

# La valutazione della capacità residua degli edifici nella gestione post-sismica alla scala urbana

Lorenzo Diana\*,\*\*, Yves Reuland\*

*parole chiave:* valutazione della vulnerabilità sismica, mappatura alla scala urbana, valutazioni post-sismiche, distribuzione del danno, resilienza sismica

## Abstract

*Tra i diversi disastri naturali, gli eventi sismici sono una delle cause principali delle perdite in termini di vite umane ed economiche. I terremoti direttamente non uccidono le persone; è al contrario il crollo degli edifici durante i terremoti che uccide. Per questa ragione, risulta necessario un coinvolgimento diretto degli architetti, degli ingegneri, degli urbanisti e di tutti i ricercatori coinvolti nella gestione del rischio sismico con l'obiettivo di trasformare le città esistenti in sistemi resilienti in grado di resistere ad un evento sismico con il minor numero possibile di perdite. Due risultano le principali sfide connesse alla questione della resilienza sismica alla scala urbana: la determinazione della vulnerabilità sismica dei sistemi nella fase precedente all'evento sismico; la determinazione del reale stato di danno e della capacità residua in fase successiva all'evento.*

*Le misurazioni in vibrazione ambientale (AVM) delle strut-*

*ture sono una fonte di informazioni non distruttiva che insieme alle tradizionali procedure di sopralluogo possono migliorare l'efficienza e l'esattezza della valutazione della vulnerabilità alla scala urbana. In fase pre-sismica, le AVM possono aiutare nella determinazione del reale comportamento delle strutture e nella modellazione delle classi strutturali che compongono il patrimonio esistente soprattutto nelle regioni con una scarsità di dati osservazionali a seguito di eventi sismici importanti. In fase post-sismica, le AVM forniscono invece direttamente informazioni relative al reale danneggiamento riscontrato e al possibile futuro danneggiamento nel caso di un aftershock. Nel presente articolo, è proposta una metodologia per l'allargamento alla scala urbana delle informazioni raccolte sulle singole classi strutturali e la valutazione del loro danneggiamento. Le potenzialità del raccoglimento degli edifici in differenti raggruppamenti sono altresì valutate.*

## 1. INTRODUZIONE

I terremoti sono una fonte di rischio naturale che continua al giorno d'oggi a causare un elevato numero di vittime e di importanti perdite economiche (UNISDR, 2013). Non è il terremoto di per se stesso a causare vittime direttamente, sono gli edifici che compongono le nostre città a far-

lo. Trasformare le città esistenti in sistemi resilienti è uno dei principali obiettivi che i ricercatori coinvolti nell'analisi e nella valutazione sismica dei sistemi urbani si devono porre. La predisposizione di affidabili strumenti per la determinazione di realistici scenari di rischio sismico può aiutare il decisore nella predisposizione di azioni proattive o reattive per il miglioramento della resilienza delle città e per

salvaguardare vite umane e beni. Due sfide principali riguardano lo studio della resilienza sismica alla scala urbana: la determinazione della vulnerabilità sismica prima dell'evento sismico; la determinazione della capacità residua successivamente all'evento sismico.

In quest'ottica, le misure di vibrazione ambientale (AVM) sono una fonte di informazioni non distruttiva che risulta particolarmente utile nella determinazione delle caratteristiche strutturali degli edifici, soprattutto nelle regioni con una scarsità di informazioni sul reale comportamento sismico. Misurazioni aggiuntive, dopo l'evento sismico, forniscono informazioni sull'entità reale del danno subito e supportano le valutazioni riguardo l'agibilità degli edifici danneggiati.

I recenti eventi sismici che hanno colpito l'Italia nel 2016 hanno riproposto una serie di questioni particolarmente importanti: la gestione dell'evento sismico, la valutazione dei danni subiti dagli edifici e la valutazione della loro agibilità. Questi aspetti rivestono un ruolo ancor più importante nel caso di eventi caratterizzati da una serie di episodi violenti (*shock* principale seguito da diversi notevoli *aftershocks*) rispetto alle sequenze sismiche con un evento principale seguito da uno sciame sismico di minore rilevanza.

Nel caso del terremoto del Centro Italia avvenuto nel 2016, dal 24 Agosto 2016 (data della prima scossa con epicentro Accumoli e Magnitudo pari a 6.0) al 28 Aprile 2017, si sono registrati circa 65 500 eventi (di cui 3 500 con magnitudo maggiore o uguale a 2.5). Di questi, ben 9 eventi sono risultati maggiori o uguali a una magnitudo di 5.0. La scossa del 30 Ottobre 2016, con epicentro Norcia, risultò di magnitudo 6.5 e quindi maggiore rispetto alla prima scossa di Agosto<sup>1</sup>.

Nel caso di *aftershock* di notevole intensità, la gestione post-sismica diviene di centrale importanza sia per quanto riguarda il primo soccorso che per il processo di ricostruzione e di valutazione dell'agibilità degli edifici.

Tanti sono gli esempi di edifici che hanno resistito alla prima scossa del 24 Agosto 2016 e che con il secondo evento di Ottobre sono stati distrutti. Un triste esempio ne è la chiesa di San Martino nella frazione di Moletano ad Amatrice (Figura 1). A seguito della scossa di Agosto la chiesa subì importanti danneggiamenti alla facciata principale, al muro dell'altare e ad alcuni elementi del tetto. La presenza di catene metalliche ha evitato il ribaltamento dei muri longitudinali e il conseguente crollo della copertura lignea. Purtroppo l'intervento di sopralluogo della Sovrintendenza dei beni culturali, la classificazione della chiesa e la progettazione di interventi di salvaguardia provvisori (mai realizzati) non hanno potuto evitare l'inevitabile. Con la seconda scossa, la chiesa è crollata e con lei tutto il suo apparato decorativo, memoria storica di un'intera comunità.

Questo dimostra come, superata la prima scossa, eventi di pari portata (o anche maggiori come nel caso del Centro Italia) possano generare ulteriori danneggiamenti e andare a peggiorare delle situazioni di per sé già critiche.

La prevalutazione dell'intensità e del contenuto frequenziale di un'ipotetica scossa di replica è di per sé un processo non preventivabile. Ne è una dimostrazione il caso dell'evento di Norcia del 30 Ottobre 2016. Il contenuto frequenziale registrato della scossa ha avuto delle importanti differenze tra la stazione di rilevazione del centro città e quella esterna al centro abitato. Nel caso del centro città, il contenuto frequenziale registrato è stato particolarmente importante nell'intervallo delle basse frequenze (tra 2 e 0.5 Hz). Di conseguenza, gli edifici dalle basse frequenze (edifici dall'alto periodo proprio di vibrazione) sono stati quelli più sollecitati. Non a caso, la cattedrale (di solito gli edifici monumentali si attestano su alti periodi propri di vibrazione) è stato uno dei pochi edifici del centro città ad essere distrutto mentre il resto del centro storico, fatto di edifici in muratura di pochi piani (dal basso periodo proprio di vibrazione) e rinforzati nel corso degli anni '70 con tecniche di irrigidimento (saldatura solai-muri verticali, aggiunta di solette in c.a. collaboranti, realizzazione di tetti in c.a.), è rimasto pressoché intatto. Il discorso è diverso per quanto riguarda il fuori città. L'intervallo frequenziale maggiormente sollecitato è stato quello delle alte frequenze (tra 5 e 1.5 Hz). Le accelerazioni e gli spostamenti subite dalle strutture con alte frequenze proprie di vibrazione, sono stati molto elevati in rapporto al centro città. Questo ha causato il collasso di diversi edifici residenziali tradizionali.

Questo breve *excursus* sulla caratterizzazione frequenziale dell'*aftershock* di Norcia sottolinea ancora una volta l'imperscrutabilità del terremoto. Di conseguenza, la valutazione sull'agibilità degli edifici danneggiati da una prima scossa non può essere automatizzata e risultare indipendente e scindibile dall'ispezione visiva e dal giudizio degli esperti. In aggiunta all'impossibilità di automatizzare la valutazione sull'agibilità, va sottolineato che il rischio post-sismico non è esclusivamente connesso al collasso strutturale. Elementi costruttivi non strutturali esterni (quali comignoli, tegole e parti di facciate) sono potenziali fonti di pericolo per i passanti sul suolo pubblico nei pressi dell'edificio danneggiato. Allo stesso modo, anche elementi di arredo interno particolarmente pesanti possono risultare pericolosi per gli abitanti degli edifici stessi. Il ribaltamento di una tramezzatura può, pertanto, avere lo stesso catastrofico effetto per gli abitanti che il collasso strutturale. Queste fonti di pericolo secondarie sono di difficile individuazione attraverso un'automatizzazione del rilievo del danno con strumenti di misurazione strutturale. Ciò dimostra come il sopralluogo visivo non può essere sostituito e/o automatizzato e il relativo risultato diffuso alla scala urbana.

Il processo dell'ispezione visiva degli immobili danneggiati da un evento sismico è una fase chiave per la valutazione dell'agibilità degli edifici (Rossetto *et al.*, 2010). Que-

<sup>1</sup> Dati INGV.



Figura 1 - Danni al muro dell'altare nella Chiesa di San Martino (Moletano, Amatrice) dopo il primo evento sismico del 24 Agosto 2016 [foto Diana L.]

sto processo, specialmente in Italia, segue una chiara procedura. È disponibile una specifica scheda (AeDES) (Baggio *et al.*, 2009) e gli ingegneri coinvolti nei sopralluoghi sono formati per classificare gli edifici in diverse classi (da A ad F) in base al danneggiamento subito. Strumenti analoghi sono introdotti in altre nazioni, come in Svizzera (D'urso *et al.*, 2015). Un edificio in classe A è un edificio ritenuto agibile mentre un edificio in classe E necessita profondi interventi strutturali per recuperare il suo stato originario ed essere (ri)considerato agibile.

Le valutazioni basate esclusivamente sui sopralluoghi visivi, tuttavia, si dimostrano inclini a giudizi soggettivi (Galloway *et al.*, 2014; Sheng-Lin *et al.*, 2017) e particolarmente lente (Marquis *et al.*, 2017; McEntire and Cope, 2004). Le campagne di sopralluogo post-sismiche risultano infatti processi "edificio-per-edificio": tutti gli edifici colpiti dal terremoto devono essere rilevati e ovviamente questo processo non può che essere particolarmente oneroso in termini di tempo. Gli elementi da rilevare risultano sia quelli strutturali (muri portanti, travi ecc.) che quelli non strutturali. In aggiunta, successivamente a ulteriori eventi (*after-shock*), sono richiesti rilievi aggiuntivi.

Dunque, il giudizio finale sull'agibilità degli edifici rimane nell'alveo della soggettività ed è legato a molte incertezze. Il reale stato di danneggiamento di alcuni elementi strutturali spesso è di complessa valutazione soprattutto per la difficoltà, l'invasività e il tempo richiesto necessario a operare test in situ. In quest'ottica, gli edifici spesso rischiano di essere giudicati come "agibili" a causa di una cattiva interpretazione del loro reale comportamento. Tale errore può essere compiuto anche nell'altro senso, giudicando inagibili edifici che tuttavia hanno ancora una buona capacità residua. Nella gestione urbana post-sismica, questo errore può affliggere intere aree e villaggi con importanti conseguenze anche nell'allocazione delle risorse e nella fase di ricostruzione. In conclusione, si sottolinea come in letteratura e nella pratica operativa le ispezioni visive vengono considerate esclusivamente come uno strumento che fornisce una stima su "quanto bene" un edificio si è comportato in seguito a un evento sismico fornendo, al contrario, poche informazioni sul "quanto bene" un edificio danneggiato possa comportarsi in seguito ad un evento sismico futuro (Marshall *et al.*, 2012).

La lentezza e la soggettività appena descritte delle ispezioni visive risultano tuttavia incompatibili con le neces-

sità operative del decisore che richiede giudizi rapidi ed esatti, specialmente nelle fasi successive ad un terremoto. La prospettiva di un *aftershock* non fa altro che acuire questa necessità. Basarsi esclusivamente sulle ispezioni visive richiede, oltre a importanti risorse in termini di tempo, anche importanti risorse in termini di denaro e nel caso di evidenti sovrastime nei giudizi di inagibilità può portare ad un blocco delle produzioni per intere regioni oltre che alla necessità di realizzare una serie di residenze temporanee. A questo si possono aggiungere ulteriori effetti collaterali relativi a una riduzione dei flussi di traffico e alla scarsità nella distribuzione dei beni di prima necessità, riducendo in maniera evidente la resilienza delle comunità ai terremoti.

L'utilizzo di tecniche di identificazione dei parametri strutturali basate sull'interpretazione dei segnali di vibrazione ha la potenzialità di ridurre la soggettività delle valutazioni post-sismiche così come di ridurre i tempi che intercorrono tra una scossa e le decisioni relative all'agibilità degli edifici colpiti. L'identificazione strutturale consente di comprendere meglio la taratura dei parametri strutturali dei modelli di calcolo confrontando le previsioni dei modelli e il comportamento misurato sugli edifici (Behmanesh *et al.*, 2015; Goulet and Smith, 2013; Smith, 2016). In caso di valutazione post-sismiche, i modelli strutturali ottenuti utilizzando tecniche di identificazione strutturale sono in grado di fornire previsioni accurate sul comportamento degli edifici in seguito alla prima scossa o a scosse di assestamento successive (Reuland *et al.*, 2019a, 2019b).

In quest'ottica, le misurazioni in vibrazione ambientale (AVM) rappresentano un interessante strumento non distruttivo per la determinazione di informazioni che supportano gli ingegneri nella fase di rilievo. Il principale obiettivo dell'impiego delle AVM è quello di permettere di derivare le proprietà modali dalle misurazioni delle accelerazioni (o delle velocità) delle vibrazioni di un edificio sotto l'azione degli agenti ambientali esterni (quali treni o veicoli e altre attività umane e fonti di eccitazione naturale come il vento o micro-sismi).

Esistono diverse tecniche per derivare proprietà modali da AVM, tra queste si cita la decomposizione del dominio della frequenza (Brincker *et al.*, 2001; Ren *et al.*, 2004). Le AVM hanno destato sempre maggiore interesse negli ultimi anni da parte della comunità scientifica per il monitoraggio strutturale (Brownjohn, 2007; Catbas *et al.*, 2013) per la loro capacità di fornire informazioni sui parametri strutturali in maniera non distruttiva. Il legame tra rigidità e parametri modali ha portato ad un'applicazione diffusa per il rilevamento dei danni (Roeck, 2003; Fan and Qiao, 2011; Özer and Soyöz, 2013; Dorvash *et al.*, 2014).

Le campagne di misurazione in vibrazione ambientale non possono sostituire i sopralluoghi tradizionali, ma possono rilevarsi utili strumenti di supporto per l'elaborazione del giudizio finale sull'agibilità degli edifici dal momento che si possono ottenere informazioni interessanti relative al comportamento complessivo della struttura, come ad esempio la frequenza naturale di vibrazione. La determinazione

del reale grado di danneggiamento di una struttura (e.g. grado di danno 2 invece che 3) può avere conseguenze decisive nell'elaborazione finale sul giudizio di agibilità e nella predisposizione futura delle linee guida per la fase di ricostruzione. Come dimostrato in passato (Clinton *et al.*, 2006; Vidal *et al.*, 2013; Foti *et al.*, 2014; Trevelopoulos and Guéguen, 2016; Mirshafiei *et al.*, 2017), le proprietà modali ottenute attraverso le vibrazioni ambientali sono sensibili al danneggiamento strutturale e dunque sono un indicatore delle reali condizioni dell'edificio.

La combinazione di misurazioni in vibrazione ambientale e ispezioni visive ha il potenziale di aumentare la resilienza strutturale dei sistemi urbani relativamente al rischio sismico. I terremoti difatti sono eventi catastrofici che possono colpire regioni dall'elevata sismicità così come aree dalla sismicità moderata. Le perdite in termini di vite umane e di beni economici o le interruzioni delle produzioni possono affliggere per diversi anni l'economia di interi paesi. I pianificatori necessitano dunque di uno strumento in grado di valutare la resilienza dei sistemi: tutti i comuni dovrebbero possedere un piano chiaro da attivare, in caso di necessità, nella fase post-sismica qualora si dimostrasse necessario. Azioni proattive o reattive devono essere pianificate nell'ottica di un evento sismico. Specialmente in fase post-sismica, l'impiego di misurazioni in vibrazione ambientale a complemento delle ispezioni visive può fornire, anche alla scala urbana, un quadro di informazioni sul possibile danneggiamento futuro che le strutture potrebbero subire qualora fossero colpite da un *aftershock*. In questa maniera il rischio di valutazioni errate e il tempo necessario all'elaborazione delle valutazioni stesse si ridurrebbe sensibilmente.

