

Capítulo 13

Conclusiones y Recomendaciones

Esta memoria ha quedado estructurada en tres grandes bloques. Tras una breve introducción, una primera parte ha recogido los aspectos conceptuales y metodológicos relacionados con los contenidos de esta investigación, de forma que se ha establecido el marco para los desarrollos y aplicaciones posteriores. La segunda parte se ha dedicado al análisis detallado del comportamiento sísmico esperado de los edificios situados en una ciudad caracterizada por una amenaza sísmica alta. El desarrollo y aplicación de métodos y técnicas avanzadas de análisis del desempeño, vulnerabilidad y fragilidad de las edificaciones ha permitido establecer, de forma cuantitativa, la importancia que, para la minoración del riesgo sísmico, tiene el diseño y construcción sismorresistente. La tercera parte se ha dedicado a analizar el riesgo sísmico de una ciudad, que por hallarse situada en un entorno de amenaza sísmica entre moderada y baja, no ha incorporado en sus costumbres y hábitos constructivos, ninguna conciencia ni precaución sísmica, lo que ha resultado en una elevada vulnerabilidad y fragilidad de sus edificios y, por lo tanto, en un riesgo considerable. Otro de los aspectos clave de este trabajo, ha sido la consideración estocástica del estudio, que permite tener en cuenta, de forma natural, las incertidumbres en la acción dinámica, en las características materiales y estructurales de los edificios y, en consecuencia en los resultados obtenidos. Diversos análisis de sensibilidad han permitido constatar, una vez más, la importancia de una correcta y ajustada definición de la acción sísmica, que, en caso de ser posible, debe fundamentarse en los acelerogramas registrados en la zona de estudio. La ciudad de Manizales en Colombia ha sido uno de los escenarios que ha permitido una aplicación clara de la importancia de preferir espectros compatibles con las acciones reales sobre otros espectros generales que promedian una gran cantidad de información y que, finalmente, pueden llegar a no ser representativas de ninguna, y nos referimos, incluso a los espectros de respuesta simplificados que proveen las normativas y códigos de diseño sísmico. Esta elevada sensibilidad de los resultados a las características de la acción ha quedado también patente en el otro escenario elegido, Barcelona.

Así, este último capítulo pretende ser de síntesis y reflexión final. En él se

presentan las conclusiones más relevantes relacionadas con los conceptos y métodos para la evaluación del desempeño y la vulnerabilidad sísmica de edificios en entornos urbanos, pero también con su aplicación a los dos casos concretos que han sido analizados en detalle: 1) los edificios porticados de hormigón armado de la ciudad de Manizales, situada en una zona de amenaza sísmica alta y 2) los edificios de mampostería no reforzada típicos de la ciudad de Barcelona, situada en una zona de amenaza sísmica que se considera entre moderada y baja.

Por otra parte, durante el trayecto de una investigación, nace un número importante de nuevas inquietudes, las trazas del estudio se ramifican, y es imprescindible optar por seguir determinadas líneas que se prefieren a otras por apuntar más directamente hacia los objetivos trazados. El tiempo y el espacio, son necesariamente limitados. Ahora es quizás el momento también de destacar el alcance de los objetivos conseguidos y anotar aquellas líneas que apuntan hacia objetivos valiosos que es conveniente perseguir en futuros estudios. Así se presenta también una serie de recomendaciones y futuros trabajos de investigación que consideramos pueden complementar los hasta aquí realizados y contribuir a su progreso de una forma natural.

13.1 Conclusiones

Se presenta, a continuación, las principales conclusiones que hacen referencia a cada uno de los tres bloques en qué se ha estructurado esta memoria.

13.1.1 Conceptos y métodos

Vulnerabilidad y daño sísmicos

Del análisis detallado de las diferentes metodologías existentes para la evaluación de la vulnerabilidad y el daño sísmico, se concluye que:

