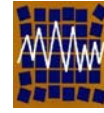




Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e
Ingeniería Antisísmica

A10-01 COMPARACIÓN DE PROGRAMAS DE ANÁLISIS SÍSMICO NO LINEAL DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

A. Rivera C.¹, M. Berríos C.², J. Campbell B.³ y M. Durán L.³

1.- AyS Consultores Ltda..

e-mail: ayscons@123.cl

2.- ODR Ingeniería Estructural

e-mail: mberrios@odr.cl

3.- Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de la Serena

Benavente 980, La Serena, Chile

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

RESUMEN

Se comparan programas de análisis sísmico no lineal de estructuras de hormigón armado. Se estudia la respuesta de cuatro modelos de estructuras planas de 3, 4, 6 y 12 pisos, sometidos a terremotos reales, Llole (1985), Kobe (1995), México (1985) y Northridge (1994), considerando el comportamiento no lineal de los materiales. Los programas que se utilizan para desarrollar los análisis tiempo-historia son IDARC-2D, RUAUMOKO-2D, DRAIN-2DX y NILDYN. Se comparan los resultados de los distintos programas a través de curvas de corte basal y desplazamiento superior v/s el tiempo de duración del sismo. También se describe la secuencia de plastificación o rotulación de las estructuras, sus índices de daño, el drift máximo entre pisos y las envolventes de corte y desplazamiento.

Palabras Clave: Análisis Sísmico No Lineal, Hormigón Armado, Software

1. INTRODUCCIÓN

El análisis estructural tiempo-historia considerando el comportamiento no lineal de los materiales que componen las edificaciones se ha utilizado en los últimos años como un complemento para el análisis sísmico de edificios en lo que se refiere a la evaluación de edificios ya diseñados y especialmente para estimar la bondad de procedimientos simplificados de comportamiento no lineal tales como el método demanda-capacidad.

A diferencia del análisis sísmico elástico lineal de una estructura, donde cualquier programa computacional utilizado debe dar los mismos resultados tanto en desplazamientos como en esfuerzos, la estimación de la respuesta de las estructuras sometidas a fuertes sismos que exceden el rango lineal elástico de los materiales, dependerá del programa empleado. Ello debido a que la modelación del comportamiento no-lineal y el algoritmo numérico utilizado difiere en los distintos programas.

El presente trabajo representa un resumen de la memoria de titulación de M. Berríos y A. Rivera desarrollada en la Universidad de La Serena [Berríos y Rivera 2004]. En ella se comparan los programas NILDYN [Meskouris 1988], DRAIN-2DX [Prakash 1992], IDARC-2D [Reinhorn 2002] y RUAUMOKO-2D [Carr 2003]. Se analizan 3 marcos de hormigón armado, de 3, 4, y 12 pisos y un eje resistente de un edificio de 6 pisos estructurado en base a muros. Los marcos de 3, 4 y 12 pisos son estructurados en base a pórticos y fueron estudiados por Durán et al [Durán 1989] y Soto [Soto 1998]. El eje resistente analizado corresponde al de un edificio real de 5 pisos más un subterráneo ubicado en La Serena. Estas estructuras son sometidas a los registros de aceleración de los sismos de Lolleo (Chile, 1985), Ciudad de México (México, 1985), Kobe (Japón, 1995) y Northridge (Estados Unidos, 1994).

2. PROGRAMA IDARC-2D

IDARC 2D (Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Building Structures) resultó de la adaptación de modelos computacionales desarrollados por investigaciones propuestas bajo el soporte de la University of Central Florida, por el Profesor Sashi Kunnath, y por medio de los Profesores Andrei Reinhorn y Rodolfo Valles-Mattox de la University of Buffalo, New York. La primera versión de IDARC 2D fue desarrollada en 1987 y la versión utilizada en este estudio corresponde a la versión 5.5, del 12 Julio del 2002.

Los análisis realizados por el programa son los siguientes:

- Análisis incremental inelástico con carga estática.
- Análisis monotónico, “push-over”.
- Análisis dinámico inelástico.
- Análisis cuasi-estático cíclico.

