

Capitolo 9

Conclusioni

9.1 Analisi finale

Nonostante l'e recenti innovazioni nell'ingegneria sismica e strutturale, negli ultimi anni il tasso di mortalità è cresciuto insieme alle perdite di tipo economico dovute ai terremoti; le cause principali risiedono nella presenza e nella costruzione di strutture estremamente vulnerabili in zone ad elevata pericolosità rischio.

Molte strutture esistenti non hanno ricevuto una progettazione adeguata, e nonostante le norme antisismiche siano oggi più severe, l'aumento della popolazione nelle zone sismiche è la causa dell'aumento del rischio. Per sovvertire questa tendenza, riducendo il numero delle vittime da terremoto ed i danni economici, è necessario migliorare la progettazione delle strutture ed intervenire su quelle esistenti. Se non vengono applicati criteri antisismici nella verifica o nella progettazione, la fragilità e la vulnerabilità delle costruzioni risultano elevate e, quando ad esse si aggiunga una pericolosità significativa derivante dalla posizione, si ha come risultato un rischio sismico non trascurabile.

Secondo ricerche effettuate sui passati terremoti, risulta tuttavia che, in una stessa zona interessata da eventi sismici, edifici con una struttura portante simile abbiano subito livelli di danno diversi.

Molte strutture progettate in passato non possono contare su una capacità di deformazione e dissipazione dell'energia adeguate a rispondere alle sollecitazioni orizzontali in modo da garantire una resistenza che escluda un collasso strutturale.

Gli studi di vulnerabilità sismica sono essenziali per la previsione e la prevenzione dei danni causati da terremoti; soprattutto in quelle zone definite a rischio moderato, in cui lo sviluppo urbanistico presuppone un rischio maggiore.

La valutazione della vulnerabilità sismica è indispensabile negli studi di rischio sismico e qualunque intervento volto a ridurre il rischio deve tenerne conto necessariamente. In generale, esistono diversi metodi di valutazione del rischio sismico, ma perchè questo tipo di analisi sia affidabile, tenendo conto della quantità di informazioni necessarie, risulta appropriato l'uso di una metodologia probabilistica.

Nel caso concreto di Barcellona, la maggior parte degli edifici sono in cemento armato e muratura; sebbene Barcellona non si trovi in una zona ad alto rischio sismico, la maggior parte degli edifici - come prevedibile - si trova in condizioni di elevata vulnerabilità.

Questa tesi vuol essere un contributo alla valutazione di vulnerabilità e fragilità sismica degli edifici della città di Barcellona.

9.2 Riepilogo

Questo studio ha avuto inizio dalla ricerca di un metodo probabilistico per la valutazione del rischio sismico degli edifici. Il procedimento non è di facile

attuazione a causa della varietà di dati necessari per poter realizzare lo studio e, inoltre, è costituito da molte variabili tanto relative alla struttura quanto all'azione sismica.

Il metodo in questione si propone di valutare le strutture in modo realistico e, nello stesso tempo, conservare la sua semplicità senza dover ricorrere ad un'analisi dinamica di tipo non lineare, che risulterebbe onerosa e complessa. La procedura non utilizza metodi soggettivi basati sull'osservazione fisica della struttura o dati sintetici come ad esempio l'anno di costruzione, il numero di piani, la tipologia dell'edificio, etc. Si può affermare che questo metodo si trovi in un punto intermedio tra i metodi basati sull'indice di vulnerabilità e funzioni del danno ed il metodo basato nella costruzione di un modello completo dell'edificio e nell'analisi dettagliata del danno prodotto attraverso una simulazione numerica del suo comportamento dinamico. Nel primo metodo, l'azione sismica è definita attraverso l'intensità macrosismica; nelle simulazioni dinamiche l'azione si definisce invece attraverso accelerogrammi sintetici, artificiali o reali. Il metodo dello spettro di capacità è invece basato sulle nuove tecniche e procedure prestazionali. Esso rappresenta l'azione attraverso uno spettro di risposta (domanda) e la struttura con uno spettro di capacità e con curve di fragilità (prestazioni). Anche se ci troviamo di fronte ad un metodo semplificato, si tratta di un modello avanzato di tipo ingegneristico che ci permette affinare meglio tanto la definizione e caratterizzazione del terremoto quanto della struttura. La classificazione degli edifici secondo tipologie costruttive ci permette abbassare il costo di applicazione massiva a grandi città. I risultati ottenuti in diverse città europee, scelte come *banco di prova* del progetto RISK-UE, ed in particolare di Barcellona, sottolineano la versatilità ed efficacia di questo metodo in prospettiva futura.

I metodi basati sull'intensità sismica e sugli indici di vulnerabilità possono essere anch'essi utili ed efficaci, benchè definiscano l'azione sismica attraverso un solo parametro, quindi siano più limitati in questo senso. D'altra parte i metodi basati sull'analisi non-lineare risultano onerosi in termini di

modellazione, calcolo ed analisi dei risultati.