- En términos absolutos, no existe un método óptimo que proporcione resultados óptimos. Es necesario analizar los métodos a la luz de la información sísmica y estructural disponible, así como a la luz de los objetivos del estudio de riesgo. Este análisis orientará la elección del método más conveniente. El elegido para zonas de amenaza alta será distinto del elegido para zonas de amenaza limitada y el escogido para realizar estudios a escala local o urbana, será diferente del escogido para un análisis a escala regional o rural. En zonas de amenaza baja, habrá que suplir las limitaciones causadas por la ausencia de información sobre la acción sísmica y el comportamiento estructural, mediante, por ejemplo, el juicio de expertos y la simulación por ordenador. En las zonas con una actividad sísmica alta, es obligado afinar más, incorporando la mayor cantidad de información sísmica y estructural, de forma que tanto la acción

sísmica considerada, como los modelos estructurales definidos sean capaces de representar fielmente los escenarios sísmicos que, muy probablemente, se van a producir en un periodo relativamente breve. La urgencia en la reparación de los edificios detectados como altamente frágiles y vulnerables, sin duda se verá recompensada por la minoración de la siguiente, y posiblemente cercana, catástrofe anunciada.

- El valor de un parámetro o índice, como por ejemplo la "deriva entre piso", que se utiliza para cuantificar los efectos del sismo sobre una estructura, por sí solo, no conlleva la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Es necesario cualificar, "en términos lingüísticos", estados discretos de daño y establecer relaciones entre valores del parámetro escogido y los umbrales de los estados. Sólo de esta forma es posible identificar y comprender la severidad de los efectos producidos por los terremotos sobre los elementos estructurales y no estructurales, sobre los contenidos y sobre los ocupantes de los edificios siniestrados.
- Las curvas de fragilidad constituyen una excelente representación de la relación entre severidad del sismo y daño. De forma natural permiten la obtención de matrices de probabilidad de daño que, a su vez, son de gran utilidad para la generación de escenarios y mapas de daño sísmico. Estas representaciones espaciales del riesgo, mediante sistemas de información geográfica, tienen vocación inequívoca de herramienta útil para el desarrollo de planes de prevención, emergencia y atención de desastres.

El desempeño sísmico

Gran parte de la presente investigación sigue una nueva filosofía de diseño que se fundamenta, principalmente, en que el desempeño sísmico de un edificio, estructura o infraestructura ante diferentes niveles del movimiento sísmico, debe cumplir con los objetivos básicos del diseño. Los niveles de desempeño o estados de daño admisibles serán claramente distintos, por ejemplo, para un hospital sometido a una acción sísmica frecuente, que para un edificio de uso esporádico u ocasional sometido a una acción sísmica que, aunque severa, es poco frecuente. Estos niveles de desempeño admisibles deben ser verificados durante el diseño. En la actualidad existen varias propuestas para la evaluación del punto de desempeño, cada una de ellas presenta ventajas y limitaciones que deben ser evaluadas, para orientar la elección del método que mejor permita predecir el comportamiento del edificio o tipo de edificios, que se analizan, cuando se vean sometidos a una determinada demanda. A partir del análisis de las habilidades de los métodos descritos en este trabajo y de su aplicación a la evaluación del desempeño sísmico de edificios de hormigón armado y mampostería no reforzada, se concluye que:

- El punto de desempeño de un edificio, definido como el punto de intersección de los espectros de capacidad y de demanda, se puede determinar a partir de

modelos sencillos de un grado de libertad. Estos modelos pueden representar, razonablemente bien, el comportamiento dinámico de estructuras de múltiples grados de libertad, más allá del límite elástico. Sin embargo, para estructuras cuyos modos más altos son significativos, estos métodos, como por ejemplo, el análisis "pushover", no son totalmente adecuados, ya que consideran que la forma de desplazamiento es independiente del tiempo y, por lo tanto, pueden no detectar las debilidades estructurales que pueden generarse cuando las propiedades dinámicas de la estructura cambian una vez se ha producido el primer mecanismo plástico local. Este fenómeno puede ser particularmente relevante, en edificios esbeltos de hormigón armado.

- Se han analizado con detalle, el método del espectro de capacidad, el método N2 y el método del coeficiente de desplazamiento. Todos ellos presentan una alta consistencia en los resultados obtenidos, que ha quedado patente en el análisis detallado de un edificio de hormigón armado de 5 niveles. Por lo tanto, se concluye que estos métodos constituyen una excelente herramienta para la aplicación práctica de la filosofía del diseño basado en el desempeño. Los casos aquí analizados y otras aplicaciones orientadas al análisis de vulnerabilidad y a la obtención de escenarios de riego en entornos urbanos, confirman esta apreciación.