L'obiettivo di questo articolo è di chiarire come l'impiego delle misurazioni in vibrazione ambientale possa aiutare il valutatore nella determinazione del reale comportamento strutturale degli edifici sia in fase pre-sismica che in fase post-sismica. Un chiaro quadro viene fornito delle diverse azioni necessarie da compiere nelle due fasi. Nel dettaglio, viene proposta un'applicazione per l'allargamento della metodologia di valutazione, dal singolo edificio alla scala urbana, per la predisposizione di mappe post-sismiche.

## 2. METODOLOGIA

La valutazione del rischio sismico è un argomento molto delicato che coinvolge diverse competenze: dalla valutazione della pericolosità sismica (*seismic hazard*), alla valutazione dell'esposizione al danno (*exposure*) alla valutazione della vulnerabilità sismica (*seismic vulnerability*) (Carreño *et al.*, 2007). Nello specifico della valutazione della vulnerabilità sismica, il ruolo del valutatore si articola in diversi obiettivi e in diverse fasi. Come si può vedere nella Figura 2, il lavoro degli ingegneri coinvolti nella valutazione sismica è strutturato in due fasi distinte: una valutazione pre-terremoto e una valutazione post-terremoto.

Nella valutazione pre-sismica, il ruolo del valutatore è quello di definire il danno che gli edifici dovrebbero subire

qualora fossero colpiti da un sisma mentre nella fase post-sismica, è quello di definire il danno reale subito e la capacità residua degli edifici. La capacità residua può essere definita come il danno previsto che gli edifici colpiti dal terremoto dovrebbero subire in caso di un *aftershock* o di una qualsiasi futura azione sismica. In questo quadro dagli obiettivi multipli, il lavoro dell'ingegnere durante entrambe le fasi è assistito da misurazioni strutturali, come le misurazioni delle vibrazioni ambientali (AVM). Infatti, le AVM consentono la determinazione di alcune caratteristiche strutturali che non possono essere rilevate direttamente mediante le ispezioni visive o ricostruite attraverso modelli comportamentali. Dalle vibrazioni ambientali, possono essere ricavate, applicando per esempio la decomposizione del dominio di frequenza (FDD) (Brincker *et al.*, 2001), le frequenze e le forme modali, che forniscono informazioni sul comportamento strutturale globale delle strutture.

Nelle sezioni successive, ci concentreremo nel dettaglio sui diversi compiti che il valutatore deve svolgere, specialmente alla scala urbana, per fornire valutazioni sismiche affidabili. La novità è legata all'impiego delle AVM sia per

la determinazione del comportamento strutturale delle classi di edifici (nella fase pre-sismica) sia del danno atteso che gli edifici già danneggiati possono subire in seguito ad un *aftershock* (nella fase post-sismica). Di particolare rilevanza e novità è la scelta e la valutazione di alcuni edifici campione e di una successiva diffusione dei risultati ottenuti alla scala urbana per la valutazione post-sismica. Come affermato in precedenza, il tempo nella gestione post-sismica rappresenta un fattore determinante. Lo sviluppo di una metodologia per il raggruppamento degli edifici al fine di definire un campione rappresentativo affidabile che possa essere utilizzato per diffondere i risultati a scala urbana può accelerare significativamente il processo di valutazione e fornire mappe attendibili per la distribuzione dei danni prevista nel caso di una scossa di assestamento in un breve lasso di tempo. Il supporto fornito dalle AVM riduce la soggettività del giudizio degli esperti e il tempo necessario all'elaborazione del giudizio, poiché le incertezze relative al grado di danno e alle prestazioni strutturali possono essere ridotte utilizzando i dati raccolti dai sensori.

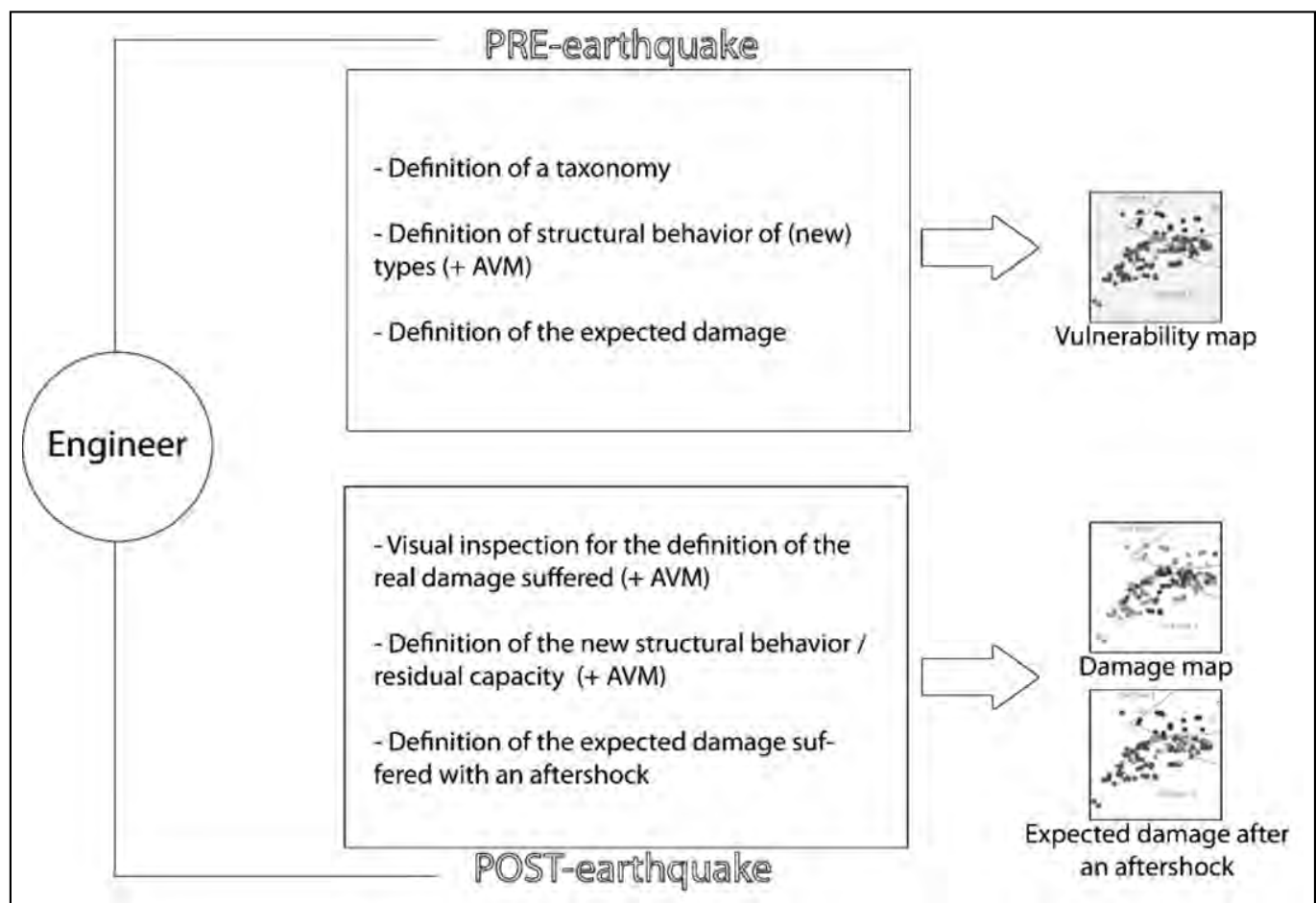


Figura 2 - La struttura e i compiti dell'ingegnere nelle valutazioni alla scala urbana in fase pre- e post- sismica [immagine prodotta da Diana L.]

## 2.1 La fase pre-sismica

L'esatta classificazione degli edifici è un passo fondamentale per una valutazione affidabile della vulnerabilità sismica. Conoscere e raggruppare correttamente le diverse tipologie strutturali che compongono un determinato sistema urbano aiuta nella valutazione del possibile danno che le città possono subire in caso di eventi sismici. Alla scala globale, una sfida chiave è dunque legata alla varietà dei tipi di edifici e dei metodi di costruzione che si possono incontrare. Diversi studi sono stati proposti in tutto il mondo al fine di valutare la vulnerabilità sismica su scala urbana nella fase pre-sismica (GNDT, 1993; FEMA 178, 1997; Otani, 2000; Onur *et al.*, 2005). Alcuni di essi sono stati proposti in Europa (Lagomarsino e Giovinazzi, 2006). Un riassunto degli strumenti di valutazione della vulnerabilità sismica può essere trovato in (Diana, 2017).

Come detto, il primo passo per valutazioni affidabili della vulnerabilità sismica su scala urbana è la determinazione delle diverse classi strutturali nelle quali raggruppare gli edifici che compongono il sistema urbano. È chiaro che le città sono sistemi complessi composti da una moltitudine di edifici e che dunque su scala territoriale, la valutazione edificio-per-edificio risulta particolarmente onerosa in termini di tempo e denaro. Pertanto, risultano necessarie alcune semplificazioni e classificazioni preventive. La definizione di una tassonomia chiara è un importante punto di partenza: in base al tipo di materiale e al sistema architettonico e strutturale, un edificio può essere attribuito a una determinata classe o un'altra. Una volta definita la tassonomia e una volta descritta ciascuna classe con adeguati modelli strutturali, ad ogni singolo edificio deve essere attribuita una determinata classe. Questo processo di attribuzione è una fase chiave per le valutazioni pre-sismiche a scala urbana nonché un punto di partenza per tutti i tipi di valutazioni che seguono.

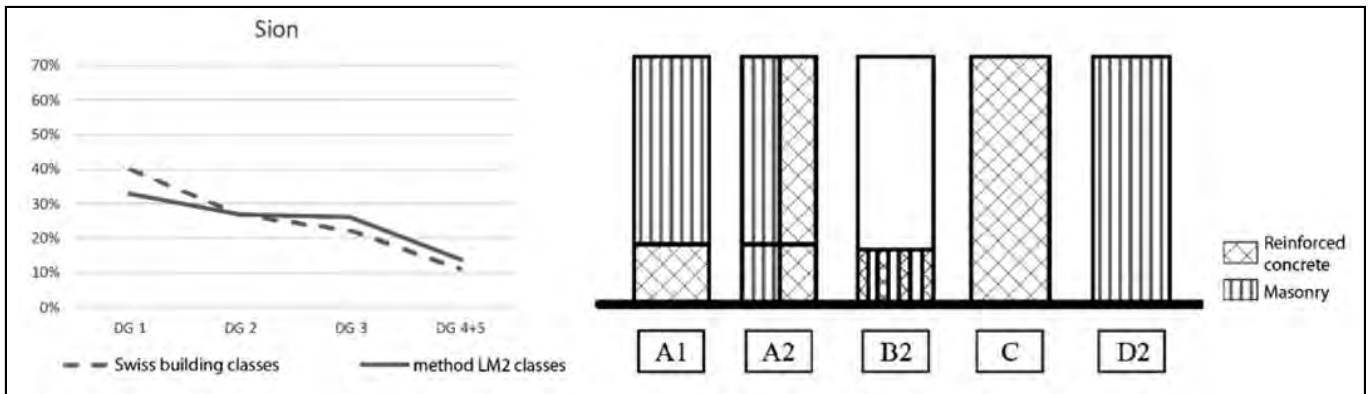
In Europa, una tassonomia coerente e rappresentativa degli edifici esistenti è stata introdotta dall'EMS 98 (Tabella 1) (Grünthal *et al.*, 2001). Nell'ambito del progetto RiskUE, Lagomarsino e Giovinazzi (2006) hanno proposto una versione aggiornata della tassonomia originale. Tutte le classi strutturali qui introdotte sono adeguate a descrivere il comportamento strutturale rispetto ai carichi orizzontali dello stock edilizio delle regioni ad elevato rischio sismico (per l'Europa si tratta principalmente dell'Europa meridionale). Tuttavia, queste classi non sono idonee a descrivere le caratteristiche di altri stock di edifici (ad esempio Europa centrale e settentrionale) (Diana *et al.*, 2018a). Per quanto riguarda la Svizzera, una particolare tassonomia è stata introdotta per descrivere al meglio le particolari caratteristiche strutturali locali (vedi Figura 3 - destra). A riguardo, uno studio dettagliato su una importante città svizzera (Sion), ha mostrato come l'introduzione delle nuove classi sopracitate si traduca in una notevole variazione della distribuzione del danno che risulta chiaramente spostata verso gradi di danno più bassi (Diana *et al.*, 2019; Diana, 2018b), come mostrato in Figura 3 (a sinistra).

**Tabella 1 - Classificazione delle strutture (edifici) nelle diverse classi strutturali (Grünthal *et al.*, 2001)**

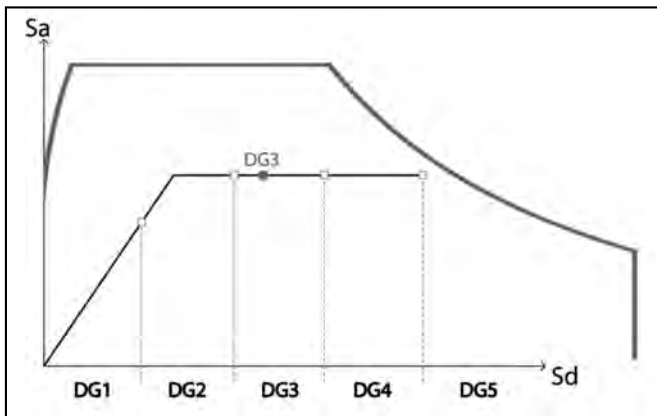
| Type of the structure                                 |
|---|
| MASONRY   |
| M1 - Rubble stone, fieldstone;                        |
| M2 - Adobe (earth brick);                             |
| M3 - simple stone;                                    |
| M4 - Massive stone;                                   |
| M5 - Unreinforced, with manufactured stone units;     |
| M6 - Unreinforced, with RC floors                     |
| M7 - Reinforced or confined                           |
| REINFORCED CONCRETE (RC)                              |
| RC1 - Frame without earthquake-resistant design (ERD) |
| RC2 - Frame with moderate level of ERD                |
| RC3 - Frame with high level of ERD                    |
| RC4 - Walls without ERD                               |
| RC5 - Walls with moderate level of ERD                |
| RC6 - Walls with high level of ERD                    |
| STEEL   |
| S - Steel structures                                  |
| WOOD  |
| W - Timber structures                                 |

Nella fase pre-sismica, l'impiego di AVM può aiutare nella definizione di nuove classi strutturali che compongono il patrimonio edilizio esistente. L'elaborazione dei dati raccolti sul campo riguardanti le vibrazioni degli edifici sotto l'eccitazione generata dall'ambiente circostante consente la determinazione di alcune importanti caratteristiche strutturali come ad esempio le forme modali relative alle modalità di vibrazione naturale, che possono aiutare nella comprensione del sistema portante di un edificio (Reuland *et al.*, 2015) e della qualità dei materiali da costruzione (Reuland *et al.*, 2017a).

La raccolta dei disegni dei progetti strutturali e la generazione di raffinati modelli numerici 3D, insieme alle informazioni raccolte dalle AVM, consentono l'identificazione del comportamento strutturale reale dell'edificio esistente. Tale processo di triplice comparazione (disegni+modello+AVM) risulta necessario dal momento che i metodi utilizzati in fase di progettazione sono spesso eccessivamente conservativi e, pertanto, non possono essere utilizzati per valutare le strutture esistenti. Una volta comprese le caratteristiche intrinseche della struttura, il comportamento del sistema sotto carichi orizzontali può essere descritto da una curva di capacità, in cui lo spostamento orizzontale in testa all'edificio è correlato alla resistenza di taglio orizzontale alla base, espressa in termini di accelerazione (Figura 4). Come si può notare in Figura 4, ogni punto della curva di capacità definisce un grado di danno (DG) ben definito. I diversi DG vanno da 1 a 5, come indicato dall'EMS98, dove il DG 1 rappresenta un lieve danno e il DG 5 rappresenta il collasso.



