

RESPUESTA DINÁMICA DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO CON DISTINTOS NIVELES DE DAÑO

Pablo M. Barlek Mendoza^a y Enrique E. Galíndez^b

^a*Instituto de Estructuras “Ing. Arturo M. Guzmán”, Universidad Nacional de Tucumán,
Av. Independencia 1800, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina, pbarlek@gmail.com,
<http://www.facet.unt.edu.ar/iest>*

^b*Instituto de Estructuras “Ing. Arturo M. Guzmán”, Universidad Nacional de Tucumán,
Av. Independencia 1800, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina, egalindez@herrera.edu.ar,
<http://www.facet.unt.edu.ar/iest>*

Palabras Claves: Columnas de Hormigón Armado, Análisis Dinámico No Lineal, Nivel de Daño, Réplicas.

Resumen. En este trabajo se estudia el comportamiento dinámico de modelos numéricos de dos columnas de hormigón armado ensayadas en la bibliografía. Los modelos numéricos son de un grado de libertad, presentan diferentes grados de refinamiento (modelos trilineales y modelos de fibra) y fueron elaborados en el programa de análisis no lineal PERFORM-3D. Los análisis dinámicos se realizaron en dos etapas. En primer lugar, se aplica un registro de aceleración del terreno con un determinado factor de amplificación que corresponde al sismo principal y lleva a la columna a un nivel de daño definido. Luego, se retorna a un estado estático y en una segunda etapa se aplica el mismo registro pero con otro factor de amplificación para simular el efecto de una réplica sobre la columna dañada. Para este estudio se consideraron cuatro acelerogramas distintos. Finalmente, se analiza la relación entre los desplazamientos máximos de las columnas provocados por las réplicas con los diferentes niveles de daño y los factores de amplificación aplicados sobre los registros.

1 INTRODUCCIÓN

El análisis dinámico no lineal de estructuras no es una tarea simple, sino que requiere de un operador que posea conocimiento suficiente para saber que parámetros de entrada se necesitan en un programa de análisis, como así también poder interpretar y juzgar la validez de los resultados obtenidos. El presente trabajo versa sobre la respuesta sísmica ante réplicas de modelos numéricos de columnas de hormigón armado con diferentes niveles de daño. Dichos modelos numéricos, elaborados en el programa PERFORM-3D, fueron calibrados en base a ensayos pseudo-estáticos a carga cíclica disponibles en la bibliografía. Adicionalmente, se consideraron dos grados de refinamiento distintos para encarar el problema: por un lado, modelos trilineales y, por otro, modelos de fibras. Para evaluar dicha respuesta, se hizo uso de tres registros de aceleraciones de terreno obtenidos de sismos reales y un registro artificial compatible con el espectro especificado en la norma sismorresistente vigente en la República Argentina.

2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

Los ensayos que sirvieron de base a esta investigación tuvieron lugar en el laboratorio de la Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda. Se consideraron dos especímenes ensayados por diferentes autores: Unidad 1 de [Tanaka \(1990\)](#), y Unidad 8 de [Zahn \(1986\)](#). El primer espécimen, con bajo nivel de carga axial, mostró un comportamiento dúctil. Mientras que el segundo, con nivel de carga axial elevado, exhibió un comportamiento del tipo frágil. Ambos especímenes exhibieron falla por flexión. Tanto la configuración de los ensayos, las cargas axiales sobre los especímenes, como las propiedades geométricas y mecánicas de los mismos se encuentran sintetizadas en el trabajo de [Barlek Mendoza, Galíndez y Pavoni \(2014a\)](#).

El programa utilizado para realizar la aproximación numérica de los resultados de los ensayos fue PERFORM-3D. Para cada columna se hicieron dos modelos con distinto grado de refinamiento: un modelo trilineal y un modelo de fibras. A la izquierda de la [Figura 1](#) se observa un esquema de los prototipos ensayados, mientras que a la derecha se ve la configuración estructural utilizada en los modelos numéricos.

A continuación se hace una breve descripción de los principios utilizados para la definición de cada uno de los modelos numéricos. Para mayores precisiones sobre los datos ingresados en el programa para cada modelo puede consultarse el trabajo anteriormente citado de [Barlek Mendoza, Galíndez y Pavoni \(2014a\)](#).

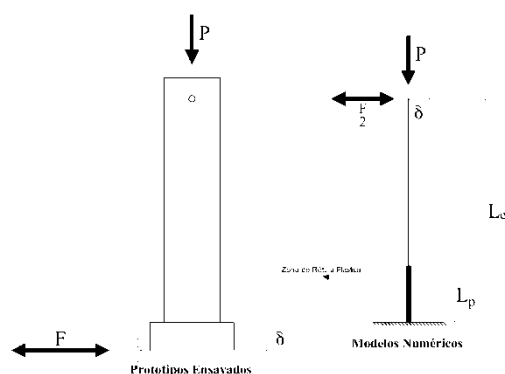


Figura 1: Prototipos Ensayados vs. Configuración en Modelos Numéricos.

2.1 Modelos Trilineales

En este tipo de modelos se considera que las relaciones esfuerzo - deformación (momento - curvatura y esfuerzo normal - deformación axial) de una rótula plástica varían de manera trilineal (ver Figura 2). Además, el programa utilizado permite tener en cuenta la pérdida de resistencia de esas relaciones una vez que se alcanza el valor del esfuerzo último.

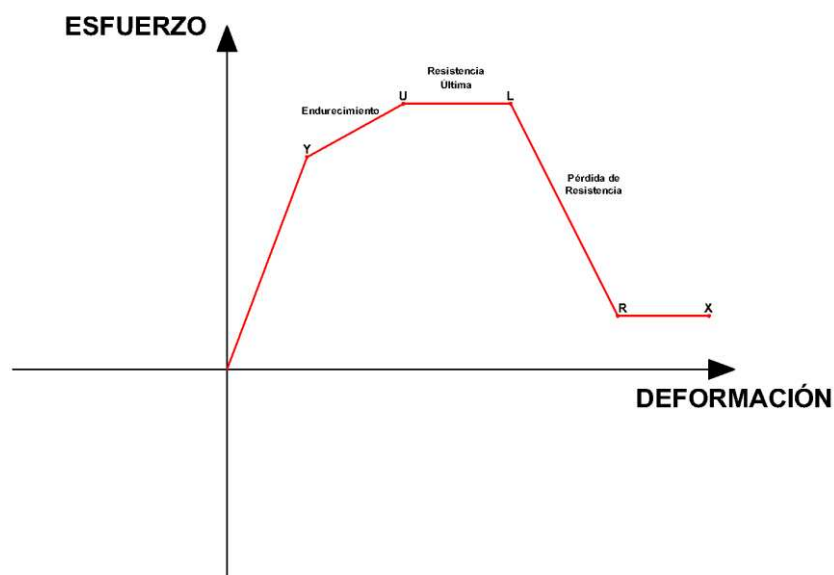


Figura 2: Curva Esqueleto Característica de Modelos Trilineales.

Para este tipo de modelo se define un componente de rótula plástica de curvatura para hormigón armado con interacción P-M-M al que se le asigna la longitud equivalente que le corresponda. Para este tipo de elementos PERFORM-3D hace uso de la teoría de la plasticidad, por lo que se debe definir una superficie de fluencia tipo P-M-M. La superficie utilizada por el programa está basada en la definida por [El-Tawil y Deierlein \(2001a, b\)](#) y presenta la ventaja de que requiere pocos parámetros para definir su forma. Dicha superficie de fluencia se aplica en el estado último. En la [Figura 3](#) puede apreciarse una superficie de fluencia de este tipo, nótese que la superficie M-M a la derecha es la que corresponde al valor de carga axial en el punto de balance del diagrama de interacción de la columna (PB).

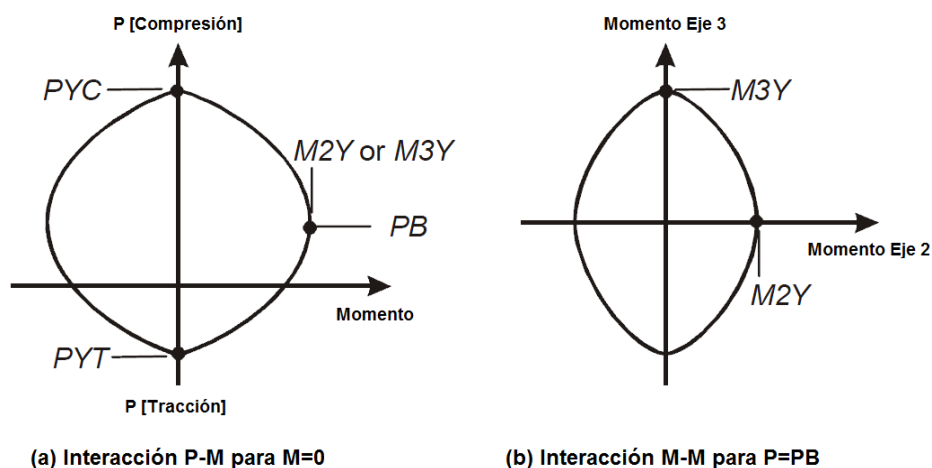


Figura 3: Superficie de Fluencia P-M-M para Rótula de Hormigón Armado.

2.2 Modelos de Fibra

Paralelamente, se elaboraron modelos de fibras para las dos columnas analizadas. Este tipo de modelo es aplicable a estructuras no lineales sometidas a flexión, como las que aquí se analizan. En este tipo de modelos la sección transversal se subdivide en un número discreto de fibras longitudinales de comportamiento uniaxial, por lo que las relaciones esfuerzo – deformación (momento - curvatura y esfuerzo normal - deformación axial) no se especifican explícitamente, sino que se obtienen de la integración de la respuesta de las fibras de acuerdo al material que se le asignó. Las características geométricas de cada fibra son: por un lado, las coordenadas locales según los ejes 2 y 3 de su baricentro y, por otro, su área denotada como $A_{i\text{fib}}$. En la Figura 4 se esquematizan estas características.

