

ESTADO DEL CONOCIMIENTO DEL ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL EN ESTRUCTURAS DE ACERO

Ronald David Ugel, Juan Carlos Vielma
Email: rugel@ucla.edu.ve, jcvielma@ucla.edu.ve

RESUMEN

En este trabajo se analizan los enfoques actualmente usados en el análisis y diseño estructural en edificios de acero. Se estudian diferentes investigaciones en las que se analizan comportamientos de estructuras y la confiabilidad de esos resultados. Se converge hacia la noción que el análisis estructural tiene sentido siempre que la demanda a la que se someta una estructura, tenga respuesta adecuada en la capacidad proporcionada por un diseño estructural eficiente. Los enfoques pueden dividirse en: enfoques deterministas elásticos y plásticos, enfoques probabilísticos basados Estados Límites de cada miembro estructural y enfoques de confiabilidad basados en Estados Límites del sistema estructural en su conjunto. Se concluye que en la medida en que sea posible predecir con cierto grado de certeza las solicitaciones producidas por el sismo y la capacidad de respuesta de la estructura para soportar tal demanda, los edificios pueden ser proyectados con un nivel adecuado de confiabilidad en su desempeño.

Palabras claves: análisis y diseño estructural, enfoque probabilístico, Estados Límites, confiabilidad de desempeño.

ABSTRACT

This paper analyzed the approaches currently used in structural design and analysis in steel buildings. Explored different researches that analyzed behavior of structures and the reliability of those results. Converges towards the notion that structural analysis has sense wherever load and seismic demand toward a structure, find appropriate response capacity provided by efficient structural design. Approaches can be divided into: plastic and elastic deterministic approach, probabilistic approaches based in Limit States for each structural member and structural reliability approaches based in Limit States for the structural system as a whole. It is concluded that to the extent that it is possible to predict with some certainty the produced stress by earthquakes and the response capacity of the structure to withstand such demand, buildings can be projected with an adequate level of reliability in its performance.

Key Words: structural design and analysis, probabilistic approach, Limit States, performance reliability.

INTRODUCCION

En las últimas dos décadas se ha producido un gran avance en el análisis y proyecto de las estructuras de acero, existiendo la posibilidad cada vez más creciente y sofisticada de estudios con base en la respuesta estática y dinámica no lineal del comportamiento de una estructura, debido al desarrollo de modelos y herramientas computacionales. Sin embargo, desde el punto de vista del proyecto estructural, en muchos casos todavía está por agregarse al análisis avanzado la evaluación de la confiabilidad de estructuras con la finalidad de garantizarle a los edificios de acero proyectados una confiabilidad de desempeño certera y adecuada.

Actualmente, las ventajas que proporciona el acero en

cuanto a resistencia, ductilidad, fácil manejo y fabricación, hacen que su uso se expanda rápidamente en la construcción de galpones y edificios comerciales y residenciales. Está tradicionalmente establecido que los procedimientos para el proyecto estructural de edificios apertados de acero se hacen a través del análisis estructural elástico lineal y últimamente a través del análisis no lineal, para determinar las resultantes en los miembros bajo diversos tipos de carga para luego comparar la respuesta contra los diferentes Estados Límites establecidos en las normas, los cuales, a su vez, están basados en la confiabilidad de las normas.

En este contexto, los autores Li y Li (2006), plantean que las prácticas usuales bajo el método LRFD (Diseño por Esta-

dos Límites) contemplan los siguientes procedimientos: 1) Se hace un análisis elástico para determinar las resultantes sobre miembros estructurales bajo cargas críticas y combinaciones de carga. 2) Se comparan las resultantes sobre los diferentes elementos con su respectivo Estado Límite especificado en los diferentes códigos. Si todas las comparaciones de los elementos son satisfactorias, el diseño estructural es adecuado según cada normativa.

Sin embargo, los autores sugieren deficiencias en tales métodos. Plantean en primer lugar, que en el análisis elástico normal en edificios de acero se consideran solamente deformaciones típicas axiales, por flexión y por corte, sin considerar efectos como rotación de juntas, flexibilidad de conexiones viga-columna, pandeo torsional y secciones no prismáticas. Además, en el análisis elástico no se consideran imperfecciones geométricas de los elementos, esfuerzos residuales o configuraciones geométricas no regulares. Por otro lado, los elementos estructurales generalmente están bajo condición plástica cuando la estructura alcanza los Estados Límites, lo que trae como consecuencia que la comparación normativa se basa en resultados de análisis elásticos en la estructura, normalmente no coincidentes con el comportamiento dinámico de la estructura. La incompatibilidad entre los resultados obtenidos en este tipo de análisis, con los resultados obtenidos en estados Límites reales, generan incertidumbre en el desempeño, por lo que es necesario estudiar los métodos de análisis capaces de generar una mayor confianza en el desempeño estructural de un edificio de acero. Estos autores denominan como “diseño avanzado” al diseño estructural que incluya un sistema de fiabilidad definido y sugieren que se ha hecho muy poco progreso en esa área.