- Los tres últimos tienen la posibilidad de incorporar cargas estáticas y el efecto P-Delta, y al final de cada análisis se determina un índice de daño para la estructura analizada.

El programa IDARC-2D permite modelar la estructura con los siguientes tipos de elementos: columnas, vigas, muros de corte, columnas de borde, vigas transversales, resortes rotacionales, amortiguadores visco-elásticos, de fricción e hysteréticos y muros de albañilería confinada. Los tres primeros son usados en los distintos análisis realizados en el presente estudio.

El modelo hysterético triparamétrico que utiliza el programa IDARC-2D mostrado en la (Fig. 1) ofrece un amplio rango de opciones en el modelamiento del comportamiento inelástico de los elementos de hormigón armado, representando una gran variedad de propiedades hysteréticas según los parámetros α , β y γ . Los valores de estos parámetros determinan las propiedades de degradación de rigidez, decaimiento de la resistencia y de deslizamiento o cierre de grieta, respectivamente.

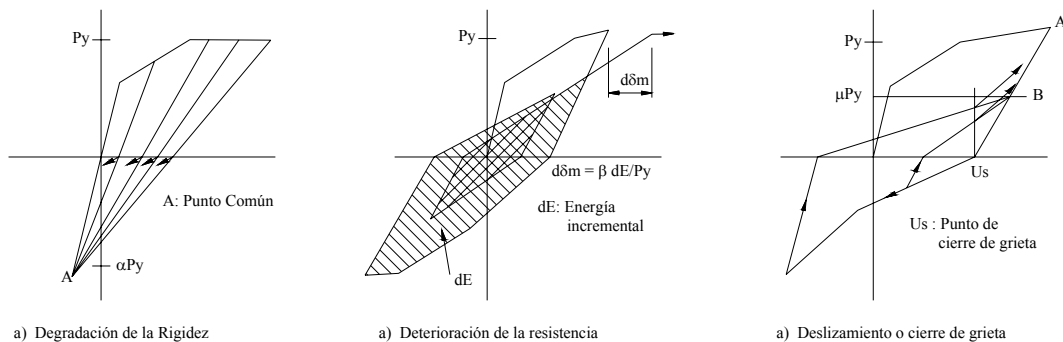


Fig. 1 Modelo Triparamétrico.

3. PROGRAMA RUAUMOKO-2D

RUAUMOKO 2D fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Canterbury, Canterbury, Nueva Zelanda, por el Dr. Athol J. Carr y está escrito principalmente en Fortran77, con algunos detalles en Fortran90 y Fortran95. La versión utilizada es la compilación del 2 de Agosto de 2003.

RUAUMOKO-2D permite realizar análisis estático, análisis modal, análisis dinámico tiempo-historia y análisis monotónico “push-over”, con los siguientes tipos de elementos: frame (vigas o columnas), spring (resortes lineales o rotacionales), damping or dash-pot (disipadores de energía), active-tendon (puntales de carga constante), quadrilateral finite (paneles), masonry panel (muros de albañilería confinada), foundation or ground (sistema de resortes que representan la interacción suelo-fundación) y structural-wall (muros de hormigón armado).

El elemento frame tiene distintos modelos, de los cuales se usó BEAM member para vigas y BEAM-COLUMN member para columnas. Ambos tienen su comportamiento inelástico según el concepto de Giberson [Giberson 1969] (Fig. 2).

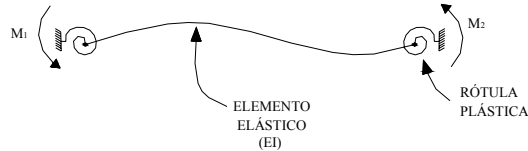


Fig. 2 Elemento de Giberson [Giberson 1969].

