



XXXIII JORNADAS SUDAMERICANAS
DE INGENIERIA ESTRUCTURAL
Santiago, 26 al 30 de Mayo de 2008



www.asaee.org.br

PROCEDIMIENTO DEMANDA-CAPACIDAD MULTIMODAL MODIFICADO

MODIFIED MULTIMODAL CAPACITY-DEMAND PROCEDURE

Jaime Campbell B. (1); Mario Duran L. (1), Tomás Guendelman B. (2), Sergio Páez R. (3)

(1) Profesor, Depto. de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Serena, Chile

(2) IEC Ingeniería Ltda. – Chile

(3) Egresado de Ingeniería Civil, Depto. de Ing. en Obras Civiles, Universidad de La Serena, Chile

(1) (3) Benavente 980, 3º Piso, Depto. de Ing. en Obras Civiles, U. de La Serena, Chile

jcampbel@userena.cl; mduran@userena.cl

(2) Dublé Almeyda 2580, Santiago, Chile

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, a la pseudo-aceleración espectral asociada al modo y al factor de participación modal.

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

Abstract

This study shows an alternative method to develop a nonlinear static analysis to a reinforced concrete multi-story plane frame. This technique is different from other ones because of the consideration not only of the fundamental vibration mode of the structure, as other techniques usually do, in the determination of the structural capacity. This difference takes into account the relevance of higher modes of vibration, the seismic excitation in the analysis (through the earthquake elastic and inelastic acceleration spectra), the storey masses and the modal participation factor.

Keyword: Non-linear static analysis, reinforced concrete frames, multimodal capacity-demand procedure.

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” [Chopra, 1999; Chopra, 2001], 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, en una primera instancia (Pushover Multimodal), 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. En una segunda instancia (Pushover Multimodal Modificado), se supone que no existe proporcionalidad entre los diferentes modos de vibrar, dado que los vectores de carga modales cambian a lo largo del proceso, ya que los períodos, modos de vibrar y, por consiguiente, las pseudoaceleraciones espectrales varían durante el análisis junto con el cambio de rigidez de la estructura.

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) y factores de participación modal, además de las masas por nivel, son usados para definir los vectores de cargas modales “ R_i ”.

En ambos casos 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.

La diferencia entre ambos métodos (Pushover Multimodal y Pushover Multimodal Modificado) radica en que en el primero los vectores de carga se mantienen proporcionales entre sí

y en el segundo los vectores de carga cambian permanentemente debido a que en cada iteración se recalculan los períodos propios, modos de vibrar, factores de participación modal y las respectivas pseudoaceleraciones.

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.

Para el desarrollo del Pushover Multimodal, es necesario haber definido la estructura, sus masas por nivel, el espectro elástico del sismo que se desea considerar y los esfuerzos de plastificación de todos los elementos. 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: $R_i = a_i \cdot S_{ai} \cdot m_i \cdot \Phi_i$

Donde:

- R_i : Vector de cargas modales
- a_i : Factor de participación modal
- S_{ai} : Aceleración Espectral asociada al Modo
- m_i : Matriz de masas por nivel de la estructura
- Φ_i : Modo

- 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 (ver Figura 1).
- 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.

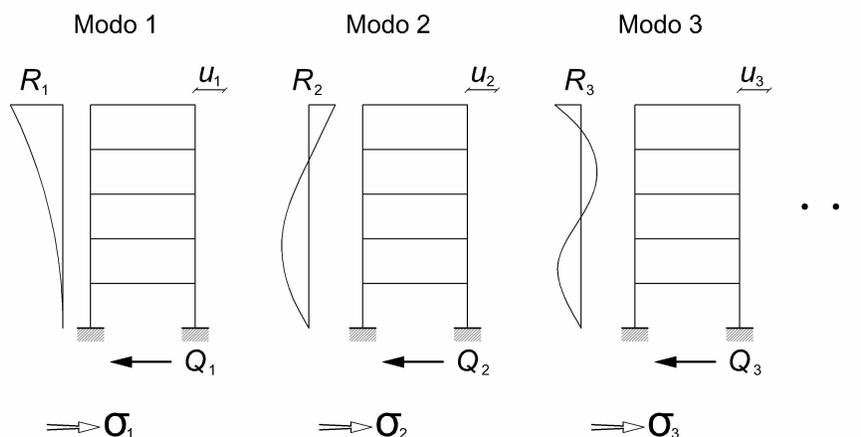


Figura 1: Metodología del Pushover Multimodal.

Para el desarrollo del Pushover Multimodal Modificado, el programa realiza lo mismo que lo indicado anteriormente para el Pushover Multimodal, con la sola diferencia que luego del paso 7 se recalculan los períodos propios, modos de vibrar y pseudoaceleraciones espectrales, por lo que los vectores de carga de la siguiente iteración ya no son los mismos de la iteración anterior.

Luego de esto, se grafican los puntos Desplazamiento-Corte Basal. Esta es la curva de capacidad de la estructura en formato Desplazamiento-Fuerza. Para traspasarla 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. de La Serena [Figuroa, 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.

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, el cual debe ser definido para los efectos de determinar la ductilidad en el punto de desempeño (ver Figura 2).