Por todo lo anterior es fundamental conocer el estado del arte del análisis y diseño estructural en estructuras de acero, haciéndose énfasis en el diseño que contemple solicitaciones de carga representativas de los movimientos sísmicos desafortunadamente tan presentes en estos días.

ANTECEDENTES

No 1. El proyecto sismorresistente actual se fundamenta en la capacidad de disipación de la energía del terremoto a través de deformaciones inelásticas significativas. Annan y otros (2009) realizaron un estudio que tiene como objetivo desarrollar una comprensión del comportamiento inelástico de pórticos arriostrados de edificios modulares de acero (MSB) y la evaluación de sus demandas sísmicas y capacidades. Como parámetros de la respuesta crítica se consideraron la deriva máxima de entrepiso y la deriva global.

La respuesta sísmica de un sistema estructural depende de varios factores, entre los cuales pueden citarse las características dinámicas, y las características del movimiento sísmico. Es necesario simular estos factores con el fin de predecir adecuadamente la respuesta, de manera que sea posible determinar la vulnerabilidad sísmica utilizando técnicas analíticas, experimentales o una combinación de ambas. El uso del Análisis Dinámico Incremental para

evaluar la capacidad sísmica de estructuras de edificios, permite obtener estimaciones más realistas y confiables de la demanda de esfuerzos y deformaciones en distintos elementos del sistema estructural. Las características no lineales como la disipación de energía y la degradación de las fuerzas afectan de manera significativa la vulnerabilidad estructural bajo cargas sísmicas. Así, los sistemas estructurales con una gran capacidad de disipación de energía son susceptibles de soportar deformaciones inelásticas mucho mayores que los sistemas con relativamente limitada capacidad de disipación de energía. En las normas de proyecto sismorresistente modernas, se espera que los sistemas estructurales alcancen deformaciones en la región inelástica bajo movimientos sísmicos severos.

El proyecto elástico usual de estructuras, contempla que las fuerzas resultantes del espectro de respuesta elástica idealizada,

que representan la sismicidad del sitio, se reduzcan mediante un factor de respuesta, R . Este factor también se utiliza para amplificar la deriva elástica calculada que ofrece una evaluación de los daños sísmicos potenciales. Los límites de deriva se determinan generalmente mediante relaciones que incorporan la altura de los pisos de la estructura del edificio. El factor R es generalmente especificado para una configuración típica de pórticos y a los materiales que constituyen la estructura, y se atribuye en parte a la ductilidad del sistema, al endurecimiento plástico del acero, a las hipótesis de diseño y a la redistribución de las fuerzas internas en el rango inelástico de respuesta.

El estudio se centró en la cuantificación de las demandas sísmicas inelásticas y la capacidad de estructuras MSB de 2, 4 y 6 pisos proyectados para ductilidad moderada según las normas canadienses. Se examinó el comportamiento y la respuesta sometiendo modelos analíticos no lineales representativos de los pórticos a un conjunto de 20 acelerogramas de terremotos con diferentes niveles de intensidad. Para escalar cada registro se utilizó la aceleración espectral en el período fundamental de la estructura, permitiendo así una reducción en la variabilidad de cada registro.

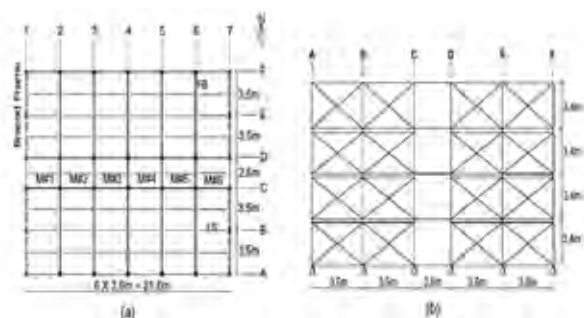


FIGURA 1

En la figura 1(a) está la ubicación del pórtico arriostrado de la estructura MSB de 6 pisos. En la figura 1(b) se observa el pórtico con sus arriostramientos.