Comportamiento sísmico de edificios

De hecho, el comportamiento y desempeño final de un edificio, cuando se ve sometido a una acción dinámica severa, está fuertemente condicionado por las tres etapas fundamentales de su proyecto y construcción, que son: el diseño, el detallado y la realización concreta de su construcción. Por lo tanto, los criterios, consideraciones y procedimientos empleados en cada una de estas etapas, permiten controlar el desempeño de los edificios. A continuación se describen las conclusiones más relevantes sobre los principales aspectos de estas tres etapas.

Etapa de diseño: Los estudios de patología estructural realizados después de la ocurrencia de un sismo intenso, demuestran que un gran porcentaje de los daños registrados, podrían haber sido evitados, mediante el uso adecuado de los criterios contemplados en las normativas de diseño sismorresistente. La omisión y el desconocimiento de estos criterios, aumentan, considerablemente, la vulnerabilidad de los edificios y favorece un desempeño deficiente. A continuación se presentan algunas reflexiones que deben tenerse en cuenta en la etapa de diseño:

- Para una adecuada transmisión de las cargas, desde los elementos estructurales que las reciben, hasta los elementos de fundación, es necesario evitar las discontinuidades del sistema resistente de cargas laterales y verticales.

- El diseño de edificios, debe estar orientado hacia el uso de configuraciones arquitectónicas y estructurales regulares, de tal forma, que se eviten efectos como la torsión, o como los mecanismos de fallo típicos de "piso débil". Estos efectos distorsionan por completo la respuesta de los edificios y reducen drásticamente su capacidad para disipar energía, aumentando su fragilidad y probabilidad de colapso.
- Los edificios deben dimensionarse de tal forma que sean consistentes con el modo de deformación inelástico esperado. Las acciones consideradas en el diseño deben ser consistentes con el nivel de amenaza sísmica. Para estas acciones, cada uno de los elementos del edificio, debe ser capaz de alcanzar la resistencia adecuada.
- La resistencia y la tenacidad deben desarrollarse no sólo dentro de los propios elementos estructurales, sino también en las conexiones entre ellos. Por lo tanto, los anclajes y las conexiones en los edificios, y en particular en los de hormigón armado, deben diseñarse para transmitir adecuadamente los esfuerzos que llegan a estas zonas del edificio. Así por ejemplo, la resistencia de una conexión debe ser mayor que la resistencia máxima de las columnas y vigas que llegan a ella, de lo contrario, se produce un fallo de ésta, que puede producir el colapso parcial o total del edificio.
- En edificios de mampostería no reforzada, deben evitarse los diseños arquitectónicos que generen zonas de concentración de esfuerzos excesivos, ya que estos pueden producir un mecanismo de fallo. Un caso típico son las fachadas de los edificios que tienen un gran número de ventanas y puertas. En este caso, cuando el edificio se ve sometido a un sismo intenso y debido a la gran cantidad de aberturas, la capacidad del muro disminuye drásticamente y se producen agrietamientos severos en las zonas del muro que se encuentran entre aberturas, haciéndolo también propenso al colapso.

Etapas de detallado:

- El comportamiento de los edificios cuando se ven sometidos a una determinada acción sísmica, depende de su ductilidad, es decir, de su capacidad para disipar energía cuando la estructura ingresa en el rango inelástico. Por lo general, los edificios de hormigón armado bien diseñados, poseen una ductilidad mucho mayor que los edificios de mampostería no reforzada. No obstante, para garantizar un buen nivel de ductilidad en los edificios de HA, conviene ciertas consideraciones en el detallado, como por ejemplo: 1) secciones doblemente reforzadas, preferiblemente con refuerzo simétrico, 2) buen confinamiento del hormigón proporcionado por una separación pequeña entre los estribos o los aros de refuerzo transversal, 3) disposición de los traslapes de los aceros, que

deben estar lo más alejados posible de las conexiones y de las zonas de máxima sollicitación y 4) refuerzo longitudinal continuo al interior de las conexiones.

- En el caso de los edificios de mampostería no reforzada, la importancia del detallado radica básicamente en el diseño adecuado de las conexiones. Así por ejemplo, para evitar que se produzca un fallo fuera del plano, es necesario garantizar un buen anclaje de los muros a los diafragmas de piso y techo. De igual forma es necesario garantizar la conexión y el anclaje de los elementos no estructurales, así como la conexión entre muros perpendiculares.