Para representar el comportamiento de los elementos de manera más real en los análisis tiempo-historia, el programa presenta 43 reglas histeréticas, pasando por linealmente elásticas, elasto-plásticas, bilineal o trilineal y llegando a reglas más extensas como las hiperbólicas o las que incluyen complejas degradaciones de esfuerzos.

Para calcular el índice de daño RUAUMOKO 2D ofrece 7 alternativas: por deformación, según Park and Ang, Bracci et al, Roufaiel and Meyer, Cosenza et al, Banon and Veneziano y Krawinkler and Zohrei.

4. PROGRAMA DRAIN-2DX

DRAIN-2DX (Dynamic Response Analysis of Inelastic Building Structures) fue desarrollado por el Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, California, por Vipul Prakash. La primera versión de DRAIN-2DX fue desarrollada en 1987 por Allahabadi, luego Prakash la mejoró el año 1992. La versión utilizada en este estudio corresponde a la versión 1.10 de Noviembre de 1993.

Este programa desarrolla análisis estático, análisis no lineal estático (push-over) y dinámico (tiempo-historia) y análisis modal, a estructuras planas. DRAIN-2DX permite modelar las estructuras con elementos tales como bielas (Elemento tipo 01 y 09), columnas (Elemento tipo 02), conexiones simples (Elemento tipo 04 y 10), paneles estructurales (Elemento tipo 06), vigas (Elemento tipo 07) y fibras (Elemento tipo 15). Los muros se modelan con el elemento columna, sin la inclusión de la deformación por corte inelástica, ya que el programa no presenta esta opción.

El ciclo histerético que rige el comportamiento inelástico del Elemento Tipo 02 y Tipo 07 es la Regla de Takeda [Takeda 1970] (Fig. 3).

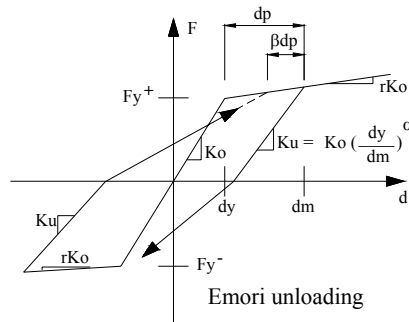


Fig. 3 Regla Histerética de Takeda.

5. PROGRAMA NILDYN

El programa Nildyn fue desarrollado por la Facultad de Ingeniería en Construcción Estática y Dinámica de la Universidad de Bochum, Alemania Federal, en el año 1988. Está escrito en Fortran.

La modelación de la estructura se basa en elementos de viga, los cuales siguen la regla de Giberson [Giberson 1969]. El comportamiento no lineal a su vez está regido por la regla histerética de Takeda [Takeda 1970]. La respuesta del sistema al análisis dinámico es calculada por una integración paso a paso, asumiendo aceleración constante en cada paso de tiempo [Newmark 1959]. Dentro de cada paso de tiempo el sistema es considerado lineal y su rigidez se caracteriza como una rigidez tangencial. Para el caso en que hay fluencia o cuando aparecen las rótulas plásticas, la rigidez es cambiada y se repite la descomposición triangular con la ayuda de la eliminación de Gauss, luego de la cual se forma la nueva matriz de rigidez.

6. PRESENTACION DE LAS ESTRUCTURAS

Los marcos de hormigón armado estudiados poseen 3, 4 y 12 pisos, con una altura entre pisos de 3 (m), con dos vanos de 4 (m) para los marcos de 3 y 4 pisos (MHA3 y MHA4), y dos vanos de 6.9 (m) y 4.8 (m) para el marco de 12 pisos (MHA12) en la dirección X, y están separados cada 4 (m) en la dirección Y. El eje resistente analizado corresponde al de un edificio de 5 pisos más un subterráneo estructurado con muros de hormigón armado. La altura de piso es de 3.42 (m) en el subterráneo y de 2.49 (m) en los niveles superiores. Mayores detalles de las estructuras se indican en Berríos y Rivera (2004).