Per valutare la vulnerabilità e fragilità sismica si sono seguite le seguenti fasi:

- Si sono descritti i principali aspetti concettuali e metodologici relativi alla valutazione di vulnerabilità e rischio sismico di edifici in cemento armato e in muratura portante.
- Si è definita l'azione sismica mediante spettri di risposta e vibrogrammi sintetici compatibili, per diverse intensità sismiche e per diverse ubicazioni. Si è creato un set di accelerogrammi, contribuendo ad una raccolta rappresentativa di eventi possibili per Barcellona.
- Si è descritto con un certo livello di approfondimento un metodo per la valutazione di vulnerabilità e del rischio sismico che si basa su di una analisi statica non-lineare.
- Si è realizzata un'analisi di sensitività del metodo semplificato per la valutazione delle soglie di danno; inoltre, a questo proposito, è stata formulata una proposta, applicabile nel caso di soglie di danno di tipo lieve e grave, che tiene conto delle proprietà fisiche dello spettro di capacità.
- Gli edifici in cemento armato di Barcellona sono stati suddivisi in tre categorie in base all'altezza: alti, medi e bassi. Sono stati modellati tre edifici rappresentativi di queste tre classi e sono state calcolate le relative curve di fragilità; inoltre si sono ricavate le matrici di probabilità di danno per due scenari sismici che tengono in conto della stessa zonizzazione sismica della città; tutto questo ha reso possibile l'estrazione di scenari di danno e rischio sismico.
- In generale, gli edifici in muratura portante non sono isolati perché fanno parte degli aggregati tipici del sistema urbanistico definiti come "isolas" (isolati) della zona del quartiere Eixample. Sono stati creati

tre edifici tridimensionale come prototipi rappresentativi della zona ed è stata analizzata una schiera in linea che simula uno dei lati dell'isolato, effettuando inoltre un esame dettagliato della capacità e fragilità dei singoli edifici, che risulta aumentare in quelli posizionati lateralmente che interagiscono diversamente con gli altri.

- Come integrazione alla valutazione, per gli edifici in cemento armato, sono stati analizzati due modelli strutturali considerando gli effetti dei tamponamenti nella risposta globale della struttura. Infine è stata eseguita un'analisi dinamica non lineare per verificare alcuni dei risultati totali ottenuti secondo il metodo semplificato descritto e utilizzato in questa tesi.

9.3 Conclusioni

Il lavoro presentato ha la premessa di servirsi di disegni strutturali di edifici reali per valutare la vulnerabilità sismica per mezzo di una metodologia avanzata, e di valutare un insieme di edifici che si trovano in una via del quartiere Eixample di Barcellona. I risultati ottenuti costituiscono un supporto allo studio di vulnerabilità e rischio sismico soprattutto per questa città.

Di seguito si presentano le conclusioni più rilevanti ottenute nei capitoli precedenti.

1. Per quel che riguarda l'azione sismica:

In questo studio l'azione sismica, d'accordo con i metodi e procedimenti usati, è stata definita e utilizzata in termini spettrali, cioè in termini di spettro di risposta di accelerazione e spostamento. È stato anche sviluppato un gruppo di segnali accelerometrici artificiali compatibili con gli spettri di risposta, con caratteristiche di accelerazione massima e durata che permettono di simulare accelerogrammi proba-

bili nella città di Barcellona. Anche se la pericolosità sismica di Barcellona è considerabile tra moderata e bassa, questi accelerogrammi artificiali sono risultati sufficienti ad effettuare simulazioni dinamiche della risposta sismica degli edifici della città, poiché sono stati ottenuti compatibilmente con la norma NCSE-02, l'EC-8 e agli spettri di risposta sviluppati specificamente per Barcellona. L'intervallo di accelerazioni massime e durate permette di simulare un'ampia varietà dell'intensità dell'azione sismica.

2. Per quanto riguarda la metodologia per la valutazione del rischio sismico:

È stato descritta una metodologia basata sull'analisi statica non lineare e il metodo dello spettro di capacità. Questa metodologia ha permesso di valutare la vulnerabilità sismica mediante curve di fragilità e matrici di probabilità di danno di buona qualità probabilistica.

3. Riguardo alle soglie degli stati di danno:

La metodologia usata stabilisce 5 stati di danno: (0) nullo o senza danno, (1) lieve, (2) moderato, (3) severo o rilevante, (4) collasso. Per determinare le soglie di questi stati di danno, sono stati scelti i casi in cui la probabilità di eccedenza è del 50%. Questa metodologia utilizza un'approssimazione ragionevole basata sullo spettro di capacità nella sua forma bilineare. Quindi, nel punto D_y definisce la soglia di danno moderato e il punto di capacità ultima, D_u , definisce la soglia di stato di collasso. Le soglie degli stati di danno lieve e rilevante sono individuate da $0.7D_y$ e $D_y+0.25(D_u - D_y)$.

L'analisi sperimentale di sensibilità a questi coefficienti rileva che uno spostamento del 20% dello stato di danno lieve può causare variazioni del 70% del grado di danno medio, dimostrando che la determinazione del soglie del stati di danno è un punto particolarmente critico. È stata fatta una proposta alternativa per gli soglie di danno lieve e severo.

Il danno lieve è definito quando lo spettro di capacità ottenuto e la sua rappresentazione bilineare differiscono per una certa quantità di accelerazione spettrale A_y . Invece, il danno severo, nonostante sia definito anche dalla curva di capacità, tenendo conto della resistenza della struttura, si basa, da un lato, sull'incrudimento per mezzo della rigidità della parte plastica della curva di capacità e, d'altra parte, sul valore minimo della derivata della funzione che ha la curva di capacità. Tanto maggiore è l'incrudimento, quanto più lo stato di danno severo si posiziona verso lo spostamento ultimo e tanto è minore, quanto più si posiziona verso lo spostamento di snervamento.

Quindi si può concludere che stabilire le soglie di danno è fondamentale per ottenere le curve di fragilità e che è necessario e conveniente realizzare studi sperimentali che permettano di stabilire dei criteri obiettivi per determinarli. L'approssimazione utilizzata in questo studio è sufficiente e permette di effettuare estese ricerche di rischio sismico in modo soddisfacente.