Etapa constructiva: El proceso constructivo debe garantizar el cumplimiento de las consideraciones y criterios utilizados en el diseño. Así por ejemplo, si un edificio fue considerado como aislado, deben utilizarse juntas de separación, que eviten posibles efectos de impacto con las estructuras vecinas. La adecuada supervisión y control de la realización práctica de la obra, son imprescindibles para el éxito de los esfuerzos realizados en las fases de diseño y detallado.

13.1.2 Aplicación a zonas de sismicidad alta

La segunda parte de este trabajo se dedica a la evaluación del desempeño y vulnerabilidad sísmica de edificios porticados de hormigón armado. Los edificios analizados, son típicos de la ciudad de Manizales (Colombia) que está situada en una zona de actividad sísmica alta, y se ha visto afectada por grandes sismos y catástrofes naturales. Por lo tanto, en esta zona se dispone de registros de aceleración que han permitido el análisis detallado de los efectos debidos a la amenaza sísmica. Por otra parte se ha recopilado información de alta calidad sobre las características estructurales de los edificios de la ciudad. Todo ello ha permitido avanzar en la caracterización de la vulnerabilidad y fragilidad de los edificios cuando se ven sometidos a acciones sísmicas típicas de la zona.

A continuación se presentan las conclusiones más relevantes referentes a la amenaza, los edificios y al método de evaluación del daño.

La demanda sísmica

Los códigos y los métodos simplificados de análisis estático no lineal, utilizan los espectros de respuesta suavizados, para representar la demanda sísmica. Estos espectros, quieren representar un promedio de la respuesta de la estructura a las acciones sísmicas esperadas en el lugar de su emplazamiento. En general, los códigos pretenden representar regiones extensas, normalmente de ámbito nacional, o incluso supranacional como por ejemplo el Eurocódigo, por lo que la ventaja de generalidad viene gravada por la servidumbre de la poca representatividad específica hasta el punto que pueden ser "poco realistas" en el sentido que no representan la forma de los espectros de respuesta de los sismos reales esperados en un lugar concreto.

Este efecto puede ser dramático en zonas de sismicidad moderada o baja. Para documentar y contrastar estas observaciones, en el caso de Manizales, ha sido posible desarrollar un modelo estocástico específico, a partir de acelerogramas registrados en la zona, que ha sido utilizado para generar acelerogramas sintéticos, que representen de forma adecuada la demanda sísmica, cuyos espectros de respuesta, a su vez, se utilizan para determinar el nivel de desempeño. De la comparación de los resultados obtenidos utilizando los espectros de norma y espectros específicos, se concluye que:

- El uso de espectros de respuesta de normas de diseño, constituye sólo una primera aproximación a la estimación del punto de desempeño sísmico de edificios.
- Los resultados obtenidos cuando se emplean espectros de acciones sísmicas ocurridas en el lugar, o compatibles con ellas, ponen de manifiesto que, por ejemplo, para estructuras con períodos medios y altos, el uso de los espectros previstos en la norma, puede llegar a sobreestimar en más de un 50%, el valor de la demanda de desplazamiento espectral de un edificio. Esta sobreestima, que en este caso sitúa a la norma del lado conservador, se debe básicamente al ancho del rango de periodos de aceleración constante y a una caída excesivamente suave en la zona de velocidad constante. Ambos aspectos resultan en un ancho de banda excesivo.
- Por el contrario, en el caso de edificios con períodos bajos, se puede subestimar la respuesta del edificio, fundamentalmente debido a un escorado hacia los períodos altos de la zona de aceleración constante, y a la subestima de la respuesta espectral en la misma zona.

Los edificios

Un gran porcentaje de los edificios existentes, particularmente en los entornos urbanos, carece de cualquier tipo de consideración sismorresistente, debido a que fueron diseñados y construidos mucho antes de la aparición de los primeros códigos y normativas de diseño. A partir de la comparación del desempeño sísmico de los edificios con y sin diseño sismorresistente de la ciudad de Manizales, se concluye que:

- El desempeño sísmico de los edificios porticados de HA mejora considerablemente cuando se consideran las prescripciones de diseño previstas en las normativas, como es de esperar. Los daños estructurales esperados se reducen hasta en un grado de daño y desaparece la probabilidad de que se presente el colapso.
- Los edificios con diseño sismorresistente, de 9 y 13 niveles, considerados como altos, cumplen los objetivos básicos de las normativas colombianas correspondientes al movimiento sísmico de diseño. Sin embargo, el desempeño de los

edificios de elevación media (5 niveles), es inadmisibles, sugiriendo, con claridad, que es urgente dotar a este tipo de edificios de nuevas medidas de protección sísmica.