**Figura 3** - Comparazione della distribuzione del danno ottenuta per la città di Sion (Svizzera) utilizzando le classi strutturali tradizionali del progetto Risk-UE (Lagomarsino and Giovinazzi, 2006) e le classi strutturali di dettaglio per il patrimonio svizzero (figura di sinistra); le nuove cinque classi strutturali introdotte per meglio descrivere il comportamento dello stock edilizio svizzero (Diana et al., 2018a e 2018b) (figura a destra)

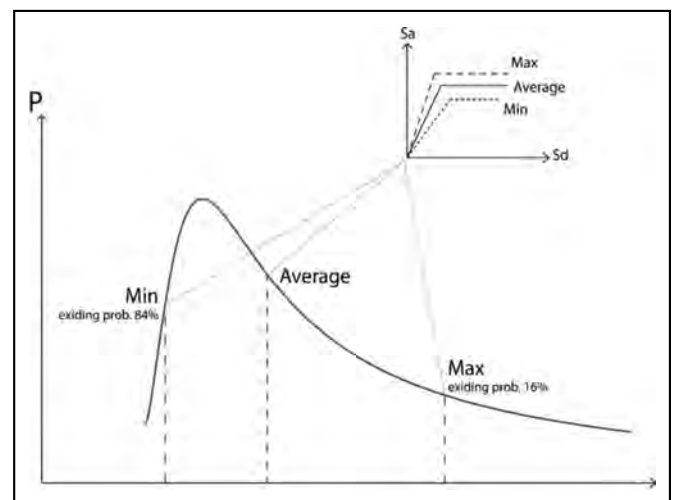


**Figura 4** - Curva di capacità generica nella quale gli spostamenti orizzontali della testa dell'edificio sono rappresentati in funzione alla resistenza di taglio orizzontale alla base, espressa in accelerazione. Ad ogni singolo punto della curva di capacità corrisponde un determinato stato di danno, variabile tra DG 1 e DG 5. Il cerchio sulla curva di capacità rappresenta il performance point. Nel caso qui rappresentato, il performance point individua un grado di danno pari a tre (DG 3). In rosso si nota lo spettro di risposta che individua la domanda sismica a cui le strutture sono soggette [immagine prodotta da Diana L.]

La definizione delle curve di capacità è un fattore molto importante per l'ottenimento di previsioni affidabili riguardo la vulnerabilità sismica alla scala territoriale. Se applicate su larga scala, le curve di capacità dovrebbero essere rappresentative di una vasta gamma di edifici appartenenti a una determinata classe in cui i parametri relativi ai materiali, alla geometria e alla capacità di inclinazione degli elementi portanti sono variabili casuali. Pertanto, diversi edifici della stessa classe devono essere esaminati e misurati in modo tale da ottenere una dispersione delle variabili casuali compatibile con la variabilità delle caratteristiche degli edifici nella classe (Lestuzzi et al., 2017; Luchini 2016).

Diverse curve di capacità sono quindi sviluppate per la stessa classe in base alla dispersione ottenuta: curve minimali, medie e massimali (Figura 5). Le AVM risultano utili per il raccoglimento di ulteriori informazioni su specifici edifici, se necessario.

Una diversa curva di capacità viene sviluppata per ogni classe strutturale e ad ogni edificio che compone il sistema urbano studiato viene attribuita una classe specifica di appartenenza. A questo punto, è possibile eseguire l'analisi della vulnerabilità sismica alla scala urbana e tracciare mappe di vulnerabilità. Il termine "vulnerabilità sismica" si riferisce alla propensione di una struttura, soggetta ad un possibile evento sismico, a subire danni (Calvi et al., 2006). In altre parole, è il danno atteso delle strutture sotto una determinata eccitazione sismica, spesso definita dai codici nazionali.



**Figura 5** - Esempio della dispersione di una determinata capacità all'interno di una stessa classe strutturale. Si notano sulla curva le diverse soglie per la definizione delle diverse curve (min, media, max) [immagine prodotta da Diana L.]

Nello specifico delle valutazioni pre-sismiche, il danno atteso viene valutato sulla base dell'approccio meccanico. La prestazione sismica attesa degli edifici colpiti da un terremoto, chiamato *performance point*, fornisce il grado di danno atteso subito. Il *performance point* è determinato dal confronto tra la curva di capacità sopra menzionata e lo spettro di risposta. La curva di capacità descrive il comportamento strutturale dell'edificio soggetto ad azioni orizzontali, mentre lo spettro di risposta è definito come la curva di domanda sismica (Cattari *et al.*, 2004). Tutti gli edifici analizzati nella fase di vulnerabilità pre-sismica sono soggetti allo stesso tipo di evento (terremoto con un periodo di ritorno di 475 anni, corrispondente a un evento di magnitudo 5,5 a una distanza epi-centrale di 7,5 km per ogni edificio). Gli spettri di risposta differiscono solo a causa delle mutevoli condizioni del terreno su cui gli edifici sono fondati.

## 2.2 La fase post-sismica

La valutazione della vulnerabilità sismica alla scala urbana risulta utile per due obiettivi in particolare: la determinazione delle mappe urbane di danno atteso prima di un evento sismico (mappe di vulnerabilità) e la determinazione del danno reale subito e della capacità residua degli edifici all'indomani dell'evento sismico.

Nello specifico della valutazione post-sismica, l'introduzione di dispositivi di misurazione (come i sensori di vibrazione), a complemento delle ispezioni visive, ha il potenziale di ridurre le incertezze e conseguentemente il tempo necessario per il completamento delle valutazioni sull'agibilità degli edifici. Ridurre il tempo tra un evento sismico e il processo decisionale riguardo la capacità residua sismica degli edifici senza compromettere la sicurezza è un pas-

so importante nell'ottica di città sismicamente resilienti (Figura 6).

Inoltre, le AVM forniscono una stima della rigidità globale di un edificio e quindi delle informazioni sulla capacità residua della struttura a resistere ad un *aftershock* dal momento che una riduzione della rigidità della struttura può essere connessa ai danni strutturali subiti. Pertanto, il reperimento di AVM su di un edificio colpito da un terremoto può aiutare nella valutazione del reale danno subito e della capacità residua e in un breve lasso di tempo (10 minuti di misurazione sono solitamente sufficienti per derivare le frequenze naturali di una struttura in modo stabile).

È stato dimostrato che le strategie di identificazione strutturale che utilizzano proprietà modali prima e dopo una scossa aiutano a identificare il comportamento non lineare degli edifici (Reuland *et al.*, 2017b). Prendendo in considerazione tutte le deviazioni e le pregiudiziali relative al modello e più in generale ogni tipo di incertezza epistemica, l'impiego delle AVM può ridurre notevolmente l'intervallo di previsione della domanda di spostamento (*performance point*).

In caso di valutazione post-sismica su di un singolo edificio, in assenza di AVM relative allo stato di costruzione iniziale (non danneggiato), raffinati modelli numerici tridimensionali possono essere utilizzati per la determinazione della capacità residua della struttura. Il risultato dell'ispezione visiva, sotto forma di grado di danno ESM98 (Grünthal *et al.*, 2001; Lagomarsino e Giovinazzi, 2006) sono usati insieme alle AVM post-sismiche per eseguire l'identificazione strutturale usando modelli strutturali statici non lineari (le curve *pushover*). A differenza di molte altre applicazioni, non sono necessarie informazioni sullo stato iniziale dell'edificio

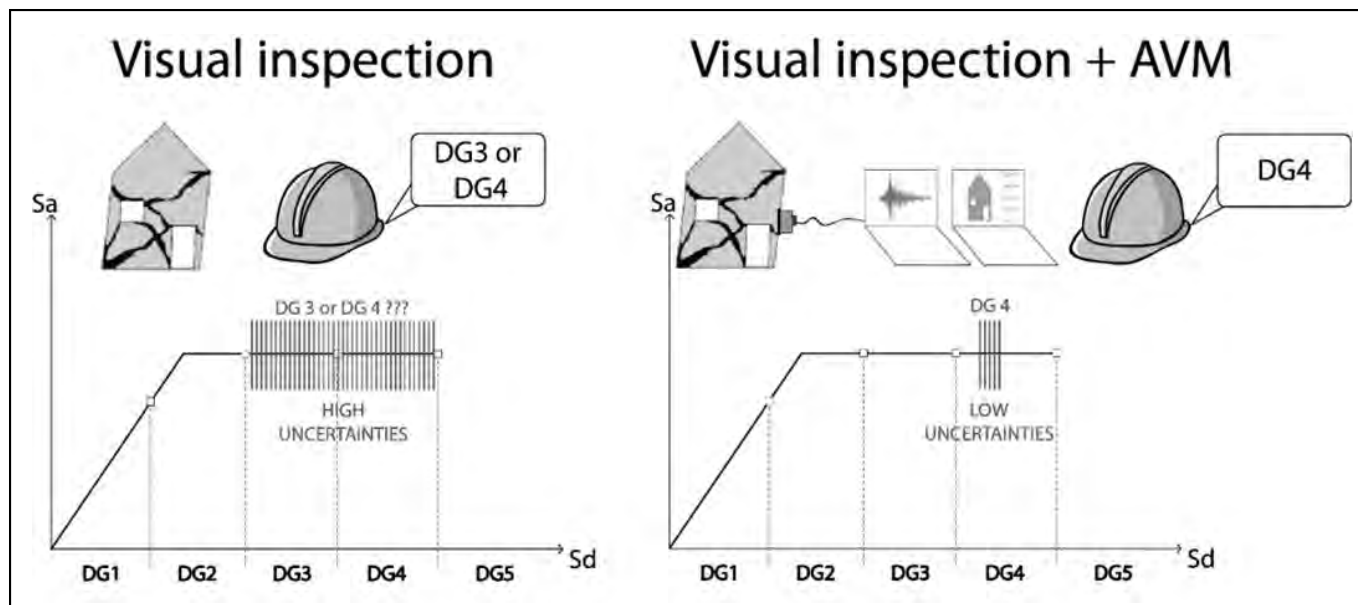


Figura 6 - L'impiego delle misurazioni in vibrazione ambientale (AVM) a supporto delle ispezioni visive riducono notevolmente le incertezze riguardo il grado di danneggiamento reale subito dalle strutture colpite dal sisma [immagine prodotta da Diana L.]



per identificare i parametri non lineari degli edifici (Reuland *et al.*, 2018). In assenza di informazioni sul segnale sismico, tali approcci non lineari statici sono più efficienti degli approcci dinamici non lineari. In conclusione, per un singolo edificio, l'ispezione visiva in aggiunta alle AVM fornisce chiarimenti sul danno reale subito dall'edificio e sul danno che potrebbe subire in caso di una ulteriore scossa.

Un edificio colpito da un terremoto mostra un degrado delle proprietà strutturali e di conseguenza i modelli strutturali definiti nella fase pre-sismica e descritti dalle curve di capacità cambiano ampiamente dopo uno *shock*. Infatti, le informazioni raccolte dalle AVM insieme al controllo visivo definiscono la riduzione della pendenza della curva di capacità con una frequenza fondamentale inferiore. In Figura 7 è rappresentata una riduzione della frequenza fondamentale della struttura (la pendenza della linea).

Un approccio semplificato che consente di tenere conto dell'influenza del danno sulla rigidità dell'edificio consiste nel ridurre la rigidità fino a considerare quella secante allo spostamento massimo che la struttura ha subito durante il terremoto (una rigidità secante al *performance point* per intenderci). Tuttavia, le strutture recuperano un po' di

rigidezza a vibrazioni di ampiezza inferiore successivamente al sisma. Pertanto, la rigidità secante rispetto allo spostamento massimo si traduce in una stima conservativa (limite inferiore) della reale rigidità di una struttura danneggiata. Michel *et al.* (2011) hanno quantificato il calo di frequenza tra le vibrazioni ambientali e le vibrazioni a ciclo grande di circa il 33% per le strutture murarie non rinforzate. Questo valore può essere utilizzato come prima approssimazione per ricavare la rigidità che viene misurata in base alle misurazioni delle vibrazioni ambientali dalla rigidità secante, come mostrato nell'Equazione 1:

$$k_{AVM} = \frac{1}{0.66^2} k_{sec} \quad (1)$$

Nell'Equazione 1,  $k_{AVM}$  è la rigidità misurata con le AVM dopo l'evento sismico e  $k_{sec}$  è la rigidità secante rispetto al massimo spostamento subito dalla struttura durante il sisma. Nel contesto di questo articolo, in particolare nella sezione 3, la rigidità secante è stata considerata come la rigidità, dovuta ad ampie vibrazioni, di riferimento per le strutture danneggiate dopo il primo evento sismico (Figura 7).

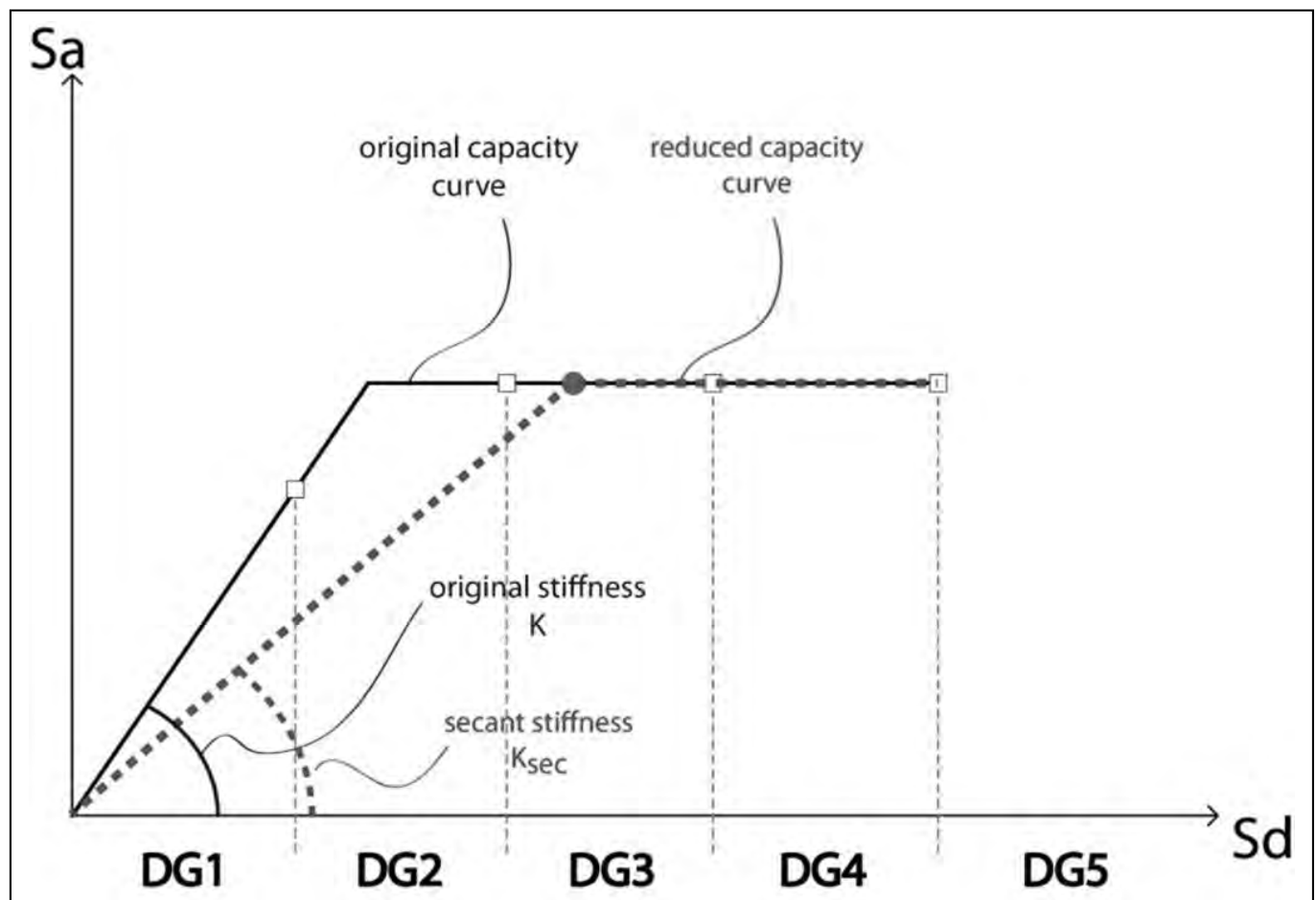


Figura 7 - Definizione del nuovo comportamento strutturale di una struttura colpita da un terremoto [immagine prodotta da Diana L.]