6.1. Consideraciones Generales

- No se considera la interacción suelo-estructura, suponiendo los elementos llegan a la fundación perfectamente empotrados.
- Se considera un grado de libertad traslacional por piso.
- No se considera respuesta torsional.
- Las vigas y columnas tienen un comportamiento no lineal en flexión.
- Los muros tienen un comportamiento no lineal en corte y en flexión.
- Las aceleraciones verticales de los sismos no se consideran.
- Se consideran las deformaciones axiales en muros y columnas, pero sólo en el rango elástico.
- Se consideran las deformaciones elásticas por corte en vigas y columnas.
- Propiedades de los materiales: Hormigón H-25, Acero A63-42H.
- Los nudos son modelados considerando penetraciones de columnas y vigas de un 25%.
- Para la estimación de la rigidez de las vigas no se considerara la contribución de las losas.
- El valor del coeficiente de amortiguamiento elegido es de un 5% del crítico.
- El intervalo de tiempo entre cada punto del registro es de 0.02 (s), y el intervalo de integración usado es de 0.005 (s) para IDARC-2D, RUAUMOKO-2D y DRAIN-2DX y de 0.02 (s) para NILDYN.
- No se considera el efecto P-Delta.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados completos de los cálculos se muestran en Berríos y Rivera (2004). En las figuras siguientes se muestra la comparación de algunos resultados tales como envolventes de desplazamiento y de corte y secuencia de plastificación de algunas estructuras analizadas.

Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica
IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción - Chile