4. In riferimento all'analisi del danno sismico negli edifici in cemento armato:

Si è realizzato uno studio sul danno sismico negli edifici in cemento armato con solai nervati (*waffle slab*) per due scenari di scuotimento sviluppati dall'ICC di Barcellona.

Nello studio si è osservato come gli edifici bassi abbiano una capacità di resistenza maggiore anche se alla fine risultano più danneggiati: la causa può essere posta in relazione con la loro rigidità strutturale che dà come risultato negli spostamenti spettrali piccoli un livello di danno lieve e moderato.

I risultati di queste prove sottolineano come un scenario probabilistico risulti più severo di uno deterministico e di come gli edifici costruiti su di un suolo deformabile soffrano un danno maggiore di quelli su di un suolo più rigido.

È interessante osservare l'influenza della forma dello spettro di risposta sul danno. In realtà negli spettri di risposta tipici della città, ci si aspetta che siano in una banda di accelerazione costante relativamente stretta; questo è importante perchè può concentrare danni negli edifici più bassi e rigidi.

Infine, risultano rispondere abbastanza bene gli edifici con solai nervati alle azioni sismiche di queste caratteristiche negli scenari considerati in quanto i risultati indicano livelli di danno di tipo lieve.

5. Per quanto riguarda il danno sismico negli edifici di muratura portante:

Un contributo particolarmente utile di questo lavoro è l'analisi del danno sismico negli edifici raggruppati tipici di Barcellona; per fare questo si sono create tre categorie di edifici, secondo un'allineazione rappresentativa della zona in questione *Example*.

È risultata interessante la scelta, la modellazione e l'analisi delle tipologie in questione, dato che ha permesso di ottenere risultati quali gli spettri di capacità e le curve di fragilità per ognuna di esse e per l'intero aggregato a schiera.

Viene a confermarsi l'influenza del tipo di suolo nel livello di resistenza complessiva. L'amplificazione dell'azione sismica negli edifici bassi è la causa di un danno stimato maggiore.

La conformazione strutturale degli edifici d'angolo è invece più irregolare, cosa che, tenendo conto delle carenze nell'ammorsamento dei muri portanti, provoca un incremento di vulnerabilità degli stessi. Le altre tipologie presentano peraltro anch'esse, in generale, un livello elevato di vulnerabilità. Per quanto concerne il comportamento in aggregato, si nota come questo erediti le vulnerabilità dei singoli edifici, non ingenerando quindi miglioramenti. Questo risultato sottolinea l'invariabilità del comportamento del singolo edificio se isolato o nella configurazione complessiva, almeno nelle situazioni e scenari ipotizzati.

Nell'analisi caratterizzata da una accelerazione di picco equivalente a 0.04g si nota come la propensione al danneggiamento sia comparabile a quella che la scala EMS-98 prevede per le classi di edifici più vulnerabili. L'edificio situato nell'angolo risulta in una classe di vulnerabilità di tipo A, mentre per quelli allineati alla via la classe è di tipo B.

6. Rispetto alle valutazioni aggiuntive effettuate sulle strutture di cemento armato:

Gli studi realizzati sulla vulnerabilità e sul danno sismico negli edifici di cemento armato sono stati condotti anche per analizzare gli effetti dell'architettura sismoresistente e la influenza dei tamponamenti. Inoltre sono state effettuate analisi di tipo dinamico non-lineari per confrontare i risultati con quanto ottenuto in questo studio.

Relativamente alla progettazione sismica, si osserva come un edificio progettato seguendo la normativa spagnola, abbia una reazione di tipo elastico dell'ordine di grandezza di accelerazioni minori di 0.10g, mentre che per accelerazioni uguali o maggiori a tale valore, la struttura soffra danni molto maggiori che possono eventualmente anche causare il collasso della struttura: ciò conferma l'efficacia della regolamentazione iberica.

Per quanto riguarda l'influenza dei tamponamenti nella valutazione del rischio sismico si osserva come il danno diminuisca migliorando la risposta dell'edificio al sisma.

L'ulteriore analisi effettuata (di tipo dinamico non-lineare) permette un confronto con i risultati ottenuti in questa tesi: in particolare, per un'accelerazione massima di 0.05g, i risultati delle due analisi coincidono fornendo un livello di danno limitato per edifici di cemento armato di 8 piani. In generale, si può affermare che il metodo statico non-lineare fornisce risultati di sufficientemente approssimati e si considera pertanto adeguato per studi di rischio sismico che richiedano il calcolo di un numero elevato di edifici. Il calcolo di tipo dinamico non-

lineare, invece, risulta, da una parte, più realistico, ma, dall'altra, anche più impegnativo oltre che oneroso matematicamente e quindi maggiormente indicato allo studio di singoli casi, di singoli edifici. L'analisi dinamica non-lineare individua, inoltre, un comportamento anomalo degli edifici in cemento, quale una risposta sismica adeguata per scosse relativamente piccole, ed una risposta catastrofica per scosse non eccessivamente importanti. Tale tendenza non è invece evidenziata dal metodo statico non-lineare.

La classificazione degli edifici in cemento armato di Barcellona in tre tipologie (alti, medi e bassi), la scelta, la modellazione tridimensionale e l'analisi completa di tre edifici prototipo, ciascuno rappresentativo della propria classe, hanno permesso lo sviluppo di spettri di capacità e curve di fragilità tipicizzate di edifici in cemento armato, valide non solo per Barcellona, ma anche per un numero rilevante di città spagnole e di paesi dove il livello di rischio è moderato. Lo sviluppo di matrici di probabilità di danno per due scenari sismici diversi (con ragionevole possibilità di verificarsi) ha permesso di ottenere differenti scenari di danno per la città. Una parte di questo progetto è stato portato avanti parallelamente con il progetto di ricerca Europeo (RISK-UE).