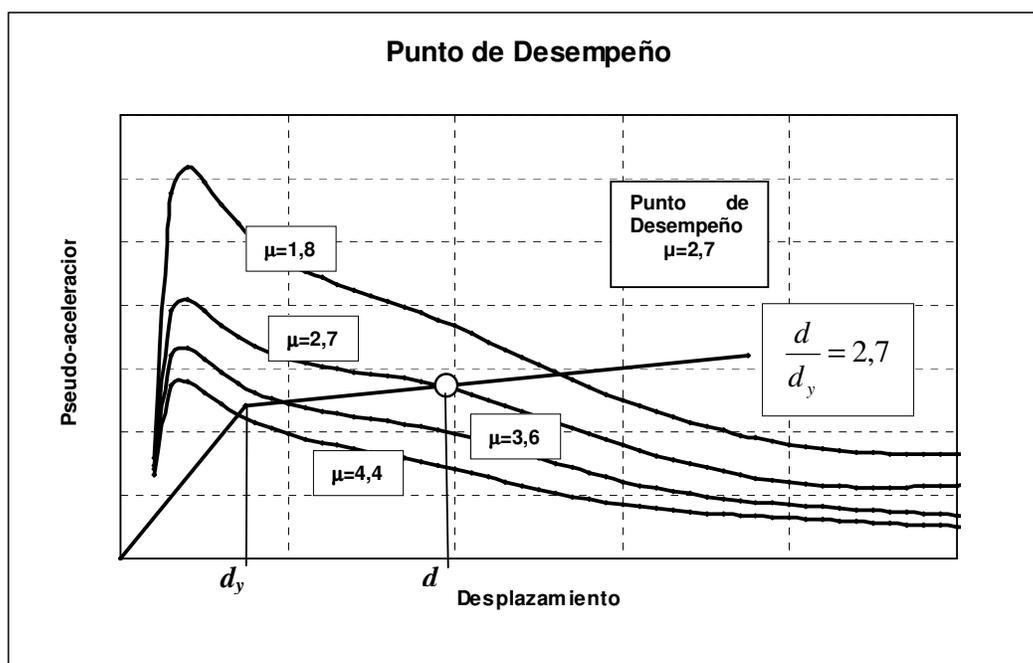


Figura 2: Determinación del punto de desempeño.

3 DESCRIPCIÓN DE LOS MARCOS

Las estructuras utilizadas en este estudio corresponden a 5 marcos planos estructurados en base a pórticos de hormigón armado de 3, 4, 12, 16 y 20 pisos, todos corresponden a estructuras ficticias. Las dimensiones de los marcos de 3, 4 y 12 pisos fueron determinadas en investigaciones anteriores realizadas por Durán y González [Durán y González, 1992; Durán y González, 1993] y Berríos y Rivera [Berríos y Rivera, 2004]. Los marcos de 16 y 20 pisos han sido definidos por Reyes y Thielemann [Reyes y Thielemann, 2006]. Los refuerzos de acero de las secciones de todos los marcos fueron calculados a partir de solicitaciones obtenidas según las disposiciones de la norma NCh433.Of96 [INN, 1996] y siguiendo la normativa del Código de Diseño de hormigón armado ACI318-95 [ACI, 1995].

Las estructuras han sido definidas en base a pórticos de hormigón armado cuyas características se especifican en la Tabla 1 y en las Figuras 3 a 7.

Tabla 1. Dimensiones de vanos y alturas de entrepiso.

Marco	N° Vanos	Longitud de Vanos (m.)			Altura de Entrepiso (m.)
		Vano 1	Vano 2	Vano 3	
MHA03	2	4,0	4,0	---	3,00
MHA04	2	4,0	4,0	---	3,00
MHA12	2	6,9	4,8	---	3,00
MHA16	3	7,0	7,0	7,0	(*)
MHA20	3	7,0	7,0	7,0	(*)

En el estudio se ha considerado hormigón H-25 y acero A63-42H. Las calidades de los materiales son (Tabla 2):

Tabla 2. Calidades de los materiales.

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

Los momentos plásticos se han determinado a través del programa RESPONSE 2000 [Bentz, 2000]. 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 [Berríos y Rivera, 2004] y Reyes y Thielemann [Reyes y Thielemann, 2006].

Estos marcos tienen una masa asociada al primer modo que es mayor al 75% aproximadamente (85,2% en MHA 03; 83,4% en MHA 04; 77,6% en MHA 12; 77,0% en MHA16 y 75,8% en MHA20).

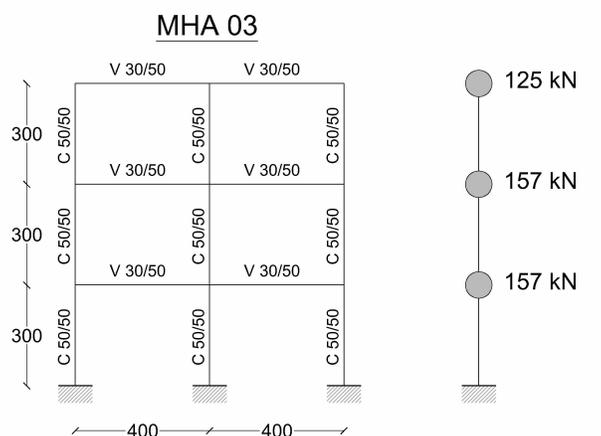


Figura 3: Marco MHA03 y respectivos pesos por nivel.

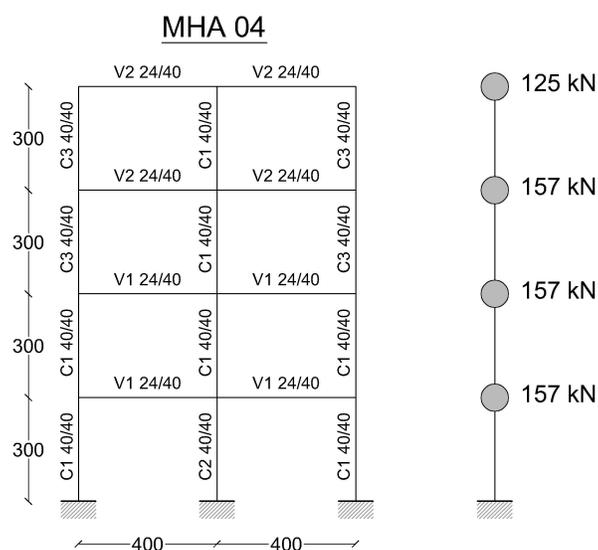


Figura 4: Marco MHA04 y respectivos pesos por nivel.