De su investigación, los autores encontraron que los módulos estudiados mostraron una respuesta modal inicial

esperada pero se mostraron más propensos a demanda en los modos superiores y que bajo las diferentes intensidades de las aceleraciones de diseño en todos los módulos estudiados. También concluyeron que dentro de la respuesta estructural de los tres MSB con diferentes alturas del estudio, las derivas de entrepiso pueden ser consideradas satisfactorias pero la distribución de los desplazamientos laterales a lo largo de la altura de cada módulo, varía de registro a registro, marcando patrones muy similares. Los niveles superiores generalmente experimentan su máximo desplazamiento en el rango elástico de respuesta. En el rango inelástico, hay una alta concentración de inelasticidad sobre todo en el primer piso. Además, la capacidad media en términos de aceleración espectral, $S_a(T_1, 5\%)$, para el Estado Límite de prevención de colapso por deriva está en el rango entre 1,4 y 2,0 veces la capacidad media asociada al límite de deriva NBCC del 2,0%. Esto evidencia la existencia de un valor de deriva asociado con el colapso. Finalmente, la demanda por deriva y ductilidad varía de un registro a otro y también con la altura de cada pórtico.

No 2. En conformidad con las tendencias más modernas, el diseño sísmico basado en desempeño tiene por objeto la evaluación de la confiabilidad estructural sísmica que se define como la frecuencia media anual (MAF) de exceder a un cierto umbral de daño, es decir, un Estado Límite. Longo y otros (2009), aplicaron la metodología para la evaluación de la MAF de exceder a un Estado límite a pórticos de acero con arriostramientos concéntricos 'V' proyectados según dos enfoques distintos. El primer enfoque corresponde a las disposiciones sugeridas por Eurocódigo 8, mientras que el segundo se basa en la evaluación del desempeño probabilístico bajo una combinación adecuada y probabilista de análisis de riesgos sísmicos, análisis de demanda sísmica y análisis de capacidad sísmica. Plantean los investigadores en su estudio que en los últimos años, después de los terremotos de Loma Prieta (1989) y Northridge (1994), ingenieros e investigadores se dieron cuenta que edificios proyectados de acuerdo con los requisitos mínimos de las normas podrían estar sometidos a daños extensos y costosos bajo terremotos moderados. Esto produjo el desarrollo de un nuevo marco conceptual para el diseño sísmico llamado proyecto sísmico con base en prestaciones (PBSD). El PBSD permite seleccionar una frecuencia anual media aceptable (MAF) de exceder un nivel de pérdidas económicas u otras consecuencias. El objetivo de diseño en PBSD se refiere a la consecución de niveles de desempeño relacionando ciertos resultados estructurales con varios niveles de intensidad sísmica. Desde un punto de vista probabilístico, el objetivo de diseño se define por la MAF de sobrepasar un Estado Límite. Estos Estados se pueden expresar mediante

Piso	TABLA 1		Eurocódigo 8		Análisis Probabilista	
	Fuerza	Diagonales	Vigas	Colimnas	Vigas	Colimnas
1	159 KN	HEA 280	HEM 550	HEB 500	HEM 550	HEB 450
2	319 KN	HEA 260	HEM 500	HEB 300	HEM 500	HEB 300
3	479 KN	HEA 240	HEM 450	HEB 200	HEM 450	HEB 220
4	611 KN	HEA 200	HEM 320	HEB 100	HEM 340	HEB 160

TABLA 1
La tabla 1 muestra los resultados para los dos criterios de diseño.

un parámetro de respuesta estructural o mediante el uso de una medida de intensidad sísmica. La comparación entre diferentes soluciones estructurales del mismo problema de diseño es necesaria cuando se hace en términos de confiabilidad sísmica.

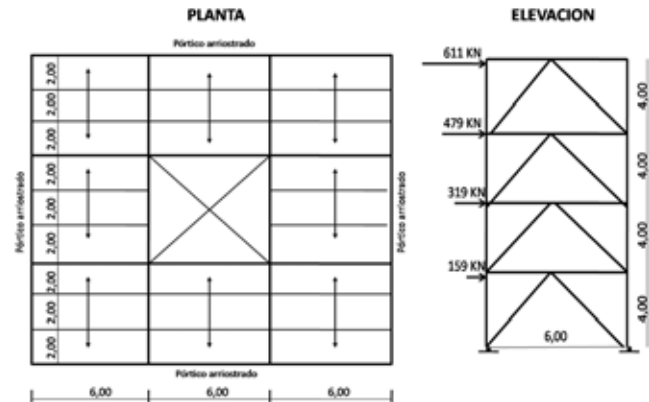


FIGURA 2
La figura 2 muestra la configuración estructural estudiada.

