOS

Los sismos considerados en este trabajo son Kobe (1995), Lollole (1985), México (1985) y Northridge (1994). Al igual que los marcos, estos sismos han sido elegidos debido a que son los mismos que se usaron en el trabajo de Berríos y Rivera (2004). De estos sismos, Kobe y Northridge son considerados impulsivos y Lollole y México son considerados vibratorios.

5. RESULTADOS

Los resultados del análisis realizado con el método descrito en este trabajo (PushOver Multi Modal, POMM) se comparan con los que entregan los programas IDARC 2D, RUAUMOKO 2D, DRAIN 2DX y NILDYN (los cuales realizan análisis tiempo-historia no-lineal) para las mismas estructuras y los mismos sismos, de acuerdo a lo determinado por Berríos y Rivera (2004), además de los resultados asociados al análisis de pushover tradicional (considerando sólo el primer modo de vibrar).

En las siguientes figuras se muestran las curvas de capacidad y de demanda para algunos de los casos estudiados.

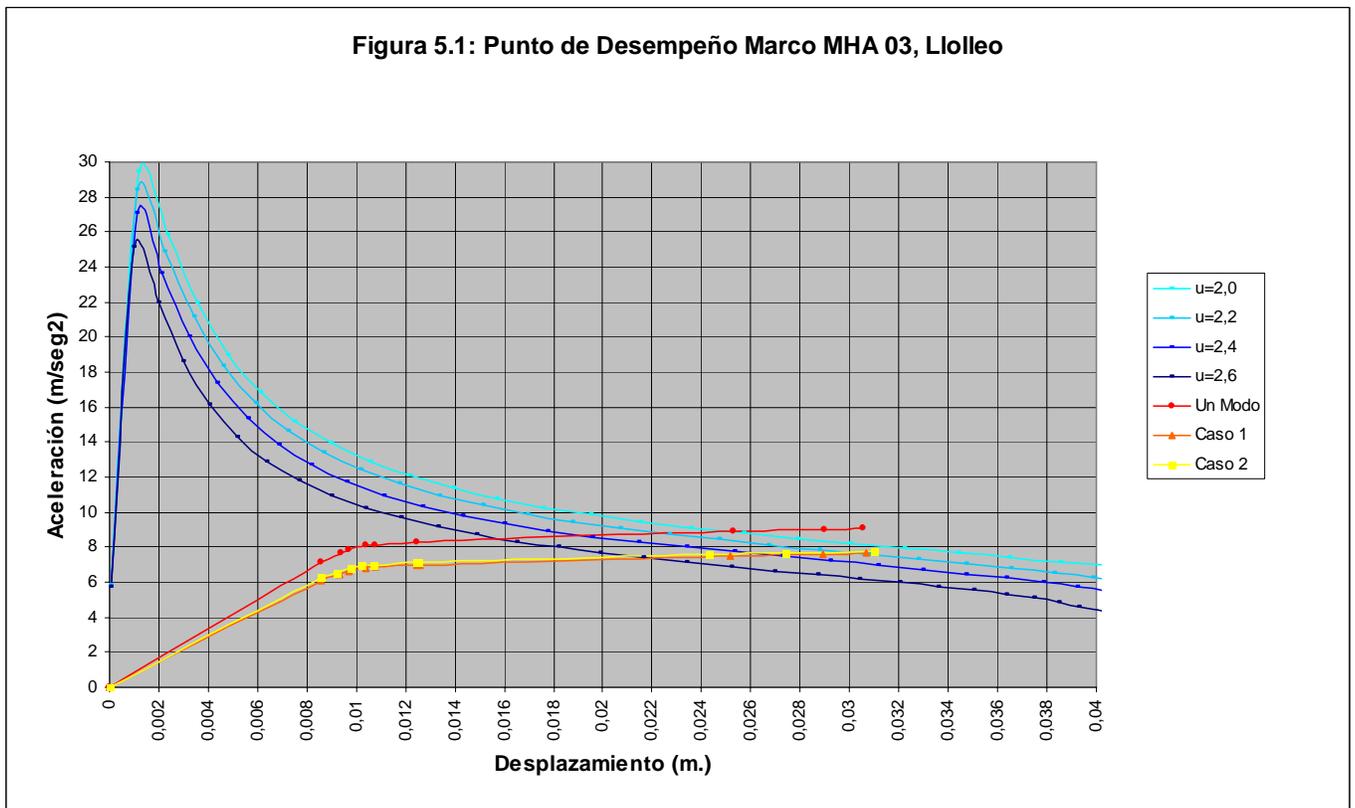


Figura 5.2: Punto de Desempeño Marco MHA 04, México

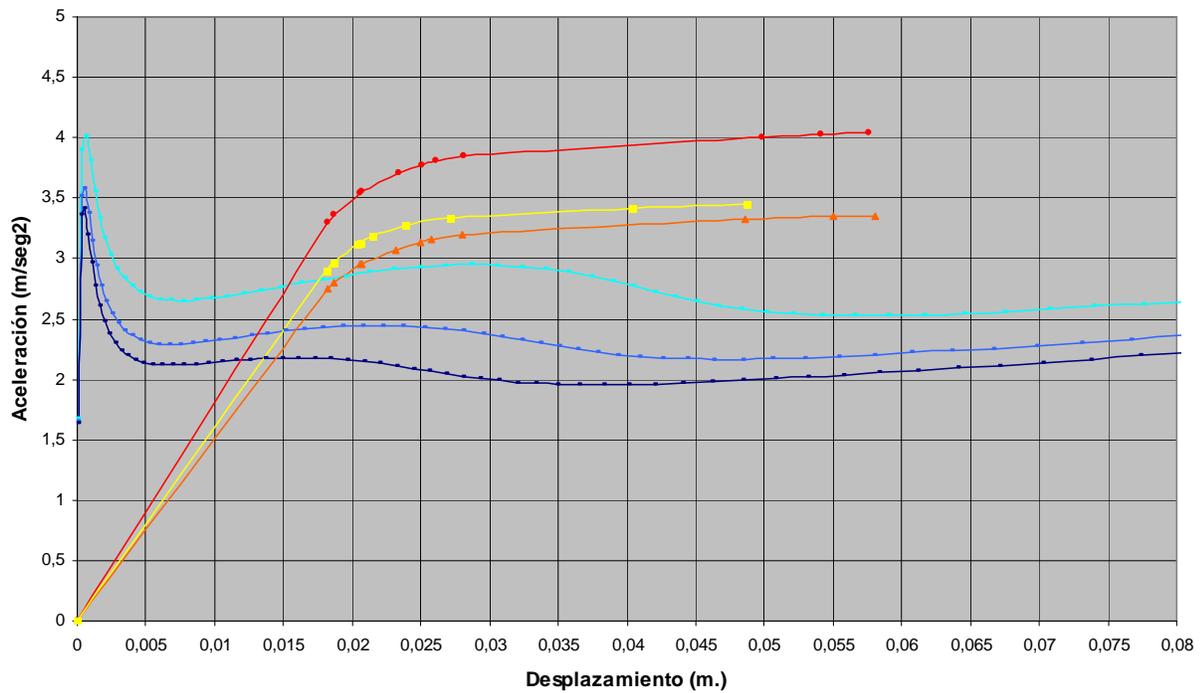
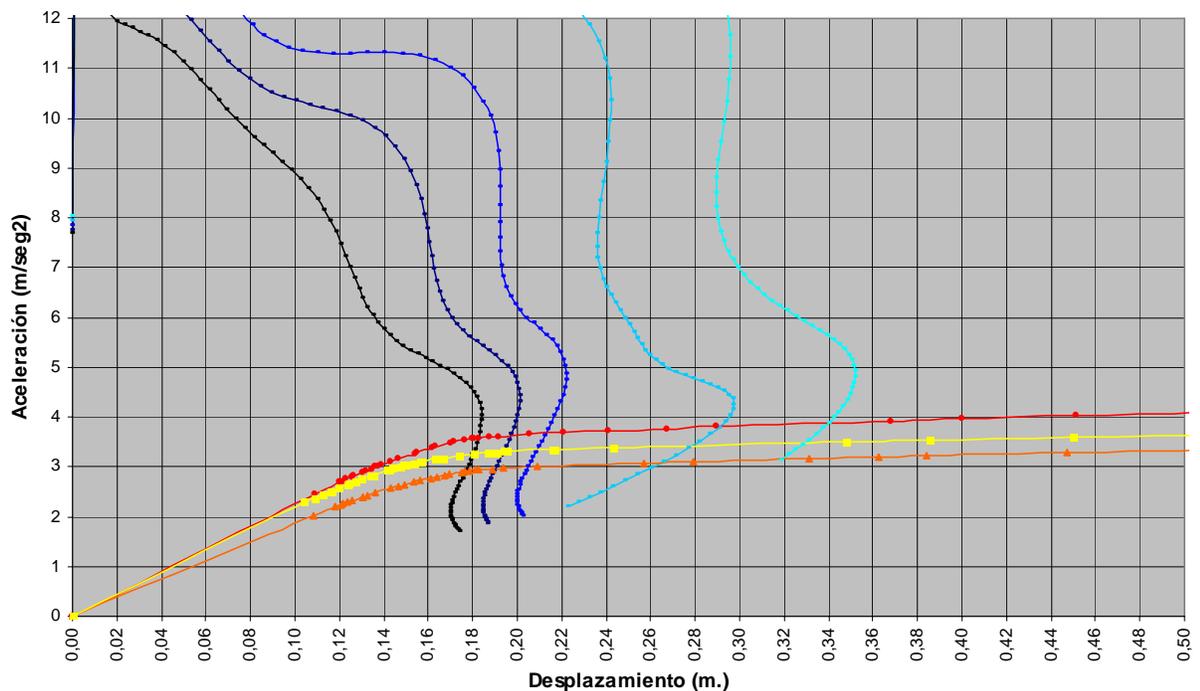