Quando la metodologia viene applicata dalla scala del singolo edificio a quella urbana, non è possibile eseguire simulazioni utilizzando raffinati modelli numerici tridimensionali per tutti gli edifici. Le simulazioni dettagliate dovrebbero essere limitate agli edifici di grande importanza per la resilienza della comunità, come ospedali ed edifici strategici. Inoltre, le simulazioni dinamiche non lineari si rivelano proibitive in termini computazionali e, quindi, si preferiscono predizioni statiche non lineari. Di conseguenza, come punto di partenza, si considerano le curve di capacità predefinite (Sezione 2.1), corrispondenti alle classi strutturali introdotte dalla tassonomia in fase pre-sismica. Rispetto ai modelli utilizzati per i singoli edifici, tali curve di capacità sono rappresentazioni semplificate. Tuttavia, per eseguire analisi a scala urbana, tali semplificazioni del grado di precisione risultano necessarie. Come descritto in precedenza, le curve di capacità sono disponibili per una vasta gamma di tipi di edifici e sono ampiamente utilizzate nella valutazione pre-sismica su scala urbana.

Applicando la stessa metodologia (ispezione visiva + AVM) su edifici appartenenti alla stessa classe e che condividono le stesse condizioni di suolo, i risultati ottenuti possono essere diffusi alla scala urbana. L'obiettivo è quello di ottenere valutazioni alla scala urbana affidabili che mostrino il danno reale subito dagli edifici e il danno che potrebbero subire in caso di un *aftershock*. Fornire affidabili mappe urbane del rischio nel caso di un *aftershock* può salvare vite umane, può aiutare i decisori nella gestione delle circostanze post-sismiche e può aumentare la probabilità che gli *stakeholders* conservino i propri beni. Inoltre, il tempo è un fattore essenziale nelle situazioni post-sismiche e pertanto la definizione di uno strumento affidabile per la trasposizione e la diffusione delle valutazioni ottenute su alcuni edifici campione alla scala urbana si dimostra un obiettivo determinante.

Simulando su ogni classe, con le nuove proprietà strutturali ridotte (danneggiate), un possibile secondo evento con le stesse caratteristiche del precedente *shock*, si può determinare il danno futuro raggiunto dagli edifici. L'intera procedura post-sismica, che viene eseguita per convalidare il grado di danneggiamento osservato durante l'ispezione visiva e per aggiornare la curva di capacità per tenere conto della riduzione della rigidezza (derivante dal danno) al fine di valutare la capacità residua, è descritta in Figura 8.

Diverse proprietà influenzano il danno raggiunto da un edificio che fa parte di una classe colpita da un sisma. Alcune delle proprietà principali che influenzano i risultati sono il numero di piani dell'edificio, le particolari condizioni locali del suolo e la distanza epi-centrale. La geo-localizzazione dell'edificio presenta un problema centrale: a causa dell'amplificazione locale e della distanza epi-centrale, due edifici che fanno parte di una stessa classe possono raggiungere un DG diverso. Estendendo il danno ottenuto per un edificio a tutti gli edifici della stessa classe alle stesse condizioni (coordinate geografiche, distanza epi-centrale, numero di piani, ecc.), è possibile mappare la distribuzione dei possibili danni futuri alla scala urbana (Figura

9). L'esattezza degli "eventuali danni" può variare in modo significativo dopo diversi giorni con l'aumento del numero degli edifici rilevati. La reiterazione dei sondaggi (ispezione visiva + AVM) può perfezionare i dati raccolti e l'accuratezza generale della distribuzione.

Nelle circostanze post-sismiche, il tempo è uno dei fattori più importanti, in particolare per la determinazione delle mappe urbane relative al possibile danneggiamento causato da un eventuale *aftershock*. Pertanto, è molto utile ridurre il tempo necessario all'elaborazione di mappe post-sismiche in grado di fornire agli amministratori uno strumento utile al processo decisionale (realizzazione di interventi di sicurezza, trasferimento di cittadini, chiusura di strade, realizzazione residenze temporanee, ecc.). Alla scala urbana, una piccola riduzione della precisione della valutazione (nell'ordine del 10% dell'errore generale) può essere accettabile se i risultati vengono forniti in un breve intervallo di tempo. A maggior ragione se si considerano le mappe post-sismiche come delle valutazioni "aperte": le indagini completate nei giorni successivi possono perfezionare iterativamente la prima distribuzione e ridurre continuamente l'errore.

Nella prossima sezione, mostreremo su di un caso di studio reale le varie strategie per la selezione di edifici campione da esaminare sulla base di diversi fattori (classe dell'edificio, numero di piani, condizioni locali del suolo di fondazione e distanza epi-centrale). In dettaglio, ci concentreremo su come raggruppare gli edifici che fanno parte del sistema urbano per scegliere quelli che dovrebbero essere esaminati con priorità per raggiungere un tasso di precisione affidabile e ridurre il tempo necessario per raggiungere valutazioni accettabili.

### 3. CASO DI STUDIO

La metodologia proposta alla sezione 2 è qui applicata al caso di studio della città di Martigny (Svizzera). La città di Martigny si trova nel cantone Vallese, la regione con il più alto rischio sismico della Svizzera ed è caratterizzata da condizioni particolarmente negative per quanto riguarda i suoli di fondazione. Per questo, uno specifico studio di microzonazione sismica è stato messo in atto dal Crealp<sup>2</sup> (Résonance Ingénieurs-Conseils SA, 2015) che prende in considerazione le amplificazioni locali. Nel dettaglio, tre microzone sono state definite: MM1; MM2 e MM3. La microzona MM1 presenta le peggiori condizioni dovute ad amplificazioni locali e per questo raggiunge le più alta domanda sismica tra le tre.

Analogamente alla città di Sion (sezione 2.1 e figura 3), la tassonomia tradizionale introdotta dal progetto Risk-UE, e idonea a descrivere il patrimonio edilizio delle città dell'Europa meridionale, non si dimostra in grado di cogliere le caratteristiche strutturali proprie degli edifici esistenti a

<sup>2</sup> Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin - [www.crealp.ch](http://www.crealp.ch)

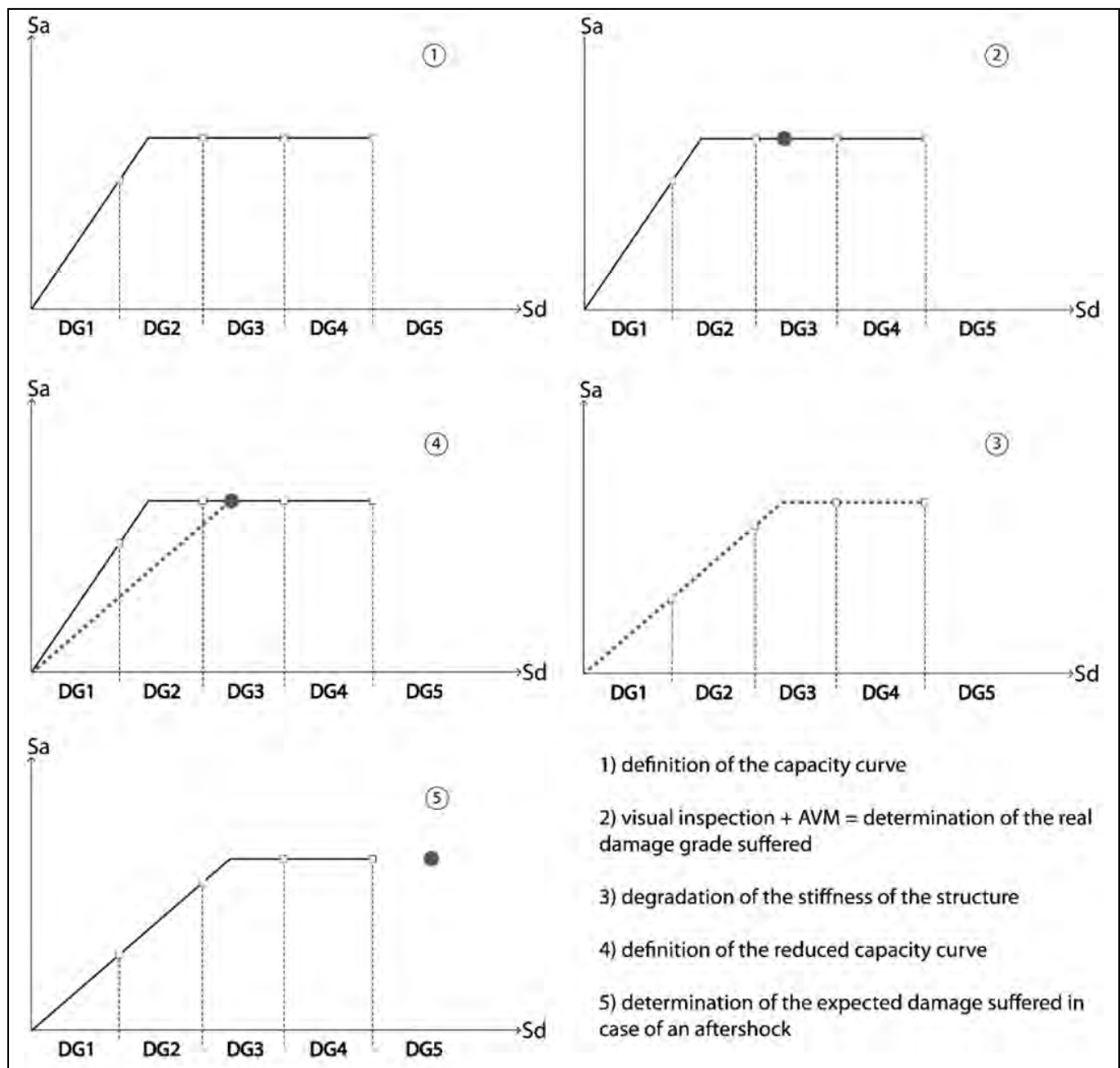


Figure 8 - La procedura della fase post-sismica per la determinazione del reale grado di danneggiamento che ha colpito la struttura e la determinazione della capacità residua [immagine prodotta da Diana L.]

Martigny. Per questo, le stesse classi edilizie introdotte per il caso di Sion sono state considerate per Martigny, a maggior ragione per il fatto che le due città, distanti pochi chilometri, condividono le stesse tecniche costruttive e gli stessi materiali da costruzione. Nello specifico, le classi strutturali introdotte sono (Figura 3 - destra): (i) tipologia A1 per gli edifici in muratura non armata (URM) con piano terra in calcestruzzo armato (RC); (ii) tipologia A2 per gli edifici con struttura portante mista URM-RC; (iii) tipologia B2

per gli edifici con piano terra in pilastri di RC; (iv) tipologia C per gli edifici con struttura portante in setti in RC; (v) tipologia D con struttura portante in setti di muratura URM (Diana *et al.*, 2018a and 2018b).

La metodologia è applicata a una porzione degli edifici di Martigny (351 edifici) con un numero di piani che varia tra i 3 e gli 8. La distribuzione, relativamente alle 5 classi strutturali introdotte e rispetto alle tre microzone, è mostrata in

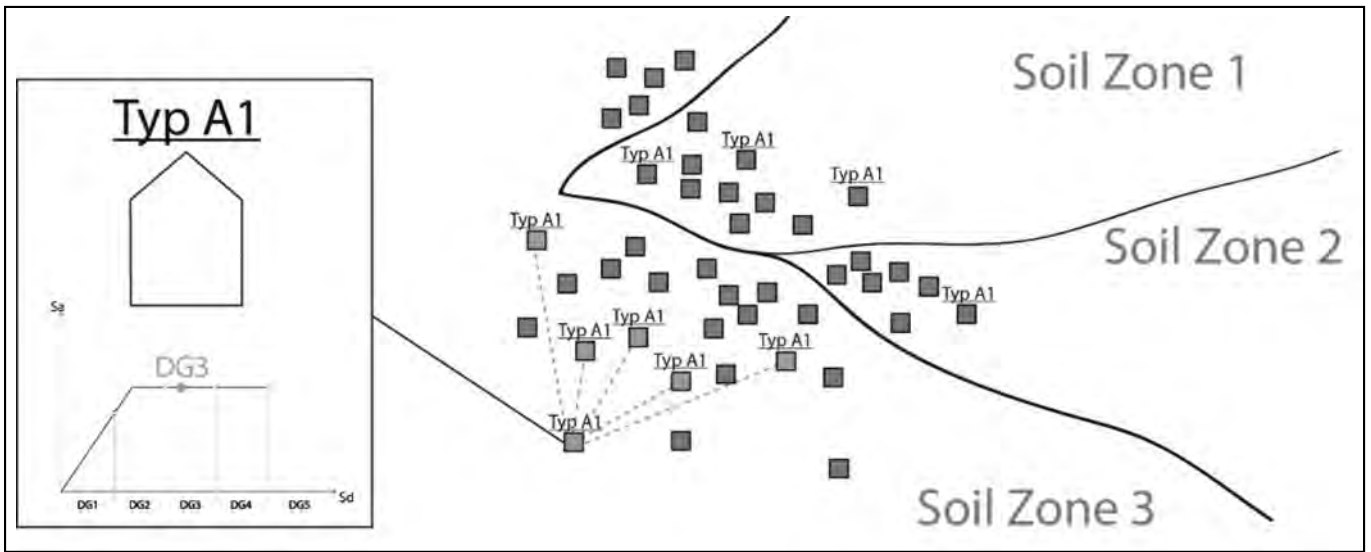


Figura 9 - La procedura per la diffusione del risultato ottenuto su edifici campione a tutta la città [immagine prodotta da Diana L.]

Figura 10 e in Tabella 2 mentre la distribuzione geografica in Figura 11. Sul totale dei 351 edifici analizzati, nessun edificio appartenente alla classe A2 è stato preso in considerazione.

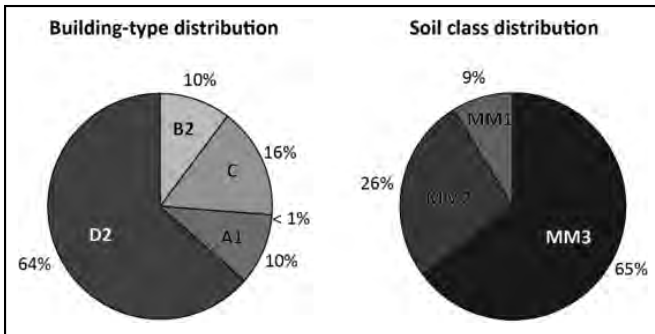


Figura 10 - Distribuzione dei 351 edifici rispetto alle classi strutturali e alle microzone [immagine prodotta da Reuland Y.]

### 3.1 La valutazione delle vulnerabilità in fase pre-sismica per la città di Martigny

Nella fase pre-sismica, la vulnerabilità dei 351 edifici è stata valutata utilizzando la metodologia LM2<sup>3</sup> (l'approccio meccanico) del progetto Risk-UE (Lagomarsino and Giovinazzi, 2006). Si noti che, nell'analisi delle strutture considerate all'interno della stessa classe, diverse curve di capacità sono state considerate in relazione al numero di piani. Ad esempio, la curva di capacità di un edificio di 3 piani facente parte della classe D2 risulta simile, ma non identica, alla curva di capacità di un edificio di 4 piani della stessa classe. Per quanto riguarda la domanda sismica, ognuna delle tre microzone è descritta da uno spettro di risposta speci-

<sup>3</sup> Level Method 2.