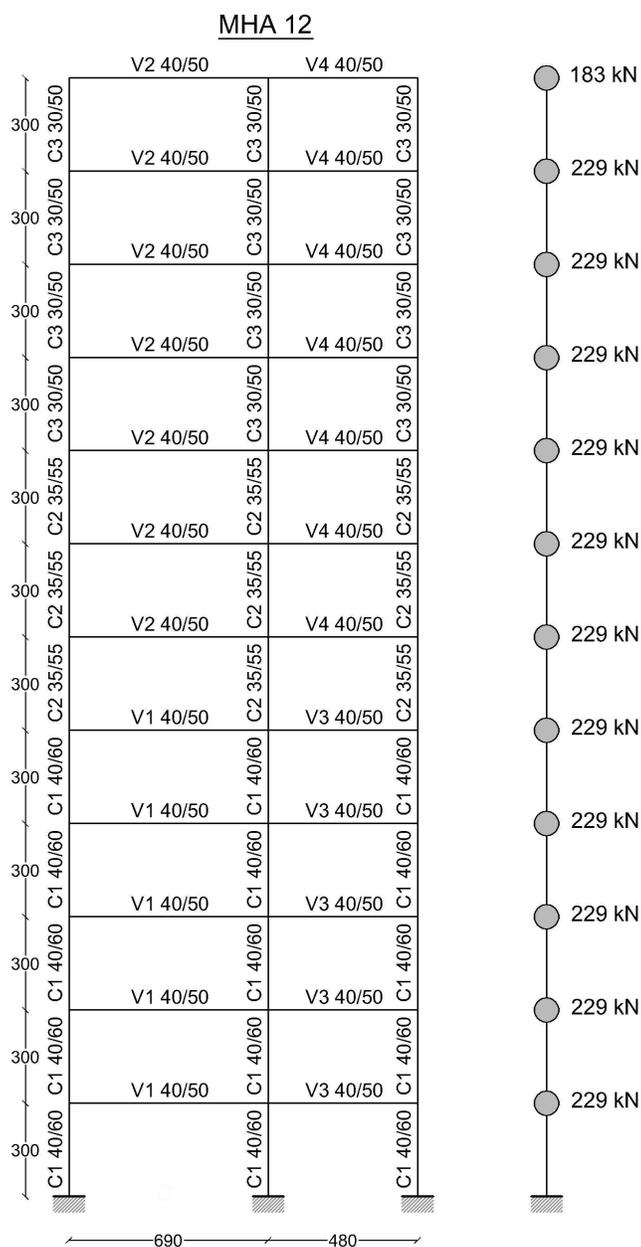


Figura 5: Marco MHA12 y respectivos pesos por nivel.

MHA 16

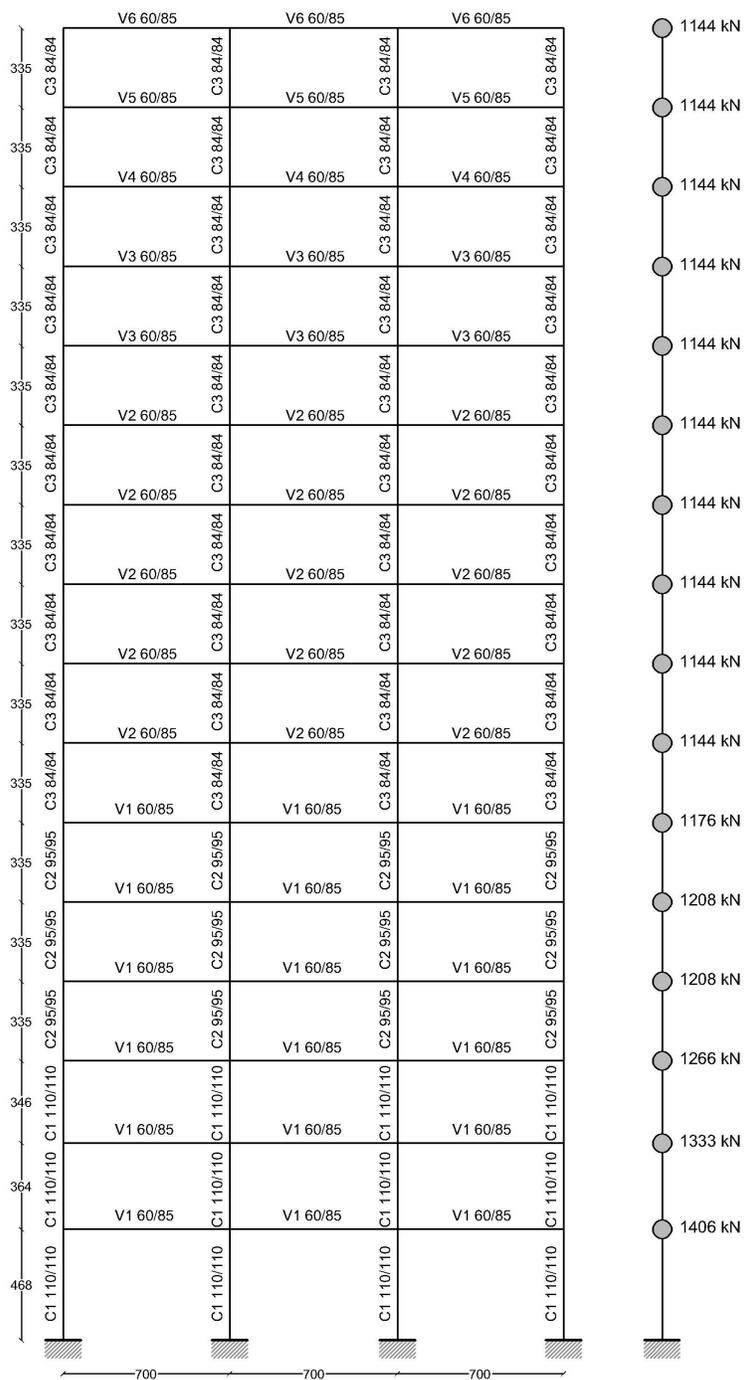


Figura 6: Marco MHA16 y respectivos pesos por nivel.