Figura 5.3: Punto de Desempeño Marco MHA 12, Kobe



En las figuras anteriores (Figuras 5.1 a 5.3) se observan los puntos de desempeño de los marcos MHA 03, MHA 04 y MHA 12 para los sismos de Lollole, México y Kobe respectivamente. De ellas se puede interpretar la posición de los puntos de desempeño en cada caso de curva de capacidad asociada, considerando un modo en los tres marcos además de tres modos para MHA 03 y cuatro modos para MHA 04 y MHA 12, para los casos 1 y 2. Los valores respectivos se pueden verificar en las tablas que se muestran a continuación.

A continuación las Tablas 5.1 a 5.12 presentan los resultados para cada caso de estructura y sismo.

Tabla 5.1: Resultados Marco MHA 03, Acelerograma Kobe

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	1.437	---	34.968	Lineal
RUAUMOKO 2D	1.454	---	38.535	1.54
DRAIN 2DX	4.175	---	41.046	1.78
NILDYN	2.853	---	---	1.09
Pushover 1 Modo	3.17	9.25	34.85	3.25
POMM Caso 1	3.79	8.05	36.06	3.90
POMM Caso 2	3.68	8.20	36.74	3.82

Tabla 5.2: Resultados Marco MHA 03, Acelerograma Lollole

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	2.710	---	36.956	1.18
RUAUMOKO 2D	2.820	---	41.413	3.63
DRAIN 2DX	3.661	---	37.818	1.51
NILDYN	3.192	---	---	1.85
Pushover 1 Modo	2.19	8.75	32.97	2.25
POMM Caso 1	2.48	7.50	33.60	2.55
POMM Caso 2	2.41	7.63	34.18	2.50

Tabla 5.3: Resultados Marco MHA 03, Acelerograma México

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	0.204	---	8.186	Lineal
RUAUMOKO 2D	0.220	---	8.170	Lineal
DRAIN 2DX	0.571	---	9.329	Lineal
NILDYN	0.294	---	---	Lineal
Pushover 1 Modo	0.34	2.87	10.81	Lineal
POMM Caso 1	0.39	2.80	12.54	Lineal
POMM Caso 2	0.37	2.83	12.68	Lineal