Los investigadores concluyeron que la MAF de superar el Estado Límite en la estructura analizada es baja y el correspondiente período de retorno es claramente mayor que el período de retorno asumido para definir el estado límite de la prevención de colapso. Por el contrario, el período de retorno correspondiente al pandeo triaxial de columnas de la estructura diseñada de acuerdo al Eurocódigo 8 es sólo 133 años.

Además, debe destacarse que el peso estructural es prácticamente el mismo para las dos estructuras consideradas, pero se distribuye de forma diferente entre vigas y columnas. En conclusión, pórticos rígidos con diagonales concéntricas diseñados con arreglo a lo dispuesto en el Eurocódigo 8 exhiben pobres actuaciones en el Estado Límite debido al prematuro pandeo de columnas. Por el contrario, pórticos rígidos con diagonales concéntricas diseñados de acuerdo con la metodología probabilística produjeron resultados adecuados o aceptables para todos los parámetros de daño considerados.

No 3. Conforme con la práctica actual de proyecto sismorresistente, las estructuras pueden estar proyectadas según sea su comportamiento energético: no disipativo o disipativo. Si el comportamiento es no disipativo, la estructura se dimensiona para responder en el rango elástico, limitándose normalmente a zonas de actividad sísmica baja o a las estructuras de uso especial y de gran importancia. De lo contrario, las normas apuntan a lograr proyectos económicos empleando comportamiento energético disipativo en el que se pueden permitir deformaciones inelásticas considerables durante eventos sísmicos de consideración. El diseño de estructuras regulares generalmente se lleva a cabo mediante la asignación de un factor de reducción R (es decir, factor de minoración) que se utiliza para reducir

las fuerzas resultantes de espectros elástico de respuesta idealizados. Esto se lleva a cabo junto con el concepto de diseño por resistencia que requiere una determinación apropiada de la capacidad de la estructura con base en mecanismos plásticos predefinidos (a menudo denominados modos de falla), junto con la suficiente ductilidad en zonas plásticas y factores de sobrecarga. En este contexto, Elghazouli (2009), examina los aspectos de diseño y comportamiento de configuraciones típicas de marcos rígidos con arriostramientos concéntricos. Se presta atención particular a las verificaciones de diseño de resistencia, así como a las consecuencias de los requisitos normativos relacionados con deriva en pórticos rígidos y pórticos arriostrados con diagonales, el comportamiento post-pandeo y la demanda de ductilidad en marcos arriostrados.

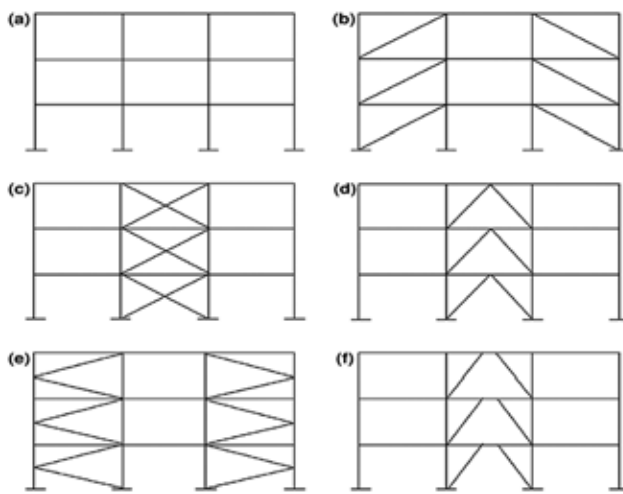


FIGURA 3

En la figura se muestra los tipos de pórticos más comunes: (a) Resistente a momentos, (b) Diagonales no acopladas, (c) Diagonales en cruz de San Andrés, (d) Diagonales concéntricas, (e) Diagonales en K, (f) diagonales excéntricas.

El investigador se centró en formas típicas de pórticos rígidos y pórticos arriostrados concéntricamente. Para los pórticos rígidos se muestra que las normas de diseño por resistencia para columnas hacen caso omiso de la influencia importante de cargas de gravedad en la sobrecarga de vigas. Además, el diseño de columnas no tiene en cuenta la sobrecarga debido a la redistribución más allá de la formación de la primera rótula plástica.

Se encontró que en comparación con AISC 2005 y otras normas internacionales, el EC8 es mucho más estricto en relación con las derivas. Como consecuencia de los estrictos requerimientos en cuanto a deriva y estabilidad, junto con la sensibilidad relativa de los pórticos de acero a estos efectos, las derivas pueden muy a menudo gobernar el diseño, lo que conlleva a una sobrecarga considerable. Esta sobrecarga es también función de diseño gravitatorio y de aceleración espectral.