Sintetizzando, si può concludere che il metodo qui descritto ed applicato, così come le semplificazioni adottate, abbia permesso di costruire una metodologia di analisi di danno sismico completa, versatile ed utile per lo studio ed il calcolo di scenari sismici non solo ubicati nella città di Barcellona, ma in generale in tutte quelle zone dove è necessaria la valutazione complessiva di un numero elevato di edifici.

L'utilità di questa ricerca è inoltre rilevante nell'ottica della prevenzione, della gestione del costruito e delle strategie di protezione; ingegneri, architetti ed imprese costruttrici devono prendere atto del fenomeno sismico e di come misure di prevenzione adottate nel progetto migliorino l'efficacia della risposta sismica degli edifici; le autorità e gli enti cui competono respon-

sabilità nell'urbanistica, la costruzione e la protezione civile troveranno in questo lavoro, informazioni aggiornate che li potranno aiutare ad aumentare il livello di protezione sismica degli edifici, per poter garantire più sicurezza alla popolazione.

Probabilmente si potrebbe migliorare la normativa sismica vigente con l'aggiunta, oltre che delle istruzioni relative alla progettazione ed alla realizzazione costruzione di nuovi edifici, anche con la verifica ed il controllo delle strutture esistenti ed il loro rinforzo strutturale che il singolo caso richieda.

Come punto finale si potrebbe dire che lo studio preliminare di un determinato scenario sismico è fondamentale anche per poter prevenire, pianificare e gestire situazioni di emergenza. Quindi, integrando in questo studio un metodo completo che consente di valutare la capacità, la fragilità ed il danno sismico previsto in un'ottica probabilistica, si è raggiunto l'obiettivo principale di questo lavoro.

9.4 Nuovi orizzonti di ricerca

Ovviamente, qualsiasi lavoro di ricerca si conclude con il raggiungimento degli obiettivi prefissati e questo lavoro non è da meno. Ciononostante è pur vero che il dialogo scientifico e tecnologico è importante per garantire lo sviluppo di qualsiasi metodologia di lavoro innovativa sempre finalizzata al miglioramento del benessere della società. Anche in questo senso questo lavoro non è un'eccezione. Molteplici aspetti del progresso si sono intravisti in questo scritto, ed in particolare in questo ultimo paragrafo del testo si presenta una lista delle ulteriori proposte di sviluppo che si considerano più interessanti. Come nelle conclusioni le linee di sviluppo aperte si strutturano negli stessi punti là considerati.

- **In riferimento all'azione sismica:** Conoscere l'azione sismica in quelle zone in cui non si dispone di registrazioni accelerometriche risul-

ta complesso però importante. Ricavare segnali di accelerazione virtuali da modelli sismici che includano le caratteristiche di generazione, propagazione e attenuazione, così come gli effetti locali, ne permetterà un utilizzo coerente con quelle qui adottate.

- **In riferimento al metodo statico non-lineare:** La simulazione degli edifici in cemento armato si basa sulla costruzione di modelli in programmi per analisi bidimensionali, attraverso la modellazione tridimensionale di casi 2D e la loro comparazione si potrà valutare in quali casi il modello 2D sia effettivamente sufficiente.
- **In riferimento alle soglie di danno:** Il metodo semplificato per stabilire le soglie di danno partendo da un parere esperto sullo spettro di capacità bilineare richiede un termine di confronto; uno potrebbe essere quello di un'analisi dinamica non-lineare, che può già di per sé mostrare differenze nel livello di danno previsto, un altro ovviamente potrebbe essere la sperimentazione. In ogni caso vale la pena di investire su metodi che permettano stabilire oggettivamente le soglie di danno. Bisognerebbe approfondire la proposta di ricerca basata sulla degradazione di rigidezza dopo la fase elastica dello spettro di capacità e sui concetti di duttilità e incrudimento. In questo caso risulta cruciale stabilire criteri per la definizione del punto critico (punto di collasso strutturale).
- **In riferimento all'analisi sul danno sismico negli edifici di cemento armato:** Si propone l'analisi di una tipologia costruttiva in cemento, orientata ad ottimizzare la sua risposta sismica in relazione alla sua forma, alternativa a quella costituisce la tipologia costruttiva attuale più frequente; così come si suggerisce di quantificare effetti di vulnerabilità già noti quali il piano sofficato, il pilastro tozzo ed il martellamento tra edifici adiacenti.
- **In riferimento agli edifici in muratura portante:** Si consiglia di proseguire con l'analisi di diversi scenari tipologico-costruttivi. Inoltre,

come nel caso dell'Eixample di Barcellona, di ricercare diverse configurazioni di pianta ed alzata presenti. Le analisi effettuate sui terremoti avvenuti in passato ci mostrano come un progetto irregolare della struttura e l'utilizzo simultaneo di materiali e tecniche costruttive con caratteristiche fisiche diverse possano compromettere la risposta sismica di tali edifici.

In concreto, si propone di realizzare uno studio dettagliato di vulnerabilità e danno sismico di un intero isolato del quartiere dell'Eixample per valutare i diversi scenari di danno possibili, e poterli confrontare con quelli del singolo edificio e dell'aggregato lineare.

- **Rispetto ad altre valutazioni interessanti si propone:**

Lo studio di altre tipologie presenti a Barcellona come ad esempio, edifici in legno e con struttura metallica.