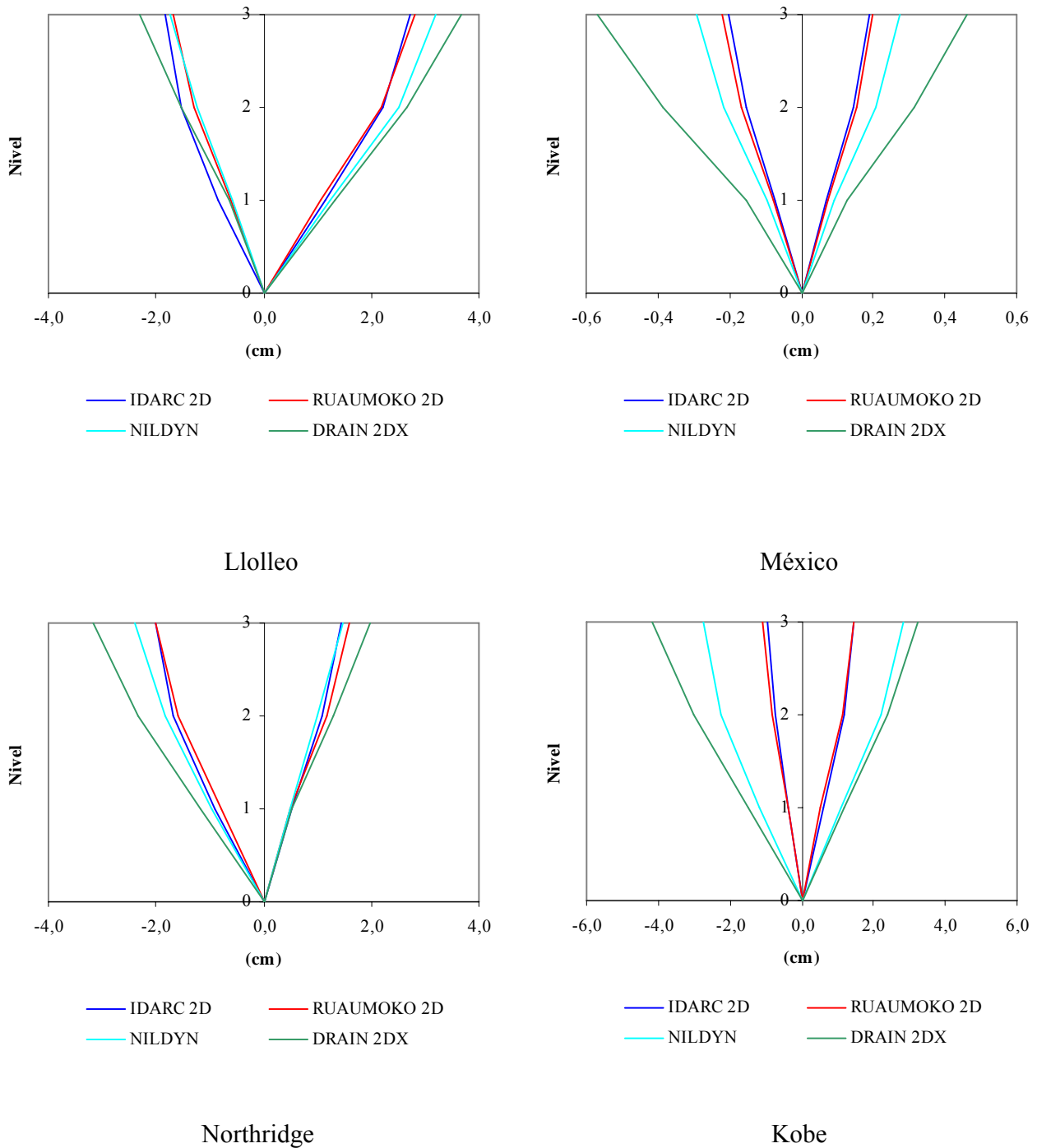


Figura 4.- Envolverte de Desplazamiento MHA3.