La comparación de los límites ancho-espesor del EC8 y AISC revela grandes diferencias en el caso de miembros tubulares rectangulares y circulares, los cuales comúnmente se

emplean como elementos de arriostramiento diagonal. Los límites de las secciones compactas en AISC son significativamente más estrictos que las correspondientes a EC8. Dado que la capacidad de ductilidad y la susceptibilidad a la fractura están directamente relacionados con la aparición de pandeo local, parece necesario realizar más evaluación de la adecuación de secciones tubulares para satisfacer las demandas cíclicas impuestas bajo condiciones sísmicas extensas.

Aparte del efecto de materiales y tamaño, se muestra que las sobrecargas en marcos arriostrados concéntricamente, en gran medida está relacionada con la idealización de pandeo en los elementos a compresión. Para diferentes situaciones de diseño, es importante cuantificar esta sobrecarga y evaluar las fuerzas reales soportadas por los elementos a compresión.

No 4. Debido al reconocimiento de la importancia de los posibles riesgos sísmicos derivados de construcciones por debajo de las normas existentes, están emergiendo tanto la investigación de métodos para evaluar ese riesgo como normas y directrices para abordar el problema de la evaluación y actualización estructural. Es así como Romao y otros (2009), aplicaron los procedimientos del Eurocódigo 8-3 (EC8-3) para evaluar si dos diferentes métodos de análisis conducen a resultados similares de seguridad identificando los factores que pueden afectar a estos resultados. Estos se complementan con un enfoque probabilístico que busca determinar si proporciones similares de Demanda/Capacidad conducen a resultados probabilísticos similares.

La configuración estructural de los dos modelos estudiados de pórticos rígidos sólo varió de un pórtico a otro en la rigidez de las columnas de cada pórtico.

Los investigadores evaluaron la seguridad sísmica de las estructuras para los Estados Límites de Carga y Deformación. La aplicación de los procedimientos de EC8-3 para cada Estado Límite y combinación de rigidez se realizó mediante métodos de análisis lineales y no lineales. En este último caso, se utilizaron tanto pushover como análisis dinámico, mientras que en el análisis lineal se consideró sólo el análisis de carga lateral estática.

En términos de la admisibilidad del análisis lineal, los resultados de las estructuras seleccionadas mostraron que, para todos los Estados límites, no han cumplido el criterio de p_{max}/p_{min} . Por lo tanto, el análisis lineal no fue considerado para evaluación de la seguridad de estas estructuras. Los resultados de este análisis también indican que, para las estructuras donde no fueron consideradas diseño sísmico en el diseño inicial, la aplicabilidad del análisis lineal sólo puede restringirse al Estado límite de Daños Limitados y que éste parece ser el Estado Límite dominante. Los resultados del análisis dinámico no lineal concluyen que las características de los acelerogramas considerados tienen una gran influencia en los resultados de evaluación de deformaciones. Tales diferencias son el resultado directo de las diferencias observadas entre los espectros de respuesta de los registros y el espectro de la norma.

No 5. El terremoto del 17 de enero de 1994 en Northridge, California, dañó más de 150 edificios aporricados de acero. El modo más grave de daño observado fue grietas en las conexiones de soldadura. Para resolver las interrogantes de desempeño en estructuras planteadas por estas fallas y para proponer mejoras en el diseño LRFD para estructuras de acero, Song y Ellingwood (2009), evaluaron cuatro pórticos de edificios con pórticos resistentes a momento, de diferentes tamaños y configuraciones, los cuales sufrieron daños en conexiones durante el terremoto, utilizando enfoques tanto deterministas como estocásticos de desempeño.

