

DAÑO ESTRUCTURAL EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO ARMADO DISEÑADOS SEGÚN NORMAS SÍSMICAS

Sebastián Delgado¹, Antonio Sarcos¹, Julio Flórez-López²,
Ricardo Picón^{2,3} y María Eugenia Marante^{2,3}

RESUMEN: En la actualidad las normas sísmicas prescriben que una estructura sometida a sismos moderados puede experimentar daño estructural reparable, pero no definen claramente el concepto de daño, ni la metodología para su cuantificación. El propósito de este trabajo es cuantificar el daño estructural, definir su distribución en la estructura y calcular las derivas inelásticas. Para ello se utilizó el modelo de Daño Concentrado desarrollado desde 1993 en la Universidad de Los Andes, Venezuela. Se analizaron pórticos planos de concreto armado de 4, 8, 12, 16 y 20 pisos. A cada uno de ellos se le aplicaron cinco acelerogramas cuyos espectros de respuesta promedian el espectro de diseño correspondiente. Los resultados de las simulaciones muestran que algunos pórticos sufrieron daño no reparable y que en condiciones de alto factor de amplificación dinámico, se desarrollaron rótulas plásticas en ambos extremos de todas las columnas de un mismo nivel, conformando un mecanismo frágil. Para mejorar el comportamiento de las estructuras se recomienda suministrar confinamiento adecuado en ambos extremos de las vigas y lograr las resistencias requeridas en columnas con mayores dimensiones y menor porcentaje de refuerzo.

INTRODUCCIÓN

Con frecuencia las edificaciones sometidas a sismos severos sufren daños significativos, pudiendo incluso producirse el colapso total de las mismas. Para el ingeniero estructural es muy importante la predicción y estimación del daño estructural. Las normas sísmicas (por ejemplo la norma sísmica venezolana COVENIN 1998) se refieren al daño estructural de forma ambigua. Es de manera indirecta que establecen prescripciones para reducir el daño, proponiendo valores límites para las derivas laterales. Esto, en general, apunta a la dirección correcta, pero una mala distribución de rigideces y resistencias relativas entre vigas y columnas, puede cumplir los límites de desplazamientos establecidos por ella sin reducir el nivel de daño esperado. En consecuencia, es más racional limitar el daño en forma cuantitativa.

Con el fin de instrumentar la cuantificación del daño estructural, se requiere incorporar modelos de daño al análisis inelástico de estructuras. En Venezuela, desde 1993, se ha desarrollado un Modelo de Daño Concentrado confiable (Flórez-López 1993, Flórez-López 1995, Cipollina et al. 1995, Flórez-López 1998, Perdomo *et al.* 1999, Picón 1999, Marante y Flórez-López 2002), que ha demostrado ser racional y confiable en la cuantificación y ubicación del daño en estructuras sometidas a solicitaciones sísmicas.

En este trabajo se describe la aplicación del Modelo de Daño Concentrado a pórticos planos de concreto armado, diseñados según las normas sísmicas vigentes venezolanas (COVENIN 1987, COVENIN 1998), con el objeto de cuantificar el daño en los miembros, determinar la distribución del mismo en la estructura, cuantificar las derivas inelásticas y comparar con los resultados esperados según los criterios de las normas. Los requisitos sismorresistentes de las normas de concreto venezolanas (COVENIN 1987), así como los de la mayoría de las normas vigentes en los países latinoamericanos, utilizan criterios de diseño muy similares a los de la norma ACI, por lo que los resultados de esta investigación pueden ser aplicables a edificaciones diseñadas siguiendo las pautas de cualquiera de estos códigos.

MODELO DE DAÑO CONCENTRADO

En esta sección se presenta un resumen de los aspectos más relevantes del Modelo de Daño Concentrado. Una descripción detallada de este modelo y de su implementación numérica se encuentran en Flórez-López 1993, Flórez-López 1995, Flórez-López 1998, Perdomo et al. 1999, Picón 1999 y Marante y Flórez-López 2002.

1. Cada miembro del pórtico es considerado como el ensamblaje de una viga-columna elástica entre dos rótulas donde se consideran concentrados todos los efectos inelásticos.
2. Se define el daño como la fracción disminuida de rigidez, después haber sucedido cierto agrietamiento.

¹ Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Fac. de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo 1247, Venezuela.

² Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida 5101, Venezuela.

³ Decanato de Ingeniería Civil, Universidad Centrooccidental "Lisandro Alvarado", Barquisimeto, Venezuela.

- Para caracterizar el daño, en secciones asimétricas, se introducen dos grupos de variables internas $\{D^+\} = \{d_i^+, d_j^+\}$ y $\{D^-\} = \{d_i^-, d_j^-\}$ que representan el daño producido por acciones positivas y negativas respectivamente. Estos parámetros de daño pueden tomar valores entre 0 y 1, tal que 0 representa una rótula intacta y 1 representa una rótula totalmente dañada sin ninguna rigidez.