Tabella 2 - Distribuzione degli edifici analizzati in Martigny relativamente alla tipologia strutturale, alle microzone e al numero di piani. La distribuzione degli edifici non risulta omogenea

| Numero di piani | Tipologia D2 |          |          | Tipologia A1 |          |          | Tipologia C |          |          | Tipologia B2 |          |          |
|-----------------|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|-------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
|                 | Zona MM1     | Zona MM2 | Zona MM3 | Zona MM1     | Zona MM2 | Zona MM3 | Zona MM1    | Zona MM2 | Zona MM3 | Zona MM1     | Zona MM2 | Zona MM3 |
| 3               | 8            | 5        | 31       | 5            | 1        | 4        | 0           | 0        | 0        | 0            | 1        | 2        |
| 4               | 4            | 22       | 52       | 4            | 1        | 4        | 0           | 3        | 8        | 0            | 2        | 3        |
| 5               | 3            | 20       | 15       | 0            | 1        | 5        | 1           | 0        | 8        | 0            | 1        | 1        |
| 6               | 4            | 6        | 30       | 0            | 1        | 2        | 1           | 0        | 8        | 0            | 3        | 15       |
| 7               | 1            | 3        | 14       | 0            | 6        | 2        | 0           | 11       | 12       | 0            | 4        | 2        |
| 8               | 0            | 1        | 4        | 0            | 0        | 0        | 0           | 1        | 3        | 0            | 0        | 2        |

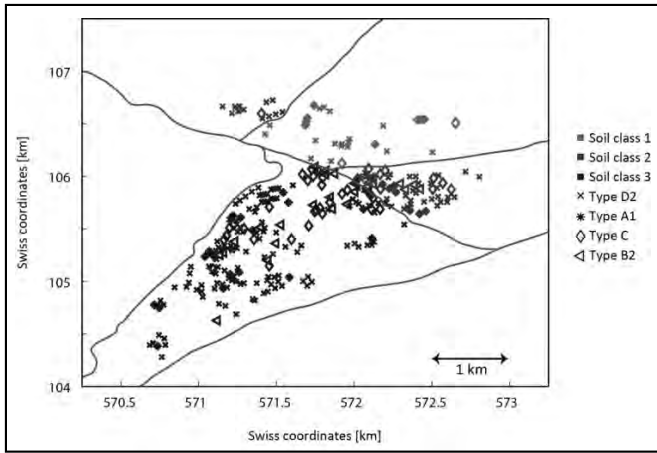


Figura 11 - La distribuzione geografica dei 351 edifici analizzati [immagine prodotta da Reuland Y.]

fico che descrive al meglio le condizioni particolari dei suoli di fondazione. Come affermato in precedenza, per le valutazioni della vulnerabilità in fase pre-sismica, per ogni edificio è stato considerato un terremoto di magnitudo 5.5, con una distanza epicentrale di 7.5 km (periodo di ritorno 475 anni).

Come si può notare in Figura 12, si prevede che la maggior parte degli edifici analizzati possano subire un serio danneggiamento. Il 63% degli edifici raggiunge un danneggiamento pari a DG4 mentre per il 9% si tratta di un collasso completo (DG5). Nessun edificio subisce un danneggiamento leggero (DG1) mentre per il 30% circa si prevede un danneggiamento medio e serio. Si può notare come la microzonazione sismica (che definisce la domanda) ha un'importanza centrale sul danneggiamento valutato in

fase preventiva. Infatti, per la microzona MM1, quella con la domanda sismica maggiore, è previsto un collasso della quasi totalità degli edifici.

### 3.2 Due scenari sismici reali

Sono stati simulati due eventi sismici al fine di ottenere due distribuzioni realistiche di danno. Nel caso di scenari realistici, una domanda sismica differente è applicata a ciascun edificio. Tale domanda risulta dipendente dalla distanza epi-centrale e dalle condizioni locali del suolo di fondazione a cui sono soggetti gli edifici. I due scenari simulati sono: Scenario 1 caratterizzato da un terremoto con epicentro a 8.7 km in direzione nord-ovest dal centro della città di Martigny e una magnitudo di 4.5; Scenario 2 caratterizzato da un terremoto con epicentro a 7.9 km in direzione sud-est dal centro di Martigny e una magnitudo di 5.5 (Figura 13). Considerando la distanza epicentrale, gli edifici possono raggiungere differenti gradi di danneggiamento per la stessa classe e per lo stesso numero di piani, potenzialmente anche all'interno della stessa microzona sismica. In aggiunta, anche edifici appartenenti alla medesima classe, con il medesimo numero di piani e giudicati con il medesimo grado di danneggiamento dopo la prima scossa, possono aver subito una domanda in spostamento differente (Figura 7 e 8) e quindi nel caso di un *aftershock* possono raggiungere un grado di danneggiamento maggiore.

### 3.3 Le valutazioni post-simiche (reale danno raggiunto e capacità residua) in Martigny

La valutazione completa del reale danno sofferto dagli edifici, prendendo in considerazione ogni singolo edificio

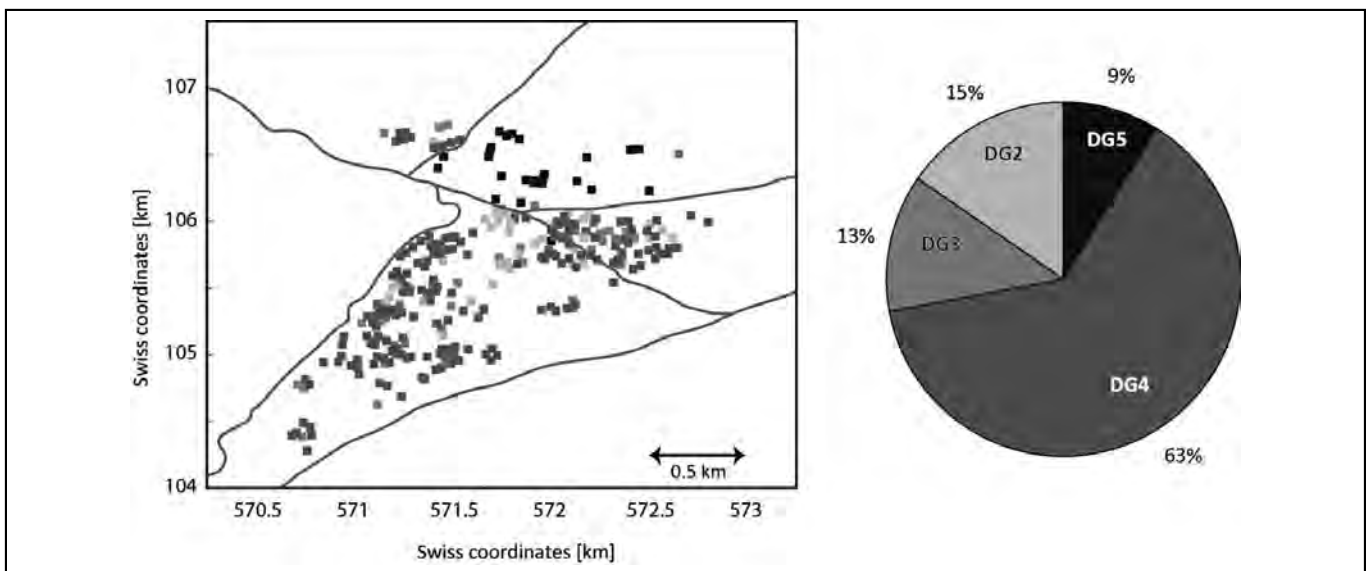
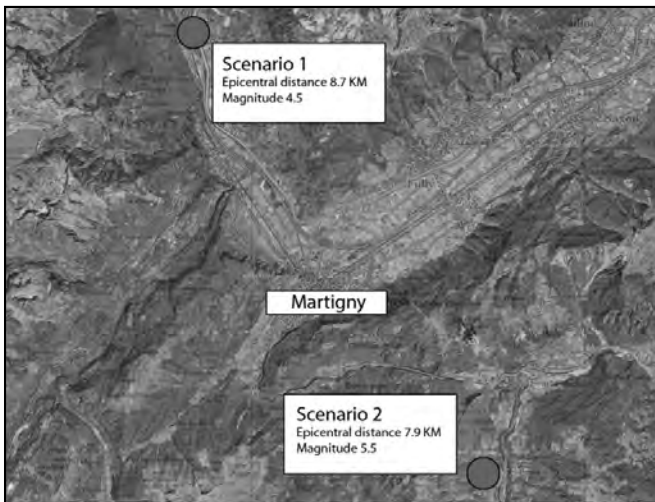
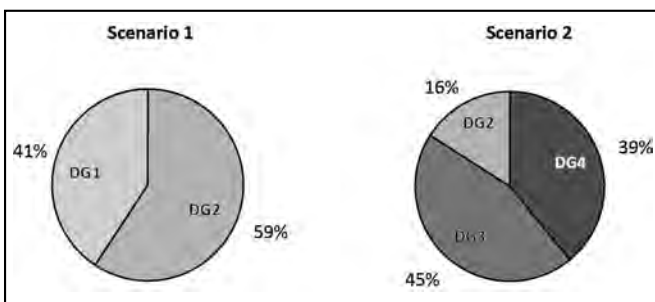


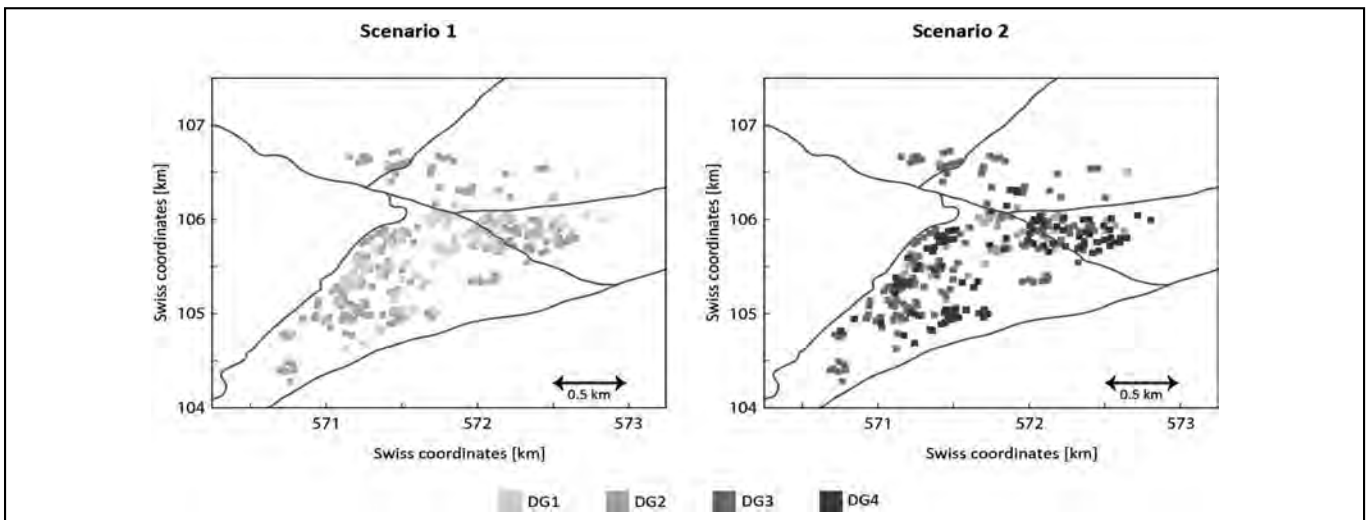
Figura 12 - Distribuzione del danno atteso (distribuzione della vulnerabilità pre-sismica) per i 351 edifici analizzati. La microzonazione ha un'influenza importante sul danneggiamento atteso [immagine prodotta da Reuland Y.]



**Figura 13** - I due scenari considerati: SCENARIO 1, distanza epicentrale di 8.7 km dal centro di Martigny, magnitudo 4.5; SCENARIO 2, distanza epicentrale di 7.9 km dal centro di Martigny, magnitudo 5.5 [immagine prodotta da Diana L.]



**Figura 14** - Distribuzione del grado di danno scaturito dai due scenari realistici analizzati: Scenario 1 – Sisma di magnitudo 4.5 in direzione nord-ovest (8.7 km); Scenario 2 – Sisma di magnitudo 5.5 in direzione sud-est (7.9 km) [immagine prodotta da Reuland Y.]

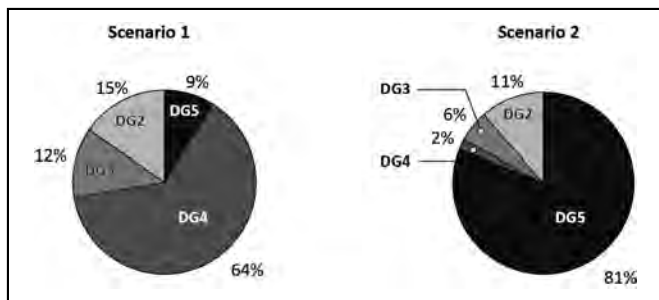


**Figura 15** - Distribuzione geografica del grado di danno raggiunto da ciascun edificio analizzato della città di Martigny relativo agli Scenari 1 e 2 [immagine prodotta da Reuland Y.]

individualmente, è mostrata in Figura 14 (distribuzione) e 15 (mappa). Questi risultati sono basati sulla conoscenza esatta del *performance point* raggiunto da ciascun edificio in occasione della prima scossa (rispettivamente per lo Scenario 1 e lo Scenario 2). Le Figure 14 e 15 mostrano come la reale distribuzione ottenuta nello Scenario 1 è nettamente meno pessimistica che la valutazione ottenuta in fase pre-sismica (Figura 12). Questo è dovuto al fatto che nella valutazione pre-sismica è considerato un evento di magnitudo 5.5 con una distanza di 7.5 km, mentre per lo Scenario 1 è analizzato un evento meno potente. Di conseguenza, la totalità degli edifici raggiunge un danneggiamento pari a DG1 e DG2. Nel caso dello Scenario 2, la domanda sismica è comparabile con quella della valutazione pre-sismica. L'unica differenza risiede nella distanza epicentrale: per la valutazione pre-sismica, l'epicentro preso in considerazione è leggermente più vicino che quello dello Scenario 2. La distribuzione reale del danno dello Scenario 2 risulta pertanto leggermente meno pessimistica rispetto a quella della valutazione pre-sismica.

La valutazione completa del possibile danno che gli edifici possono subire nel caso di un *aftershock* (capacità residua) è mostrato in Figura 16 e 17. Analogamente al reale danneggiamento mostrato in Figura 14 e 15, anche la valutazione post-sismica rispetto al danneggiamento futuro, mostrata in Figura 16 e 17, è ottenuta partendo da una conoscenza esatta su ogni singolo edificio. In questo caso, le valutazioni post-sismiche sulla capacità residua sono ottenute usando la stessa domanda sismica delle valutazioni pre-sismiche e delle curve di capacità ridotte secondo la procedura illustrata nella sezione 2.2 (Figura 7 e 8).

Nel caso dello Scenario 1, un secondo evento sismico (*aftershock*) causerebbe danni che non si discostano di tanto dalla valutazione pre-sismica (vedi Figura 12). L'analogia tra le due distribuzioni è da ricercare nella bassa domanda sismica per lo Scenario 1. Infatti, un danneggiamento DG1 e parte del danneggiamento DG2 fanno rimanere le strut-



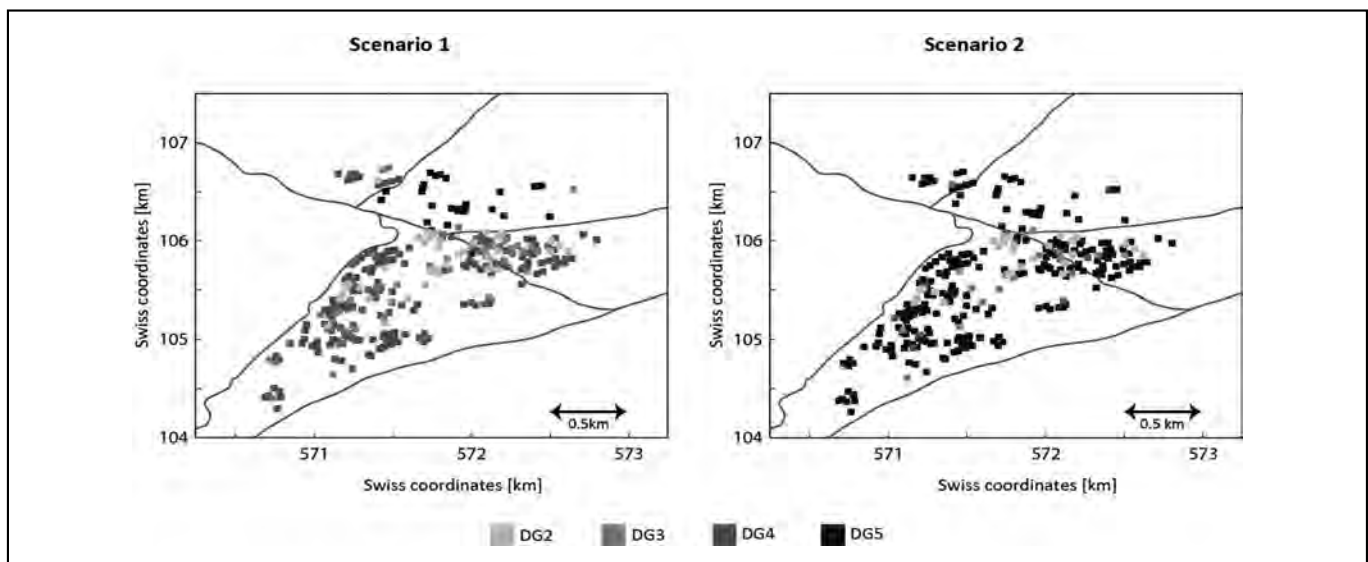
**Figura 16** - Valutazioni post-sismiche sul possibile danno raggiunto nel caso di un *aftershock* ottenute applicando il metodo LM2 del progetto Risk-UE nel caso dello Scenario 1 (sinistra) e 2 (destra) [immagine prodotta da Reuland Y.]

ture all'interno di un comportamento elastico: non si avvia dunque un processo di deterioramento strutturale con una riduzione della rigidità e una conseguente modifica della curva di capacità. Per lo Scenario 2, lo stato degli edifici peggiora nettamente a causa di un evento di maggiore entità. Il danneggiamento atteso dopo un *aftershock* risulta pertanto significativamente più pessimistico che quello ottenuto per lo stato pre-sismico (non danneggiato). La Figura 16 mostra come, sotto l'azione di un *aftershock* con proprietà analoghe al primo evento, per la maggioranza dello stock analizzato (pari all'81% degli edifici) è previsto un collasso (DG5). Questi edifici ovviamente non possono essere dichiarati agibili e al contrario necessitano importanti interventi di ristrutturazione (o di sostituzione) al fine di raggiungere una resistenza analoga allo stato precedente al primo terremoto.