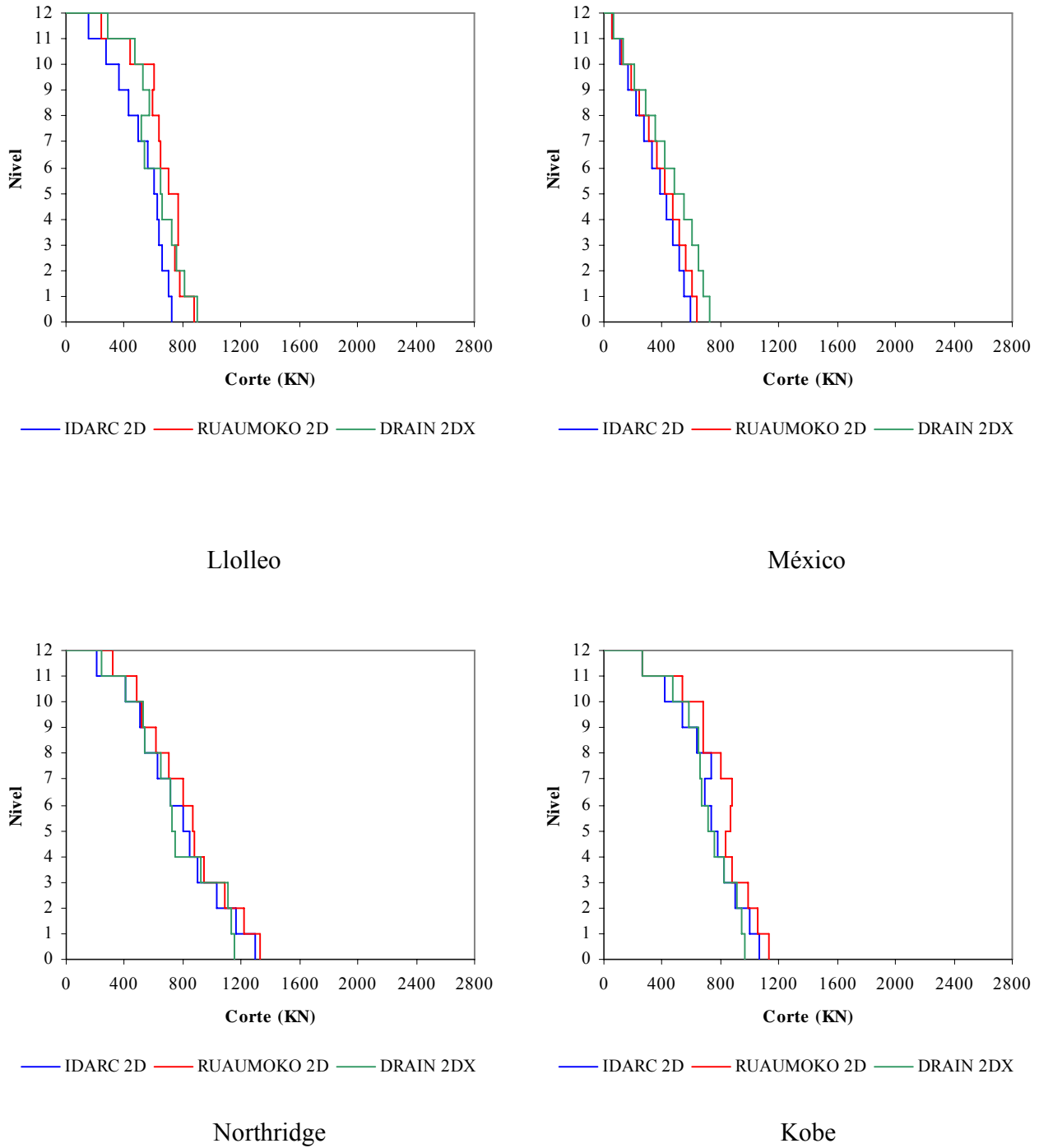


Figura 5.- Envoltura de Corte MHA12.