Applicare i metodi e procedimenti qui utilizzati ad altre città spagnole con l'obiettivo di migliorare la previsione del rischio sismico. In questo senso gli studi portati a termine a Barcellona nell'ultimo decennio costituiscono un bagaglio culturale indiscutibile che può essere molto utile nello sviluppo di linee guida e di confronto per nuovi studi in altre zone a rischio sismico con caratteristiche similari.

Apéndice A

Conclusiones en Español

A.1. Comentarios finales

A pesar de los avances realizados en la ingeniería sísmica y estructural, en las últimas décadas se han incrementado las pérdidas tanto humanas como monetarias a causa de los terremotos. Esto es debido a la existencia de población y estructuras vulnerables en zonas sísmicas.

Muchas estructuras han sido construidas sin tener en cuenta ningún diseño antisísmico y a pesar de que, hoy en día, los códigos sísmicos son más exigentes, el crecimiento de población en zonas sísmicas contribuye al aumento del riesgo. Para reducir el número de víctimas es necesario mejorar el diseño sísmico en las estructuras nuevas, así como también, el comportamiento de las estructuras antiguas. Si no se aplica ninguna comprobación o diseño sísmico, la fragilidad y vulnerabilidad de los edificios es elevada y cuando se combina con la peligrosidad de un emplazamiento da como resultado un riesgo sísmico no despreciable.

A partir de los terremotos ocurridos en el pasado, muchos investigadores han observado que, a pesar de que un grupo de edificios con una misma

tipología estructural se encuentren ubicados en un mismo emplazamiento, experimentan diferentes niveles de daño.

Muchas de las estructuras diseñadas en el pasado no poseen una capacidad de deformación y disipación de energía adecuadas para soportar acciones horizontales sin llegar a colapsar o a sufrir daños muy fuertes.

Los estudios de vulnerabilidad sísmica son de vital importancia para la predicción y prevención del daño sísmico esperado. La aplicación de este tipo de técnicas es de especial interés en zonas de sismicidad moderada, donde el desarrollo de las ciudades y de los entornos urbanos ha significado un aumento del riesgo sísmico.

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica es indispensable en los estudios de riesgo sísmico y en la mitigación de desastres. Cualquier acción o iniciativa dirigida en salvar pérdidas humanas y materiales, ocasionadas por sismos, requiere estudios de vulnerabilidad sísmica. Hoy en día existen muchos métodos para estudiar la vulnerabilidad sísmica en una zona y la mayoría de estos métodos consideran criterios de evaluación diferentes.

Para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de forma fiable es necesario disponer de una considerable cantidad de información que no siempre se tiene y que, además, posee considerables incertidumbres, por lo tanto, el uso de una metodología probabilista es la más apropiada.

En Barcelona, la mayoría de los edificios residenciales son de hormigón armado y de obra de fábrica. Un gran número de estos edificios se encuentran con alto riesgo sísmico debido a su alta vulnerabilidad, a pesar de que Barcelona no está ubicada en una zona de alta sismicidad. Esta tesis es una contribución a la evaluación de la vulnerabilidad y fragilidad sísmicas de los edificios de la ciudad de Barcelona.

A.2. Recapitulación

Esta investigación se encaminó por una metodología para estudiar de forma probabilista el riesgo sísmico de edificios. El procedimiento no es sencillo debido a la diversidad de información necesaria para llevar a cabo este tipo de estudios y, además, involucra muchas incertidumbres tanto en los parámetros estructurales como en los sísmicos.

La metodología trata de evaluar las estructuras de la manera más realista posible, pero simplificada, sin tener que llevar a cabo un análisis dinámico no lineal, el cual resulta costoso y complejo. No utiliza métodos subjetivos basados en las observaciones físicas de la estructura como por ejemplo, el año de construcción, el número de pisos, la tipología de los edificios, etc. Se puede afirmar que esta metodología se halla en un punto intermedio entre los métodos basados en índices de vulnerabilidad y funciones de daño y los basados en el modelado exhaustivo del edificio y el análisis detallado del daño por simulación numérica de su comportamiento dinámico. Además, en el primer método, la acción sísmica se suele definir por la intensidad macrosísmica; en las simulaciones dinámicas la acción se define mediante acelerogramas sintéticos, artificiales o reales. El método del espectro de capacidad se fundamenta en las nuevas técnicas y procedimientos del diseño basado en desempeño. Representa la acción mediante un espectro de respuesta y el edificio mediante su espectro de capacidad y curvas de fragilidad. Aunque simplificado, se trata de un método avanzado más ingenieril, que permite afinar mejor tanto la definición y caracterización del terremoto como de la estructura. La clasificación de edificios en tipologías constructivas permite rebajar el costo de aplicación masiva a grandes urbes.

Los resultados obtenidos en varias ciudades europeas, escogidas como *banco de pruebas* del proyecto RISK-UE, pero en particular en Barcelona, acreditan la versatilidad y eficiencia de este método con vocación de futuro.

Los métodos basados en intensidades sísmicas e índices de vulnerabilidad

son también adecuados aunque la definición de la acción sísmica mediante un sólo parámetro es pobre. Los métodos de análisis dinámico no lineal son computacionalmente costosos.