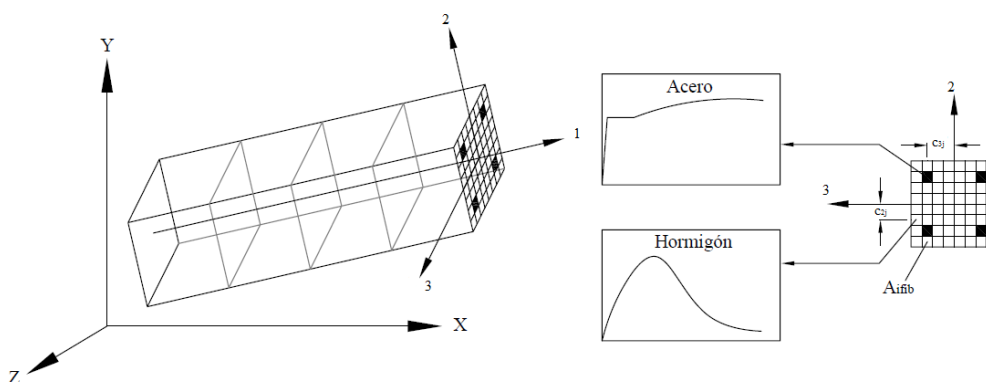


Figura 4: Principios Utilizados en Modelos de Fibras.

Para este tipo de modelo se asumen las hipótesis de que las fibras sufren pequeñas deformaciones y que las secciones planas permanecen planas para cualquier historia de cargas. Además, se supone que existe adherencia perfecta entre fibras, por lo que no se consideran fenómenos como el deslizamiento de la armadura longitudinal. En contraste, este tipo de modelos puede reproducir fenómenos como endurecimiento, ablandamiento y estricción de los ciclos de histéresis. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este tipo de modelo no considera la interacción entre flexión y corte.

Para las fibras de las secciones transversales se distinguieron tres tipos de materiales diferentes, a saber: hormigón no confinado de recubrimiento (gris claro), hormigón confinado del núcleo (gris oscuro) y acero longitudinal de refuerzo (azul). La Unidad 1 de Tanaka (1990) se subdividió en un total de 57 fibras, mientras que la Unidad 8 de Zahn (1986) en 48 fibras. En la Figura 5 se observa un esquema con la discretización realizada en cada sección.

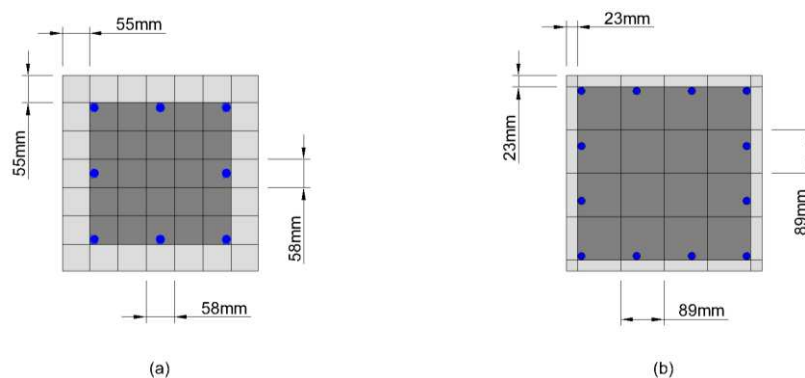


Figura 5: Discretización de Secciones Transversales (a) Unidad 1 Tanaka (1990); (b) Unidad 8 Zahn (1986).

2.3 Degradación Cíclica

Generalmente, los elementos estructurales sometidos a carga cíclica sufren degradación de rigidez y de resistencia. Este fenómeno suele ser progresivo, y la energía disipada en cada ciclo está relacionada con la degradación de rigidez.

Para modelar este efecto PERFORM-3D utiliza factores de degradación de energía que se aplican a los componentes inelásticos. Estos factores se pueden definir como el cociente entre el área de un lazo histerético degradado y el área de un lazo histerético sin degradación (Figura 6). Por lo tanto, un componente sin ningún tipo de degradación de rigidez tendrá un factor de degradación de energía igual a 1,00, y el mismo tenderá a hacerse más pequeño a medida que se incrementa la deformación máxima.

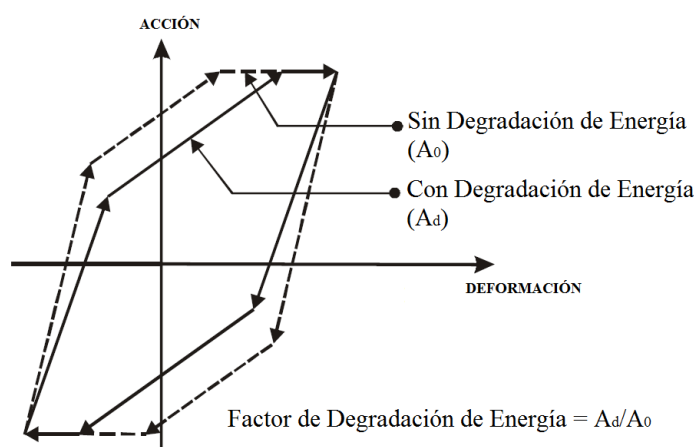


Figura 6: Degradación de Rigidez y Factor de Degradación de Energía.

En el caso de los modelos trilineales, se asignan factores de degradación de energía al componente de rótula plástica, mientras que para los modelos numéricos de fibras se asignan factores de degradación de energía a las relaciones tensión – deformación de cada uno de los materiales que componen la sección transversal del elemento.

3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ANÁLISIS DINÁMICOS NO LINEALES

En el presente apartado se discuten las principales propiedades de los análisis dinámicos no lineales realizados en este trabajo. Como se mencionó anteriormente, las columnas estudiadas fueron asimiladas como sistemas de un grado de libertad. El objetivo de esta serie de análisis fue evaluar la respuesta dinámica de las columnas con diferentes niveles sometidas a réplicas de sismos.

3.1 Acelerogramas Seleccionados

Para llevar a cabo este estudio se utilizaron un total de cuatro acelerogramas de diferentes características. El criterio adoptado en la elección de los mismos fue representar de manera apropiada las características de los sismos típicos de las zonas sísmicas 2 y 4 de la República Argentina (Componente Longitudinal de Acelerograma de El Cadillal y Componente Norte – Sur de Acelerograma de Caucete, respectivamente). Adicionalmente, se incluyó un acelerograma artificial compatible con el espectro propuesto por el reglamento [INPRES-CIRSOC 103 Parte I \(2013\)](#) para la zona sísmica 4 (Acelerograma Artificial Compatible con Espectro 1 – Zona 4). Por último, se consideró también un acelerograma internacional muy utilizado en la bibliografía disponible para poder ampliar la base de los resultados

(Componente Norte – Sur de Acelerograma de Kobe).

En la [Figura 7](#) se graficaron los cuatro registros de aceleración considerados en este trabajo. Asimismo, en la [Tabla 1](#) se resumen los principales parámetros que caracterizan a los acelerogramas. Vale la pena destacar la diferencia existente en la duración y aceleración pico del terreno (*PGA*) de los registros elegidos.

Por otro lado, en la [Figura 8](#) se puede apreciar como el espectro trilogarítmico del acelerograma artificial seleccionado se ajusta de manera aproximada con el establecido por la norma.

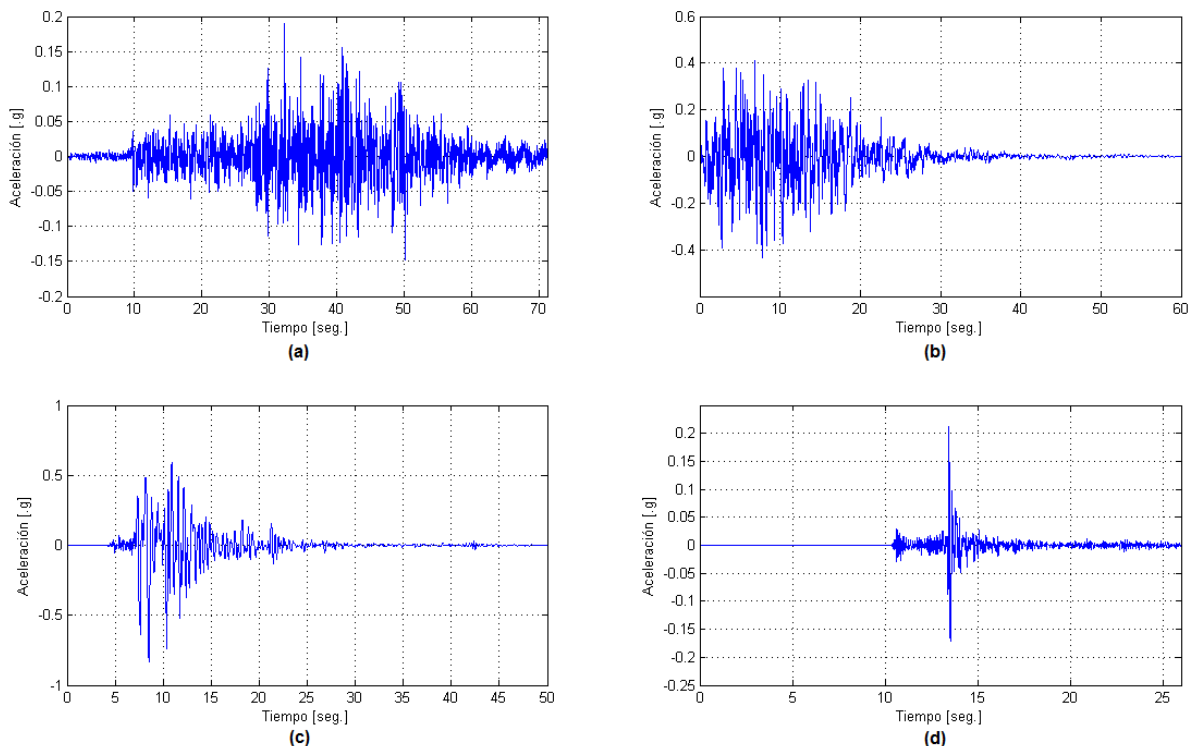


Figura 7: (a) Acelerograma de Cauçete (ACAU); (b) Acelerograma Artificial Compatible con Espectro 1 – Zona 4 (AACE1-Z4); (c) Acelerograma de Kobe (AKOB); (d) Acelerograma de El Cadillal (ACAD).

Registro	<i>PGA</i> [. <i>g</i>]	Duración Total [<i>seg</i>]	Intervalo de Muestreo Δt [<i>seg</i>]
Acel. de Cauçete (ACAU)	0,19	70,00	0,02
Acel. Artificial Compatible con Espectro 1 – Zona 4 (AACE1-Z4)	0,43	60,00	0,02
Acel. de Kobe (AKOB)	0,83	50,00	0,02
Acel. de El Cadillal (ACAD)	0,21	26,00	0,004

Tabla 1: Características Principales de los Acelerogramas Seleccionados.