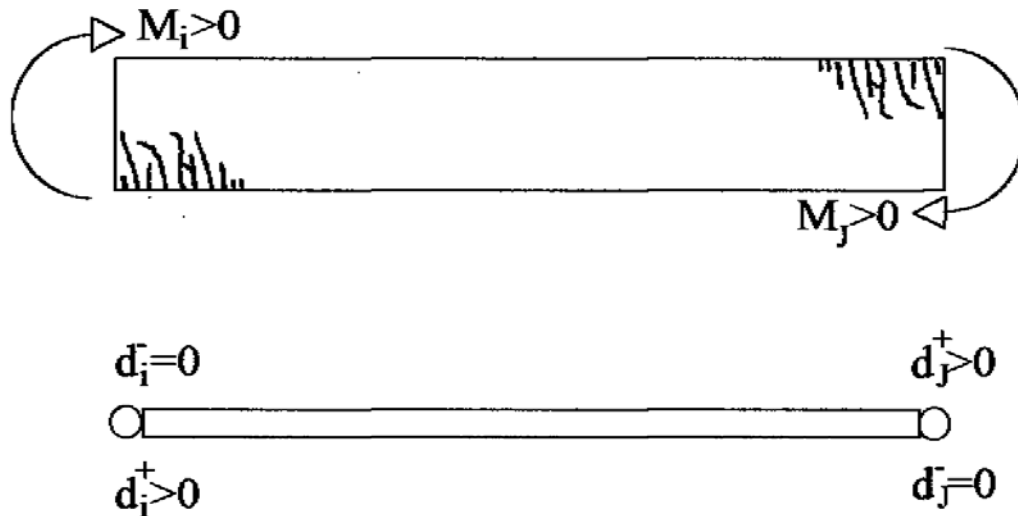


Figura 1: Representación del daño en un miembro de concreto armado.

- La determinación de los desplazamientos, deformaciones, esfuerzos internos, daño positivo y negativo, rotaciones plásticas y fuerzas en extremo de miembro, es efectuada resolviendo el sistema que conforman las ecuaciones de compatibilidad, las ecuaciones de equilibrio y la ley de comportamiento de miembro degradable, la cual a su vez consiste en la ley de estado, las funciones de fluencia, de daño y las leyes de evolución de las rotaciones plásticas y del daño.
- Para describir la evolución del daño se utiliza el criterio de Griffith, el cual establece que puede haber propagación de las grietas sólo cuando la energía liberada durante el proceso de crecimiento de las mismas es suficiente para suministrar la energía necesaria para dicha propagación. Aplicando este criterio se obtiene una relación entre los momentos y las correspondientes variables de daño.
- Númericamente, el problema se resuelve con la técnica predictor-corrector-verificador, que se programa en un elemento de usuario dentro del programa comercial de elementos finitos ABAQUS 2001.

El modelo así descrito permite la cuantificación de los daños positivos y negativos en los extremos de todos los miembros de un pórtico de concreto armado, al ser sometido a un movimiento sísmico preestablecido.

CARACTERÍSTICAS DE LOS PÓRTICOS ESTUDIADOS

Para realizar el estudio planteado, se seleccionó una muestra de pórticos de acuerdo a los criterios siguientes:

- Se usaron cinco pórticos representativos de 4, 8, 12, 16 y 20 pisos, con tres tramos de vigas, dos exteriores de 7.00 metros y uno interior de 9.00 metros. Al piso inferior se asignó una altura de 4.75 metros y al resto de los pisos 3.60 metros.
- Los cortes basales se determinaron según el espectro elástico correspondiente a una sismicidad intermedia y a un suelo de dureza también intermedia (Figura 2).
- La distribución de fuerzas laterales en los pórticos de 4 y 8 pisos se efectuó según el método estático equivalente. En los de 12, 16 y 20 pisos se utilizó el método dinámico de un grado de libertad por nivel.

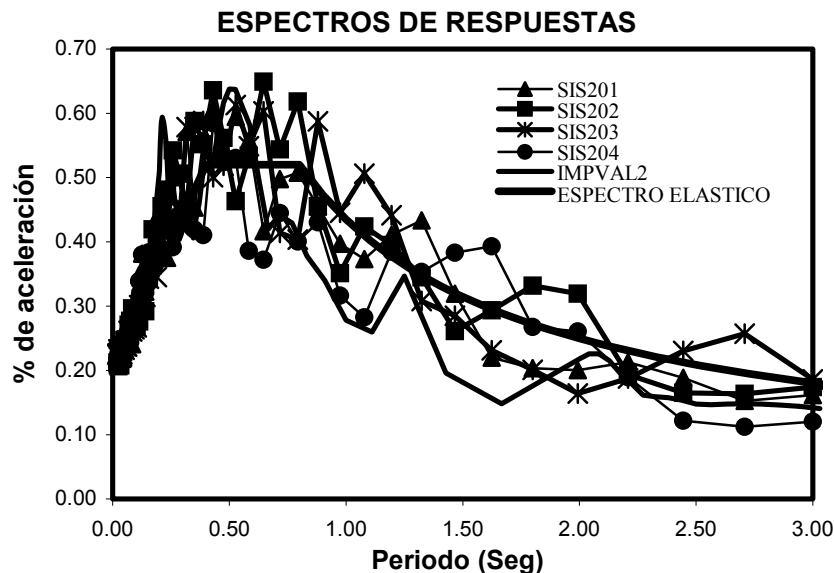


Figura 2: Espectro elástico y espectros de respuesta de los sismos utilizados.