Para la evaluación de la vulnerabilidad y fragilidad sísmicas se han seguido las siguientes etapas:

- Se han descrito los principales aspectos conceptuales y metodológicos relacionados con la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios de hormigón armado y obra de fábrica.
- Se ha definido la acción sísmica mediante espectros de respuesta y acelerogramas artificiales, para distintas intensidades sísmicas y para diferentes emplazamientos. Se ha generado un grupo de acelerogramas artificiales (compatibles con los espectros de respuesta) contribuyendo a una colección representativa de eventos para Barcelona.
- Se ha descrito, con cierto nivel de detalle, una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico, que se basa en el análisis estático no lineal.
- Se ha efectuado un análisis de sensibilidad sobre el método simplificado de establecer los umbrales de daño; se ha realizado una propuesta alternativa para los umbrales de los estados de daño leve y severo que tienen en cuenta las propiedades físicas del espectro de capacidad.
- Los edificios de hormigón armado de Barcelona se han agrupado según tres categorías: altos, medianos y bajos. Se han modelado 3 edificios representativos de éstas 3 clases y se han obtenido curvas de fragilidad. Asimismo, se han obtenido matrices de probabilidad de daño para dos escenarios sísmicos que tienen en cuenta la misma zonificación sísmica de la ciudad. Todo ello ha hecho posible la obtención de escenarios de daño y de riesgo sísmico.

- En general, los edificios de obra de fábrica de ladrillo no están aislados, sino que forman parte de agregados, formando las típicas manzanas del Eixample. Se han modelado, en 3D, tres edificios representativos de los existentes en la ciudad y se ha evaluado una agrupación en línea que simula un lado de la manzana. Se ha efectuado un análisis detallado de la capacidad y fragilidad de los edificios individuales y de su conjunto, concluyendo que se confirma la alta vulnerabilidad de este tipo de edificios que aumenta en los edificios típicos de esquina, los cuales transfieren sus perversas propiedades sísmicas a la alineación de edificios.
- Como complemento de evaluación para los edificios analizados de hormigón armado, se han analizado dos modelos estructurales considerando los muros de relleno en la respuesta global de la estructura. Finalmente, se ha llevado a cabo un análisis dinámico no lineal para comprobar algunos de los resultados globales obtenidos con la metodología simplificada descrita y utilizada en esta tesis.

A.3. Conclusiones

El trabajo aquí presentado tiene la premisa de utilizar planos estructurales de edificios reales para llevar a cabo la evaluación de la vulnerabilidad sísmica por medio de una metodología avanzada, y de evaluar un conjunto de edificios agregados en una calle del distrito del Eixample de Barcelona. Los resultados obtenidos constituyen un aporte a los estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico, en especial, para la mencionada ciudad.

A continuación se presentan las conclusiones más relevantes derivadas de los capítulos aquí desarrollados:

1. En lo relativo a la acción sísmica:

En este estudio la acción sísmica, de acuerdo con los métodos y procedimientos empleados, se ha definido y utilizado en términos espectrales, es decir en términos de espectros de respuesta. También se ha desarrollado una colección completa de acelerogramas artificiales compatibles con espectros de respuesta, aceleraciones pico y duraciones que permiten simular los acelerogramas probables en la ciudad de Barcelona. A pesar de que el peligro sísmico de Barcelona es entre moderado y bajo, esta colección de acelerogramas artificiales es suficiente para efectuar simulaciones dinámicas de la respuesta sísmica de los edificios de la ciudad, ya que se han construido compatibles con la NCSE-02, con el EC-8 y con espectros de respuesta desarrollados específicamente para Barcelona. El rango de aceleraciones pico y de duraciones permite simular una amplia variedad de intensidades sísmicas.

2. En lo referente a la metodología para la evaluación del riesgo sísmico:

Se ha descrito una metodología basada en el análisis estático no lineal y en el método del espectro de capacidad. Esta metodología ha permitido evaluar la vulnerabilidad sísmica mediante curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño, de una manera fiable en el campo probabilista.

3. En cuanto a los umbrales de los estados de daño:

La metodología empleada establece cinco estados de daño: (0) nulo o no daño, (1) leve, (2) moderado, (3) severo y (4) colapso. Para determinar los umbrales de estos estados de daño, es decir los lugares en los que la probabilidad de excedencia es del 50 %, la metodología usa una aproximación razonable basada en el espectro de capacidad en su forma bilineal. Así, en el punto de cedencia (D_y) define el umbral de daño moderado y el punto de capacidad última (D_u) define el umbral del estado de colapso. Los umbrales de los estados de daño leve y severo se definen situándolos en $0.7D_y$ y en $D_y+0.25(D_u - D_y)$.

El ensayo de sensibilidad sobre estos coeficientes pone de manifiesto que un desplazamiento del 20 % del umbral del estado de daño leve puede inducir variaciones del 70 % en el grado de daño medio, demostrando que la determinación del umbral de los estados de daño es un punto particularmente crítico. Se ha efectuado una propuesta alternativa para los umbrales de daño leve y severo.

El umbral de daño leve se define cuando el espectro de capacidad obtenido y su representación bilineal difieren una cierta cantidad de la aceleración espectral de cedencia. En cambio, el severo, a pesar de ser definido también en la curva de capacidad, teniendo en cuenta la resistencia de la estructura, se basa por un lado en el endurecimiento por medio de la resistencia de la rama plástica de la curva de capacidad y por otro lado, en que la derivada de la función que tiene la curva de capacidad tome un valor mínimo. Cuanto mayor es el endurecimiento, el estado de daño severo se sitúa más hacia el desplazamiento último y cuánto menor es, éste se sitúa más hacia el desplazamiento de cedencia.