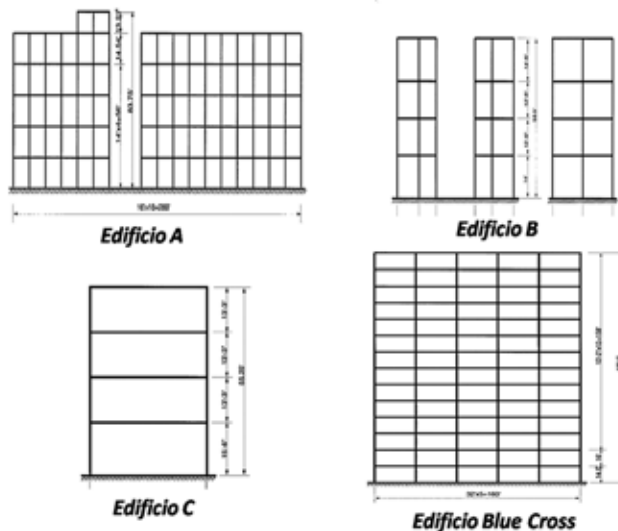


FIGURA 4

Este estudio se centra en modelos dinámicos deterministas, mediante un modelo histerético que incorpora los efectos de fractura en la conexión en pórticos rígidos con respuesta sísmica con acelerogramas derivados del terremoto de Northridge. Estas conexiones fracturadas generan a su vez deformaciones laterales mayores en los pórticos, con impacto significativo en aceleraciones espectrales mayores que las aceleraciones producidas por el sismo. Las comparaciones que hicieron los investigadores de daños previstos por simulaciones con los daños observados mostraron resultados impredecibles. En el edificio C, el análisis produjo derivas significativamente menores que las observadas en los edificios luego de la fractura de las conexiones, mientras que en el edificio A, el análisis estimó derivas globales mucho mayores que las registradas. La comparación entre el análisis y la observación fue bastante aproximada para el edificio Blue Cross y el edificio B. Por lo tanto, esos análisis pueden ser suficientes para predecir los patrones de daños generales dentro de los pórticos rígidos; sin embargo, la predicción de daños en conexiones parece cuestionable. Los investigadores concluyeron que la falta de similitud puede atribuirse, en parte, a las omisiones e incertidumbres inherentes al proceso de simulación. La fuerza de un terremoto y la resistencia estructural son

aleatorias por naturaleza. El hecho de que las predicciones en algunos modelos de edificaciones concuerdan con revisiones de daños mientras que en otros no, sugiere que la falta de concordancia puede ser debida a la variabilidad inherente en los parámetros o incertidumbres en lugar de graves deficiencias en los modelos estructurales propios de simulaciones. Un análisis probabilístico en lugar de determinista de la respuesta estructural de una edificación al movimiento de suelo de un terremoto, puede proporcionar luz adicional sobre estas comparaciones, indicando la calidad de concordancia entre el daño previsible y el observado que podría esperarse.

No 6. Como complemento de su investigación, Song y Ellingwood (2009), consideraron en detalle la aleatoriedad y la incertidumbre inherente de las simulaciones para hacer frente a daños en edificios con pórticos con uniones rígidas que fueron dañados en el terremoto de Northridge, utilizando el procedimiento de análisis dinámico no lineal como una herramienta de evaluación.

Propusieron un plan de muestreo estadístico que genere una descripción probabilística de desempeño de las estructuras. Con este enfoque, los daños producidos se enmarcan dentro de la dispersión estadística de daño pronosticado por modelos probabilísticos. Se calcula la fragilidad de estructuras por las probabilidades de alcanzar determinados Estados Límites en niveles cada vez más severos de acelerogramas, tanto para pórticos sanos como para pórticos dañados por el sismo.

Continuando el estudio de los edificios mostrados en la figura 4, los autores observaron que, por ejemplo, el daño observado en el edificio A fue sobrestimado en el análisis, mientras que en el edificio C fue subestimado. Por otra parte, la comparación entre el daño previsto y el registrado fue razonablemente bueno para el edificio B y el edificio Blue Cross. En los análisis de estas estructuras, todas las variables son tratadas como deterministas y sus valores promedios estimados se utilizaron para predecir la respuesta sísmica de los sistemas estructurales de los cuatro edificios. Sin embargo, tanto las fuerzas sísmicas como la resistencia estructural son aleatorias por naturaleza. El reemplazo de variables que realmente son aleatorias con valores deterministas podría explicar una parte importante de la diferencia entre los resultados pronosticados por el análisis y lo que se observaron en las inspecciones de los edificios. Las diferencias entre los estados límites de edificios dañados con respecto a estructuras no afectadas por el sismo, proporcionan puntos de referencia sobre la confiabilidad asociados con la práctica actual de diseño de sísmico y apreciaciones sobre la vulnerabilidad de pórticos dañados ante posteriores movimientos sísmicos.

Los investigadores concluyeron que los parámetros más importantes en la determinación de la respuesta de la estructura son: el momento en el que se produce la grieta inicial en la conexión y la capacidad reducida de la conexión. Parámetros relacionados con el comportamiento post fractura sólo tienen una pequeña influencia sobre la respuesta de la estructura. Mientras que la media de las derivas entre pisos son aproximadamente iguales en simulaciones y en

las registradas, determinados valores obtenidos a partir de sismos registrados muestran mayor variabilidad que aquellos que utilizan los movimientos sísmicos simulados. Las probabilidades de alcanzar ciertos Estados Límites tienen el mismo orden que otras investigaciones simultáneas e independientes, lo cual puede indicar que la investigación de riesgo sísmico está convergiendo en las herramientas que serán útiles para las decisiones de riesgo, calibración de normas y códigos, así como para el diseño, construcción y rehabilitación de estructuras.

No 7. Bermúdez (2010), se planteó evaluar la vulnerabilidad sísmica de los principales tipos de edificios de acero, estudiando el comportamiento no lineal y haciendo énfasis en analizar la plastificación en los edificios de acero hasta alcanzar niveles de deformación asociados a colapso, y en estudiar las fuentes de degradación de resistencia que pueden incidir en una falla más temprana de la estructura. Se utilizó el enfoque probabilístico para analizar el daño sísmico observado en edificios de acero y se intenta precisar la vulnerabilidad sísmica propia de cada tipología estructural de acero.

En esta investigación confluyen tres enfoques distintos para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras de acero. El primero es el de la vulnerabilidad observada en sismos pasados, el segundo es el de la vulnerabilidad calculada a partir de análisis estructurales no lineales, tanto estáticos como dinámicos, de acuerdo con los métodos convencionales para estos análisis; y el tercero es la evaluación de la vulnerabilidad a través de la evaluación probabilística de los procedimientos de cálculo estructural.

De acuerdo con los resultados obtenidos, Bermúdez observó que la altura de los edificios de acero es un factor determinante de su vulnerabilidad sísmica. La configuración estructural de pórticos arriostrados resultó muy ventajosa en el caso de los edificios de baja altura mientras que el sistema de pórticos resistentes a momento brinda más seguridad estructural en el caso de los pórticos de gran altura. Consecuentemente en el caso de los pórticos de altura media la vulnerabilidad sísmica de los dos sistemas es similar. Los umbrales de colapso de los edificios altos y medianos arriostrados, en términos de su desplazamiento espectral, fueron inferiores a los de los edificios resistentes a momento de la misma altura, en clara contradicción con HAZUS 99 que presenta el mismo umbral de colapso para edificios de la misma altura sin tener en cuenta el sistema estructural. El análisis dinámico no lineal aplicado según los criterios de Eurocódigo 8, permitió confirmar que, como se había observado en el análisis estático no lineal, en los edificios arriostrados puede ocurrir una falla muy temprana producto de la concentración de la plastificación en las plantas más vulnerables.

La evaluación probabilística realizada de los requerimientos contenidos en la NSR-98 demostró que, aunque una estructura esté cuidadosamente dimensionada de acuerdo con dichos requerimientos, cuando se tiene en cuenta la variabilidad de los parámetros de resistencia y de carga se pueden encontrar probabilidades de excedencia supe-

riores a las consideradas aceptables en el proyecto, por el efecto de la propagación de la incertidumbre.

CONCLUSIONES

Todos las investigaciones apuntan en una misma dirección: el análisis y diseño estructural tienen sentido práctico en la medida que la demanda a la que pueda ser sometida una estructura, tenga respuesta adecuada en la capacidad que le proporciona un diseño estructural eficiente. Específicamente, el enfoque del análisis y diseño estructural en acero puede dividirse en enfoques deterministas elásticos y plásticos, enfoques probabilísticos basados en los estados límites de cada miembro estructural y enfoques de confiabilidad basados en estados límites del sistema estructural en su conjunto. Desde el punto de vista histórico, el diseño determinístico fue el más usado hasta hace veinte años. Hoy prevalece el diseño probabilístico basado en Estados Límites de los miembros estructurales y la mayoría de los códigos internacionales basan sus requerimientos en este enfoque o se encuentran en proceso de adaptación.

La gravedad de los daños que un sismo induce a un edificio depende de la vulnerabilidad sísmica de dicha estructura y de la intensidad de dicho evento. La vulnerabilidad es controlada por el nivel general de desempeño de la estructura, lo que a su vez podría ser una función de la deriva de entrepiso, las rotaciones plásticas o las fuerzas sobre los miembros. La aceleración sísmica causa la respuesta del edificio en forma de deformaciones, desplazamientos y sobrecargas, todo lo cual representa sollicitaciones (demandas) adicionales sobre la estructura. Si es posible predecir con cierto grado de certeza tanto las sollicitaciones producidas por el sismo como la capacidad de respuesta de la estructura para soportar tal demanda, los edificios pueden ser proyectados con un nivel adecuado de confiabilidad en su desempeño.

Si se unen las actuales demandas de desempeño de una edificación con el desarrollo del análisis de estructuras que permiten simulaciones y modelos matemáticos cada vez más sofisticados, podemos comenzar a cuestionar la validez de los métodos probabilistas que revisan individualmente cada miembro de una estructura.

Se plantean incompatibilidades en los siguientes aspectos: En principio se usa análisis elástico para obtener los resultantes, sin considerar la plasticidad del material. Pero seguidamente se consideran los Estados Límites elasto-plásticos de los miembros estructurales, considerando por lo tanto la plasticidad del material. Esta incompatibilidad significa que las resultantes en los elementos que se obtienen en LRFD no son lo suficientemente reales.

Los modos de inestabilidad asumidos en LRFD son incompatibles con los modos de inestabilidad global que ocurren realmente. La hipótesis básica en la determinación del pandeo en pórticos de acero es que el pandeo ocurre simultáneamente en todas las columnas del mismo nivel, lo cual se contradice con el hecho que solo columnas individuales de un mismo nivel concurren al modo elasto-plástico inicialmente. Esto significa que el efecto de la inestabilidad

de una estructura es determinado por un valor empírico de longitud efectiva para columnas de un portico según el método LRFD, pero dicha longitud efectiva no puede reflejar las restricciones inelásticas entre miembros estructurales relacionados entre ellos.

El hecho que los métodos LRFD busquen obtener un comportamiento estructural adecuado para cada miembro de una estructura, implica que no puede considerarse variables asociadas al sistema estructural como un todo. Los métodos LRFD tienen como objetivo asegurar el funcionamiento

del elemento, no de la estructura. La estructura será eficiente en la medida que todos los miembros lo sean, pero en este tipo de análisis no se consideran factores como ductilidad de la estructura, redundancia, forma estructural y correlación entre cargas y resistencia estructural combinadas.

Estas incompatibilidades pueden resultar en un diseño estructural no lo suficientemente realista, con valores de confiabilidad de desempeño desconocidos o menos exactos de lo que se quisiera.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AIS. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, Colombia. 1998.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Inc. Seismic provisions for structural steel buildings. AISC, Chicago, IL. 2005.

ANNAN, C. D., YOUSSEF, M. A. & EI N. "Seismic Vulnerability Assessment of Modular Steel Buildings". Journal of Earthquake Engineering. 2009 Vol 13: No 8. p. 1065 — 1088. 2009

BERMUDEZ MEJIA, Carlos Alberto. "Vulnerabilidad sísmica de edificios de acero". Directores: Alex Barbat Barbat & Lluís Pujades. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. 2010.

ELGHAZOULI, A.Y. "Assessment of European seismic design procedures for steel framed structures". Bull Earthquake Eng. 2009. DOI 10.1007/s10518-009-9125-6.

EMS 98. European Macroseismic Scale 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Luxembourg. 1998.

EUROPEAN STANDARD NORM. Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels. European Committee for standardization. 1998.

EUROPEAN STANDARD NORM. Eurocode 3: design of steel structures. Part 1: general rules and rules for buildings. Brussels. European Committee for standardization. 2005.

FEMA, NIBS. Earthquake Loss Estimation Methodology (HAZUS 99). Federal Emergency Management Agency y

National Institute of Building Sciences. Washington, D.C., USA. 1999.

LI, Guo-Giang & LI, Jin-Jun. Advanced analysis and design of steel frames. 1ra edición, London U.K. John Wiley & Sons LTD. 2007. 368 p.

LIEW, J. Y. R., WHITE, D. W. & CHEN, W. F. *Beam-column design in steel frameworks - insight on current methods and trends*. Journal of constructional steel research. 1991. Vol 18. No 4. p 269-308.

LONGO, Alessandra, MONTUORI, Rosario & PILUSO, Vincenzo. "Seismic reliability of V-braced frames: Influence of design Methodologies". Earthquake engineering and structural dynamics. 2009. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/eqe.919. 2009

NBCC. National Building Code of Canada, Institute for Research in Construction. National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, Canada. 2005.

ROMAO, Xavier, DELGADO, Raimundo, GUEDES, João & COSTA, Anibal. "A comparative application of different EC8-3 procedures for the seismic safety assessment of existing structures". Bull Earthquake Eng. 2009 DOI 10.1007/s10518-009-9123-8.

SONG, Jianlin & ELLINGWOOD, Bruce R. "Seismic Reliability of Special Moment Steel Frames with Welded Connections: I". Journal of structural engineering. 2009. Vol 125 No 4. April 2009. Paper No 18266

SONG, Jianlin & ELLINGWOOD, Bruce R. "Seismic Reliability of Special Moment Steel Frames with Welded Connections: II". Journal of structural engineering. 2009. Vol 125 No 4. April 2009. Paper No 18267.