4. En los nodos se cumplió con el requerimiento de que la relación entre la suma de las resistencias de las columnas y la suma de las resistencias de las vigas fuese mayor o igual a 1.20.
5. En general se consideró que el concreto de las columnas y de las vigas estaba suficientemente confinado, aunque se realizaron cálculos en el pórtico de 4 pisos para el caso de vigas no confinadas. En el acero se consideró el endurecimiento por deformación.
6. Los períodos de vibración del primer modo para los pórticos de 4, 8, 12, 16 y 20 piso, son respectivamente 0.852, 1.153, 1.817, 2.284 y 2.698 segundos.
7. La resistencia característica del concreto utilizado para columnas y vigas, fue de 250 Kg/cm². Para el acero de refuerzo se tomó una fluencia de 4200 Kg/cm².
8. Se consideró, que el pórtico estudiado era el pórtico interior de un edificio con cuatro ejes portantes, separados 6.00 metros. La carga de entrepiso por peso propio usada fue 614 Kg/m² y 300 Kg/m² por carga variable. En el techo estos valores fueron 484 y 100 Kg/m² respectivamente.
9. Las dimensiones de columnas y vigas, así como el refuerzo de todos los elementos pueden ser revisadas en Delgado 2002. En general las vigas se diseñaron para trabajar como simplemente armadas, las columnas tienen porcentajes de armado entre el 1.3% y el 3.4 %, con excepción del pórtico de cuatro pisos cuyas columnas centrales tienen 4% en el primero y segundo piso y el 4.9% en el tercero y el cuarto piso. Respecto a la regularidad de resistencias en columnas, todos los pórticos son regulares con excepción del pórtico de dieciséis pisos que tiene una reducción de resistencia en las columnas exteriores de 56.4% entre los pisos 10 y 11.

CARACTERISTICAS DE LOS SISMOS UTILIZADOS

Se utilizaron cinco acelerogramas, cuatro de ellos fueron generados artificialmente, el quinto fue obtenido por la normalización del sismo de El Centro.

Los acelerogramas artificiales denominados sis201, sis202, sis203 y sis204 (Figura 3) fueron obtenidos con el programa SIMQKE (Vanmarcke 1976), sus valores de frecuencias predominantes oscilan entre 0.3 y 2.5 CPS. El sismo normalizado impval2 (Figura 3), fue obtenido de la literatura, con una duración de la fase intensa de 30 seg. y una duración total de 53.42 seg., su contenido de frecuencias predominantes oscila entre 0.3 y 4.2 CPS. La aceleración máxima del terreno de todos los acelerogramas es de 0.20g.