4 SISMOS CONSIDERADOS

Los sismos considerados en este trabajo son Kobe (1995), Lolloe (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 [Berríos y Rivera, 2004]. De estos sismos, Kobe y Northridge son considerados impulsivos y Lolloe y México son considerados vibratorios. En las siguientes figuras (Figuras 8 a 11) se muestran los espectros elástico e inelástico en formato A-D (aceleración – desplazamiento) de los sismos considerados en este estudio.

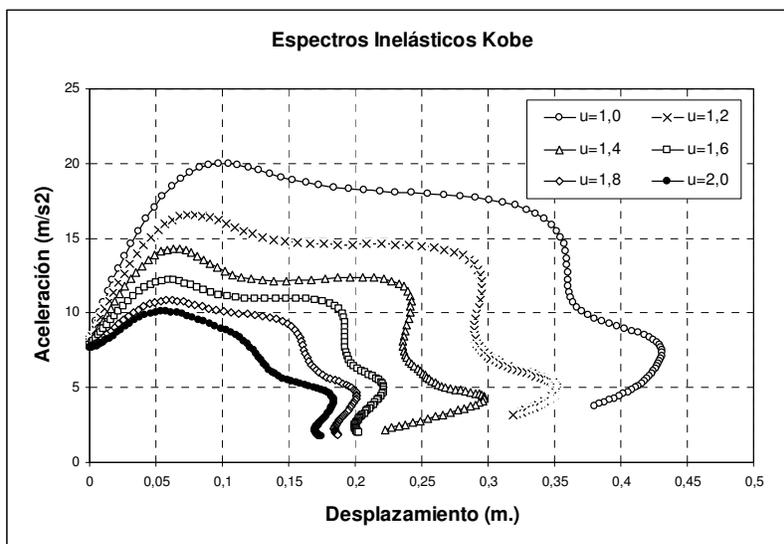


Figura 8: Espectros Inelásticos Kobe.

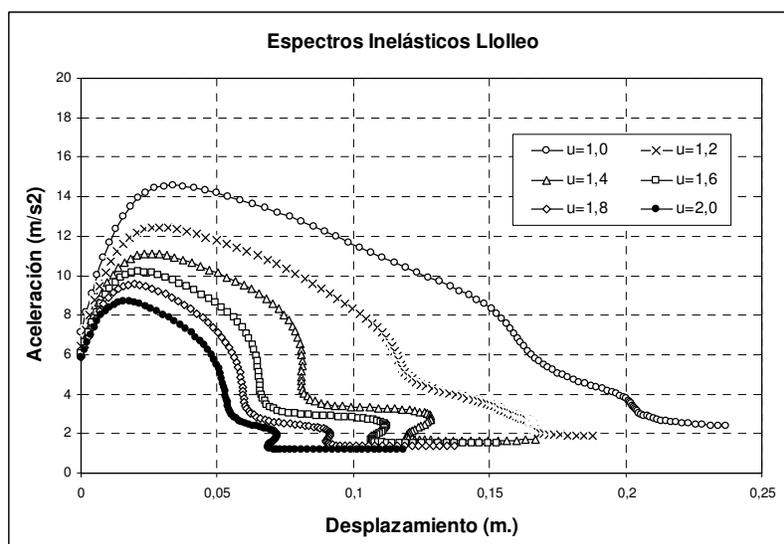


Figura 9: Espectros Inelásticos Lolloe.

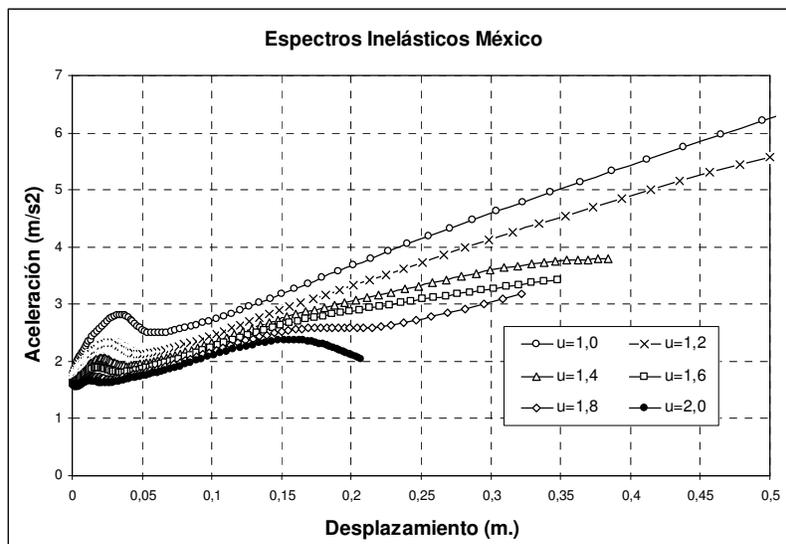


Figura 10: Espectros Inelásticos México.

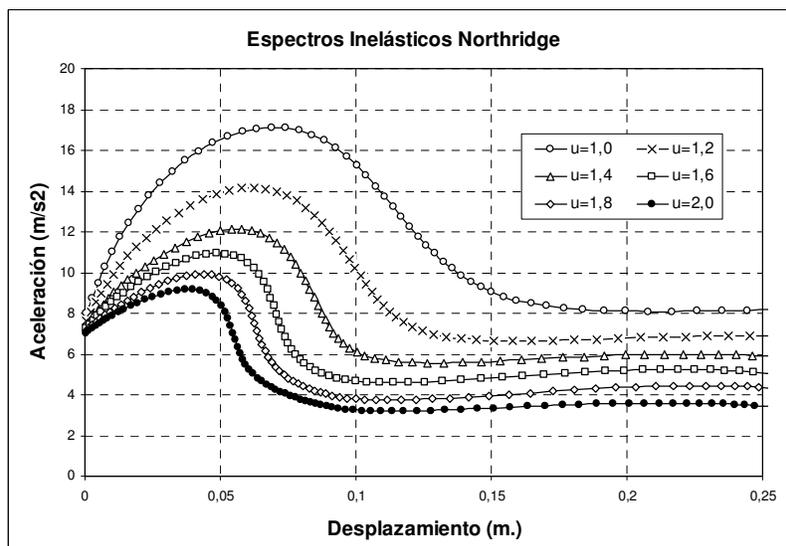


Figura 11: Espectros Inelásticos Northridge.