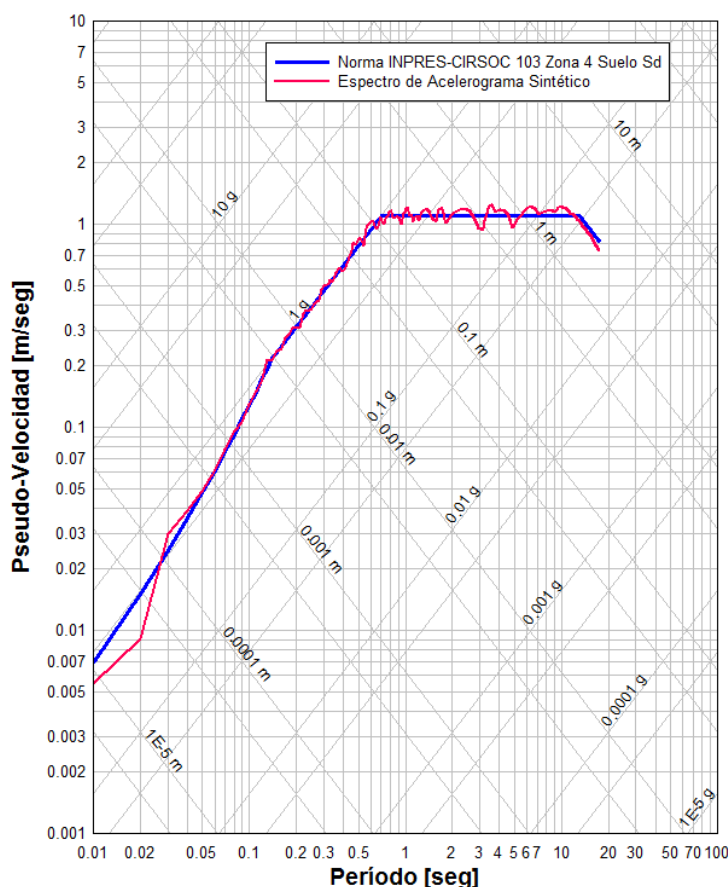


Figura 8: Espectros Elásticos Trilogarítmicos Norma INPRES-CIRSOC 103 Parte I (2013) vs. AACE1-Z4.

3.2 Método de Integración

Para la resolución de este tipo de problemas de un grado de libertad es necesario realizar la integración en el tiempo de la ecuación de equilibrio dinámico de un sistema sometido a una excitación en su base:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (1)$$

Donde:

m : Es la masa del sistema. En los casos estudiados está conformada tanto por el peso propio de las columnas, como por la carga axial aplicada por el actuador en el ensayo.

c : Es el coeficiente de amortiguamiento del sistema.

k : Es la rigidez de la columna, la cual va variando de acuerdo a los factores de degradación de energía.

x , \dot{x} y \ddot{x} : Son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración del sistema, respectivamente.

\ddot{x}_g : Es la excitación sísmica, que se asume como la aceleración del terreno actuante en la base de la estructura analizada.

Existen distintas familias de métodos para poder integrar la ecuación (1), PERFORM-3D hace uso del método de Newmark con coeficientes $\beta = 0,25$ y $\gamma = 0,50$, suponiendo de esta forma una aceleración promedio constante a lo largo del paso de integración en el tiempo Δt . Esta metodología implícita, también conocida como regla trapezoidal, es incondicionalmente estable (para el caso de una estructura sin amortiguamiento) y tiene un orden de convergencia 2. Además, puede recalarse que para sistemas de un grado de libertad este procedimiento presenta la ventaja de que no agrega amortiguamiento numérico artificial.

El paso de tiempo de integración Δt debe ser especificado por el usuario. Para ello, deben considerarse dos aspectos importantes:

1. Se debe capturar de la manera más precisa posible la respuesta del sistema. Para el caso de un sistema elástico de un grado de libertad, el método de la aceleración constante da resultados lo suficientemente aproximados si el paso de tiempo es menor que $1/12$ del período de la estructura. Para una estructura lineal de varios grados de libertad, se puede identificar el modo más alto que tiene una contribución importante en la respuesta y usar un paso de tiempo igual a $1/12$ del período de ese modo. Como en general el período de una estructura se incrementa luego de que esta entra en fluencia, si el paso de tiempo es seleccionado en base al criterio presentado para estructuras en estado elástico, usualmente será lo suficientemente pequeño como para calcular la respuesta inelástica.

2. Se debe capturar correctamente el movimiento del terreno. Por ejemplo, si un registro de un sismo posee valores de aceleración cada 0,02 segundos, no se debe usar un paso de tiempo Δt mayor que 0,02 segundos, aún para una estructura con un período muy elevado, de otra manera se tendría el riesgo de distorsionar el movimiento del terreno.

En los análisis dinámicos realizados en este trabajo prevaleció la segunda condición por sobre la primera. En la [Tabla 2](#) se adjuntan los pasos de integración en el tiempo para cada uno de los acelerogramas, puede apreciarse que en todos los casos coincidieron con el intervalo de muestreo de los registros.

Registro	Paso de Integración Δt [seg]
Acel. de Cauce (ACAU)	0,02
Acel. Artificial Compatible con Espectro 1 – Zona 4 (ACE1-Z4)	0,02
Acel. de Kobe (AKOB)	0,02
Acel. de El Cadillal (ACAD)	0,004

Tabla 2: Pasos de Integración adoptados para cada acelerograma considerado.

3.3 Amortiguamiento Viscoso

Una estructura esencialmente elástica disipa energía mediante distintos mecanismos. Esto es disipación de energía “elástica”, que se modela comúnmente utilizando amortiguamiento viscoso. Una suposición usual en el análisis tiempo-historia elástico lineal es de un amortiguamiento igual al 5% del amortiguamiento viscoso crítico en cada uno de los modos naturales de vibración. Como el mecanismo de amortiguamiento real es casi con certeza no viscoso, esto constituye una aproximación.

Una vez que la estructura plastifica, disipa energía adicional a través de su comportamiento inelástico. En un análisis dinámico no lineal esto es modelado directamente. Luego, la energía total disipada será la suma de la energía disipada en rango elástico y la disipada inelásticamente.

En los análisis dinámicos no lineales es una práctica usual asumir amortiguamiento viscoso para tener en cuenta la energía disipada en el rango elástico.

Para el caso de una estructura de un grado de libertad, el coeficiente de amortiguamiento viscoso puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$c = 2 m \xi \omega \quad (2)$$

Con:

m : Es la masa del sistema, al igual que en la ecuación (1).

ξ : Es la relación de amortiguamiento con respecto al amortiguamiento crítico (c_c).

ω : Es la frecuencia angular propia del sistema de un grado de libertad. $\omega = 2\pi/T$ [rad/seg].

La ecuación (2) deja en claro que si se fija una relación de amortiguamiento ξ , el coeficiente de amortiguamiento del sistema dependerá de la frecuencia angular ω y, consecuentemente, del período de la estructura T .

Para cada columna analizada, los períodos elásticos determinados con los modelos trilineales y con los modelos de fibras resultaron diferentes. En la Tabla 3 se exhiben los distintos valores de los períodos T en cada caso.

Columna	Modelo Trilineal	Modelo de Fibras
Unidad 1 – Tanaka (1990)	0,415	0,220
Unidad 8 – Zahn (1986)	0,577	0,482

Tabla 3: Períodos Elásticos T [seg.] calculados para los distintos Modelos Numéricos.

La diferencia en los períodos puede atribuirse a las distintas hipótesis realizadas con respecto a la rigidez inicial de las columnas, debidas fundamentalmente a la adopción de los factores para considerar la rigidez fisurada que multiplican a los momentos de inercia en los modelos trilineales, ver Barlek Mendoza, Galíndez y Pavoni (2014a).

Por lo tanto, para una misma relación de amortiguamiento ξ , la expresión (2) dará como resultado un valor del coeficiente de amortiguamiento para el modelo trilineal y otro diferente para el modelo de fibras.

Considerando que los dos modelos de una misma columna poseen igual masa m , y una rigidez efectiva que se asume similar para los ciclos de ductilidad media ($k_{trilineal} \sim k_{fibras}$), se pretende que para un determinado sismo la demanda de desplazamientos que se le impone al sistema sea similar, entendiéndose que al resolver la ecuación (1), los desplazamientos x demandados por el sismo al modelo trilineal no difieran mucho de los que se obtienen para el modelo de fibras. Ello lleva a buscar igualar en la medida de lo posible los coeficientes de amortiguamiento c . Esto último trae como consecuencia que se adopten distintos valores de la relación de amortiguamiento ξ para el modelo trilineal que para el modelo de fibras.

De esta manera, se decidió adoptar un valor fijo para la relación de amortiguamiento de los modelos de fibras (ξ_{fibras}) de 0,05 (5% con respecto a c_c) y calcular los valores correspondientes a los modelos trilineales ($\xi_{trilineal}$) igualando los coeficientes c dados por la ecuación (2):

$$\xi_{trilineal} \omega_{trilineal} = \xi_{fibras} \omega_{fibras} \quad (3)$$

De esta última expresión se puede determinar $\xi_{trilineal}$ en función de las frecuencias angulares propias de ambos modelos y de la relación de amortiguamiento obtenida para el modelo de fibras. Las relaciones de amortiguamiento finalmente adoptadas para los análisis dinámicos no lineales se pueden encontrar en la Tabla 4.

Columna	$\xi_{trilineal}$	ξ_{fibras}
Unidad 1 – Tanaka (1990)	0,0943	0,0500
Unidad 8 – Zahn (1986)	0,0599	0,0500

Tabla 4: Relaciones de Amortiguamiento adoptadas para los Distintos Modelos.

4 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS

En este trabajo se hace un estudio con el objetivo de determinar la respuesta sísmica de modelos numéricos de las dos columnas mencionadas previamente partiendo de diferentes niveles de daño.