El método

Para evaluar el daño sísmico de los edificios de hormigón armado de Manizales, se han utilizado dos métodos: el primero, es un método simplificado, en el que, el daño se determina a partir de un análisis estático no lineal y la demanda sísmica se representa por medio de un espectro de respuesta. El segundo consiste en un análisis dinámico no lineal de la estructura usando historias temporales de aceleración para definir la demanda sísmica. Las conclusiones más relevantes que se derivan de los resultados obtenidos son:

- Los niveles de daño predichos por ambos métodos pueden llegar a diferir hasta en un grado. Es decir que, para un mismo edificio, mientras el método simplificado predice un estado de daño severo, con el otro método se prevé un daño moderado.
- Por lo tanto, en este caso, puede considerarse que el método simplificado es conservador y puede razonablemente ser utilizado para el diseño de estructuras convencionales.
- El segundo método, más sofisticado, es sin duda el más adecuado para evaluar la respuesta sísmica y el daño, ya que incorpora la variación temporal de las propiedades estructurales y representa la acción sísmica mediante acelerogramas.
- El esfuerzo que requieren estos métodos de análisis no lineal, aconsejan también, incorporar las incertidumbres en la amenaza y en los parámetros estructurales, de forma que los resultados obtenidos tengan el carácter estocástico de este tipo de problemas.

13.1.3 Aplicación a zonas de sismicidad moderada

Se ha evaluado el desempeño y la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería no reforzada típicos del distrito de "l'Eixample" en Barcelona, como un ejemplo típico de ciudad moderna situada en una zona de amenaza moderada. La acción sísmica se ha considerado mediante espectros de respuesta y el análisis se ha realizado para los siguientes casos: el espectro de diseño que la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 provee para la ciudad para un periodo de retorno de 500 años; dos espectros específicos obtenidos por el ICC. Los espectros provistos por el ICC son representativos de la amenaza sísmica máxima probable esperada en la ciudad (método determinista) y de la amenaza sísmica con una probabilidad de

ocurrencia del 10% en 50 años, o con un periodo de retorno de 475 años (método probabilista).

Los resultados obtenidos en el análisis de daño en este tipo de edificios, para los tres casos de amenaza, apuntan hacia las siguientes conclusiones, que como en el caso de escenarios en zonas de amenaza alta, se han agrupado según se refieran a la amenaza, los edificios y el método.

La demanda

- Existen diferencias significativas entre los tres espectros de respuesta utilizados para analizar posibles escenarios sísmicos en la ciudad. Las diferencias entre los escenarios determinista y probabilista son razonables puesto que su significado es diferente. Sin embargo, el escenario previsto por la normativa sísmica, debiera ser aproximadamente el mismo que el previsto en el caso probabilista. Su significado es el mismo.
- Las diferencias se dan, básicamente, en el nivel de aceleración y anchura, previstos para la zona de aceleración constante, y en su decaimiento en la zona de velocidad constante. El espectro del caso probabilista es más ancho y más alto que el correspondiente al prescrito en la NCSE-02.
- Así pues, a pesar de la inexistencia de datos de aceleración, el uso de técnicas de ingeniería sísmológica ha permitido obtener espectros de respuesta específicos, que confirman las conclusiones obtenidas en zonas de amenaza alta.
- Por lo tanto, en general, es fundamental desarrollar espectros de demanda específicos, pero en particular, en zonas de acumulación de riesgo. En caso de ausencia de datos de aceleración real es conveniente acudir a otras técnicas sísmológicas que aproximen el espectro a utilizar, al realmente esperado en la zona.

Los edificios

En este apartado se recogen las conclusiones referentes a la capacidad y el daño esperado en los edificios.