5 RESULTADOS

Los resultados del análisis realizado con el método descrito en este trabajo (PushOver Multi Modal, POMM y PushOver Multi Modal Modificado) se comparan con los que entregan el programa RUAUMOKO 2D [Carr, 2003] (el cual realiza análisis tiempo-historia no-lineal) para las mismas estructuras y los mismos sismos, de acuerdo a lo determinado por Berríos y Rivera [Berríos y Rivera, 2004] y Reyes y Thielemann [Reyes y Thielemann, 2006], además de los resultados asociados al análisis de pushover tradicional (considerando sólo el primer modo de vibrar).

En las siguientes figuras (Figuras 12 a 21) se muestran las curvas de capacidad y de demanda para algunos de los casos estudiados.

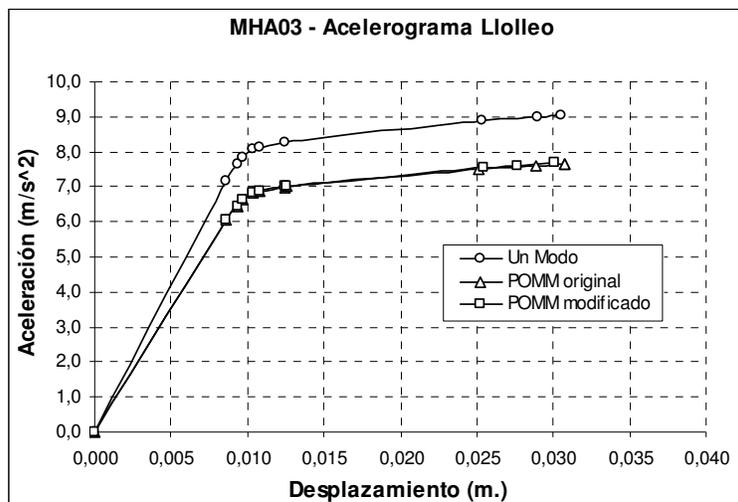


Figura 12: Curvas de Capacidad MHA03, Acelerograma Lolloe.

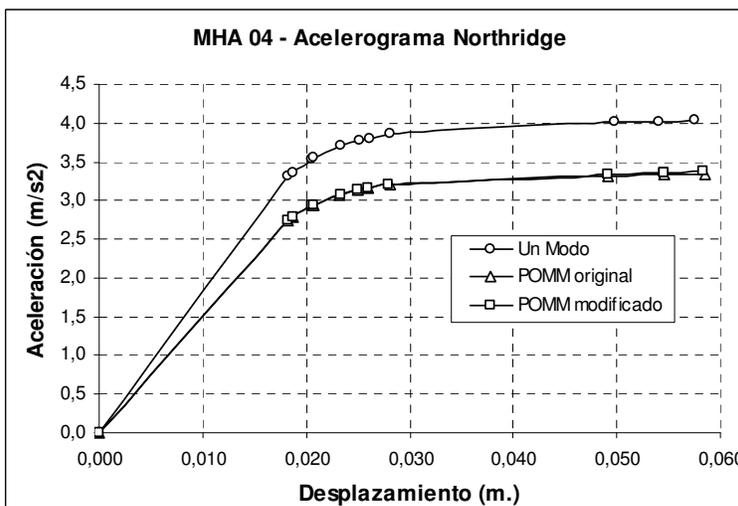


Figura 13: Curvas de Capacidad, MHA04, Acelerograma Northridge.

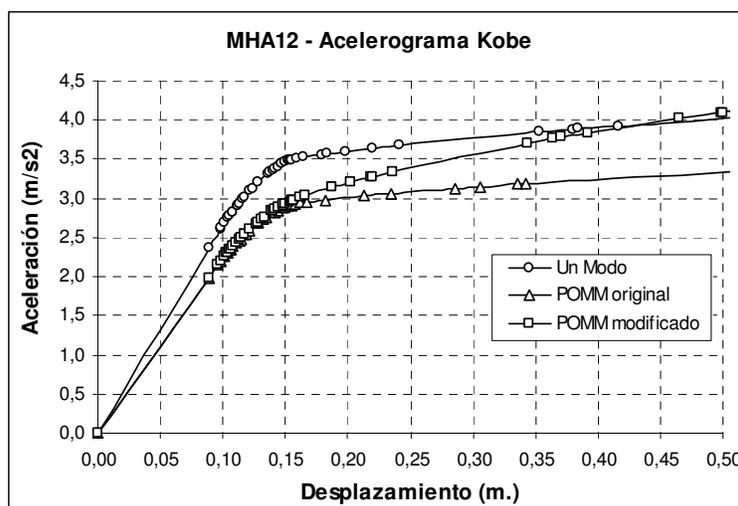


Figura 14: Curvas de Capacidad, MHA12, Acelerograma Kobe.

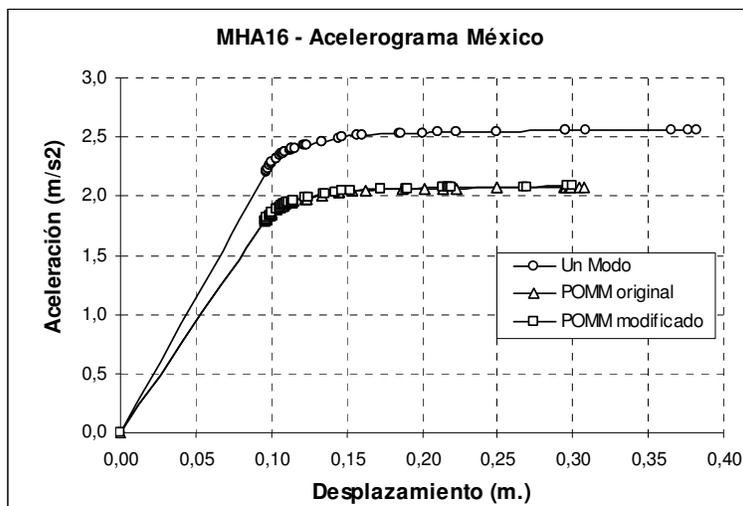


Figura 15: Curvas de Capacidad, MHA16, Acelerograma México.