Por lo tanto se concluye que: el establecimiento de los umbrales de daño es crucial para la obtención de curvas de fragilidad y que son necesarios y convenientes estudios experimentales que permitan establecer criterios objetivos para su determinación. Con todo, la aproximación utilizada en este estudio es suficiente y permite efectuar estudios masivos de riesgo sísmico de forma satisfactoria.

4. En referencia al análisis del daño sísmico en edificios de hormigón armado:

Se ha realizado un estudio sobre el daño sísmico en edificios de hormigón armado con forjados reticulares para dos escenarios sísmicos desarrollados por el ICC para Barcelona.

En el estudio se ha observado cómo los edificios bajos presentan mayor capacidad y rigidez que los edificios medianos y altos. Pero los edificios bajos presentaron más daño, lo cual puede estar relacionado con su

rigidez que da como resultado, que para desplazamientos espectrales relativamente pequeños, aparezcan los estados de daño leve y moderado.

Los resultados han puesto de manifiesto cómo el escenario probabilista es más dañino que el determinista y cómo los edificios situados en suelo blando sufren más daño que los situados en un suelo duro.

Es interesante también observar la influencia de la forma del espectro de respuesta en el daño. En efecto, los espectros de respuesta típicos de la ciudad se espera que sean de una banda de aceleración constante relativamente estrecha. Ello es importante ya que puede inducir daño relevante en edificios rígidos y bajos.

Finalmente, para los escenarios considerados, los edificios de hormigón armado con forjados reticulares responden razonablemente bien ante un evento sísmico de estas características, ya que los daños esperados son principalmente de carácter leve.

5. En cuanto al estudio del daño sísmico en los edificios de obra de fábrica:

Una contribución particularmente relevante de este trabajo es el análisis del daño sísmico en edificios agregados propios de Barcelona. Para ello se han caracterizado tres edificios típicos de Barcelona y se ha evaluado una alineación representativa de un lado de una manzana característica del *Example*.

Ha sido importante la elección, modelado y análisis de los tres tipos de edificios de obra de fábrica existentes en Barcelona, ya que ha permitido obtener, para cada uno y para una línea de edificios de esta misma tipología, los espectros de capacidad y las curvas de fragilidad.

Se confirma la influencia del tipo de suelo: la amplificación de la acción sísmica característica de los suelos blandos, incrementa mucho el daño esperado.

La configuración estructural de los edificios de esquina es más irre-

gular, lo que unido a serias deficiencias en el arriostramiento de sus muros resistentes incrementa de forma significativa su fragilidad. Los otros edificios modelados y analizados también presentan una elevada vulnerabilidad. El conjunto agregado de edificios hereda su alta vulnerabilidad, de forma que su comportamiento sísmico no mejora. Esto es importante, ya que establece que los resultados de efectuar escenarios de riesgo sísmico considerando edificios aislados no tendrán diferencias significativas con los escenarios que incorporen los agregados.

El análisis del caso de una acción sísmica caracterizada por una aceleración básica de $0.04g$ indica una considerable probabilidad de daño comparable a la que la escala EMS-98 prevé para las clases más vulnerables de edificios. El edificio de esquina muestra una clase de vulnerabilidad tipo A y el edificio de banda de una manzana equivale a una tipo B.

6. Respecto a las evaluaciones adicionales realizadas en estructuras de hormigón armado:

Los estudios realizados sobre la vulnerabilidad y el daño sísmico en edificios de hormigón armado, se han complementado con el objetivo de analizar los efectos del diseño sismorresistente y la influencia de los muros de relleno. Por otra parte, se han realizado análisis dinámicos no lineales, para contrastar y validar los resultados obtenidos mediante la metodología aquí aplicada.

Con respecto al diseño sísmico se observó que un edificio diseñado, siguiendo las normativas españolas, responderá de manera elástica para aceleraciones menores a $0.10g$, mientras que para aceleraciones iguales o mayores, la estructura tendrá daños fuertes que podrían llevarla incluso al colapso, lo que asegura la eficiencia de la normativa sísmica española.

De la consideración de las paredes de relleno en la evaluación del riesgo sísmico, se observó cómo el daño esperado disminuye, mejorando así el comportamiento sísmico de los edificios.

Finalmente, el uso del análisis dinámico no lineal y de los índices de daño de Park y Ang han permitido comparar los resultados obtenidos mediante el análisis estático y dinámico.

Concretamente, para una aceleración pico de 0.05g, tanto el análisis dinámico como el estático predicen un estado de daño leve para un edificio de hormigón armado de 8 pisos. En general, los resultados indican que el método estático no lineal proporciona resultados aproximados razonables por lo que se considera adecuado para estudios de riesgo sísmico que involucren una evaluación amplia de un gran número de edificios. El método de análisis dinámico no lineal es más realista pero también más complejo y computacionalmente costoso, por lo que se considera más adecuado para el análisis de edificios especiales, individuales o singulares. Con todo, el análisis dinámico no lineal detecta un comportamiento anómalo de los edificios de hormigón, que tendrían una respuesta sísmica adecuada para terremotos relativamente pequeños, pero una respuesta catastrófica para terremotos no excesivamente fuertes. Esta característica pasa desapercibida en el análisis estático no lineal.

La clasificación de los edificios de hormigón armado de Barcelona en tres tipos (altos, medianos y bajos), la elección, modelado y análisis exhaustivo de un edificio representativo de cada clase, ha permitido el desarrollo de espectros de capacidad y curvas de fragilidad típicas de los edificios de hormigón armado característicos no sólo de Barcelona, sino también de un número importante de ciudades españolas y de países en zonas con un nivel de amenaza moderado. El desarrollo de matrices de probabilidad de daño para dos escenarios sísmicos, cuya ocurrencia en Barcelona es razonable, ha permitido la obtención de escenarios de daño sísmico para esta ciudad. Parte de estos trabajos y estudios se han desarrollado en el marco de un proyecto europeo de investigación (RISK-UE).