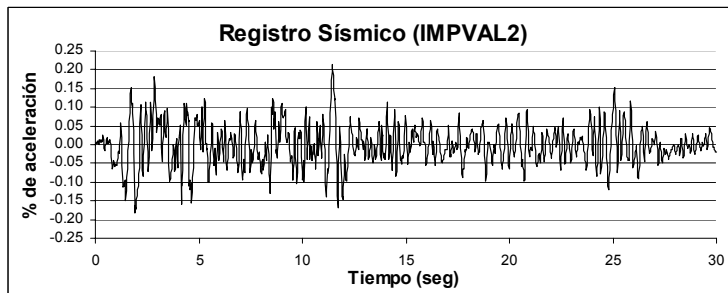
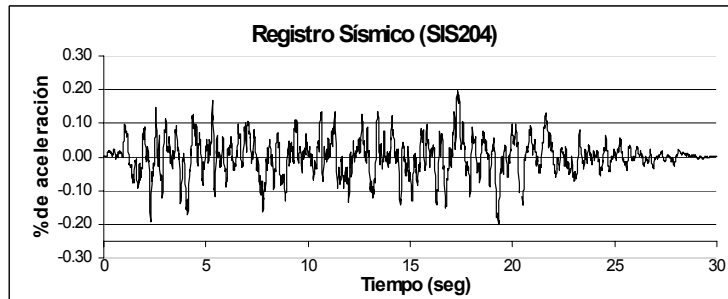
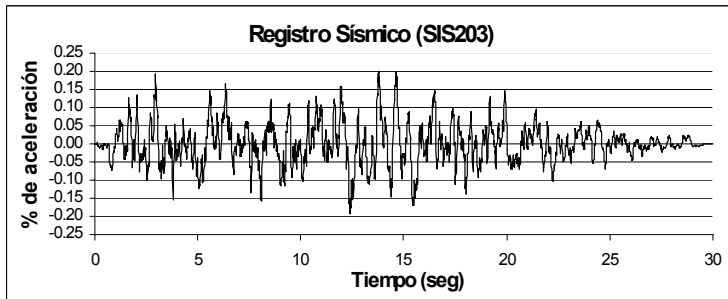
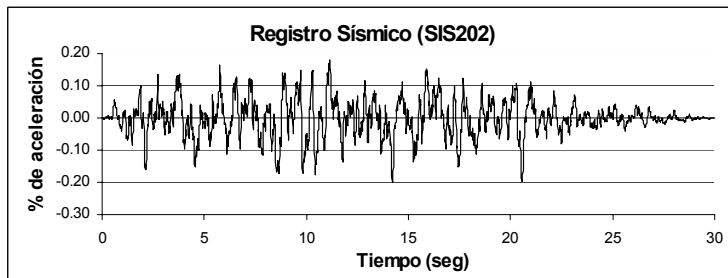
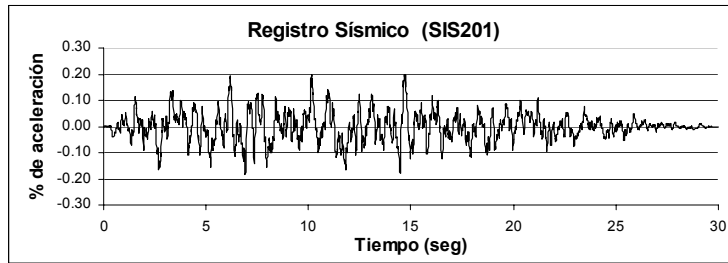


Figura 3: Acelerogramas utilizados.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En general, el patrón de daños obtenido en todos los pórticos fue exactamente el mismo para los cinco sismos utilizados. La figura 4 muestra gráficamente los resultados de daños correspondientes a la aplicación del sismo sis201.