4.1 Niveles de Daño de los Elementos

Los niveles de daños utilizados en este trabajo se corresponden con los definidos por la [Asociación Japonesa de Prevención de Desastres en Edificios \(2001\)](#), JBDPA por sus siglas en inglés. Dichos niveles se enumeran desde el 0 al V, en orden de daño creciente. Es decir que el nivel de daño 0 corresponde a un elemento estructural sin daño, mientras que el nivel de daño V es asignado a un miembro con colapso inminente. El parámetro seleccionado en este código para establecer el nivel de daño es el máximo ancho residual de fisura en el elemento ($\max W_0$). Un trabajo previo de [Barlek Mendoza, Galíndez y Pavoni \(2014b\)](#) relacionó los anchos residuales de fisura con desplazamientos máximos para cada uno de los modelos numéricos de las columnas. Estos resultados fueron usados en este estudio para determinar el nivel de daño en cada uno de los modelos numéricos.

En la [Tabla 5](#) se exhiben tanto los máximos anchos residuales de fisura como los desplazamientos máximos correspondientes a cada nivel de daño de los modelos numéricos elaborados. Se debe hacer notar que la Unidad 8 de [Zahn \(1986\)](#) no exhibió un comportamiento que se corresponda con el nivel de daño IV, sino que pasó directamente del nivel III al colapso ya que los anchos de fisuras determinados no fueron mayores que 2,00mm en la etapa previa al colapso. Debe recordarse que este fue sometido a un alto nivel de carga axial, por lo que presentó un comportamiento frágil.

Nivel de Daño	$\max W_0$ [mm]	Desplazamientos Máximos δ_{max} [mm]			
		Unidad 1 - Tanaka (1990)		Unidad 8 - Zahn (1986)	
		Trilineal	Fibras	Trilineal	Fibras
I	$\max W_0 < 0,20$	12,30	14,29	12,76	17,76
II	$0,20 \leq \max W_0 \leq 1,00$	26,73	26,42	27,23	42,81
III	$1,00 \leq \max W_0 \leq 2,00$	50,84	43,25	51,62	49,49
IV	$\max W_0 > 2,00$	119,18	120,35	-	-

Tabla 5: Desplazamientos Máximos Correspondientes a los Diferentes Niveles de Daño para cada uno de los Modelos Numéricos.

4.2 Procedimiento

El procedimiento adoptado consiste en encontrar mediante análisis dinámicos no lineales la relación entre el factor de amplificación aplicado a un acelerograma de entrada y la máxima demanda de desplazamiento sobre los modelos numéricos. En primer lugar, se somete a los modelos numéricos a un determinado movimiento del terreno (sismo principal) caracterizado por un registro de aceleraciones y un factor de amplificación aplicado sobre el mismo. De esta forma, se busca alcanzar un nivel de daño preestablecido en el elemento sometiéndolo a una acción que genere el desplazamiento máximo asociado a dicho nivel de daño. Posteriormente, se retorna el modelo numérico dañado a un estado estático, quedando el mismo con una deformación o desplazamiento residual, y se le aplica el mismo registro de aceleraciones del terreno pero con un factor de amplificación diferente (equivalente a una réplica del sismo principal) y se evalúa el desplazamiento pico del mismo.

Esta metodología se ejemplifica mediante los resultados que se grafican en la [Figura 9](#), que

corresponden al modelo de fibras de la Unidad 1 de Tanaka (1990) usando el Acelerograma de Kobe (AKOB). En la misma puede observarse que el sismo principal es aplicado con un factor de amplificación (FA) de 0,396 sobre el modelo, provocando un desplazamiento máximo de 43,25mm que se corresponde con el nivel de daño III del elemento. Adicionalmente, también se puede destacar un desplazamiento remanente en el modelo de aproximadamente 10mm luego del evento. En el instante de tiempo que finaliza la curva verde, se retorna la columna a un estado estático. Posteriormente, se aplica sobre el modelo dañado el mismo registro de movimiento de terreno pero con diferente factor de amplificación ($FA = 0,641$), el mismo representa una réplica del sismo principal. La respuesta dinámica para este caso se encuentra representada por la curva negra con línea punteada. De la figura puede advertirse que para la réplica se alcanzó un desplazamiento máximo de 120,35mm, que se corresponde con el nivel de daño V, es decir con el colapso del elemento estructural. Por lo tanto, para este ejemplo se tiene que el sismo principal llevó a la columna a un nivel de daño III, mientras que la réplica del mismo provocó el colapso del elemento analizado.

La principal hipótesis realizada en esta metodología es que tanto el sismo principal como la réplica se encuentran representados por un único acelerograma, la diferencia entre ambos radica en el factor de amplificación que se le aplica. En otras palabras, no se contempla la posibilidad de que el sismo principal presente una variación distinta en el tiempo a la que tiene la réplica.

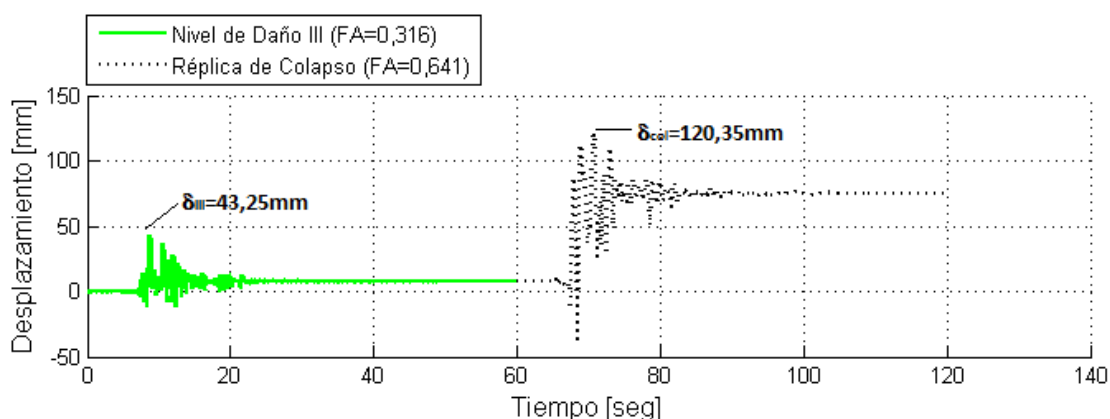


Figura 9: Modelo de Fibras Unidad 1 Tanaka (1990) [ref] sometido a AKOB con diferentes FA para sismo principal y réplica.

Los resultados obtenidos de los análisis realizados para el modelo de fibras de la Unidad 1 de Tanaka (1990) sometido a AKOB se sintetizan en el gráfico de la Figura 10. En la misma se observan cinco curvas que relacionan el factor de amplificación aplicado al registro con el desplazamiento máximo del modelo. La curva que corresponde al nivel de daño 0 (sin daño) se obtiene partiendo de un estado en el que modelo no presenta daño, y se van aumentando los factores de amplificación hasta alcanzar el colapso del elemento, nótese que para este caso no se trabajó con réplicas del sismo principal. En cambio, para el resto de las curvas, el elemento fue sometido a un sismo principal que lo llevó al nivel de daño con el que parte y posteriormente fue sometido a una réplica con un determinado factor de amplificación que le provoca un desplazamiento máximo. Estos dos últimos valores fueron los que se utilizaron para graficar las curvas.

En general, como es de esperarse, los modelos que parten de un nivel de daño distinto de 0 requieren factores de amplificación menores para alcanzar un desplazamiento máximo determinado. Este fenómeno se acentúa a medida que el nivel de daño del elemento se

incrementa, ver curva cyan correspondiente al nivel de daño IV de la [Figura 10](#).

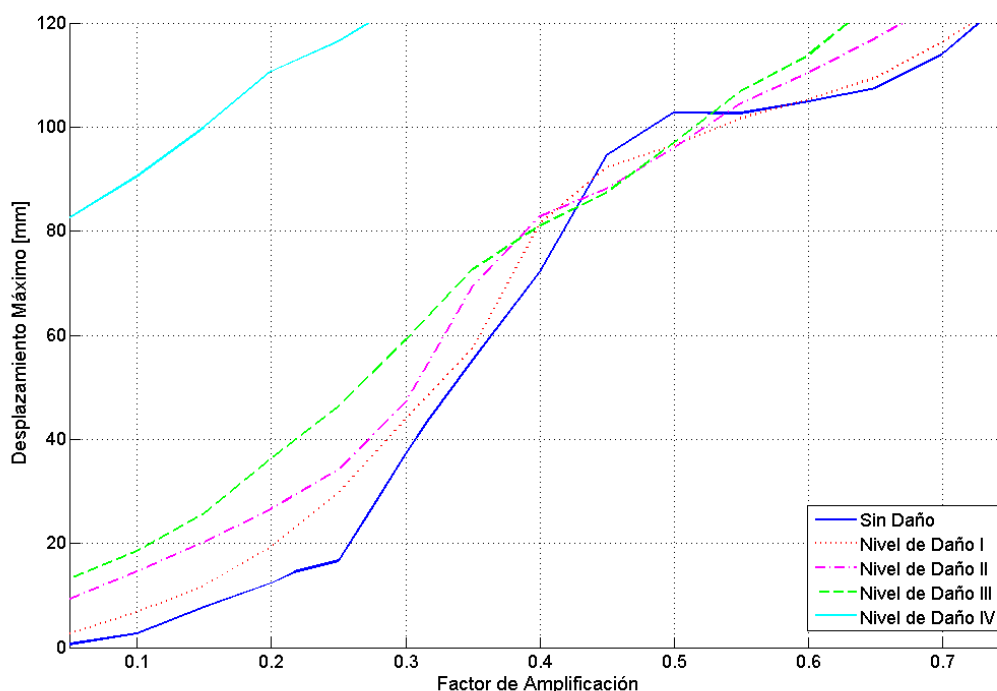


Figura 10: Factor de Amplificación vs. Desplazamientos Máximos para Modelo de Fibras Unidad 1 [Tanaka \(1990\)](#), registro AKOB.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se discuten los resultados más relevantes de los análisis realizados. Se presta especial atención a las curvas que relacionan los desplazamientos máximos con los factores de amplificación aplicados a los registros para los distintos niveles de daño. Estos resultados fueron utilizados por los mismos autores en otro trabajo para calcular la capacidad sísmica residual dinámica de las columnas analizadas.

5.1 Unidad 1 Tanaka (1990) Modelo Trilineal

En la [Figura 11](#) se muestra, a modo de ejemplo, la respuesta dinámica en términos de desplazamientos y fuerzas del modelo trilineal de la Unidad 1 de [Tanaka \(1990\)](#) sometido al registro ACAU. En este caso puede observarse que el sismo principal ($FA = 1,375$) lleva a la columna a un nivel de daño II, mientras que la réplica ($FA = 2,790$) produce el colapso de la misma. En el gráfico también puede observarse el comportamiento histerético del modelo trilineal, diferenciándose el sismo principal de la réplica.