En síntesis, se concluye que la metodología aquí descrita y aplicada, así como las simplificaciones adoptadas, han permitido construir una herramienta de análisis de daño sísmico que es completa, versátil y útil para el desarrollo y análisis de escenarios de daño sísmico, no sólo en la ciudad de Barcelona, sino en cualquier entorno urbano que requiera una evaluación masiva de un gran número de edificios.

La utilidad del trabajo se dirige hacia la prevención, gestión y protección. Ingenieros, arquitectos y constructores deben tomar conciencia del fenómeno sísmico y de cómo las precauciones tomadas en el diseño y construcción repercuten de forma directa y significativa en la minoración del riesgo sísmico. Las autoridades y entidades con responsabilidad en urbanismo, construcción y protección civil hallarán en este trabajo, conocimientos nuevos que les ayudarán, desde el punto de vista sísmico, a aumentar los niveles de protección de los edificios para garantizar la seguridad de las personas. Probablemente haya que mejorar la normativa sísmica vigente incluyendo, además de las instrucciones para el diseño y construcción de nuevos edificios, el seguimiento, control y, cuando así se requiera, el refuerzo de los edificios existentes.

Finalmente, la predicción de las consecuencias de un escenario sísmico es fundamental para prevenir, planificar y gestionar emergencias.

En este punto, pues, se puede decir que implementando una metodología completa que permite evaluar la capacidad, fragilidad y daño sísmico esperado, bajo una óptica probabilista, se ha alcanzado el principal objetivo de este trabajo.

A.4. Futuras líneas de investigación

Claramente cualquier trabajo de investigación acaba una vez alcanzados los objetivos básicos de su planteamiento y desarrollo y este trabajo no es una excepción. Con todo, también es cierto que la dialéctica científica y tecnológi-

ca del desarrollo de cualquier nuevo método, procedimiento o producto es un sólido punto de apoyo para el progreso del conocimiento, del bienestar y de la sociedad. En este sentido tampoco este trabajo es excepción. Múltiples aspectos de progreso se han ido entreviendo a lo largo de esta memoria. En este apartado de cierre del último capítulo se destaca una muestra de las propuestas de desarrollo que se consideran más relevantes. Al igual que las conclusiones, las líneas abiertas se estructuran en los mismos puntos allá considerados.

- **En referencia a la acción sísmica:** El conocimiento fino de la acción sísmica en zonas donde no se dispone de acelerogramas es particularmente complejo pero importante. La obtención de acelerogramas artificiales a partir de modelos sismológicos que incorporen las características de generación, propagación y atenuación, así como los efectos locales, permitirá validar las acciones sísmicas aquí empleadas.
- **En referencia a la metodología basada en el análisis estático no lineal:** La simulación de los edificios de hormigón armado se basa en modelos y programas en dos dimensiones. Se propone utilizar herramientas que permitan modelar en 3D para comparar con modelos 2D y establecer en qué casos y en qué medida el modelo 2D es suficiente o insuficiente.
- **En cuanto a los umbrales de los estados de daño:** El criterio simplificado para establecer los umbrales de daño a partir de una opinión experta sobre el espectro de capacidad bilineal requiere ser contrastado; una forma puede ser mediante el análisis dinámico no lineal, que ya deja vislumbrar diferencias en el daño esperado y, otra forma, puede ser el trabajo experimental. En ambos casos conviene avanzar hacia criterios objetivos que permitan establecer los umbrales de los estados de daño. Hay que explorar mejor la propuesta basada en la degradación de rigidez en la rama elástica del espectro de capacidad y en los

conceptos de ductilidad y endurecimiento. En este sentido es crucial establecer criterios para la definición del punto de capacidad última o de colapso.

- **En cuanto al análisis del daño sísmico de los edificios de hormigón armado:** Se propone el análisis de otras tipologías constructivas de hormigón, orientado a optimizar el diseño sísmico de este tipo de edificios que constituye la tipología constructiva actual más frecuente. Así mismo, se sugiere cuantificar efectos tan conocidos y establecidos como el piso blando, columna corta y el efecto de golpeto entre edificios adyacentes.
- **En referencia a los edificios de obra de fábrica:** Se propone proseguir con el análisis de diferentes configuraciones de agregados incluyendo, como es el caso en muchas manzanas de Barcelona, diferentes configuraciones en planta y en alzado e, incluso, diferentes tipologías constructivas. La experiencia de terremotos pasados apunta hacia el mal comportamiento de irregularidades geométricas, así como, de la mezcla de diferentes materiales y tipologías constructivas.

En concreto, se propone realizar un estudio detallado de vulnerabilidad y daño sísmico de una manzana real completa del distrito Eixample, para conocer los diferentes resultados de daño si se consideran edificios aislados, agrupaciones en línea, o el sistema completo.

- **Respecto a otras evaluaciones interesantes se propone:**

El estudio de otras tipologías existentes en Barcelona, como por ejemplo, edificios de madera y estructuras metálicas.

Aplicar los métodos y procedimientos aquí empleados a otras ciudades españolas con el objetivo de avanzar en la predicción eficaz del riesgo sísmico probable. En este sentido los estudios efectuados en Barcelona en el último decenio constituyen una experiencia piloto que puede servir de pauta y guía en estudios similares en otras ciudades situadas en zonas

con peligro sísmico.