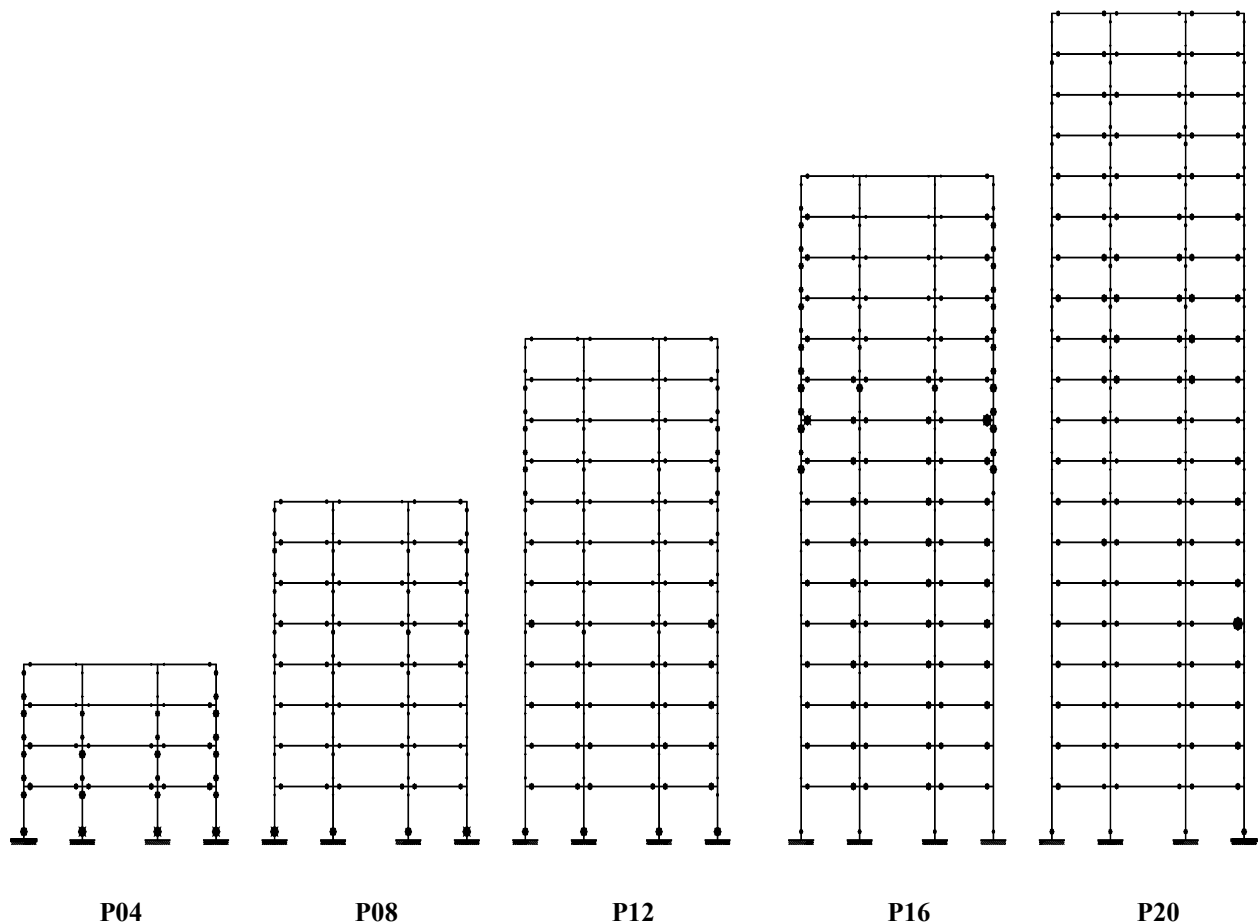


Figura 4: Esquema de identificación de daños para el sismo SIS201.

Pórtico de cuatro pisos

Daños máximos de 0.43, 0.46, 0.44, 0.44 y 0.38 fueron obtenidos para cada uno de los cinco sismos estudiados. Estos se produjeron en la base de las columnas de planta baja. Se consideró 0.40 como valor límite de daño reparable. Entre el 5% y el 9% de las rótulas sufrieron daños no reparables y se ubican consistentemente en las columnas del primer nivel. Entre el 43% y el 63% de las rótulas en las columnas sufrieron daños mayores que las vigas adyacentes (0.29, 0.29, 0.30, 0.31 y 0.27) ubicándose en las columnas centrales de los pisos 1 y 2, así como en las columnas exteriores de los pisos 1, 2 y 3. El hecho de que la frecuencia del primer modo de este pórtico esté ubicada en el centro de la banda de frecuencias predominantes para los cinco sismos usados, da como resultado factores de amplificación dinámicos mayores en este pórtico que en los otros.

Cabe señalar que en este pórtico, a diferencia de los otros, se observan altos porcentajes de refuerzo en las columnas centrales (4.9%), lo cual permite dimensiones mas bien pequeñas, que causan las altas derivas obtenidas del análisis inelástico (> 0.018). Esto, en unión a los bajos valores de curvaturas últimas que implican los altos porcentajes de refuerzo, y al alto factor de amplificación dinámico característico en pórticos de baja altura sometidos a sismos para este tipo de suelos, crean condiciones propicias para el patrón de daños obtenido. Este efecto con daños generalizados denota un comportamiento estructural deficiente, puesto que supone fragilidad al ser atacados ambos extremos de todas las

columnas de un mismo nivel con magnitud de daños superior al de las vigas. Los daños entonces no se presentan predominantemente en las vigas.

Para la cuantificación de los daños, en principio todas las columnas y vigas se modelaron confinadas. Sin embargo, en este pórtico en particular, se realizaron cálculos adicionales, suponiendo vigas no confinadas y columnas confinadas, para lo cual las nuevas curvaturas calculadas fueron del orden de la mitad de las que corresponden al modelo confinado. Los resultados comparativos se muestran en las Figuras 5, 6, 7 y 8. Estos indican que para absorber la misma cantidad de energía, las vigas no confinadas deben sufrir daños con valores que duplican los equivalentes a vigas confinadas, mientras que las columnas prácticamente conservan los mismos niveles de daño ya mencionados.

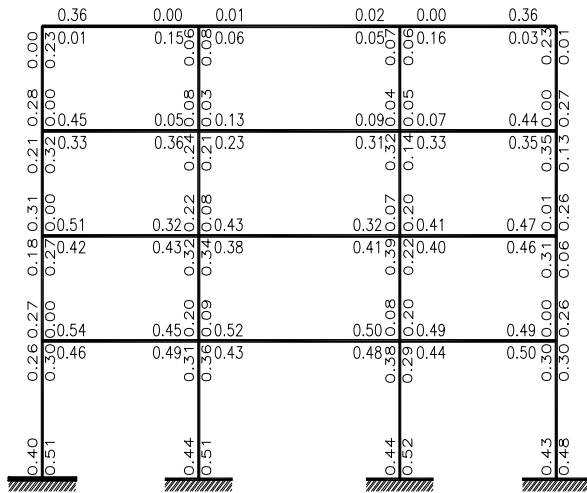


Figura 5: P04 con vigas no confinadas.