En referencia a la capacidad, el aspecto más relevante alude a las enormes incertidumbres involucradas en el análisis de edificios de mampostería, muchos de ellos centenarios, construidos con técnicas y materiales inciertos. Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la construcción de los edificios de mampostería no reforzada de "l'Eixample" son altamente inciertas, debido que éstas eran determinadas de forma empírica. Sólo a partir de 1920, año en el cual comienza a funcionar el laboratorio de ensayos de la Universidad Industrial de Barcelona, se empiezan a determinar experimentalmente algunas de las propiedades de los materiales típicos utilizados en la construcción de edificios. Por lo tanto, para considerar estas

incertidumbres, se ha utilizado las técnicas de simulación por ordenador. De los resultados obtenidos en la obtención del espectro de capacidad y sus implicaciones en el cálculo del punto de desempeño, se concluye que:

- Se observa una importante dispersión entre el espectro medio de capacidad y los correspondientes a una desviación estándar. Estas diferencias se traducen en un daño esperado con una incertidumbre considerable.
- El nivel de desempeño sísmico correspondiente al espectro medio de capacidad varía hasta en un grado de daño con relación a los espectros correspondientes al valor medio, más / menos una desviación estándar. Así pues, es evidente que los métodos utilizados para la determinación del desempeño sísmico, son sensibles a las incertidumbres en los parámetros estructurales. Por lo tanto, ante la ausencia de información confiable, los métodos para la evaluación del daño, deben considerar el rango de variación del nivel de desempeño sísmico de los edificios. Para garantizar el cumplimiento de los objetivos básicos de diseño, para todos los casos posibles, es muy aconsejable verificar las condiciones más extremas.
- La capacidad sísmica de los edificios de mampostería no reforzada de l'Eixample, disminuye con el número de niveles. Por lo tanto el daño esperado en los edificios altos, es mucho mayor que en los edificios de elevación media y baja. En consecuencia, se desaconseja totalmente la mampostería no reforzada en edificios esbeltos situados en zonas de amenaza sísmica moderada o alta, por causa de su elevada vulnerabilidad.

En referencia al daño, el factor más relevante se refiere a las diferencias observadas entre los escenarios probabilista y el previsto en la NCSE-02, que debieran ser similares. Estas diferencias en el daño esperado se deben a la forma del espectro de demanda. Las principales conclusiones son:

- El punto de desempeño de los edificios de mampostería no reforzada de l'Eixample, previsto en los casos NCSE-02 y determinista, permanece dentro del rango elástico y, por lo tanto, para estos dos escenarios, se espera un suficiente margen de seguridad que garantiza el cumplimiento de los objetivos básicos de diseño propuestos en la normativa española.
- Sin embargo, los mismos edificios, pueden llegar a un comportamiento de precolapso, para el escenario probabilista. Así pues, es probable que un alto porcentaje de los edificios existentes, presenten daños severos y, por lo tanto, no cumplan con el objetivo básico de diseño de preservar la vida de los ocupantes y reducir los daños en los edificios.

- El escenario probabilista es el más desfavorable. Los daños esperados se hallan entre los estados de daño moderado y severo. Los escenarios producidos por la demanda prevista en la NCSE-02 y en el caso determinista prevén daños entre leves y moderados.
- En consecuencia, son altamente aconsejables, el desarrollo e implementación de técnicas de reforzamiento que reduzcan la alta vulnerabilidad de estos edificios. Ello sin duda disminuiría la probabilidad de ocurrencia de daños en los edificios y en la población por causa sísmica.

13.1.4 Otros aspectos metodológicos

Las diferencias observadas en los resultados en función de los escenarios y de las incertidumbres en los parámetros estructurales, han motivado la realización de un análisis de sensibilidad que se ha centrado, en la repercusión que sobre el daño esperado tienen pequeñas variaciones en los espectros de demanda.

Los espectros suavizados, presentan dos zonas típicas que definen sus principales características espectrales: la zona de aceleración constante y la zona de velocidad constante. Además del nivel de la zona de aceleración constante, el período (T_C) que las separa y el parámetro que controla la caída del espectro en la zona de velocidad constante (d), influyen considerablemente en la determinación de la demanda de desplazamiento. Se ha analizado la influencia de las variaciones en cada uno de estos dos últimos parámetros, sobre el nivel de desempeño de las estructuras. El análisis se ha efectuado, en un primer paso considerando T_C constante, variando d variable entre 1.0 y 1.43. En un segundo paso se ha considerado d constante y se ha hecho variar T_C entre 0.22 y 0.40 s. De la evaluación del nivel de desempeño sísmico para cada uno de los espectros de respuesta generados a partir de estas combinaciones, se concluye:

- Variaciones del orden del 20% en el ancho de la zona de aceleración constante producen diferencias entre el 30% y el 50% en las probabilidades de los estados discretos de daño.
- Variaciones del 10% en el valor del exponente " d ", que controla el decaimiento de la aceleración espectral a partir de T_C , producen diferencias entre el 15% y el 60% en las probabilidades de los estados de daño.
- Así pues, los métodos utilizados para la determinación del punto de desempeño de edificios, son muy sensibles a la forma del espectro de demanda, el cual está controlado, en el caso de los espectros de diseño, por los parámetros T_C y d .
- Por lo tanto, y en particular en zonas con amenaza sísmica baja o moderada, es necesario superar las limitaciones impuestas por la cantidad y calidad de la información disponible, utilizando la ingeniería sismológica para afinar en

la predicción de la aceleración local esperada y aplicar técnicas de simulación que permitan incorporar, al método utilizado para el cálculo de los espectros de respuesta, las altas incertidumbres en los parámetros sísmicos.

- También la demanda sísmica se debe representar mediante un espectro de respuesta medio, acompañado de sus correspondientes desviaciones típica u otros parámetros estadísticos que reflejen los niveles de confianza y su carácter estocástico.

Otro aspecto metodológico importante se refiere a la caracterización y definición de los umbrales de los estados de daño. Sin duda, la correspondencia entre la demanda de desplazamiento, el daño y la adopción, razonable, conveniente y útil, de unos estados de daño, requiere la definición de ciertos umbrales, a partir de los cuales, es posible relacionar los intervalos de variación de un parámetro o índice de daño, con los estados discretos de daño. En este trabajo, se han analizado dos tipos de umbrales diferentes, que conducen a las siguientes conclusiones:

- La distribución del daño global es sensible a la definición de los umbrales de daño, por lo tanto, éstos deben ser definidos a partir de la experimentación y, cuando sea posible, utilizando levantamientos de daño después de ocurrido un sismo.
- Las expresiones simplificadas desarrolladas para la determinación de los umbrales de daño, deben ser utilizadas con precaución y deben estar acompañadas del juicio de expertos, que controlen la adecuación y fiabilidad de los resultados obtenidos. En cualquier caso, de nuevo es conveniente contrastar los resultados obtenidos con los observados en crisis sísmicas y experimentos.

13.1.5 Escenarios y mapas

Este tipo de estudios, tiene una clara vocación de aplicación a la minoración del daño y, por lo tanto, de la incidencia que sobre la población tienen las crisis sísmicas. Por lo tanto de ellos se deben derivar una serie de productos, que es muy conveniente sean manejados por personal involucrado en tareas de ordenación territorial, protección civil y planificación y gestión de emergencias, entre otras. Este personal, frecuentemente no es especialista en temas ingenieriles y conviene que la información les llegue de forma llana, clara y fácilmente accesible.

Por lo tanto, los estudios de vulnerabilidad y daño sísmico deben ser capaces de generar expresiones simplificadas que puedan ser utilizadas para la generación, entre otros, de cuadros estadísticos simplificados y de escenarios y mapas de daño sísmicos.

Una contribución relevante de este trabajo, ha consistido en el desarrollo de expresiones simplificadas finales, o funciones de fragilidad, que permiten evaluar la

vulnerabilidad sísmica de edificios porticados de hormigón armado y de mampostería no reforzada. Además, se han establecido procedimientos simplificados que permiten hallar el punto de desempeño de este tipo de edificios a partir del binomio capacidad-demanda. Como resultado, fluye de manera natural la obtención de matrices de probabilidad de daño, que evalúan la probabilidad de exceder o igualar un cierto estado de daño para un cierto valor del parámetro que caracteriza la acción sísmica. En nuestro caso la intensidad de la acción sísmica se ha cuantificado mediante la aceleración máxima del terreno, y el desplazamiento espectral. Las matrices de probabilidad de daño, obtenidas para los diferentes escenarios considerados en las ciudades de Manizales y de Barcelona, han permitido obtener las distribuciones estadísticas del daño y generar mapas que representan la distribución espacial del daño. Este es un excelente producto, directamente transferible a las autoridades con responsabilidades en la protección ciudadana y gestión de emergencias.