Tabla 5.4: Resultados Marco MHA 03, Acelerograma Northridge

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	1.995	---	37.354	Lineal
RUAUMOKO 2D	2.013	---	41.178	2.04
DRAIN 2DX	3.160	---	38.636	1.68
NILDYN	2.407	---	---	1.09
Pushover 1 Modo	2.54	8.94	33.68	2.60
POMM Caso 1	2.82	7.63	34.18	2.90
POMM Caso 2	2.74	7.88	35.30	2.85

Tabla 5.5: Resultados Marco MHA 04, Acelerograma Kobe

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	20.924	---	24.746	5.01
RUAUMOKO 2D	24.540	---	35.524	20.80
DRAIN 2DX	27.124	---	25.837	7.39
NILDYN	25.109	---	---	2.91
Pushover 1 Modo	6.83	4.13	20.76	3.25
POMM Caso 1	6.62	3.42	20.79	3.15
POMM Caso 2	6.64	3.45	20.98	3.20

Tabla 5.6: Resultados Marco MHA 04, Acelerograma Lolleo

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	7.686	---	26.239	2.15
RUAUMOKO 2D	7.440	---	29.143	6.25
DRAIN 2DX	8.454	---	22.745	3.46
NILDYN	7.411	---	---	1.17
Pushover 1 Modo	4.73	4.00	20.11	2.25
POMM Caso 1	4.78	3.31	20.12	2.28
POMM Caso 2	4.70	3.44	20.92	2.30

Tabla 5.7: Resultados Marco MHA 04, Acelerograma México

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	1.099	---	12.713	Lineal
RUAUMOKO 2D	1.130	---	12.347	Lineal
DRAIN 2DX	3.146	---	13.730	Lineal
NILDYN	1.692	---	---	Lineal
Pushover 1 Modo	1.55	2.78	13.98	Lineal
POMM Caso 1	1.90	2.88	17.51	Lineal
POMM Caso 2	1.75	2.82	17.15	Lineal

Tabla 5.8: Resultados Marco MHA 04, Acelerograma Northridge

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	12.734	---	25.972	3.86
RUAUMOKO 2D	13.363	---	29.829	7.64
DRAIN 2DX	13.229	---	23.419	3.86
NILDYN	10.187	---	---	1.18
Pushover 1 Modo	5.26	4.05	20.36	2.50
POMM Caso 1	5.67	3.38	20.55	2.70
POMM Caso 2	5.59	3.44	20.92	2.70

Tabla 5.9: Resultados Marco MHA 12, Acelerograma Kobe

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	31.657	---	106.867	2.42
RUAUMOKO 2D	30.870	---	112.750	6.78
DRAIN 2DX	33.404	---	96.610	2.84
NILDYN	---	---	---	---
Pushover 1 Modo	23.68	3.72	78.20	1.47
POMM Caso 1	22.99	3.05	80.11	1.45
POMM Caso 2	21.63	3.35	87.99	1.53

Tabla 5.10: Resultados Marco MHA 12, Acelerograma Llolleo

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	15.602	---	72.135	1.15
RUAUMOKO 2D	16.740	---	87.749	5.20
DRAIN 2DX	23.154	---	90.490	3.50
NILDYN	---	---	---	---
Pushover 1 Modo	17.72	3.60	75.68	1.10
POMM Caso 1	17.80	3.08	80.89	1.15
POMM Caso 2	15.08	3.53	92.71	1.18

Tabla 5.11: Resultados Marco MHA 12, Acelerograma México

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	6.660	---	59.366	Lineal
RUAUMOKO 2D	9.154	---	63.674	1.38
DRAIN 2DX	16.511	---	72.150	1.22
NILDYN	---	---	---	---
Pushover 1 Modo	14.50	3.25	67.58	1.00
POMM Caso 1	27.25	3.05	80.11	1.70
POMM Caso 2	25.22	3.12	81.94	1.60

Tabla 5.12: Resultados Marco MHA 12, Acelerograma Northridge

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (Tonf.)	μ
IDARC 2D	29.718	---	129.949	2.63
RUAUMOKO 2D	30.690	---	133.400	5.10
DRAIN 2DX	39.423	---	112.910	3.16
NILDYN	---	---	---	---
Pushover 1 Modo	28.67	3.80	79.88	1.78
POMM Caso 1	29.33	3.18	83.52	1.85
POMM Caso 2	26.86	3.60	94.55	1.90

Es necesario consignar que los valores de ductilidades entregadas por RUAUMOKO 2D resultan notoriamente mayores debido a que este programa considera el punto de fluencia de la estructura a partir de un criterio muy distinto al de los restantes programas.

6. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados expuesto se concluye que el método propuesto constituye una buena alternativa para estimar el corte basal y el desplazamiento último de una estructura de marcos de hormigón armado.

Observando las curvas de capacidad determinadas se puede apreciar que existen diferencias entre los resultados obtenidos para un modo (pushover tradicional) y para varios modos. El análisis con varios modos no manifiesta grandes diferencias en la medida que se aumenta el número de modos, por lo que aparentemente sería suficiente trabajar con dos.

Las diferencias encontradas entre las curvas de capacidad asociada a un modo y las asociadas a varios modos se manifiestan en el aumento del esfuerzo de corte basal que la estructura admite. Esto es más notorio en las estructuras más altas.

Por otra parte, el método entrega resultados particularmente buenos en corte basal y desplazamiento en el tope para el sismo de Lollole, el cual es el único sismo chileno de la muestra.

Es importante indicar que los resultados obtenidos en este trabajo están referidos a marcos cuya masa asociada al primer modo es siempre mayor al 75% aproximadamente (84,1% en MHA 03, 82,7% en MHA 04 y 76,1% en MHA 12). Probablemente el método tendría diferencias más sustanciales con el asociado a un sólo modo si se trabajara con estructuras en las cuales el primer modo tenga una incidencia menor.

Finalmente, de los análisis realizados con las estructuras y sismos considerados en este trabajo, se deduce que el factor de participación modal no tiene una influencia importante en los resultados.

REFERENCIAS

- Chopra, A. K., and Goel, R, K. (1999). Capacity-Demand-Diagrams Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures. SDF Systems. *PEER Report 1999/02*.
- Chopra, A. K., and Goel, R, K. (2001). A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings: Theory and Preliminary Evaluation. *PEER Report 2001/03*.
- Guendelman, T., Guendelman, M., Lindenberg, J., Leyton, F. y Eisenberg, A. (2002). Desempeño Sísmico Implícito de Edificios Diseñados con la Norma Sísmica Chilena. *Anales de las VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA 2002)*, 81.
- Guendelman, T. (2004). Apuntes de Clase del Curso CI52N. *Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile*, Capítulo 13: Procedimiento Capacidad-Demanda.
- Guendelman, T. (2003). Apuntes de Clase Análisis Sísmico de Edificios. *Master en Diseño de Edificios, Facultad de Arquitectura, Universidad Mayor*, Capítulo 13: Procedimiento Capacidad-Demanda.
- Durán, M. y González, E. (1992). Utilización de un Algoritmo de Optimización para Aumentar la Ductilidad de Marcos de Hormigón Armado ante Cargas Horizontales. *Numerical Methods in Engineering and Applied Sciences, CIMNE*, 1022-1031.
- Durán, M. y González, E. (1993). Aumento de la Ductilidad de Marcos de Hormigón Armado para la sollicitación Sísmica Utilizando Programación Matemática. *Anales de VI Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA 1993)*, 487-496.
- Berrios, M. y Rivera, A. (2004). Comparación de Programas de Análisis Sísmico No-Lineal de Estructuras de Hormigón Armado. *Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Serena*.
- Rivera, A., Berrios, M., Campbell J. y Durán M. (2005). Comparación de Programas de Análisis Sísmico No-Lineal de Estructuras de Hormigón Armado. *Anales de IX Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA 2005)*.
- Figueroa, L., Durán M. y Campbell J. (2005). Obtención de Espectros Inelásticos de Sismos Chilenos para su Utilización en el Método NSP. *Anales de IX Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA 2005)*.
- Código de Diseño de Hormigón Armado, Basado en el ACI 318-95.