Asimismo, en la [Figura 12](#) se resumen los resultados obtenidos para este modelo considerando los cuatro registros descriptos anteriormente. Estos resultados se muestran en términos de desplazamientos máximos y factores de amplificación aplicados a los acelerogramas para cada nivel de daño. Se aclara que para graficar las curvas correspondientes a los niveles de daño distintos de 0 (o sea, todas las curvas excepto la que corresponde al elemento en su estado original sin daño), se consideran los desplazamientos máximos y los factores de amplificación de las réplicas.

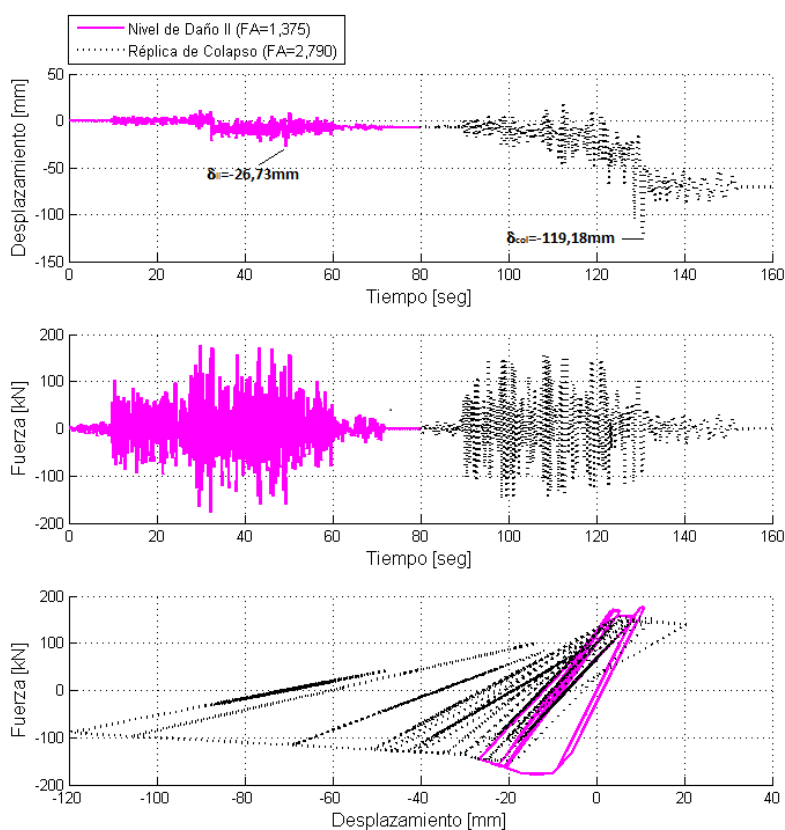


Figura 11: Modelo Trilineal Unidad 1 – Tanaka (1990) sometido a ACAU. Sismo Principal $FA = 1,375$ (Nivel de Daño II) y Réplica $FA = 2,790$ (Nivel de Daño V – Colapso).

Los resultados obtenidos para esta serie de análisis fueron, en general, razonables. De la Figura 12 se evidencia que a medida que el nivel de daño de la columna va aumentando, los factores de amplificación requeridos para lograr un determinado desplazamiento máximo se van haciendo más pequeños. Sin embargo, existen algunas excepciones al fenómeno recién enunciado. En primer lugar, puede destacarse que para ACAU los factores de amplificación cercanos al desplazamiento de colapso del modelo son superiores para los niveles de daño II y III (FA de 2,790 y 2,860, respectivamente) que para la curva sin daño ($FA = 2,785$) y la correspondiente a daño tipo I ($FA = 2,778$). Por otra parte, también debe destacarse que en el caso del registro ACAD, para obtener iguales desplazamientos máximos se requirieron factores de amplificación más elevados en el nivel de daño IV que en el III, como se observa en la Figura 12(d).

Puede observarse una gran dispersión en los factores de amplificación globales aplicados a los diferentes registros. Esto puede atribuirse a las distintas características de los acelerogramas seleccionados para este estudio. En este sentido, se recalca que para ACAU, se necesitaron FA del orden de 3,000 para llevar al colapso al espécimen en los niveles de daño bajos. Para AACE1-Z4, los factores de amplificación máximos se acercaron a 0,800. De forma similar, los mayores FA requeridos en el caso de AKOB estuvieron apenas por encima de 0,600. En cambio, para ACAD se obtuvieron factores de amplificación considerablemente más grandes, alcanzándose un valor máximo de 34,000 necesario para alcanzar el colapso del modelo numérico trilineal partiéndose de un estado sin daño.

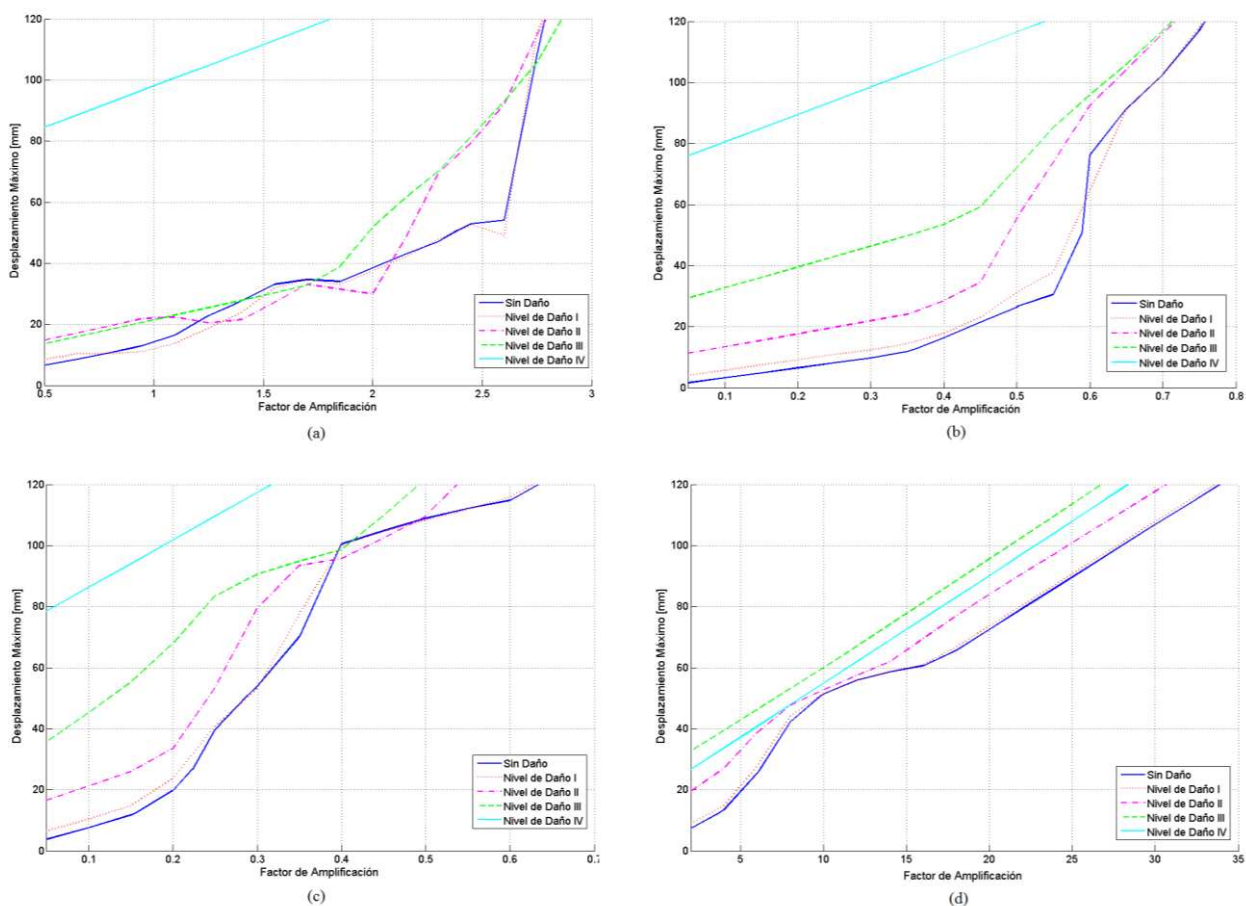


Figura 12: Factor de Amplificación Aplicado sobre el Registro vs. Desplazamiento Máximo. Modelo Trilineal Unidad 1 – Tanaka (1990) (a) ACAU; (b) ACE1-Z4; (c) ACOB; (d) ACAD.

5.2 Unidad 1 Tanaka (1990) Modelo de Fibras

Para ilustrar la serie de análisis realizada sobre el modelo de fibras de la Unidad 1 Tanaka (1990) se incluyen los gráficos de la Figura 13. En la misma puede apreciarse la respuesta dinámica del modelo numérico sometido al acelerograma artificial ACE1-Z4. Dicha respuesta se expresa en términos de las relaciones desplazamiento - tiempo, fuerza - tiempo y, finalmente, fuerza - desplazamiento. En esta última relación se manifiesta el comportamiento histerético del modelo de fibras conforme a los parámetros ingresados para el mismo.

De la figura puede destacarse que el sismo principal, el registro ACE1-Z4 multiplicado por un factor de amplificación igual a 0,452, provoca un desplazamiento máximo de 14,29mm apenas después de los 10 segundos de iniciado el movimiento. Este desplazamiento conduce a la columna a un nivel de daño I. Posteriormente, se determina el comportamiento del modelo dañado sometido ante la réplica, que en este caso fue el mismo registro pero con $FA = 1,063$. Puede observarse que la misma provoca un desplazamiento pico de 120,35mm, llevando la columna al nivel de daño V, o sea al colapso.

Los resultados obtenidos para la totalidad de los casos estudiados se resumen en los cuatro gráficos de la Figura 14. En ella se muestran las relaciones entre los factores de amplificación y los desplazamientos máximos para los distintos niveles de daños considerados.