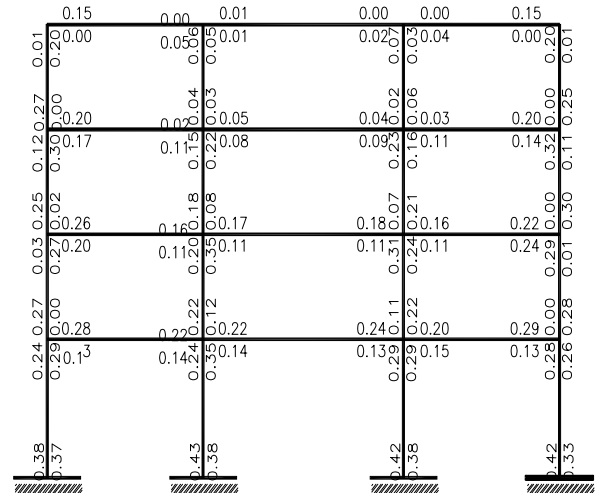


Figura 6: P04 con vigas confinadas.

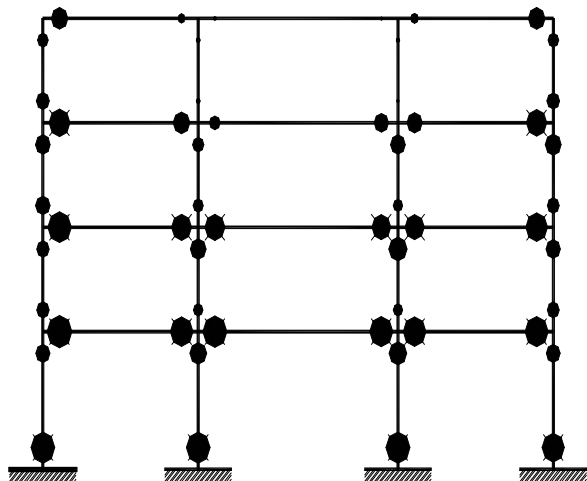


Figura 7: P04 con vigas no confinadas.

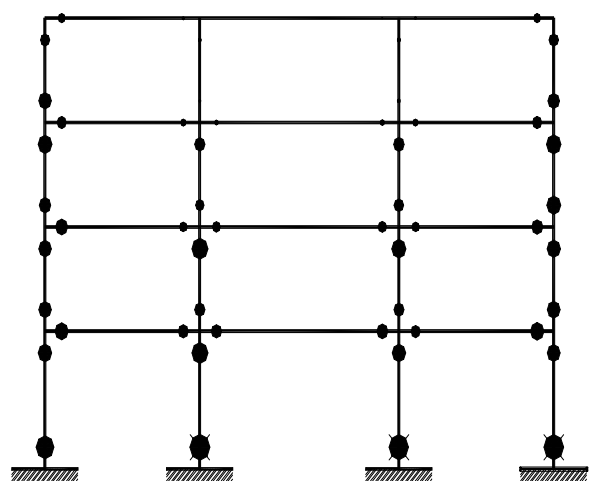


Figura 8: P04 con vigas confinadas.

Pórtico de ocho pisos

Los daños máximos obtenidos resultaron en valores de 0.44, 0.53, 0.52, 0.54 y 0.46 para cada uno de los cinco sismos estudiados y se observan en la base de las columnas de planta baja. Solamente el 2% de las rótulas sufrieron daños no reparables, los que se ubican consistentemente en las columnas del primer nivel. En todos los casos las vigas

sufrieron daños mayores que las columnas en un mismo nodo (0.29, 0.29, 0.30, 0.31 y 0.27). A pesar de los valores altos de daño en la base de las columnas del primer nivel, el comportamiento estructural de este pórtico es excelente, cumpliéndose la hipótesis de ocurrencia de daños predominantemente en las vigas.

Al igual que en el pórtico de cuatro pisos, aunque en menor grado, el primer modo de este pórtico está dentro de la banda de frecuencias predominantes de los sismos utilizados. Por esta razón en este pórtico se obtuvo el valor máximo de daño de 53%.

Pórtico de doce pisos

Los daños máximos obtenidos, 0.38, 0.41, 0.45, 0.28 y 0.35 para cada uno de los cinco sismos estudiados, se observan de nuevo en la base de las columnas de planta baja. Solamente el 1% de las rótulas sufrieron daños no reparables, los que se ubican de nuevo en las columnas del primer nivel. Entre el 13 y el 19% de las rótulas en columnas sufrieron daños mayores que las vigas en un mismo nodo (0.29, 0.29, 0.32, 0.24 y 0.28). El comportamiento estructural de este pórtico es de mediana calidad, si bien existen columnas con daños superiores a los de las vigas, no ocurre en todas las columnas de un mismo nivel lo que permite afirmar el cumplimiento tímido de la hipótesis de ocurrencia de daños predominantemente en las vigas.

Pórtico de dieciséis pisos

Los daños máximos obtenidos de 0.49, 0.43, 0.41, 0.43 y 0.44 para cada uno de los cinco sismos estudiados, se observan en las vigas del piso diez. Solamente el 1% de las rótulas sufrieron daños no reparables y se ubican en las vigas de ese mismo nivel. Entre el 19 y el 34% de las rótulas en columnas sufrieron daños mayores que las vigas en un mismo nodo (0.37, 0.39, 0.37, 0.39 y 0.39) con ubicación predominante en las columnas exteriores de los niveles nueve, diez, once y doce.