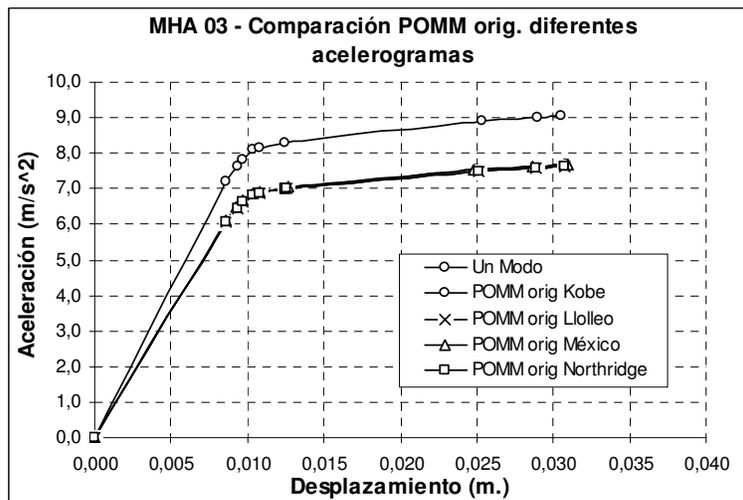


Figura 16: Curvas de Capacidad, MHA03, diferentes Acelerogramas.

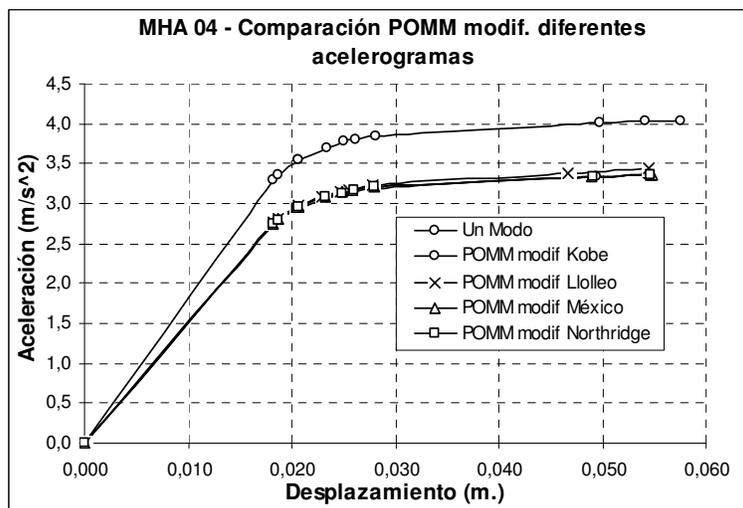


Figura 17: Curvas de Capacidad, MHA04, diferentes Acelerogramas.

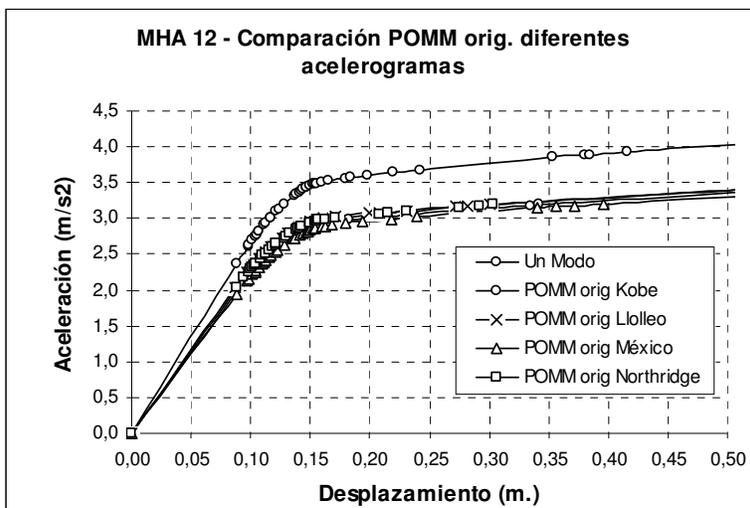


Figura 18: Curvas de Capacidad, MHA12, diferentes Acelerogramas.

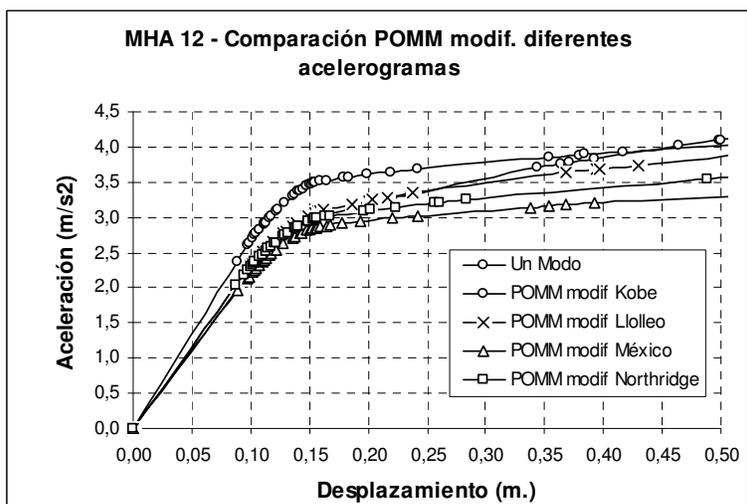


Figura 19: Curvas de Capacidad, MHA12, diferentes Acelerogramas.