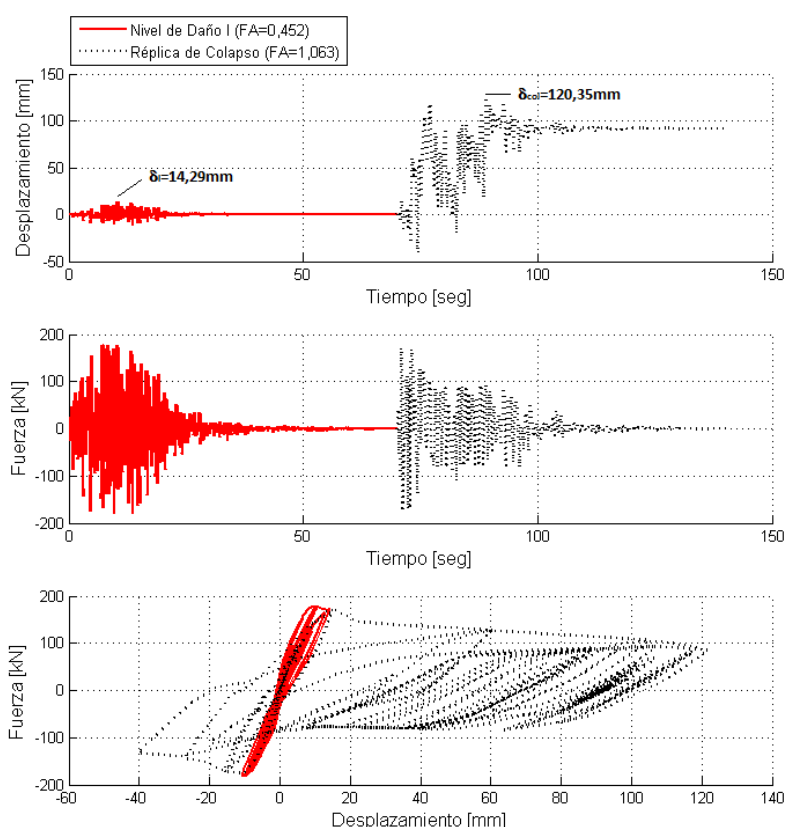


Figura 13: Modelo de Fibras Unidad 1 – Tanaka (1990) sometido a ACE1-Z4. Sismo Principal $FA = 0,452$ (Nivel de Daño I) y Réplica $FA = 1,063$ (Nivel de Daño V – Colapso).

Como es de esperarse, en la mayoría de los casos se verificó que para alcanzar un determinado desplazamiento máximo, los factores de amplificación requeridos se hicieron más pequeños a medida que el nivel de daño del elemento se va incrementando. No obstante, al igual que en el modelo trilineal, se detectaron algunas excepciones a esta tendencia. En el caso del registro ACAU, se observa que en el intervalo comprendido entre los 22,00mm y 57,00mm de desplazamiento máximo las curvas correspondientes a los niveles de daño I y II presentan valores superiores del factor de amplificación con respecto a la curva obtenida partiendo del modelo sin daño. Algo similar ocurre para ACE1-Z4, donde se detectó que los factores de amplificación requeridos para la curva con nivel de daño I fueron superiores que los de la curva sin daño entre los 86,00 y 110,00mm. Este fenómeno se manifiesta también para AKOB, donde las curvas con niveles de daño I, II y III exhiben mayores factores de amplificación que la correspondiente al modelo sin daño inicial en el intervalo entre 85,00 y 102,00mm. Por último, puede apreciarse que en el caso del registro ACAD se produce la discrepancia más notoria, ya que los resultados obtenidos muestran que los factores de amplificación requeridos por el nivel de daño I fueron superiores a los del modelo sin daño para gran parte del rango de desplazamientos máximos considerado.

Con respecto al orden de magnitud de los factores de amplificación aplicados sobre los registros, se puede recalcar que, en general, los valores evaluados resultaron similares a los que se mencionaron anteriormente para el modelo trilineal de la misma columna, siendo sensiblemente superiores en este caso. Nuevamente, se reconoce una gran variación entre los factores de amplificación aplicados a los distintos acelerogramas propuestos. En el caso de ACAU, se requirieron FA cercanos a 4,000 para que las réplicas logran el colapso de la columna partiendo de los niveles de daño I, II y III. Para el registro ACE1-Z4, los factores

de amplificación oscilaron entre 0,000 y un valor sensiblemente inferior a 1,100. Como se aprecia en la Figura 14(c), para AKOB se utilizaron FA que se encontraron entre 0,000 y 0,740, los más bajos de entre los cuatro registros seleccionados. En contraste, los factores de amplificación más elevados fueron utilizados para ACAD, donde se requirió un valor máximo de 33,450 para llevar a nivel de daño V al modelo partiendo con un nivel de daño I.

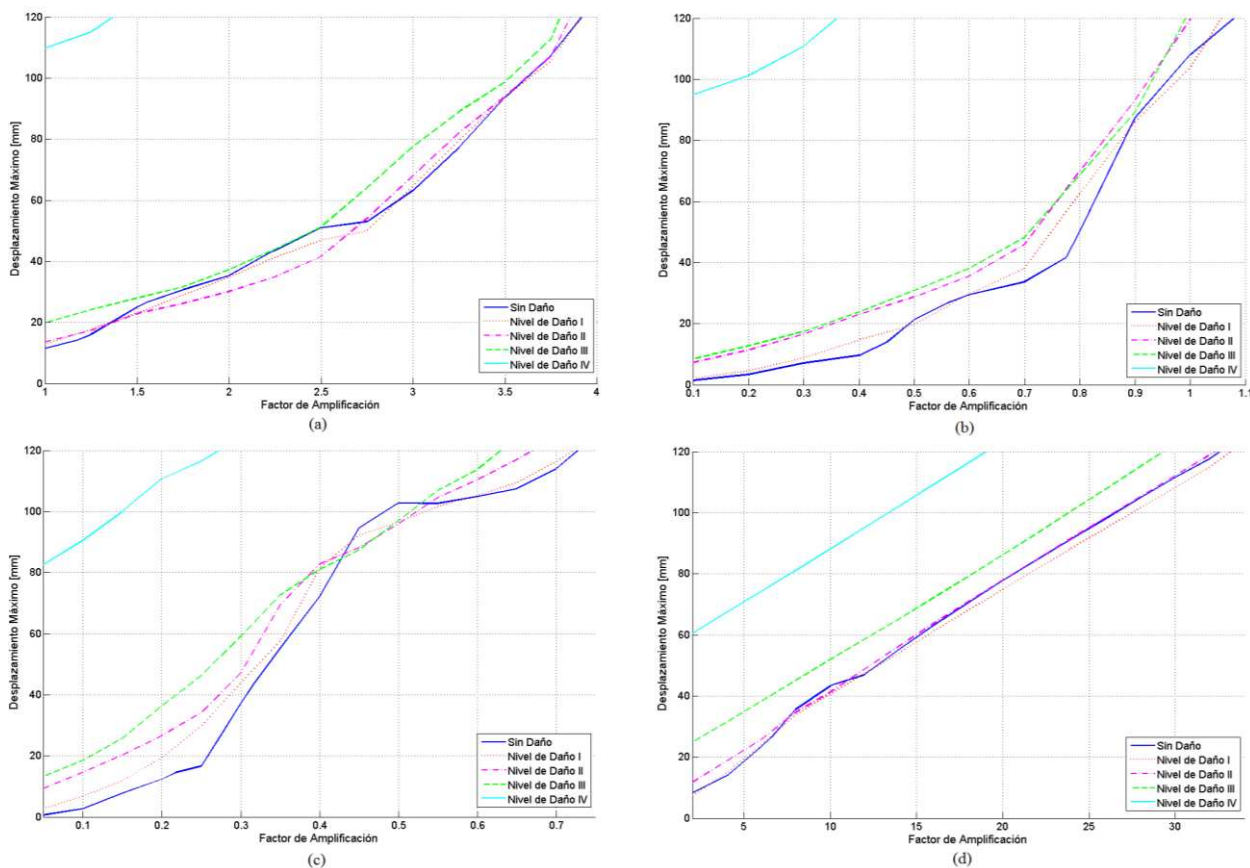


Figura 14: Factor de Amplificación Aplicado sobre el Registro vs. Desplazamiento Máximo. Modelo de Fibras Unidad 1 – Tanaka (1990) (a) ACAU; (b) AACE1-Z4; (c) AKOB; (d) ACAD.

5.3 Unidad 8 Zahn (1986) Modelo Trilineal

El modelo trilineal de la Unidad 8 Zahn (1986) fue sometido a una serie de análisis dinámicos no lineales de acuerdo a la metodología antes descrita. En la Figura 15 se puede apreciar la respuesta dinámica de este modelo en uno de los casos estudiados. Los diagramas mostrados en la figura corresponden al registro AKOB, donde se observa que el sismo principal, con un $FA = 0,156$, ocasiona un desplazamiento máximo en la columna de 27,23mm alrededor de los 8,60 segundos. De esta forma, se verifica que el sismo principal lleva al elemento al nivel de daño II. Una vez finalizado el sismo principal, se retorna a un estado estático con un desplazamiento residual cercano a 1,00mm. A continuación se aplica una réplica, que consiste en el mismo registro AKOB multiplicado por un factor de amplificación de 0,185. Esta acción produce un desplazamiento máximo de 51,62mm a los 8,80 segundos de iniciada la réplica, provocando el colapso del elemento analizado.

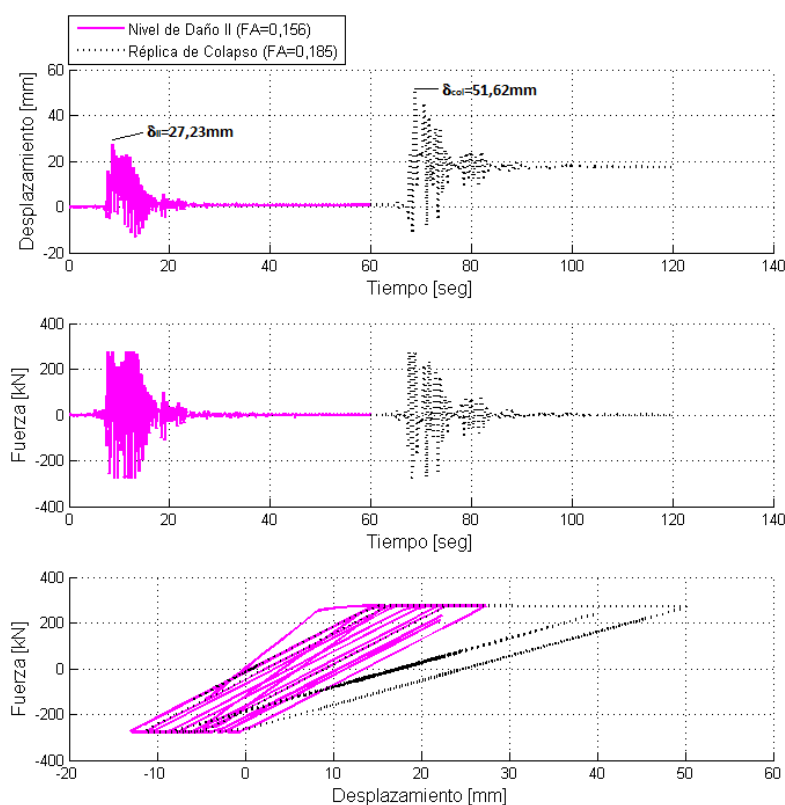


Figura 15: Modelo Trilineal Unidad 8 – Zahn (1986) sometido a AKOB. Sismo Principal $FA = 0,156$ (Nivel de Daño I) y Réplica $FA = 0,185$ (Nivel de Daño V – Colapso).