Poiché le distribuzioni dei danni mostrate nelle Figure 16

e 17 sono ottenute utilizzando informazioni precise su tutti gli edifici, queste sono da considerarsi come *ground truth*, le distribuzioni obiettivo reali per intenderci. Tuttavia, come affermato in precedenza, le situazioni post-sismiche sono caratterizzate dalla necessità di un rapido processo decisionale dove il tempo che intercorre tra l'evento e l'elaborazione del giudizio svolge un ruolo determinante. Si ritiene che una prima valutazione della risposta di un'intera città a un evento sismico debba pertanto essere ottenuta in modo rapido al fine di organizzare azioni di emergenza. Di seguito, dunque, si valuterà l'accuratezza delle distribuzioni post-sismiche che possono essere ottenute analizzando solo una parte del patrimonio edilizio, attraverso la scelta di alcuni edifici campione, e la successiva diffusione dei risultati ottenuti su edifici analoghi alla scala urbana.

L'accuratezza dei risultati ottenuti dalla scelta secondo diverse combinazioni degli edifici campione è valutata prima sul reale DG che ha colpito gli edifici dopo la prima scossa e successivamente sul possibile DG futuro in caso di *aftershock*. Nel dettaglio, l'errore commesso rispetto alle distribuzioni *ground truth* è calcolato per 4 possibili combinazioni di edifici campione: (i) selezione degli edifici solamente secondo la loro tipologia costruttiva, che nel caso di Martigny consiste nel diffondere alla scala urbana la valutazione su 4 edifici ai restanti 351; (ii) selezione di un edificio per tipologia e per microzona, per un totale di 12 edifici su 351; (iii) selezione di un edificio per tipologia e per numero di piani, per un totale di 24 edifici su 351 (si ricorda che gli edifici analizzati hanno tra i 3 e gli 8 piani); (iv) selezione di un edificio per tipologia in base alla distanza epicentrale (sono stati selezionati 4 *ranges*) per un totale di 16 edifici selezionati su 351. È ovvio che per operare questa classificazione è necessario conoscere la tassonomia del-



**Figura 17** - Distribuzione geografica del grado di danno raggiunto da ciascun edificio analizzato utilizzando la domanda sismica fornita dagli spettri di risposta delle microzone di Martigny e le curve di capacità derivanti dallo stato danneggiato [immagine prodotta da Reuland Y.]

le costruzioni locali. Si sottolinea però che questa classificazione degli edifici in categorie di riferimento è di per sé già alla base delle valutazioni pre-sismiche e che quindi dovrebbe già essere stata operata. In fase pre-sismica la categorizzazione del patrimonio esistente permette di effettuare valutazioni sistemiche a grande scala e di mettere in atto strategie di *retrofitting* per il miglioramento della resilienza del sistema.

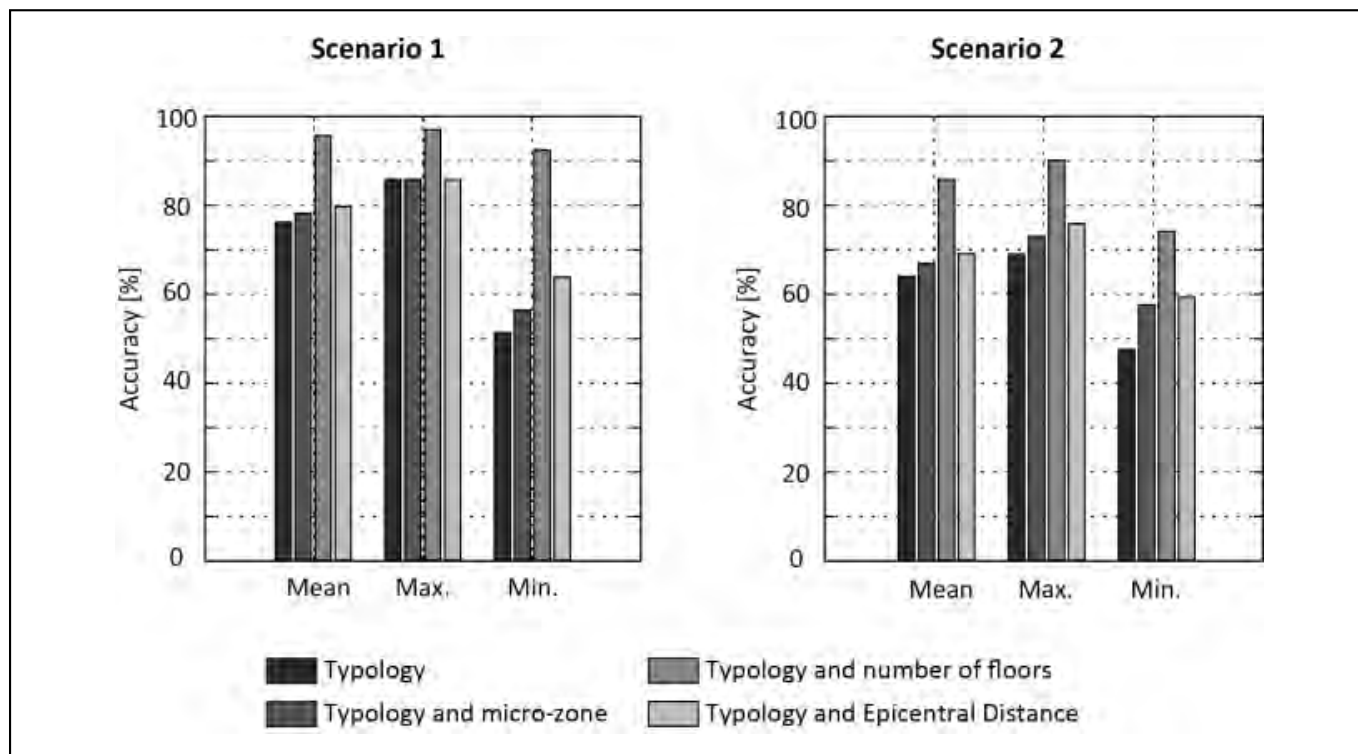
È chiaro che i quattro approcci di *clustering* hanno esigenze temporali diverse poiché la quantità di edifici da ispezionare e misurare cambia da un *cluster* all'altro. Con l'ipotesi di un solo team di ingegneri che esegue sondaggi, 120 minuti sono considerati la quantità minima di tempo per l'ispezione visiva, l'installazione dei sensori, le registrazioni dei dati di vibrazione, l'elaborazione dei dati di vibrazione e l'espressione del giudizio finale sul danno reale subito e sul danno futuro in caso di un *aftershock*. Un

riassunto delle richieste in termini di tempo per i 4 approcci di *clustering* è mostrato nella Tabella 3. Ad integrazione della Tabella 3, si consideri che il totale di ore per eseguire la valutazione edificio-per-edificio sul totale dei 351 edifici analizzati sarebbe di 702 ore (351 edifici X 2 ore ad edificio).

La Figura 18 mostra l'accuratezza relativa alla valutazione del reale danno subito che si può ottenere se le informazioni ottenute dalle diverse ipotesi di *clustering* fossero diffuse a tutti gli edifici analoghi alla scala urbana (351 edifici). Dal momento che la valutazione è fortemente influenzata da quale edificio viene selezionato come campione (ogni edificio ovviamente ha una risposta diversa rispetto ad un altro), sono state effettuate 100 diverse selezioni casuali. In Figura 18 si nota il valore minimo, massimo e medio ottenuto attraverso le 100 selezioni casuali per i quattro diversi *cluster* e per i due Scenari. Si può notare che l'accu-

**Tabella 3 - I quattro diversi clustering, il numero di edifici da rilevare e la richiesta in termini temporali**

| Cluster | Selection                   | Buildings analyzed | Time demand |
|---------|-----------------------------|--------------------|-------------|
| 1       | Type                        | 4 buildings        | 8h          |
| 2       | Type + micro-zones          | 12 buildings       | 24h         |
| 3       | Type + n. of floors         | 24 buildings       | 48h         |
| 4       | Type + epi-central distance | 16 buildings       | 32h         |



**Figura 18 - Accuratezza ottenuta nella valutazione del reale stato di danno dei 351 edifici selezionando in maniera casuale gli edifici campione componenti dei quattro diversi cluster basati sulla sola tipologia costruttiva, sulla tipologia costruttiva combinata alternativamente alle microzone, al numero di piani o alla distanza epicentrale [immagine prodotta da Reuland Y.]**



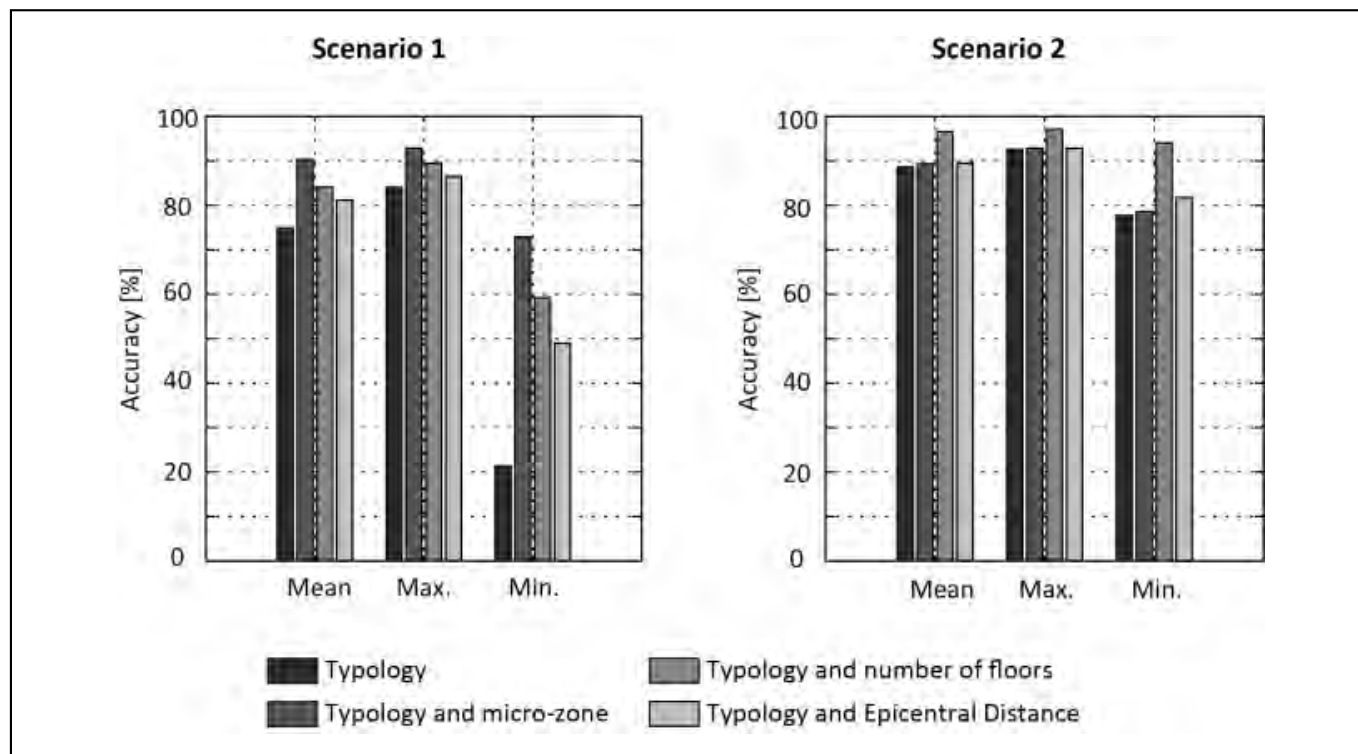
tezza nei risultati generali ottenuti è migliore per lo Scenario 1. Ciò può essere spiegato con il fatto che, essendo lo Scenario 1 uno scenario con una domanda sismica inferiore, sono coinvolti solamente due diversi DG (DG1 e DG2), mentre si arriva a tre gradi di danno (DG1, DG2 e DG3) per lo Scenario 2, come si può notare in Figura 14.

Nel caso della valutazione del reale stato di danneggiamento raggiunto, l'accuratezza migliore è raggiunta quando gli edifici campione sono selezionati in base alla tipologia costruttiva e al numero di piani, diffondendo poi tale valutazione a tutta la città. Questo risultato è dovuto al fatto che in questa combinazione viene selezionato un numero maggiore di edifici campione (24 edifici) rispetto alle altre combinazioni. Sulla stessa linea, la combinazione secondo la tipologia edilizia e la distanza epicentrale (16 edifici campione) fornisce risultati leggermente migliori rispetto a quelli ottenuti dalla combinazione di tipologia costruttiva e microzone (12 edifici).

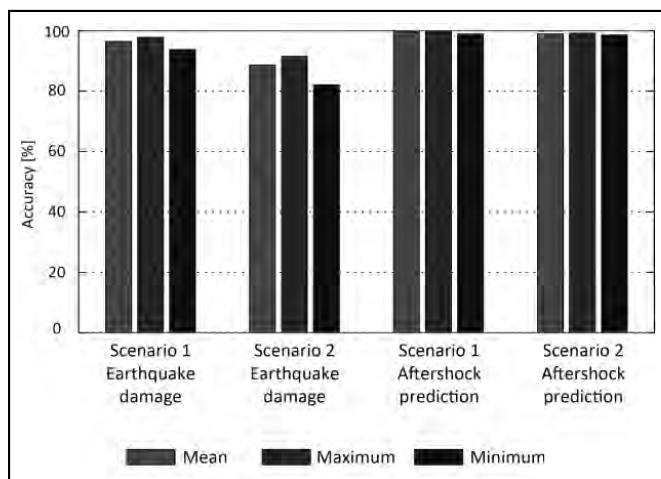
Per quanto riguarda la valutazione dei danni attesi in occasione di un *aftershock* (Figura 19), i risultati cambiano. Difatti, l'influenza delle microzone sulle previsioni di danno, come affermato in precedenza (sez. 3.1), si riscontra chiaramente nello Scenario 1 che è solo marginalmente influenzato dal danno subito durante la prima scossa, data la debole domanda sismica. Quando il danneggiamento dopo la prima scossa ha un'influenza maggiore, come nel caso del-

lo Scenario 2, i migliori risultati sono ottenuti dalla combinazione di tipologia e numero di piani, che include un numero maggiore di edifici campione (24).

In conclusione, è valutata l'accuratezza che può essere ottenuta dalla valutazione di edifici selezionati in base a tre fattori (tipologia costruttiva, numero di piani e microzone). In questo approccio, sono valutati 72 edifici: 4 (tipologie) per 3 (microzone) per 6 (numero di piani coinvolti da 3 a 8). I 72 edifici considerati rappresentano approssimativamente il 20% del patrimonio edilizio totale analizzato e per la loro valutazione risulterebbero necessari 6 giorni di lavoro continuativo (144 ore per le ispezioni visive + AVM). L'accuratezza ottenuta in questo caso (raggruppando secondo tre fattori), sia per quanto riguarda il DG raggiunto dopo la prima scossa che per il danneggiamento previsto in seguito ad un *aftershock*, è mostrata in Figura 20. Come si può notare, l'accuratezza della valutazione del DG subito inizialmente è inferiore all'accuratezza ottenuta per la valutazione delle previsioni di danneggiamento futuro. Questa differenza può essere spiegata dal fatto che le informazioni che non sono prese in considerazione (per questa combinazione a tre fattori la sola informazione non considerata è quella relativa alla distanza epicentrale) risultano avere un'influenza maggiore per quanto riguarda i risultati relativi al danno subito che al danno previsto.



**Figura 19** - Accuratezza ottenuta nelle valutazioni post-sismiche sul possibile danneggiamento in caso di un *aftershock* sui 351 edifici usando una selezione casuale di edifici basati sulla sola tipologia costruttiva, sulla tipologia costruttiva combinata alternativamente alle microzone, al numero di piani o alla distanza epicentrale [immagine prodotta da Reuland Y.]



**Figura 20** - Accuratezza ottenuta nel caso della combinazione di tre fattori: tipologia costruttiva; microzone e numero di piani. La percentuale di accuratezza ottenuta selezionando solamente un 20% di edifici campione rispetto a tutto il patrimonio considerato è sufficiente per le esigenze delle valutazioni post-sismiche [immagine prodotta da Reuland Y.]

Nel raggruppare gli edifici campione secondo tre fattori (tipologia costruttiva, numero di piani e microzone), l'accuratezza minima ottenuta per il DG reale raggiunto supera l'80% mentre per le valutazioni sul danneggiamento futuro si supera il 95% in tutti i casi. Questi dati sull'accuratezza delle valutazioni si ritengono sufficienti per le esigenze di valutazioni post-sismiche affidabili necessarie a predisporre misure di sicurezza immediate. Come descritto in precedenza, il numero di edifici analizzati, successivamente ai primi 6 giorni (di sopralluoghi continui), può aumentare continuamente fornendo un aumento dell'accuratezza delle mappe post-sismiche.

Si sottolinea, tuttavia, che dal momento che gli elementi non strutturali secondari non vengono presi in considerazione in questo tipo di valutazioni, i risultati ottenuti non possono essere usati direttamente per elaborare le decisioni finali riguardo l'agibilità degli edifici, ma piuttosto possono risultare utili per stabilire un ordine sulle priorità di ispezione e sulla messa in sicurezza dei percorsi pubblici e delle vie di fuga.

#### 4. IMPATTI ECONOMICI DELL'IMPIEGO DELLE AVM NELLE VALUTAZIONI SISMICHE ALLA SCALA URBANA

Sebbene il presente articolo sia incentrato principalmente su aspetti tecnici relativi ai giudizi sulla vulnerabilità sismica, si sottolinea che l'impiego delle AVM nelle valutazioni pre- e post-sismiche a larga scala ha delle considerevoli conseguenze sulla gestione delle risorse economiche e degli investimenti.

Al fine di tenere in considerazione tutti i diversi aspetti economici connessi alla resilienza sismica dei sistemi urbani,

un quadro completo, sulla scia delle ricerche in ambito dell'ingegneria sismica basata sulle prestazioni (*performance-based earthquake engineering*), risulta necessario (Krawinkler e Miranda, 2004, Moehle e Deierlein, 2004). Con tale approccio si rende possibile una stima affidabile del rapporto costi-benefici degli interventi di *retrofitting* e dei benefici economici derivanti da una maggiore conoscenza del comportamento e del danneggiamento degli edifici in fase post-terremoto.

Tuttavia, lo sviluppo di tale modello basato sull'approccio alle prestazioni (*performance-based engineering*) si fonda sulla possibilità di reperimento di grandi quantità di informazioni sulla risposta e sul danneggiamento delle strutture a passati eventi sismici, sia a livello di prestazioni dei singoli componenti strutturali, sia a livello di perdite subite. Inoltre, al fine di combinare nei modelli di calcolo le diverse fonti di incertezza presenti, è necessario un lasso di tempo che difficilmente risulta compatibile con le necessità speditive delle valutazioni post-sismiche. A queste difficoltà, si aggiunge la scarsità di informazioni su alcuni tipi di strutture, come ad esempio le strutture in muratura non rinforzata, che, seppur particolarmente diffuse in Europa, risultano difficilmente modellabili con conseguente difficoltà di stima del comportamento atteso (Giordano *et al.*, 2018). Pertanto, soprattutto nelle regioni con un rischio sismico medio-basso, tale approccio ad alta intensità di conoscenza non risulta attuabile nell'immediato mentre risulta particolarmente vantaggioso in aree ad alto rischio sismico e già colpite da eventi nel recente passato. Per una valutazione economica completa delle conseguenze connesse agli eventi sismici, è fondamentale prendere in considerazione i costi indiretti, come i tempi di inattività (*downtime*), le interruzioni di business (*business interruption*) e le funzioni della comunità, che vanno al di là degli approcci tradizionali e per i quali è necessario dell'ulteriore lavoro futuro (Krawinkler e Deierlein, 2014). Ciononostante, nel proseguimento della presente sezione, si è voluto comunque fornire una quantificazione preliminare di alcuni impatti economici connessi al caso di studio.

Il processo di *clustering* degli edifici, descritto nella sezione 3.3, combinato con le AVM, offre l'opportunità di eseguire valutazioni post-sismiche su sottoinsiemi relativamente piccoli di classi di edifici. La conseguente valutazione di pochi edifici campione rispetto alla valutazione "uno a uno" riduce considerevolmente il tempo necessario per fornire ai decisori scenari di danno urbano speditivi ma affidabili. Nel città-prototipo di Martigny (solo 351 edifici sono considerati su un totale di circa 2.500), l'approccio di *clustering* consente una significativa riduzione delle valutazioni: solo 72 edifici possono essere valutati senza perdere in accuratezza. Tale riduzione nel numero di oggetti da valutare corrisponde a una riduzione del tempo di valutazione dell'80%. Come affermato in precedenza, per la valutazione *in loco* e la seguente analisi dei dati registrati in remoto, è necessario da parte di un team un tempo minimo di 120 minuti per esprimere giudizi relativi a un singolo edificio. Considerando una squadra composta da quattro esperti, con un costo compreso tra 50 e 75 €/h<sup>4</sup>,

per il piccolo campione di 351, il costo totale della valutazione ammonterebbe a 28.000 - 43.000 € anziché 140.000 - 210.000 €. Diffuso a tutti i 2.500 edifici di Martigny, la riduzione dei costi per la valutazione post-sismica è ancora più evidente. L'approccio basato sul *clustering* con AVM porta ad un costo totale di 200.000 - 300.000 € anziché di 1.000.000 - 1.500.000 € dell'approccio standard edificio per edificio. Oltre a questi costi diretti di valutazione, la riduzione del tempo necessario all'espressione dei giudizi post-sismici limita anche i costi indiretti derivanti dal *business and production interruption* degli edifici che non vengono dichiarati rapidamente agibili.

L'impiego dell'AVM nelle valutazioni su vasta scala produce un altro risultato importante correlato alla stima delle perdite economiche dirette e al *downtime*.

Le perdite economiche dirette si riferiscono ai costi necessari per la riparazione dei danni subiti dagli edifici durante il terremoto. Tali costi diretti sono legati al danno strutturale, al danno non strutturale e al danno di tutto ciò che è contenuto negli edifici. I danni strutturali, a cui in particolare modo si riferisce il presente articolo, incidono per un 10 - 25% sul costo di ricostruzione mentre i componenti non strutturali possono comportare costi fino al 33%. Dopo un terremoto dunque, la maggior parte degli investimenti di riabilitazione e ristrutturazione degli edifici è connessa ai componenti non strutturali (Mayes, 1995). In questo documento tuttavia, non sono stati presi in considerazione danni relativi agli elementi non strutturali e ai contenuti.

In una fase pre-sismica, al fine di predeterminare i costi diretti attesi derivanti dal danno strutturale, è possibile prendere in considerazione una previsione probabilistica basata sulla prestazione sismica attesa (*performance point*). Il danno strutturale atteso è strettamente connesso all'individuazione del *performance point* (Sezione 2.1 e 2.2). La probabilità di superamento di ciascuno dei livelli di danno ( $P_{Dk}$ ,  $k = 0, \dots, 5$ ) viene valutata mediante specifiche curve di fragilità basate su distribuzioni lognormali (Lago-

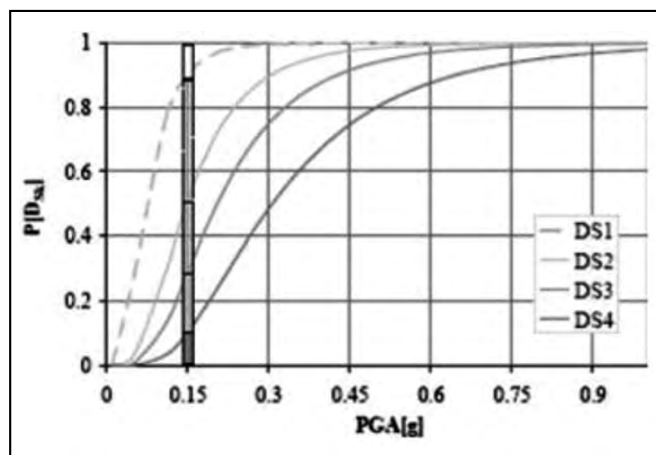


Figura 21 - Esempio di curve di fragilità [Lagomarsino and Giovinazzi 2006]

marsino e Giovinazzi, 2006) (Figura 21). Secondo l'EMS-98 (Grünthal, 1998), a ciascun grado di danno può essere assegnata una percentuale di danneggiamento specifico (Tabella 4). Diverse percentuali di danneggiamento sono state proposte in letteratura (Kappos, 2006).

Una volta definite la probabilità di superamento di ciascun grado di danno e le percentuali di danneggiamento in base al *performance point* ottenuto, è possibile calcolare il costo di riparazione. La percentuale di danneggiamento medio (MDR) è definita come:

$$MDR = \sum_{k=0}^5 P_{Dk} \cdot CDF_k \quad (2)$$

dove  $CDF_k$  è il fattore centrale di danneggiamento (Tabella 4) che può essere definito per ogni grado di danno.

Una volta definito MDR, il costo di riparazione DC è calcolato come:

$$DC = DR \cdot RPV \quad (3)$$

dove RPV è il costo di ricostruzione, determinato sulla base dei prezziari parametrici per il sito preso in considerazione. Nel caso di valutazioni post-sismiche, il calcolo di DC è strettamente collegato al danneggiamento osservato. Per

<sup>4</sup> DECRETO 17 giugno 2016 Approvazione delle tabelle dei corrispettivi commisurati al livello qualitativo delle prestazioni di progettazione adottato ai sensi dell'articolo 24, comma 8, del decreto legislativo n. 50 del 2016.

Tabella 4 - Gradi di danno e percentuali di danneggiamento [EMS-98]

| Danno | Percentuale di danneggiamento [%] | Fattore centrale di danneggiamento [%] |
|-------|-----------------------------------|--|
| 0     | Nessun danno                      | 0                                      |
| 1     | Danno trascurabile/leggero        | 0 - 1                                  |
| 2     | Danno moderato                    | 1 - 20                                 |
| 3     | Danno sostanziale                 | 20 - 60                                |
| 4     | Danno molto forte                 | 60 - 100                               |
| 5     | Distruzione                       | 100                                    |

quantificare il valore di MDR in questo caso nessun tipo di calcolo probabilistico viene effettuato. Il valore di MDR è strettamente connesso alla percentuale di danneggiamento riscontrata *in loco*.

Con il termine *downtime*, nel caso di contesti sismici, ci si riferisce al lasso di tempo durante il quale la funzione elargita dagli edifici è sospesa a causa del danno subito e dei lavori di riparazione necessari. In altri termini, è il tempo necessario per il recupero delle funzioni originarie dopo un terremoto. È quindi più generalmente connesso al concetto di resilienza delle comunità e dei sistemi urbani. Diversi stati di recupero possono essere definiti (Bonowitz, 2011): re-occupazione degli edifici, rifunzionalizzazione pre-terremoto, recupero completo. Molina Hutt *et al.* (2016) hanno definito il calcolo del *downtime* complessivo suddividendo i ritardi in diverse categorie (interruzione delle reti e dei sistemi, fattori di impedimento e lavori di riparazione):

$$\text{Downtime} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \text{utility disruption} \\ \text{impeding actors} \end{array} \right\} + \text{repair work} \quad (4),$$

dove con *utility disruption* ci si riferisce al tempo necessario per il completo o parziale recupero di funzionalità dei sistemi impiantistici e delle reti urbane necessario al corretto funzionamento degli edifici (acqua, gas, elettricità), con *impeding factors* al tempo durante il quale fattori esterni (la mobilitazione dei valutatori in fase post-sismica, la mobilitazione degli appaltatori, la mancanza di finanziamenti) possono impedire l'inizio dei lavori di riparazione (*repair work*).

Questo tipo di calcolo del *downtime* è chiaramente limitato da una lunga serie di incertezze che sono di difficile quantificazione. Un calcolo omnicomprendente del *downtime* sarà oggetto di ricerche future. Nell'ambito del presente articolo, il calcolo del *downtime* è considerato esclusivamente in connessione alla valutazione dell'agibilità degli edifici.

L'uso delle AVM a scala urbana si traduce principalmente in una migliore valutazione del danno reale che gli edifici hanno subito durante un terremoto. La determinazione del danno reale sofferto dagli edifici ha effetti evidenti sul giudizio sull'agibilità degli edifici. Anche se, come affermato in precedenza, i giudizi sull'agibilità non possono essere automatizzati e direttamente correlati ai risultati delle AVM, alcune importanti considerazioni possono essere fatte. Nelle simulazioni presentate nella Sezione 3, tutti gli edifici che a seguito della simulazione di un *aftershock* sono subiscono un DG3, DG4 o DG5 possono essere considerati non agibili. D'altra parte, gli edifici simulati in DG1 possono essere considerati agibili. Il giudizio relativo alla DG2 è strettamente connesso all'ispezione visiva e all'eventuale presenza di instabilità locali. Per semplicità, tutti gli edifici in DG2 sono stati considerati come agibili.

Con l'impiego dei dati forniti dalle AVM a supporto delle analisi visive, si suppone che l'85% degli edifici subisca un DG3 - DG4 - DG5 nel caso dello Scenario 1 e l'89% nel caso dello scenario 2. L'approccio tradizionale che prevede esclusivamente l'ispezione visuale, fornisce lo stesso risultato

(85%) per lo Scenario 1 (dove il danneggiamento successivo alla prima scossa risulta minimo) mentre il 100% degli edifici è considerato non agibile nel caso dello Scenario 2.

Con l'uso delle AVM, il numero totale di edifici considerati non agibili è quindi ridotto nel caso di un forte evento sismico, mentre non si evidenziano differenze importanti nel caso di un debole evento. L'utilizzo di AVM riduce le incertezze legate alle valutazioni post-sismiche con una conseguente riduzione dei tempi di inutilizzo previsti.

## 5. CONCLUSIONI

Le valutazioni sismiche alla scala urbana richiedono strumenti di valutazione rapidi che siano accompagnati da un giudizio ingegneristico oggettivo, affidabile ed esperto. La soggettività e le incertezze legate alle ispezioni visive standard tuttavia minano la precisione delle valutazioni post-sismiche, oltre a essere particolarmente onerose in termini di tempo, con il rischio di rallentare drammaticamente l'intero processo. In questo articolo è stato proposto un approccio che combina l'ispezione visiva e le misurazioni di vibrazioni ambientali. Il processo di ispezione visiva rimane ovviamente alla base del processo di sopralluogo post-sismico. I suoi esiti non possono essere automatizzati o direttamente sostituiti dalle informazioni raccolte dalle misurazioni delle vibrazioni ambientali. Questo è dovuto al fatto che le fonti di pericolo possono talvolta scaturire da elementi non strutturali, difficilmente rilevabili dai sensori che invece si limitano a fornire interessanti informazioni sulle caratteristiche strutturali.

L'impiego di tecnologie di identificazione strutturale, insieme all'ispezione visiva tradizionale, riduce la soggettività e il tempo necessario all'espressione del giudizio finale sul danno reale subito dagli edifici colpiti da un terremoto e sul danno futuro che eventuali *aftershock* potrebbero causare. Questa metodologia di sopralluogo congiunto fornisce ai responsabili delle decisioni informazioni più che affidabili in un lasso di tempo ridotto. Con una riduzione della soggettività nell'espressione del giudizio e con una riduzione sulle incertezze riguardo al comportamento di alcuni elementi strutturali derivante dall'elaborazione dalle misurazioni delle vibrazioni delle strutture alle sollecitazioni ambientali, il tempo necessario all'espressione di un giudizio "esperto" si riduce drasticamente con importanti vantaggi nel management post-sismico. La metodologia (ispezione visiva + AVM), sviluppata per l'analisi di singoli edifici, viene adattata all'intera città e viene valutato il potenziale di raggruppamento degli edifici. Vengono tratte le seguenti conclusioni:

- Il *clustering* degli edifici in base alle loro tipologie costruttive, alle microzone di appartenenza e all'altezza (numero di piani) fornisce al decisore una mappatura affidabile del danno subito (accuratezza 80%) e della vulnerabilità futura (accuratezza 95%) dopo aver valutato solo il 20% del patrimonio edilizio. Se è disponibile meno tempo, il caso di studio analizzato suggerisce di basarsi sulla tipologia costruttiva e sull'altezza come *clusters* preliminari.

- I risultati ottenuti dalla diffusione alla scala urbana dei dati ottenuti su alcuni edifici campione, nel caso di eventi ad alta intensità, sono più affidabili se si considera la valutazione del danneggiamento futuro, piuttosto che la valutazione del danneggiamento raggiunto dopo la prima scossa. Nel caso di eventi a bassa intensità, non si riscontra una tendenza molto chiara. In aggiunta, si riscontra, soprattutto per la valutazione del danno sofferto, che l'accuratezza delle valutazioni diminuisce con l'aumentare dell'eterogeneità dei gradi di danneggiamento (DG) coinvolti.
- La selezione degli edifici campione da testare ha una chiara influenza sulla distribuzione finale. Soprattutto nel caso di eventi a bassa intensità e per la determinazione del danno futuro, l'accuratezza minima raggiunta può scendere fino al 20% in quanto è influenzata dal particolare campione che viene selezionato.
- Diverse conseguenze economiche sono riscontrabili e si riferiscono principalmente alla riduzione del tempo necessario all'espressione del giudizio e alla riduzione del tempo complessivo di inutilizzo degli edifici. La riduzione del tempo necessario all'espressione di giudizi in fase post-sismica ha un impatto diretto sui costi dei rilevatori, per i quali, grazie all'impiego di AVM e al *clustering* degli edifici, si arriva ad una riduzione dell'80%. L'impiego di AVM permette, nel caso di eventi sismici di maggiore entità, anche una riduzione del numero degli edifici (-11%) dichiarati non agibili rispetto alle valutazioni tradizionali basate esclusivamente sulle ispezioni vive e ritenute maggiormente conservatrici. Nessuna differenza tra i due approcci si denota nel caso di eventi di minore entità.

Tuttavia, va notato che il lavoro presentato in questo documento non include diverse fonti di incertezza (adottando

un approccio conservativo) che saranno incluse in studi futuri:

- Nel caso di studio, si considera che tutti gli edifici si comportino secondo la curva di resistenza minima. Tuttavia, questo non è realistico e anzi eccessivamente pessimista. Un passo importante verso un'accurata valutazione su scala urbana si basa sull'individuazione degli edifici che si comportano secondo il comportamento minimo, massimale o intermedio. Dovrebbe essere valutato l'errore commesso ignorando la capacità di riserva (prendendo in considerazione solo le curve minime).
- Le incertezze riguardanti la rigidità delle strutture danneggiate sono state ignorate nel presente lavoro. In altre parole, i risultati mostrati nel caso di studio si basano sull'ipotesi che la rigidità residua, sotto l'azione di sollecitazioni dalla larga ampiezza, sia esattamente la rigidità secante rispetto allo spostamento massimo (ipotesi prudente) e che la frequenza naturale misurata sia collegata alla rigidità danneggiata seguendo esattamente l'equazione 1. In realtà, questa ipotesi non è realistica e queste incertezze devono essere prese in considerazione dettagliatamente.
- La metodologia proposta dovrebbe essere applicata alle città con più tipologie e più edifici per valutare la generalità delle conclusioni.

### RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano Ivan Vollet e Lorin Favre per il loro contributo all'elaborazione dei risultati sul caso di studio. Questo lavoro è stato parzialmente finanziato dalla Swiss National Science Foundation con il contratto No. 200020-169026.

\* **Lorenzo Diana, Yves Reuland**, IMAC (Applied Computing and Mechanics Lab) – IIC – ENAC – École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

e-mail: [lorenzo.diana@epfl.ch](mailto:lorenzo.diana@epfl.ch); [yves.reuland@epfl.ch](mailto:yves.reuland@epfl.ch)

\*\* **Lorenzo Diana**, DISG (Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica) - Università di Roma La Sapienza.

e-mail: [lorenzo.diana@epfl.ch](mailto:lorenzo.diana@epfl.ch)

### Bibliografia

BAGGIO C., BERNARDINI A., COLOZZA R., CORAZZA L., DELLA BELLA M., DI PASQUALE G., DOLCE M., GORETTI A., MARTINELLI A., ORSINI G., PAPA F., ZUCCARO G., *Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES)*, Editrice Italiani nel Mondo srl, 2009.

BEHMANESH I., MOAVENI B., LOMBAERT G., PAPADIMITRIOU C., *Hierarchical Bayesian model updating for structural identification*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 64-65, 2015, pp. 360-376.

BONOWITZ D., *Resilience criteria for seismic evaluation of existing buildings*, Special Projects Initiative Rep. A 2008, Structural Engineers Association of Northern California, San Francisco, 2011.

BRINCKER R., ZHANG L., ANDERSEN P., *Modal identification of output only systems using frequency domain decomposition*, Smart Materials and Structures, Vol. 10, No. 3, 2001, p. 441.

BROWNJOHN J.M., *Structural health monitoring of civil infrastructure*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 365, 2007, pp. 589-622.

- CALVI G.M., PINHO R., MAGENES G., BOMMER J.J., RESTREPO-VÉLEZ L.F., CROWLEY H., *Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years*, ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 472, Vol. 43, No. 3, 2006, pp. 75-104.
- CARREÑO M.L., CARDONA O.D., BARBAT A.H., *Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach*, Natural Hazards, Vol. 40, No. 1, 2007, pp. 137-172.
- CATBAS NECATI F., KIJEWski-CORREA T., AKTAN EMIN A., (EDS) *Structural Identification of Constructed Systems*, 2013.
- CATTARI S., CURTI E., GIOVINAZZI S., LAGOMARSINO S., PARODI S., *Un modello meccanico per l'analisi di vulnerabilità del costruito in muratura a scala urbana*, XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Genova, 25-29 Gennaio 2004.
- CLINTON J.F., BRADFORD S.C., HEATON T.H., FAVELA J., *The observed wander of the natural frequencies in a structure*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 1, 2006, pp. 237-257.
- DIANA L., *Seismic vulnerability assessment at urban scale: state of the art and perspectives*, Valori e valutazioni, Vol. 18, 2017, pp. 69-80.
- DIANA L., MANNO A., LESTUZZI P., PODESTÀ S., LUCHINI C., *Impact of displacement demand reliability for seismic vulnerability assessment at an urban scale*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 112, 2018a, pp. 35-52.
- DIANA L., REULAND Y., MANNO A., LESTUZZI P., PODESTÀ S., *Seismic displacement-demand and urban damage distribution: the impact of different methods on vulnerability assessment*, in Xudong Qian, Sze Dai Pang, Ghim Ping Raymond Ong, Kok-Kwang Phoon (eds), Proc. of the 6<sup>th</sup> Intl. Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (6ISRERM) 31 May – 1 June 2018, Singapore, 2018b.
- DIANA L., LESTUZZI P., PODESTÀ S., LUCHINI C., *Improved Urban Seismic Vulnerability Assessment Using Typological Curves and Accurate Displacement Demand Prediction*, Journal of Earthquake Engineering, 2019. DOI: 10.1080/13632469.2019.1597784.
- DORVASH S., PAKZAD S.N., LACROSSE E.L., *Statistics based localized damage detection using vibration response*, Smart Structures and Systems, Vol. 14, No. 2, 2014, pp. 85-104.
- D'URSO F., PERUZZI R., GALMARINI A., *Manuel d'utilisation de la fiche d'évaluation post-sismique des bâtiments*, Rapport pour le Canton du Valais, Suisse, 2015 (en français).
- FAN W., QIAO P., *Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study*, Structural Health Monitoring, Vol. 10, No. 1, 2011, pp. 83-111.
- FOTI D., GATTULLI V., POTENZA F., *Output-Only Identification and Model Updating by Dynamic Testing in Unfavorable Conditions of a Seismically Damaged Building*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 29, No. 9, 2014, pp. 659-675.
- FEMA 178, *NEHRP handbook for the seismic evaluation of existing buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, 1997.
- GALLOWAY B., HARE J., BRUNSDON D., WOOD P., LIZUNDIA B., STANNARD M., *Lessons from the Post-Earthquake Evaluation of Damaged Buildings in Christchurch*, Earthquake Spectra, Vol. 30, No. 1, 2014, pp. 451-474.
- GIORDANO N., CRESPI P., FRANCHI A., *Cost-benefit analysis for the retrofit of masonry buildings through performance-based seismic assessment*, 10th International Masonry Conference. G. Milani, A. Taliercio, S. Garrity, 2018, pp. 982-990.
- GOULET J.-A., SMITH I.F., *Structural identification with systematic errors and unknown uncertainty dependencies*, Computers & Structures, Vol. 128, 2013, pp. 251-258 (<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.07.009>).
- GNDT, *Rischio sismico di edifici pubblici – Parte I: aspetti metodologici*, Centro Servizi Quasco, Bologna, 1993, p. 425.
- GRÜNTAL, G., *European Macroseismic Scale 1998 EMS-98*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Lussemburgo, 1998.
- GRÜNTAL G., MUSSON R. M. V., SCHWARZ J., STUCCHI M., *European Macroseismic Scale 1998, EMS-98*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 19, 2001.
- KAPPOS A.J., PANAGOPOULOS G., PANAGIOTOPOULOS C., PENELIS G., *A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings*, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 4, 2006, pp. 391-413.
- KRAWINKLER H., MIRANDA E., *Performance-based earthquake engineering*, Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering. Vol. 9, 2004, pp. 1-9.
- KRAWINKLER H., DEIERLEIN G.G., *Challenges towards achieving earthquake resilience through performance-based earthquake engineering*, Performance-Based Seismic Engineering: Vision for an Earthquake Resilient Society. Springer, 2014, pp. 3-23.
- LAGOMARSINO S., GIOVINAZZI S., *Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings*, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 4, 2006, pp. 415-443.
- LESTUZZI P., PODESTÀ S., LUCHINI C., GAROFANO A., KAZANTZIDOU-FIRTINIDOU D., BOZZANO C., *Validation and improvement of Risk-UE LM2 capacity curves for URM buildings with stiff floors and RC shear walls*, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 15, No. 3, 2017, pp. 1111-1134.
- LUCHINI C., *Development of displacement-based methods for seismic risk assessment of the existing built environment*, PhD thesis, University of Genova, Italy, 2016.
- MAYES R.L., *Interstory Drift Design and Damage Control Issues*, Earthquake Spectra, Vol. 13, No. 4, 1995, pp. 703-719.
- MARQUIS F., JENNA JIHYUN KIM, ELWOOD K.J., CHANG S.E., *Understanding post-earthquake decisions on multi-storey concrete buildings in Christchurch, New Zealand*, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 15, No. 2, 2017, pp. 731-758.
- MARSHALL J.D., BARNES J.C., GOULD N.C., JAISWAL K., LIZUNDIA B., SWANSON D.B., TURNER F., *Post-Earthquake Building Safety Assessments for the Canterbury Earthquakes*, Structures Congress 2012, 2012, pp. 1057-1068.

- MCENTIRE D.A., COPE J., *Damage Assessment After the Paso Robles, San Simeon, California, Earthquake: Lessons for Emergency Management*, Natural Hazards Center, 2004.
- MICHEL C., ZAPICO B., LESTUZZI P., MOLINA F.J., WEBER F., *Quantification of fundamental frequency drop for unreinforced masonry buildings from dynamic tests*, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 40, No. 11, 2011, pp. 1283-1296.
- MIRSHAFIEI F., MIRSHAFIEI M., MCCLURE G., *A new three-dimensional seismic assessment method (3d-sam) for buildings based on experimental modal analysis*, *Computers & Structures*, Vol. 180, 2017, pp. 125-137.
- MOEHLE J., DEIERLEIN G.G., *A framework methodology for performance-based earthquake engineering*, 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004.
- MOLINA HUTT C., ALMUFTI I., WILLFORD M., DEIERLEIN G., *Seismic Loss and Downtime Assessment of Existing Tall Steel-Framed Buildings and Strategies for Increased Resilience*, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, No. 8, 2016.
- ONUR T., VENTURA C.E., LIAM FINN W.D., *Regional seismic risk in British Columbia — damage and loss distribution in Victoria and Vancouver*, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 32, 2005, pp. 361-371.
- OTANI S., *Seismic vulnerability assessment methods for buildings in Japan*, *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, Vol. 2, No. 2, 2000, pp. 47-56.
- ÖZER E., SOYÖZ S., *Vibration-Based Damage Detection and Seismic Performance Assessment of Bridges*, *Earthquake Spectra*, Vol. 31, 2013, pp. 137-157 (<https://doi.org/10.1193/080612EQS255M>).
- REN W.-X., ZHAO T., HARIK I.E., *Experimental and analytical modal analysis of steel arch bridge*, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, 2004, pp. 1022-1031.
- RÉSONANCE INGÉNIEURS-CONSEILS SA, *Microzonage sismique spectral de Martigny*, Retrieved March 14, 2019, (<https://www.crealp.ch/fr/accueil/le-crealp/telechargement-doc/category/187-cartes-seismies.html>), 2015.
- REULAND Y., GAROFANO A., LESTUZZI P., SMITH I.F.C., *Evaluating seismic retrofitting through ambient vibration tests and numerical models*, IABSE Conference 2015 (Structural Engineering – Providing solutions to global challenges), 22-25 September 2015, Geneva, Switzerland, 2015.
- REULAND Y., ABOU JAOUDE A.A.R., LESTUZZI P., SMITH I.F.C., *Usefulness of ambient-vibration measurements for seismic assessment of existing structures*, Fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR), Zurich, Switzerland, 13-15 September 2017a.
- REULAND Y., LESTUZZI P., SMITH I.F.C., *Data-interpretation methodologies for non-linear earthquake response predictions of damaged structures*, *Frontiers in Built Environment*, Vol. 3, 2017b, pp. 3-43.
- REULAND Y., DIANA L., LESTUZZI P., SMITH I.F.C., *Structural resilience through model-based data interpretation: from building to cityscale post-seismic assessment*, in Xudong Qian, Sze Dai Pang, Ghim Ping Raymond Ong, Kok-Kwang Phoon (eds), Proc. of the 6<sup>th</sup> Intl. Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (6ISRERM) 31 May – 1 June 2018, Singapore, 2018.
- REULAND Y., LESTUZZI P., SMITH I.F., *Measurement-based support for post-earthquake assessment of buildings*, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019a, pp. 1-16.
- REULAND Y., LESTUZZI P., SMITH I.F., *A model-based data-interpretation framework for post-earthquake building assessment with scarce measurement data*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 116, pp. 253-263, 2019b (<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.008>).
- ROECK G.D., *The state-of-the-art of damage detection by vibration monitoring: the SIMCES experience*, *Journal of Structural Control*, Vol. 10, pp. 127-134, 2003 (<https://doi.org/10.1002/stc.20>).
- ROSSETTO T., KAPPOS A.J., KOURIS L.A., INDIRLI M., BORG R.P., LLOYD T.O., SWORD-DANIELS V., *Comparison of damage assessment methodologies for different natural hazards*, Urban habitat constructions under catastrophic events (Proceedings), 2010.
- SHENG-LIN LIN, UMA S.R., KING A., *Empirical fragility curves for non-residential buildings from the 2010-2011 Canterbury earthquake sequence*, *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 1-29, 2017.
- SMITH I.F.C., *Studies of Sensor-Data Interpretation for Asset Management of the Built Environment*, *Frontiers in Built Environment*, Vol. 2, No. 8, 2016.
- TREVIPOULOS K., GUÉGUEN P., *Period elongation-based framework for operative assessment of the variation of seismic vulnerability of reinforced concrete buildings during after-shock sequences*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 84, 2016, pp. 224-237.
- UNISDR, *From Shared Risk to Shared Value: The Business Case for Disaster Risk Reduction*, Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, 2013.
- VIDAL F., NAVARRO M., ARANDA C., ENOMOTO T., *Changes in dynamic characteristics of Lorca RC buildings from pre-and post-earthquake ambient vibration data*, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2013, pp. 1-16.