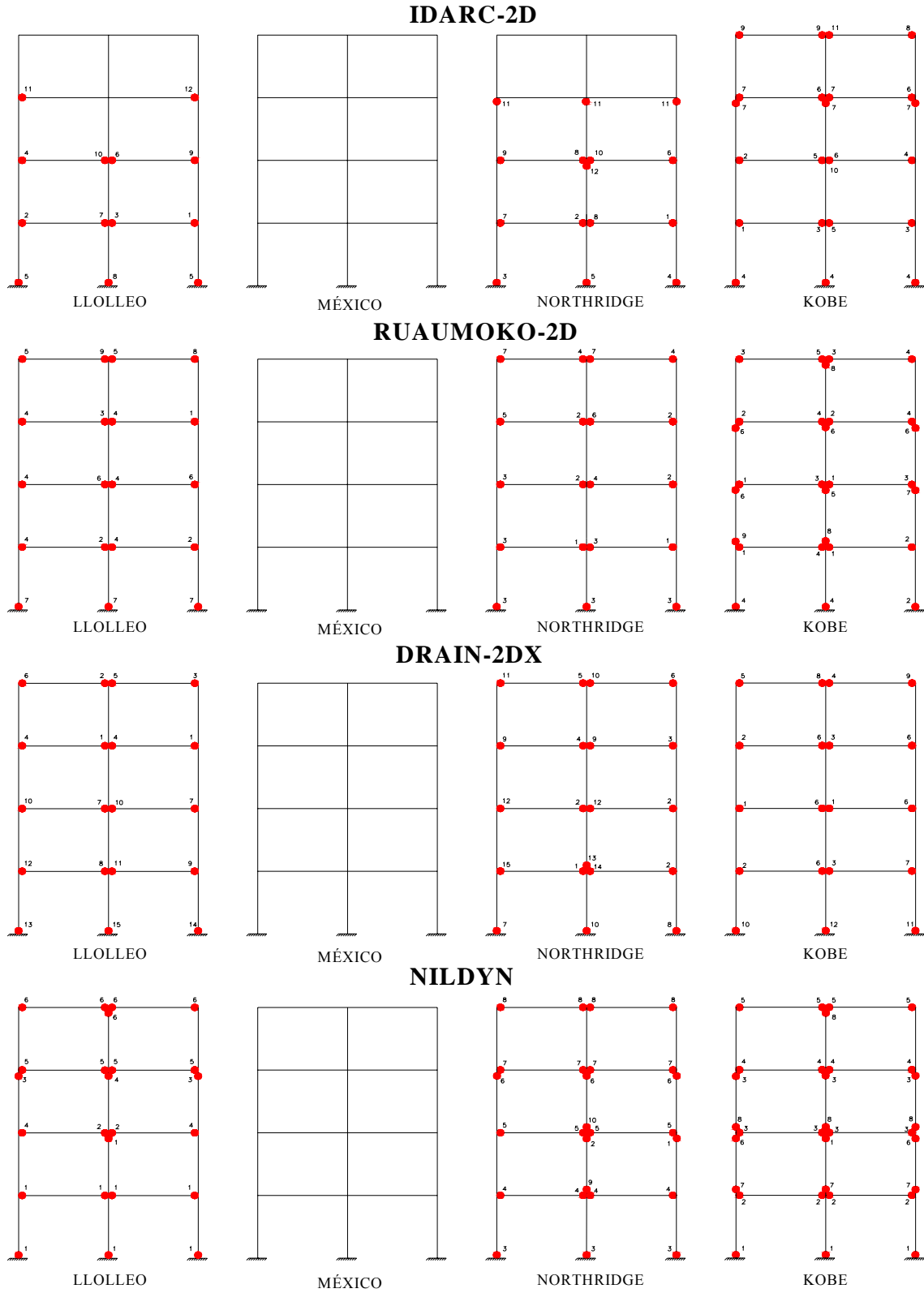


Figura 6 Secuencia de Rotulación MHA4.

8. CONCLUSIONES

La selección apropiada del parámetro de degradación de rigidez en la rama de descarga del ciclo histérico influye en la respuesta sísmica de los modelos analizados cuando estos trabajan en su comportamiento extremo (no lineal), destacándose que, ante sismos vibratorios la respuesta estructural varía dentro de un rango, cuyo valor máximo se obtiene con una degradación de rigidez severa y el valor mínimo cuando no se considera degradación de rigidez. Sin embargo, para sismos impulsivos, la respuesta es única, obteniéndose sin considerar la degradación de rigidez, ya que los pulsos del acelerograma se concentran en un corto intervalo de tiempo. La calibración de este parámetro depende de la rigidez de descarga del ciclo histérico, la cual es diferente en cada software utilizado, es por esto, que se tomó como patrón la descarga del programa IDARC-2D, y de este se obtuvo el parámetro de degradación de rigidez del resto de los programas. Además del parámetro de degradación de rigidez, el intervalo de integración Δt afecta en la respuesta estructural, en mayor medida para los sismos impulsivos, debido a la cantidad de pulsos en un corto intervalo de tiempo del acelerograma. Para este tipo de sismo el intervalo de integración debe ser pequeño para que las fuerzas correctivas que restituyen el desbalance de fuerzas originado por el cambio de rigidez dentro de un paso de integración pueden minimizar esta diferencia entre el esfuerzo real (considerando el cambio de pendiente de la curva histérica) y el esfuerzo calculado (considerando una rigidez constante en el intervalo).

Para los registros de terremotos vibratorios (Llolleo) se observa que las estructuras de periodos cortos ($T < 0.2$ (s)) sufren más daño, reflejado a través de grietas a lo largo de los elementos, y descascaramiento del hormigón, según la interpretación del índice de daño. En forma análoga, las estructuras más flexibles ($T > 0.2$ (s)) presentan más daño con los terremotos impulsivos, provocando rompimiento del hormigón y descubrimiento de armaduras. Para el terremoto de Llolleo, el cual lleva a incursionar a las estructuras en el rango no lineal, el porcentaje de peso que toma el corte basal en las estructuras más rígidas ($T < 0.2$ (s)) supera el 80%, valor que indica que la respuesta máxima de la estructura fue afectada por amplificación, ya que si el modelo se comporta como cuerpo rígido el porcentaje del peso debería ser de 65.3%. Sin embargo, para el terremoto de México, el cual no lleva a las estructuras a incursionar en el rango plástico, el porcentaje de peso que toma el corte basal en las estructuras más rígidas ($T < 0.2$ (s)) alcanza en promedio el 20% valor que supera el 14% del peso que se adopta como el corte basal máximo.

El valor máximo del desplazamiento entre pisos (drift) que adopta la norma chilena de diseño sísmico de edificios considerando una sollicitación sísmica reducida, 0.2%, responde de manera apropiada a la máxima respuesta que entregan los análisis realizados para los terremotos vibratorios, siempre que el drift admisible (0.2%) sea amplificado por R^* para estimar los valores del drift inelástico. Sin embargo, para los registros impulsivos uno de los modelos analizados supera el drift así calculado.

Finalmente debido a la complejidad de desarrollar este tipo de análisis y según la experiencia adquirida, se recomienda para futuras investigaciones el uso de los programas IDARC-2D y RUAUMOKO-2D. El programa NILDYN no es recomendable, ya que tiene límites de memoria en su archivo de entrada, no posee variadas opciones que representen el real comportamiento de la estructura y entrega un archivo de salida bastante acotado. DRAIN-2DX no es muy recomendable, ya que posee un complejo y estricto archivo de entrada y no permite regular el comportamiento de algunos elementos, pero su archivo de salida es bastante extenso y fácil de interpretar. IDARC-2D se caracteriza por un fácil y completo ingreso de datos, una amplia cantidad de opciones que permiten representar de manera más real el comportamiento de los elementos y la entrega de resultados es bastante amigable para estructuras de hasta

3 pisos, esto debido a límites de memoria. En cambio con RUAUMOKO-2D el ingreso de datos es muy simple, requiere de una serie de parámetros que no intervienen en el análisis, pero que son utilizados por el post-procesador DYNAPLOT, presenta una enorme variedad de opciones para representar el comportamiento de los elementos, y sus resultados son muy completos y fáciles de interpretar por el post-procesador, el cual entrega en forma gráfica los resultados de los distintos análisis realizados por RUAUMOKO-2D, lo que convierte en el programa más versátil y de mejor aplicación para cualquier tipo de estructura.

REFERENCIAS

- Berrios, M., 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, Universidad de La Serena, La Serena.*
- Carr, A.J. (2003). RUAUMOKO, The Maori God of Volcanoes and Earthquakes. Vol 1 y 2, *Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Canterbury.*
- Durán, M., Duhalde, M. y González, E. (1989). Optimización de marcos de hormigón con solicitación horizontal y requerimientos de ductilidad. *Anales V Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, ACHISINA, Santiago.*
- Giberson, M.F. (1969). Two Nonlinear Beams with Definitions of Ductility. *Journal of Structural Division, ASCE Vol 96, N° ST2.*
- Meskouris, K., Krätzig, W.B., Elenas, A., Heiny, L. and Meyer, I.F. (1988). Mikrocomputerunterstützte Erdbebenuntersuchung von Tragwerken, *SFD 151-Bericht. Nr 8, Ruhr Universität Bochum, Germany.*
- Newmark, N.M. (1959). Method of Computation for Structural Dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE Vol 85, N° EM3.*
- Prakash, V. (1992). Dynamic Response Analysis of Inelastic Building Structures: The DRAIN Series of Computer Programs. Ph. D. Thesis. *Report N° UCB/SEMM-92/98, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California.*
- Prakash, V., Powell, G.H, Campbell, S.D and Filippou, F.C. (1992). DRAIN-2DX: Preliminary Element User Guide. *Structural Engineering Mechanics and Materials, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California.*
- Reinhorn, A. and Valles, R.E. (2002). IDARC-2D Version 5.5: Inelastic Damage Analysis of Reinforce Concrete of Building Structures. User's Guide. *Department of Civil Engineering, University of New York at Buffalo, New York.*

Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica
IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción - Chile

Soto, J. (1998). Modelo Simplificado de Análisis Sísmico No Lineal de Estructuras de Hormigón Armado. *Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Serena, La Serena.*

Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielsen, N.N. (1970). Reinforced Concrete Responses to Simulated Earthquake. *Journal, ASCE, Vol 96, ST12.*