La totalidad de los resultados obtenidos para este modelo se sintetiza en los gráficos que se muestran en la Figura 16. Allí se aprecian las relaciones entre los factores de amplificación aplicados a los diferentes registros y los desplazamientos máximos que se producen en el modelo.

En los resultados obtenidos con este modelo se puede apreciar con mayor claridad la tendencia de que a medida que se incrementan los niveles de daño, los factores de amplificación necesarios para alcanzar determinado valor de desplazamiento máximo decrecen. Esto se verifica para todos los registros, con la única excepción de que para ACAD se observa que en el intervalo comprendido entre los 18,00 y 27,50mm los factores de amplificación correspondientes al nivel de daño III son superiores a los correspondientes al tipo de daño II.

Se hace notar que los factores de amplificación aplicados a este modelo fueron inferiores a los que se exhibieron para los dos casos previos. Esto se debe a que se trata de una columna con un elevado nivel de carga axial y, por lo tanto, una ductilidad menor que la de Tanaka. La magnitud de los factores de amplificación utilizados continuó mostrando gran variabilidad dependiendo en cada caso del registro utilizado. De esta manera, se tuvo que para ACAU los factores de amplificación usados sobre el acelerograma estuvieron comprendidos entre 0,000 y un valor cercano a 1,500. Para AACE1-Z4 se utilizaron factores de amplificación menores, requiriendo un FA de 0,380 para llevar el modelo a colapso partiendo de un estado sin daño. En el caso de AKOB se requirieron los factores de amplificación más pequeños para este modelo, utilizándose valores que se encontraron entre 0,000 y 0,190. Contrariamente, para ACAD se necesitaron los factores de amplificación más elevados, alcanzándose un valor pico de 13,350.

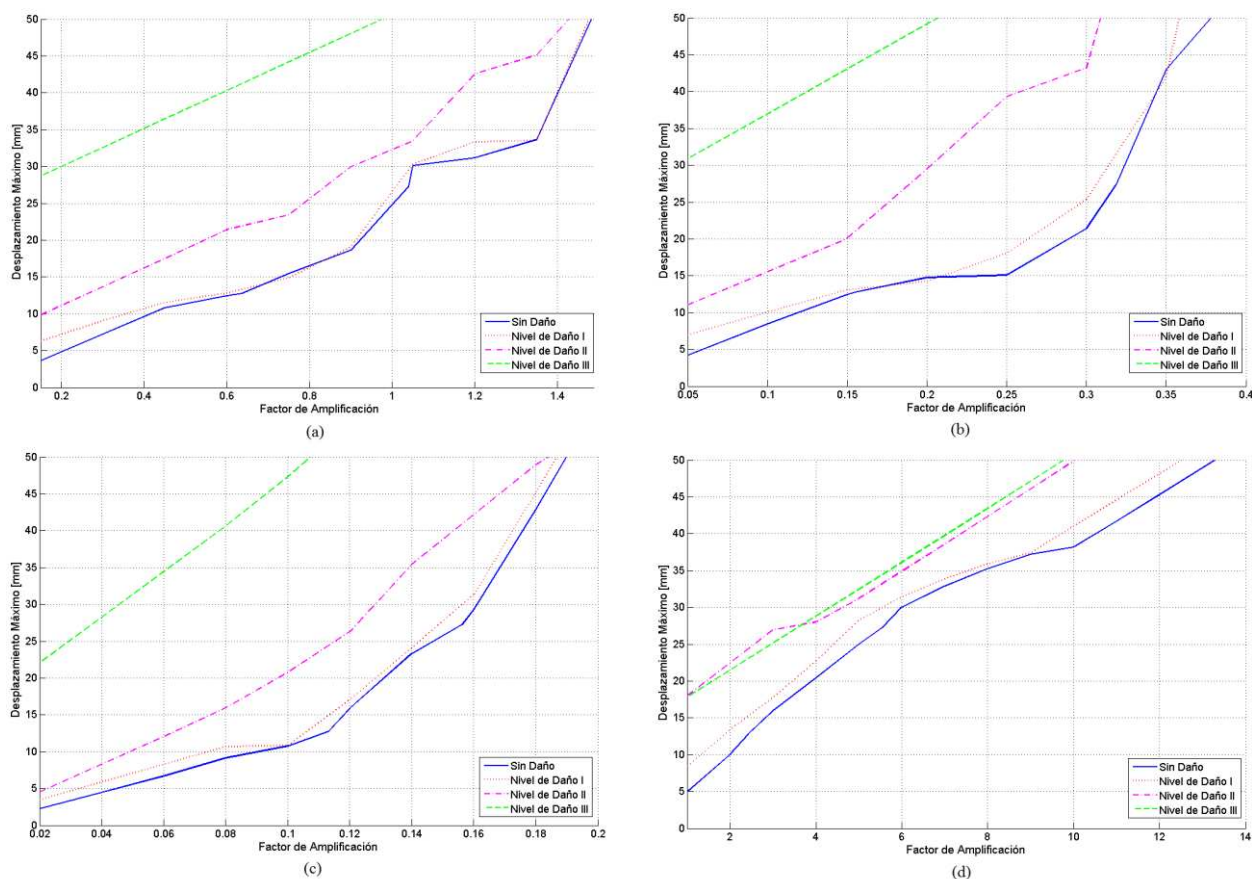


Figura 16: Factor de Amplificación Aplicado sobre el Registro vs. Desplazamiento Máximo. Modelo Trilineal Unidad 8 – Zahn (1986) (a) ACAU; (b) AACE1-Z4; (c) AKOB; (d) ACAD.

5.4 Unidad 8 Zahn (1986) Modelo de Fibras

Para ejemplificar las curvas de respuesta dinámica obtenidas para el modelo de fibras de la Unidad 8 Zahn (1986) se adjunta la Figura 17. En la misma puede observarse la respuesta en términos de desplazamientos, fuerzas y tiempo de este modelo sometido al registro ACAD. En este caso, se aprecia que el sismo principal, representado por el registro afectado por un FA de 3,750, demanda un desplazamiento máximo de 17,76mm sobre la columna. Este valor pico se corresponde con un nivel de daño I y se produce aproximadamente a los 14 segundos de iniciado el movimiento. Una vez que el sismo principal ha finalizado, el elemento retorna a un estado estático quedando un desplazamiento residual cercano a los 2,00mm. Posteriormente, se somete el modelo dañado a una réplica dada por el registro original multiplicado por un factor de amplificación de 12,700. Como consecuencia de este movimiento, el modelo alcanza el desplazamiento de colapso (49,49mm) a los 13,55 segundos de iniciada la réplica. Por lo tanto, en este ejemplo se tiene que luego del sismo principal el modelo sufre un daño que puede enmarcarse dentro del nivel I, mientras que la réplica lleva al mismo al colapso.

En la Figura 18 se resumen los resultados encontrados luego de la serie de análisis realizada sobre este modelo. Dichos resultados se muestran en términos de la relación entre los factores de amplificación y los desplazamientos máximos. Cada gráfico corresponde a uno de los registros seleccionados y, a su vez, cada curva se corresponde con un nivel de daño determinado. Se recuerda que para la Unidad 8 Zahn (1986) no se evidenció un intervalo de desplazamientos máximos que se corresponda con el nivel de daño IV, sino que la columna

pasó del nivel III al colapso debido a su comportamiento frágil.

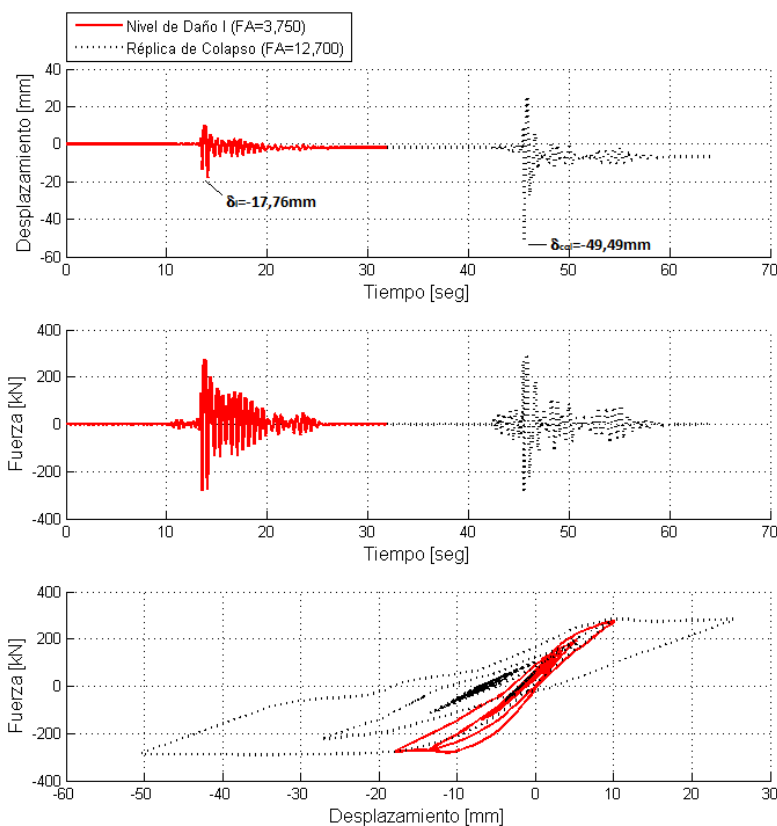


Figura 17: Modelo de Fibras Unidad 8 – Zahn (1986) sometido a ACAD. Sismo Principal $FA = 3,750$ (Nivel de Daño I) y Réplica $FA = 12,700$ (Nivel de Daño V – Colapso).

Al observar los gráficos de la Figura 18, puede concluirse que para este modelo también se verifica el fenómeno de que a medida de que el nivel de daño se incrementa para alcanzar un determinado umbral de desplazamientos máximos se requieren, en general, menores factores de amplificación sobre los registros. Al igual que con los modelos tratados en los apartados previos, en este caso también existen excepciones a esta tendencia. En el caso de ACAU pueden distinguirse dos intervalos en los que la curva correspondiente al nivel de daño I requiere factores de amplificación superiores a los de la curva para el modelo sin daño, aunque se debe recalcar que son intervalos pequeños y la diferencia entre los FA no resulta relevante. Para el registro ACE1-Z4 pasa algo similar, pero en este caso se observa que el intervalo en que los factores de amplificación de la curva de tipo de daño I superan a los de la sin daño es algo mayor, extendiéndose aproximadamente desde los 15,00mm hasta los 45,00mm. En ACAD también se aprecia un pequeño intervalo con estas características, el mismo se prolonga desde los 15,00mm hasta los 20,00mm. Contrariamente, en el caso de AKOB no se detecta excepción a la tendencia antes marcada.

Por otra parte, se puede recalcar que los FA utilizados para este modelo resultan comparables a los que se usaron para el modelo trilineal de la misma columna, siendo sensiblemente mayores en este caso. De manera similar a lo que ocurrió con el resto de los modelos, en este caso también se observa una gran variabilidad en los factores de amplificación de acuerdo con el registro estudiado. Para ACAU los FA variaron entre 0,000 y 1,850, consiguiendo con este último valor que el modelo en su estado original sin daño alcance el colapso. En el caso de ACE1-Z4, los factores de amplificación oscilaron entre

0,000 y 0,470. Mientras que para el registro AKOB se utilizaron los *FA* más pequeños de la serie, alcanzando un valor máximo de 0,174. En cambio, tal como se mencionó en los apartados anteriores, ACAD requirió los factores de amplificación más elevados, llegando a un máximo de 13,350 en el caso de querer llevar al colapso el modelo partiendo de un estado sin daño. Nótese como este último valor coincide con el factor de amplificación más elevado especificado para el modelo trilineal.

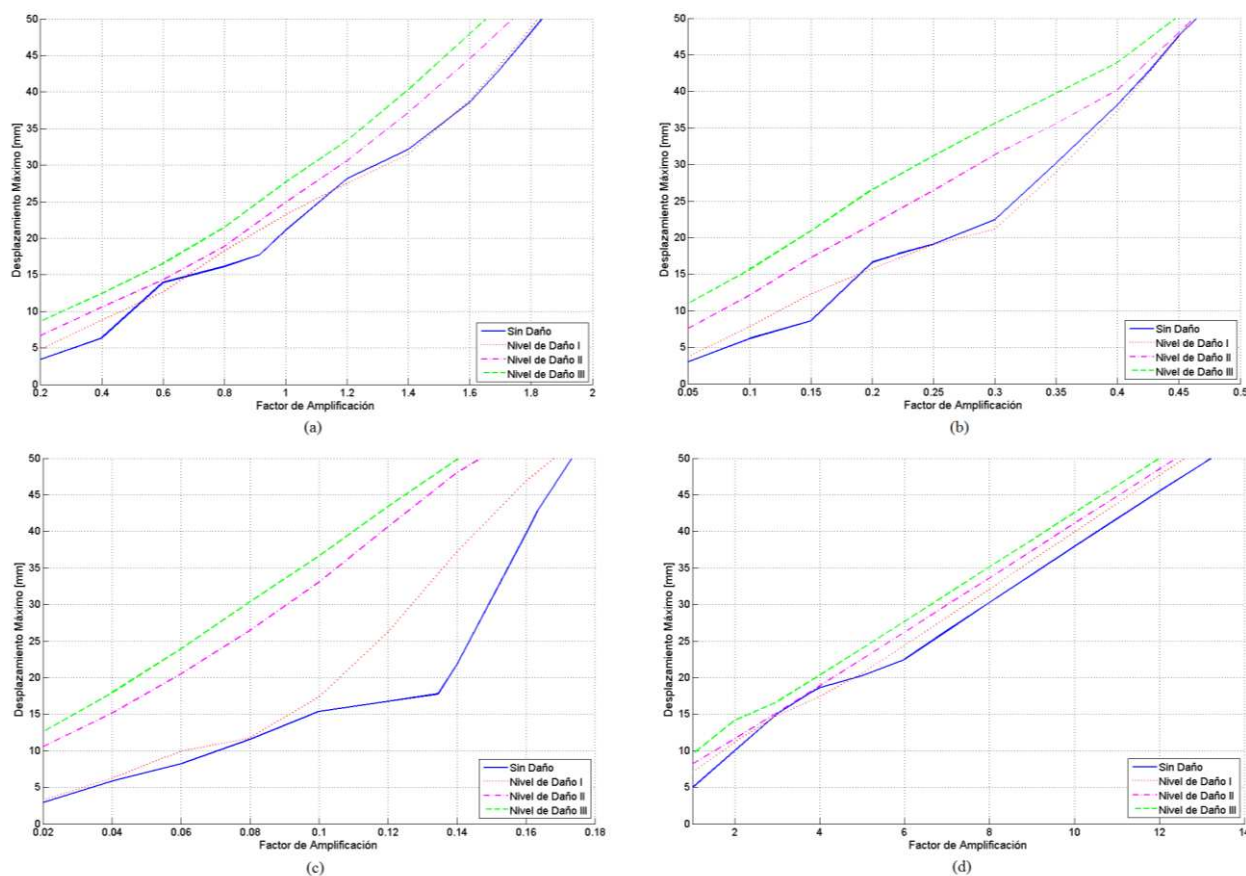


Figura 18: Factor de Amplificación Aplicado sobre el Registro vs. Desplazamiento Máximo. Modelo de Fibras Unidad 8 – Zahn (1986) (a) ACAU; (b) AACE1-Z4; (c) AKOB; (d) ACAD.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se hizo una serie de análisis dinámicos no lineales sobre modelos numéricos de un grado de libertad de dos columnas calibradas de acuerdo a datos de ensayos disponibles en la bibliografía. Además, se analizaron dos grados diferentes de refinamiento: por un lado, los modelos trilineales y, por otro, los modelos de fibras. El estudio hizo especial énfasis en la respuesta dinámica de los modelos ante réplicas partiendo de distintos niveles de daño. Para ello, se intentó encontrar la relación entre los factores de amplificación aplicados a los registros y los desplazamientos máximos que definen los diferentes tipos de daño de los elementos. Las conclusiones obtenidas se detallan a continuación.

En primer lugar, si bien existen excepciones puntuales a esta tendencia como se enunció en el análisis de resultados, se advierte un fenómeno claro y, en cierta forma, predecible: para alcanzar un determinado valor de desplazamientos máximos, los factores de amplificación aplicados a los acelerogramas decrecen a medida que el nivel de daño de las columnas se incrementa.

Por otro lado, se observa una gran variabilidad de los factores de amplificación. Esto puede atribuirse a las distintas características de los registros de aceleraciones del terreno seleccionados para este estudio. Además, se observa que los factores de amplificación utilizados sobre la Unidad 1 Tanaka (1990) fueron superiores a los de la Unidad 8 Zahn (1986). Esto se debe al comportamiento más dúctil de la primera columna, lo que le permite alcanzar desplazamientos más grandes. Con respecto a los factores de amplificación propiamente dichos, se tuvo que en general para AACE1-Z4 y AKOB fueron necesarios factores aproximadamente iguales o menores que 1,000. En cambio, para ACAU se necesitaron factores de amplificación de alrededor de 3,000 para llevar al colapso a la columna dúctil. Para ACAD los factores empleados fueron muy superiores, requiriéndose amplificar el registro original hasta por un factor de 32,870 para ocasionar el colapso del modelo de fibras de la Unidad 1 de Tanaka (1990).

Finalmente, se hace notar que en la mayor parte de los casos analizados los factores de amplificación aplicados sobre los acelerogramas en los modelos de fibras fueron superiores a los que se aplicaron a los modelos trilineales, aunque también se debe aclarar que siempre estuvieron dentro del mismo orden de magnitud. En este punto pueden advertirse un par de excepciones: para la Unidad 1 Tanaka (1990) los factores de amplificación usados con el registro ACAD fueron superiores en el caso del modelo trilineal, mientras que para la Unidad 8 Zahn (1986) los *FA* correspondientes a AKOB del modelo trilineal fueron mayores que los del modelo de fibras mientras que para ACAD fueron iguales en ambos modelos.

REFERENCIAS

- Asociación Japonesa de Prevención de Desastres en Edificios (Japanese Building Disaster Prevention Association – JBDPA). Guideline for Post-earthquake Damage Evaluation and Rehabilitation. *Japón*, 2001.
- Barlek Mendoza P. M., Galíndez E. E. y Pavoni S. B. Modelación Numérica de Columnas de Hormigón Armado Sometidas a Cargas Cíclicas. *23º Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, 2014a.
- Barlek Mendoza P. M., Galíndez E. E. y Pavoni S. B. Factores de Reducción de la Capacidad Sísmica para Columnas de Hormigón Armado Dañadas por Sismos. *XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural “Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional y el Bienestar Social”*, 2014b.
- El-Tawil S. y Deierlein G. Nonlinear Analysis of Mixed Steel-Concrete Frames I: Element Formulation. *Journal of Structural Engineering* 127:647-655, 2001a.
- El-Tawil S. y Deierlein G. Nonlinear Analysis of Mixed Steel-Concrete Frames II: Implementation and Verification. *Journal of Structural Engineering* 127:656-665, 2001b.
- Proyecto de Norma INPRES – CIRSOC 103 Parte I “Construcciones en General” (Elevado para su puesta en vigencia legal a nivel nacional). *Argentina*, 2013.
- Tanaka H. Effect of Lateral Confining Reinforcement on the Ductile Behaviour of Reinforced Concrete Columns. *Tesis Doctoral, Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda*, 1990.
- Zahn F. A. Design of Reinforced Concrete Bridge Columns for Strength and Ductility. *Tesis Doctoral, Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda*, 1986.