13.2 Recomendaciones y futuros trabajos de investigación

Las metodologías desarrolladas en este trabajo, constituyen un avance significativo para los estudios globales de evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios en entornos urbanos. La capacidad de estas metodologías para representar el comportamiento "real" de los edificios, cuando se ven sometidos a una determinada acción sísmica, depende fundamentalmente de los siguientes factores: 1) la cantidad y calidad de la información utilizada para definir los modelos que representan la acción sísmica y los edificios, 2) el tipo de análisis utilizado para evaluar la respuesta de los edificios y 3) las suposiciones y simplificaciones realizadas. Por lo tanto, los esfuerzos para mejorar la estimación real del daño en edificios, aplicando las metodologías desarrolladas en este trabajo, deben estar orientados hacia los siguientes aspectos:

- Obtener funciones de distribución de probabilidad que representen la variación de las principales variables que controlan tanto la acción sísmica como la respuesta de los edificios, a partir de datos experimentales disponibles.
- Realizar ensayos de laboratorio para determinar experimentalmente los umbrales de daño de los edificios típicos de las ciudades de Manizales y Barcelona, es decir, que permitan correlacionar los intervalos de variación de un parámetro o índice de daño, con los estados discretos de daño.
- Aplicar a la ciudad de Barcelona, los procedimientos que, como los que se han utilizado para el caso de Manizales, tienen en cuenta los aspectos estocásticos involucrados en la demanda y en la capacidad sísmica. Es ampliamente reconocido, que el análisis dinámico no lineal es la mejor forma de cuantificar la

respuesta de los edificios ante sismos intensos. La ausencia de acelerogramas en Barcelona, se puede suplir adecuadamente mediante la generación de historias temporales de aceleración compatibles con espectros de respuesta obtenidos mediante ingeniería sísmológica, como por ejemplo, los propuestos por el ICC.

- Los edificios de mampostería no reforzada de l'Eixample que se han modelado en este trabajo, han sido analizados como estructuras aisladas. No obstante, en realidad, estos edificios no cuentan con juntas de separación entre edificios colindantes, y las agrupaciones que pueden llegar a constituir una manzana completa, son ilustrativamente llamadas por el propio ayuntamiento como estructuras monolíticas. Por lo tanto, se recomienda modelar una manzana completa de l'Eixample y evaluar su comportamiento sísmico, para observar la respuesta de todo el conjunto de edificios y compararla con el análisis de cada edificio por separado.
- Un planteamiento que resalte las características altamente estocásticas de los fenómenos y estructuras involucradas debe conducir a la obtención de las funciones de distribución de probabilidad y los estadísticos de los parámetros que definen: 1) las expresiones simplificadas para la evaluación de la distribución del daño, esto es, el valor medio del desplazamiento espectral $\overline{S_{d,EDi}}$ y la desviación estándar β_{EDi} del logaritmo natural de S_d para cada estado de daño, ED_i . 2) los parámetros que caracterizan la representación bilineal del espectro de capacidad, es decir, las coordenadas del punto de cedencia (D_y, A_y) y de capacidad última (D_u, A_u) y 3) el punto de desempeño, es decir, la demanda de desplazamiento y aceleración espectral $(S_{dp}$ y $S_{ap})$.
- Lógicamente, lo mismo cabría esperar de los parámetros que definen la demanda sísmica. Tanto los valores del tramo de aceleración constante, su anchura y su decaimiento en el tramo de velocidad constante, deberían ir acompañados de los intervalos de confianza, por ejemplo del 95%.
- De todas formas se reconoce también la necesidad de simplificar estos aspectos cuando de transmitir la información resultante con fines de establecer normativas de diseño y acciones orientadas a la planificación y gestión de la protección civil.

13.3 Epílogo

Este trabajo quiere ser un paso más orientado al progreso de la sociedad humana, en los aspectos de mejora de la seguridad y calidad de la vida en los entornos urbanos. Además de a las regiones con una alta amenaza sísmica, donde el fenómeno sísmico es reconocido como prioritario, se apunta directamente a los ambientes de amenaza moderada, donde la ausencia de "recuerdo sísmico" y de unas precauciones mínimas,

conduce a un aumento considerable del riesgo sísmico que, por otra parte sería relativamente sencillo de evitar.

A lo largo del siglo *XX*, hemos aprendido las causas de las catástrofes sísmicas, ojalá en el siglo *XXI*, seamos capaces de evitarlas!