En este pórtico la frecuencia del segundo modo se ubica en la banda de frecuencias predominantes de los sismos utilizados, lo cual podría ser un factor causante del aumento de la respuesta de los pisos altos. Se debe señalar que los daños máximos coincidentalmente suceden en el piso diez, en el cual las columnas son de igual sección que las del piso once, pero existe una reducción brusca de la cantidad de acero en un 56%, siendo este el único lugar en que este porcentaje de reducción fue decidido así al diseñar los pórticos. Similar al caso del pórtico de doce pisos, el comportamiento estructural aquí es regular, si bien existen columnas con daños superiores que las vigas, no ocurre en todas las columnas de un mismo nivel. Se cumple en forma tímida, la hipótesis de ocurrencia de daños predominantemente en las vigas.

Pórtico de veinte pisos

Excluyendo una rótula en la viga del quinto nivel ($d = 0.52$), todos los daños resultaron reparables, los valores máximos obtenidos en vigas 0.34, 0.32, 0.31, 0.36 y 0.32 para cada uno de los cinco sismos estudiados, se observan esparcidos en las vigas de todos los niveles. En todos los casos, los daños en las vigas resultaron mayores que sus columnas adyacentes 0.27, 0.23, 0.25, 0.27 y 0.27. Las frecuencias predominantes de los sismos seleccionados, claramente alejadas del período fundamental de este pórtico, constituyen la razón de su reducida sollicitación, con los consecuentes daños reparables obtenidos. El comportamiento estructural de este pórtico fue excelente, con daños presentándose predominantemente en las vigas.

En este pórtico, el daño máximo se determinó en el nivel cinco, lo cual coincide con el nivel cuya viga fue reforzada con el mayor porcentaje de refuerzo respecto al resto de vigas del mismo pórtico y aún al resto de pórticos estudiados. Adicionalmente en este caso, el diseño de las vigas al igual que en el de cuatro pisos, es condicionado por las cargas gravitacionales, pero a diferencia de aquel, el diseño de las columnas debe resistir elevadas cargas axiales con fuertes momentos causados por las sollicitaciones sísmicas. Esta condición de diseño, resulta en secciones de gran tamaño y gran resistencia con consecuentes valores altos de la relación $\Sigma M_c / \Sigma M_v$.

Derivas

La deriva máxima se obtuvo en el pórtico de cuatro pisos (Figura 10), en el cual el valor superó el 0.018 especificado como un límite por la norma COVENIN 1998. El pórtico de dieciséis pisos también mostró valores de hasta 0.016. Por otro lado el pórtico de veinte pisos fue el que sufrió menores derivas así como menores daños. Esto establece una correlación directa entre el daño estructural y las derivas experimentadas.