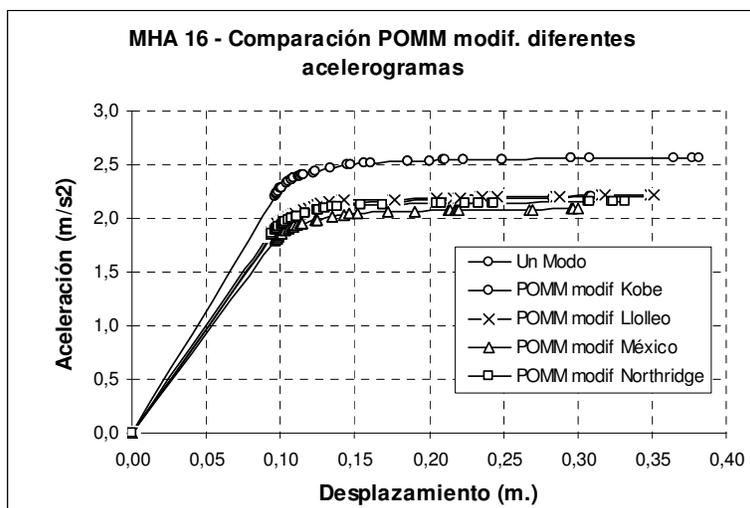


Figura 20: Curvas de Capacidad, MHA16, diferentes Acelerogramas.

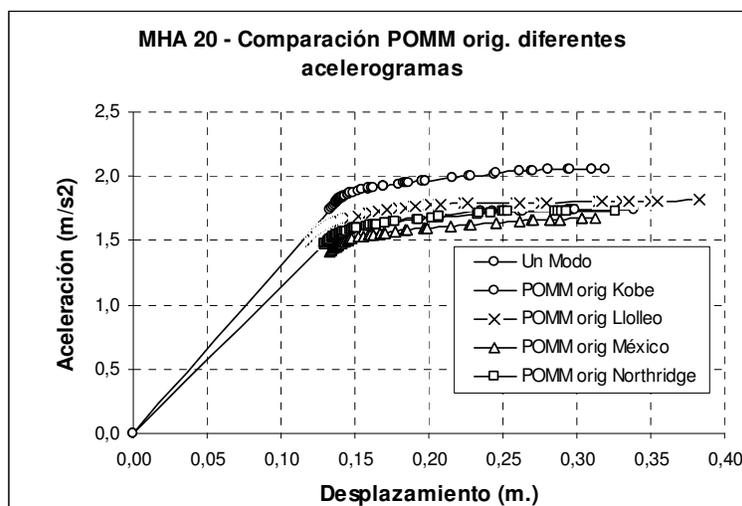


Figura 21: Curvas de Capacidad, MHA20, diferentes Acelerogramas.

A continuación, las Tablas 3 a 22 presentan los resultados para cada caso de estructura y sismo.

Tabla 3. Comparación de resultados MHA03, Acelerograma Kobe

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	1,45	---	385,4	1,54
Pushover 1 Modo	3,17	9,25	348,5	3,25
POMM	3,79	8,05	360,6	3,90
POMM Modificado	4,00	8,03	359,7	4,08

Tabla 4. Comparación de resultados MHA03, Acelerograma Lloleto

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	2,82	---	414,1	3,63
Pushover 1 Modo	2,19	8,75	329,7	2,25
POMM	2,48	7,50	336,0	2,55
POMM Modificado	2,43	7,46	334,2	2,48

Tabla 5. Comparación de resultados MHA03, Acelerograma México

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	0,22	---	81,7	Lineal
Pushover 1 Modo	0,34	2,87	108,1	Lineal
POMM	0,39	2,80	125,4	Lineal
POMM Modificado	0,35	2,19	98,1	Lineal

Tabla 6. Comparación de resultados MHA03, Acelerograma Northridge

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	2,01	---	411,8	2,04
Pushover 1 Modo	2,54	8,94	336,8	2,60
POMM	2,82	7,63	341,8	2,90
POMM Modificado	3,14	7,72	345,9	3,21

Tabla 7. Comparación de resultados MHA04, Acelerograma Kobe

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	24,54	---	355,2	20,80
Pushover 1 Modo	6,83	4,13	207,6	3,25
POMM	6,62	3,42	207,9	3,15
POMM Modificado	6,55	3,44	209,2	3,16

Tabla 8. Comparación de resultados MHA04, Acelerograma Llolleo

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	7,44	---	291,4	6,25
Pushover 1 Modo	4,73	4,00	201,1	2,25
POMM	4,78	3,31	201,2	2,28
POMM Modificado	4,73	3,37	204,9	2,28

Tabla 9. Comparación de resultados MHA04, Acelerograma México

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	1,13	---	123,5	Lineal
Pushover 1 Modo	1,55	2,78	139,8	Lineal
POMM	1,90	2,88	175,1	Lineal
POMM Modificado	1,18	2,74	166,6	Lineal

Tabla 10. Comparación de resultados MHA04, Acelerograma Northridge

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	13,36	---	298,3	7,64
Pushover 1 Modo	5,26	4,05	203,6	2,50
POMM	5,67	3,38	205,5	2,70
POMM Modificado	5,81	3,37	204,9	2,77

Tabla 11. Comparación de resultados MHA12, Acelerograma Kobe

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	30,87	---	1.127,5	6,78
Pushover 1 Modo	21,67	3,77	809,2	1,56
POMM	21,29	3,18	835,8	1,52
POMM Modificado	24,04	3,71	975,1	1,48

Tabla 12. Comparación de resultados MHA12, Acelerograma Llolleo

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	16,74	---	877,5	5,20
Pushover 1 Modo	15,86	3,73	800,6	1,14
POMM	16,10	3,24	851,5	1,17
POMM Modificado	15,56	3,56	935,7	1,20

Tabla 13. Comparación de resultados MHA12, Acelerograma México

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	9,15	---	636,7	1,38
Pushover 1 Modo	20,54	3,76	807,0	Lineal
POMM	13,88	3,06	804,2	Lineal
POMM Modificado	13,80	3,03	796,4	Lineal

Tabla 14. Comparación de resultados MHA12, Acelerograma Northridge

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	30,69	---	1.334,0	5,10
Pushover 1 Modo	26,50	3,80	815,6	1,91
POMM	27,34	3,26	856,8	1,98
POMM Modificado	27,72	3,38	888,4	1,93

Tabla 15. Comparación de resultados MHA16, Acelerograma Kobe

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	38,47	---	4.760,0	3,88
Pushover 1 Modo	18,85	2,51	3.699,9	1,73
POMM	18,67	2,10	3.827,7	1,76
POMM Modificado	18,79	2,15	3.918,9	1,73

Tabla 16. Comparación de resultados MHA16, Acelerograma Llolleo

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	M
RUAUMOKO	22,03	---	4.452,4	2,94
Pushover 1 Modo	14,11	2,49	3.670,4	1,30
POMM	13,66	2,14	3.900,6	1,32
POMM Modificado	14,12	2,16	3.937,1	1,32

Tabla 17. Comparación de resultados MHA16, Acelerograma México

Programa	δ (cm.)	a (m/seg²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	36,04	---	4.867,0	3,25
Pushover 1 Modo	11,10	2,48	3.655,7	1,26
POMM	20,94	2,05	3.736,6	1,98
POMM Modificado	24,77	2,07	3.773,0	2,28

Tabla 18. Comparación de resultados MHA16, Acelerograma Northridge

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	41,38	---	4.941,5	4,08
Pushover 1 Modo	23,08	2,53	3.729,4	2,13
POMM	21,61	2,12	3.864,2	2,18
POMM Modificado	22,83	2,13	3.882,4	2,14

Tabla 19. Comparación de resultados MHA20, Acelerograma Kobe

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	43,41	---	5.473,4	3,43
Pushover 1 Modo	21,98	1,99	3.614,0	1,49
POMM	22,78	1,69	3.802,5	1,57
POMM Modificado	22,85	1,76	3.960,0	1,54

Tabla 20. Comparación de resultados MHA20, Acelerograma Lolleo

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	27,14	---	4.990,0	1,87
Pushover 1 Modo	17,33	1,95	3.541,4	1,17
POMM	16,64	1,76	3.960,0	1,28
POMM Modificado	16,72	1,78	4.005,0	1,19

Tabla 21. Comparación de resultados MHA20, Acelerograma México

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	56,44	---	5.692,0	3,25
Pushover 1 Modo	28,11	2,03	3.686,7	1,90
POMM	26,17	1,64	3.690,0	2,03
POMM Modificado	29,44	1,67	3.757,5	2,03

Tabla 22. Comparación de resultados MHA20, Acelerograma Northridge

Programa	δ (cm.)	a (m/seg ²)	Q basal (kN)	μ
RUAUMOKO	51,87	---	5.550,0	4,08
Pushover 1 Modo	29,13	2,04	3.704,8	1,98
POMM	25,71	1,70	3.825,0	2,00
POMM Modificado	28,50	1,73	3.892,5	1,94

Es necesario consignar que los valores de ductilidades entregadas por RUAUMOKO 2D [Carr, 2003] resultan notoriamente mayores debido a que este programa considera el punto de fluencia de la estructura a partir de un criterio diferente al considerado en este trabajo.

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 (Pushover Multimodal y Multimodal Modificado). 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 o tres. Además, se aprecia que los resultados considerando la modificación del procedimiento, en general, no hace gran diferencia con el procedimiento original, excepto en el caso del marco MHA12.

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 Lolleo, el cual es el único sismo chileno de la muestra.

Junto a lo anterior, es importante destacar que el método modificado aporta una mejora a los resultados, en cuanto a que se aproxima más a los del programa RUAUMOKO.

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. 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.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI (1995). Código de Diseño de Hormigón Armado, Basado en el ACI 318-95. *American Concrete Institute, Detroit, Michigan, U.S.A.*

Bentz (2000). Bentz, E. Response 2000: User Manual. *PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada, 2001.*

Berríos, 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.*

Campbell (2005). Campbell, J., Durán, M. y Guendelman, T. Procedimiento Demanda-Capacidad Multimodal. *Anales de IX Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA 2005).*

Campbell, J. (2007). Procedimiento Demanda-Capacidad Multimodal. *Tesis de Master, CIMNE-Universidad Politécnica de Cataluña, España.*

Carr (2003). Carr, A. J. RUAUMOKO: The Mori God of Volcanoes and Earthquakes, Vol. 1 and 2. *Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Canterbury, New Zealand.*

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.*

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 solicitud Sísmica Utilizando Programación Matemática. *Anales de VI Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA 1993), 487-496.*

Figueroa (2005). Figueroa, L., Durán M. y Campbell J. 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)*.

Guendelman (2002). Guendelman, T., Guendelman, M., Lindenberg, J., Leyton, F. y Eisenberg, A. 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. (2003). Apuntes de Clase Análisis Sísmico de Edificios. *Master en Diseño de Edificios, Facultad de Arquitectura, Universidad Mayor*, Capítulo 13: Procedimiento Capacidad-Demanda.

Guendelman, T. (2004). Apuntes de Clase del Curso CI52N. *Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile*, Capítulo 13: Procedimiento Capacidad-Demanda.

INN (1996). Diseño Sísmico de Edificios, Norma Chilena Oficial NCh433 of.96. *Instituto Nacional de Normalización, Chile*.

Reyes y Thielemann (2006). Reyes, I., Thielemann, C. Evaluación del Factor de Modificación de Respuesta Estructural para Diseño Sismorresistente en Edificios de Hormigón Armado. *Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Serena*.

Rivera y Berríos (2005). Rivera, A., Berríos, M., Campbell J. y Durán M. 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)*.