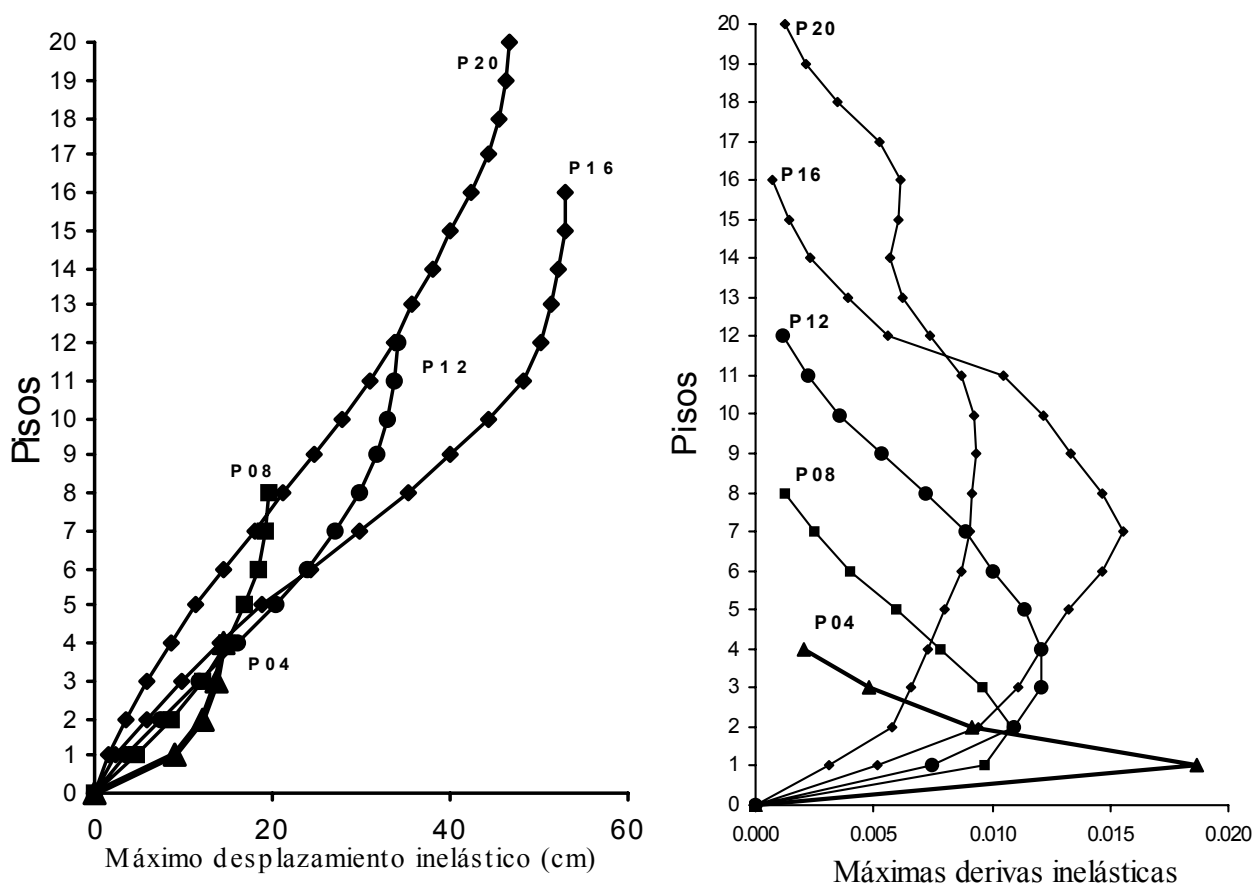


Figura 9: Envolventes de desplazamientos y derivas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se enumeran las principales conclusiones derivadas del análisis de los resultados obtenidos:

1. Futuras ediciones de las normas sismorresistentes deben incluir definiciones precisas del daño estructural, así como recomendaciones sobre métodos idóneos para su cuantificación y más aún, dar valores límites de daño como requerimiento de un buen diseño. En pocos años ya no serán excusas los costos del análisis, ni la falta de conocimiento de los ingenieros estructurales.
2. Se pudo demostrar que no siempre el estricto cumplimiento de las prescripciones normativas garantizan comportamientos con daños reparables.
3. Se pudo observar una clara correlación entre altos factores de amplificación dinámicos, altos porcentajes de acero en columnas y elevadas derivas, con un patrón de daños que denota comportamiento deficiente. Así mismo, bajos factores de amplificación dinámicos, bajos porcentajes de acero en columnas y bajas derivas se correlacionan con un patrón de daños correspondiente a comportamiento excelente.
4. El resultado comparativo entre vigas confinadas y no confinadas para el pórtico de cuatro pisos, demuestra que se deben tomar provisiones adicionales a la normativa actual para garantizar adecuado confinamiento en los extremos de vigas. Las separaciones de estribos especificadas actualmente no cumplen este cometido.
5. Durante la etapa de cálculo se pudo demostrar que existe fuerte correlación de tipo inverso entre la curvatura última y los daños experimentados. Entonces, para una misma resistencia, bajos porcentajes de acero conducirían a elevadas curvaturas últimas con consecuentes reducción de daños.

REFERENCIAS

- ABAQUS (2001) User's Manual Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. Versión 6.2
- Cipollina A., López-Inojosa A. y Flórez-López J. (1995). "A simplified damage mechanics approach to nonlinear analysis of frames", *Computers & Structures*, 54 (6), 1113-1126.
- COVENIN (1987). Norma 1753-87 "Estructuras de concreto armado para edificaciones. Análisis y diseño", Venezuela.
- COVENIN (1998). Norma 1756-98 "Edificaciones sismorresistentes", Venezuela.
- Delgado C. Sebastián A. (2002). "Cuantificación del Daño Estructural en Pórticos Planos de Concreto Armado Diseñados según la Norma COVENIN 1756-98 Sometidos a Excitaciones Sísmicas", Trabajo especial de Grado para optar al Título de Magister Scientiarum en Ingeniería Estructural, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.
- Flórez-López J. (1993). "Modelos de daño concentrado para la simulación del colapso de pórticos planos". *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 9 (9), 143-159.
- Flórez-López J. (1995). "Simplified model of unilateral damage for RC frames", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 121 (12), 1765-1772.
- Flórez-López J. (1998). "Frame analysis and continuum damage mechanics", *Journal of Eur. Mech.*, 17 (2), 269-284.
- Marante M. E. y Flórez-López J. (2002). "Model of damage for RC elements subjected to biaxial bending", *Engineering Structures*, 24(9), 1141-1152.
- Perdomo M.-E., Ramirez A. & Flórez -López J. (1999). "Simulation of damage in RC frames with variable axial forces", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 28 (3), 311-328.
- Picón Rodríguez, R. A., (1999). "Evolución de la Degradación de Rigidez en Pórticos de Concreto Armado". Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural. Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela.