



## Scenari di pericolosità sismica e di danno per la città di Gorizia

Matteo Barnaba<sup>a</sup>, Marco Fasan<sup>a</sup>, Claudio Amadio<sup>a</sup>, Salvatore Noè<sup>a</sup>, Fabio Romanelli<sup>b</sup>, Franco Vaccari<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Via Alfonso Valerio 6/1, 34127 Trieste, Italy

<sup>b</sup> Dipartimento di Matematica e Geoscienze, via Weiss 4, 34128 Trieste, Italy

*Keywords: pericolosità; accelerogrammi; danno; metodo meccanico; Gorizia*

### ABSTRACT

In questa memoria si presentano alcuni dei risultati ottenuti da recenti studi relativi alla stima della pericolosità e del rischio sismico per la città di Gorizia. Per la valutazione della pericolosità sismica si è ricorsi alla metodologia sviluppata presso il dipartimento di Matematica e Geoscienze di Trieste con cui, attraverso la modellazione dei processi di generazione e di propagazione delle onde sismiche, si stima lo scuotimento al sito in forma di segnali a larga banda e inclusivi degli effetti di sito. Grazie a tale modellazione è stato possibile analizzare la variabilità dell'input sismico per Gorizia: si è infatti studiata la variabilità intra-evento, relativa cioè alla non omogenea distribuzione spaziale del moto del suolo (e.g. per effetti di sorgente e di sito) dato il singolo scenario, e la variabilità inter-evento, relativa cioè agli effetti dei diversi terremoti di scenario ai singoli siti. Si presenta inoltre un'analisi dell'influenza di tale variabilità sulla stima del danno strutturale, quest'ultimo valutato con modelli di tipo meccanico per descrivere la risposta delle varie tipologie costruttive rappresentative del territorio analizzato.

### 1 INTRODUZIONE

In questa memoria si presenta uno studio di carattere preliminare che tratta la pericolosità sismica e il possibile danno conseguente a diversi scenari sismici ipotizzati per la città di Gorizia. Questa località viene studiata in quanto, anche se non interessata in tempi recenti da terremoti di forte intensità, essa ricade in una zona potenzialmente attiva dal punto di vista sismico a causa della vicinanza di diverse faglie attive, situate in territorio italiano, sloveno e croato (DISS Working Group, 2018). Inoltre, la città sorge sulle sponde del fiume Isonzo e ne discende che il terreno in molte aree risulta di tipo alluvionale, quindi potenzialmente soggetto a fenomeni di amplificazione sismica locale. Infine, la città è stata classificata "zona sismica" solo a partire dal 2004, per cui gran parte dell'edificato è stato progettato trascurando le azioni orizzontali dovute ai terremoti.

Generalmente le analisi di pericolosità sismica (sia probabilistiche che deterministiche) si basano sull'utilizzo di relazioni semplificate di predizione del moto del suolo (GMPE – Ground Motion Prediction Equations). Le GMPE, forniscono una distribuzione probabilistica della misura di intensità del moto (IM – *Intensity*

*Measure*) del suolo scelta (e.g. accelerazione spettrale), funzione principalmente della magnitudo del terremoto e della distanza sito-sorgente. Queste si ottengono mediante regressione dei dati registrati da eventi storici e mescolano gli effetti della variabilità inter- ed intra-evento. Nel caso in esame, la prima rappresenta, fissate le proprietà dello scenario (e.g. magnitudo, meccanismo focale, geometria della faglia), la variabilità del moto del suolo ai siti dovuta a diversi possibili processi di rottura della sorgente. La seconda, fissato lo scenario e uno specifico processo di rottura, rappresenta la variabilità spaziale (*site-to-site*) della misura di intensità, che dipende principalmente dalla propagazione del campo d'onda attraverso suoli diversi.

Tale variabilità riveste una fondamentale importanza nelle analisi di rischio sismico di sistemi distribuiti, quali, ad esempio, centri urbani, reti infrastrutturali ecc.) (e.g. Weatherill et al. 2015). Essa viene solitamente inclusa nell'analisi di pericolosità sismica adottando modelli di correlazione spaziale empirici (e.g. Esposito & Iervolino 2011, 2012; Jayaram & Baker 2009).

In questo lavoro, per valutare la pericolosità sismica si è invece ricorsi ad una metodologia

“physics-based”, in cui lo scuotimento al suolo in diversi siti della città è rappresentato da accelerogrammi, a larga banda nelle tre componenti spaziali, calcolati tramite il prodotto tensoriale tra il tensore della sorgente del terremoto e la funzione di Green del mezzo attraversato dalle onde sismiche (suolo) (Panza et al. 2001, 2012; Fasan 2017). Il lavoro si basa sulla modellizzazione della propagazione delle onde sismiche a partire dalla conoscenza delle sorgenti sismiche e delle proprietà strutturali della terra e permette di tenere conto della complessità cinematica del processo di rottura della sorgente sismica nonché degli effetti del sito, quindi di considerare la variabilità spaziale intra ed inter-evento del moto del suolo.

Il danno strutturale è stato valutato con riferimento alla metodologia LM2, proposta nell’ambito del progetto internazionale Risk-UE (Milutinovic & Trendafiloski 2003, Risk-UE 2003), che prevede di rifarsi ad un modello di tipo meccanico, SDOF equivalente non-lineare, per descrivere la risposta delle diverse tipologie edilizie assoggettate all’azione sismica (Lagomarsino & Giovinazzi 2006). Tuttavia in questo lavoro si è fatto riferimento a tale metodologia soltanto per la definizione degli SDOF da associare alle diverse tipologie strutturali, mentre la risposta in termini di spostamento è stata valutata mediante analisi dinamica non lineare al passo. Tale approccio, reso possibile dalla disponibilità dell’input sismico in forma di accelerogrammi, ha il vantaggio di non necessitare della definizione di una misura di intensità del moto del suolo (e.g. intensità macrosismica, PGA, intensità di Housner o altri), passaggio invece obbligatorio utilizzando l’approccio standard basato sull’uso delle GMPE.

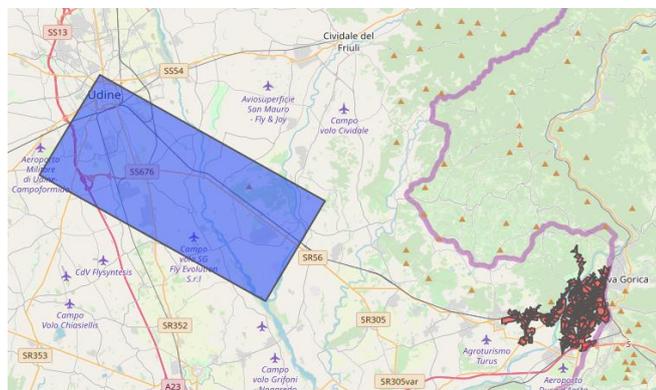


Figura 1. Faglia Medea (proiezione del piano di faglia sul piano orizzontale), evidenziata in blu, e l’area oggetto di studio (città di Gorizia), evidenziata in rosso.

Nel presente lavoro l’analisi di pericolosità e di danno condotta per la città di Gorizia è un’analisi di scenario. Sono stati infatti

considerati il moto del suolo e le possibili conseguenze, in termini di danno strutturale, risultanti da un evento sismico, generato dalla faglia denominata “Medea”. Tale faglia è censita come ITIS126 nel Catalogo Italiano delle Sorgenti Sismiche attive (DISS Working Group, 2018), ha una magnitudo ( $M_w$ ) massima pari a 6.4 ed è localizzata a circa 17 km dalla città (Figura 1). Per tale scenario, si sono ipotizzate diverse descrizioni cinematiche del processo di rottura sul piano di faglia (variando campo di scorrimento, punto di nucleazione, velocità di rottura ecc.), anche al fine di coglierne la componente stocastica. Per ciascuna “realizzazione” del processo di rottura, si sono valutate l’entità e la distribuzione spaziale del moto del suolo e dei conseguenti danni strutturali attesi. Ciò ha consentito di cogliere l’effetto della variabilità del moto del suolo, sia quella riscontrabile allo stesso sito tra due diverse realizzazioni (inter-evento), che quella legata alla non-omogenea distribuzione spaziale del moto del suolo e relativa alla singola realizzazione (intra-evento). Inoltre, la definizione di un parametro di sintesi del danno atteso per l’intera zona urbana ha consentito il confronto tra due approcci diversi per la stima del danno a seguito di uno scenario sismico. Un primo approccio, che si potrebbe definire “standard”, prevede di valutare il danno atteso considerando le diverse realizzazioni del processo di rottura interessare contemporaneamente l’area urbana, selezionando per ogni sito il valore più severo (o un suo percentile) di un parametro di domanda della struttura (*Engineering Demand Parameter* - EDP). Tale approccio, adatto per un’analisi di pericolosità puntuale, potrebbe però sovrastimare la domanda per un sistema distribuito, come un centro urbano, in quanto, data l’occorrenza di un evento sismico, esso sarà caratterizzato da un unico processo di rottura. Per tale motivo si è seguito anche un secondo approccio, considerando separatamente gli effetti in termini di danno derivanti dalle diverse realizzazioni dell’evento di scenario.

## 2 VALUTAZIONE DEL MOTO DEL SUOLO

Al fine di valutare lo scuotimento associato allo scenario sismico ipotizzato, e il suo conseguente effetto sul tessuto urbano, si è ricorsi alla simulazione numerica del moto del suolo.

Il calcolo degli accelerogrammi sintetici avviene in due fasi:

- 1: simulazione del processo di rottura sul piano di faglia;

2: simulazione della propagazione delle onde e calcolo degli accelerogrammi sintetici ai siti di interesse.

È quindi necessario modellare le proprietà della sorgente sismica e della struttura interposta fra la sorgente e i siti di interesse. Come detto le caratteristiche principali della faglia Medea sono state estratte dal catalogo DISS e sono riportate in Tabella 1.

La faglia è stata modellata come sorgente estesa (Gusev 2011); tale modellazione consente di cogliere gli effetti legati al processo cinematico di rottura (i.e. direttività – *directivity*) e, in campo vicino, alla dislocazione (i.e. spostamento statico – *fling step*).

Quando si utilizza il modello esteso, la sorgente del terremoto è considerata un campo di scorrimento relativo distribuito sulla superficie di faglia, su cui si presume si verifichi il processo di rottura (Figura 2a). Tale superficie viene quindi modellata come una griglia di sotto-sorgenti puntiformi, il cui momento sismico è calcolato considerando ciascuna di esse come una componente di una realizzazione di un processo casuale non stazionario. Assumendo una descrizione cinematica realistica del processo di rottura, il modello di sorgente sismica estesa ci consente di generare uno spettro (in ampiezza e fase) della funzione temporale della sorgente che tiene conto sia del processo di rottura che degli

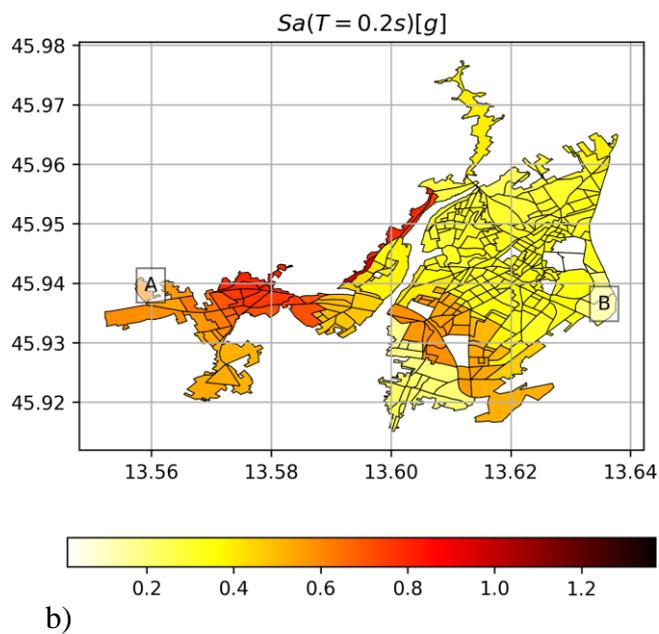
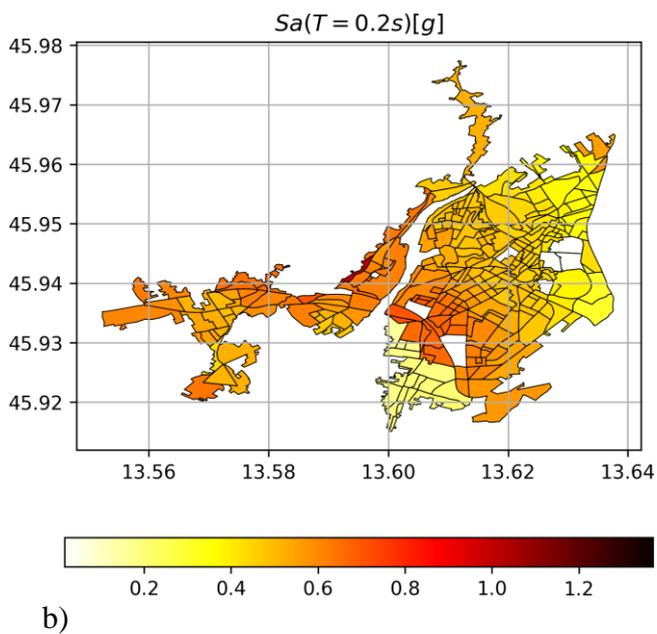
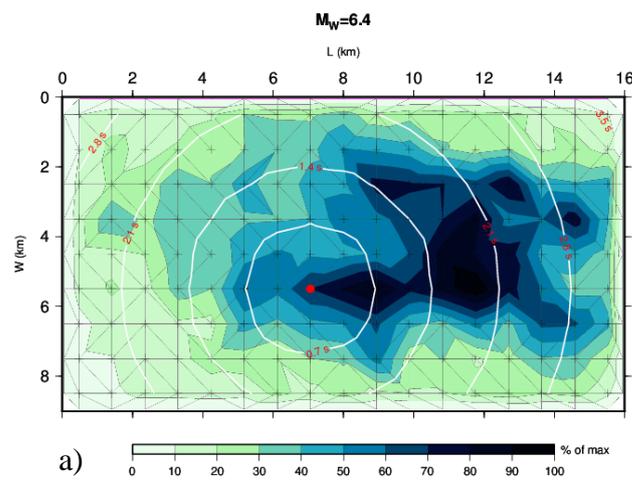
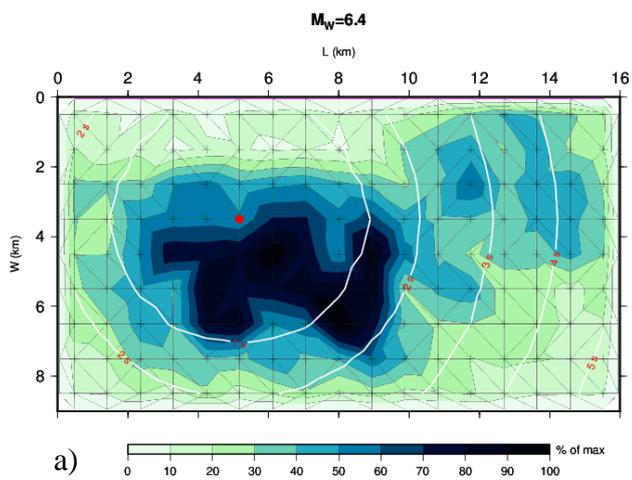


Figura 2. a) distribuzione dello scorrimento sulla faglia per la 12<sup>a</sup> realizzazione; b) relativo campo di scuotimento (accelerazione spettrale per T = 0.2s in unità di g).

Figura 3. a) distribuzione dello scorrimento sulla faglia per la 30<sup>a</sup> realizzazione; b) relativo campo di scuotimento (accelerazione spettrale per T = 0.2s in unità di g).

effetti della direttività, anche in condizioni di campo vicino. La simulazione dell'evoluzione spazio-temporale della sorgente viene eseguita dall'algoritmo PULSYN06 (Gusev 2011). Per lo scenario scelto, si sono considerate 100 possibili realizzazioni del processo di rottura. In questo modo si è tenuto conto della natura stocastica del processo di rottura che si ripercuote nella variabilità inter- ed intra-evento del moto del suolo. A titolo di esempio, in Figura 2a e 3a si sono riportate due diverse modalità di rottura per lo scenario considerato (realizzazione 12 e 30, rispettivamente), caratterizzate da un diverso campo di scorrimento sul piano di faglia, punto di nucleazione ed evoluzione temporale. Nelle immagini le aree più scure corrispondono ad un elevato scorrimento sulla faglia, rappresentata come un rettangolo di lati 9km e 16km, mentre le isocrone bianche descrivono l'andamento temporale del processo di rottura. Il punto rosso mostra il punto di nucleazione della rottura (si noti come a questo sia associato il tempo iniziale  $t=0$ s).

Al fine di cogliere la distribuzione spaziale del moto del suolo per ogni realizzazione, il calcolo degli accelerogrammi è stato effettuato nel baricentro di ogni zona censuaria in cui è divisa la città di Gorizia (286 ricevitori). Tale calcolo è condotto in mezzi lateralmente omogenei, i.e. il modello strutturale del suolo è rappresentato da uno spazio semi-infinito a strati anelastici piani e paralleli, sino ad una frequenza di 10 Hz e utilizzando due diverse tecniche: la tecnica della somma modale (Panza et al. 2001, Panza et al. 2012) e della DWN - *discrete wavenumber* - (Pavlov 2009, 2013). Gli effetti di sito sono invece considerati adottando, per ogni zona censuaria, una stratigrafia diversa rappresentativa delle sue proprietà medie. Le caratteristiche degli strati superficiali sono state dedotte da studi geologici condotti per la città (Bisiani 1989, Grego & Iadarola 1998) mentre quelle degli strati profondi sono state dedotte da quelle adottate in Panza et al. (2001; 2012) per il poligono regionale in cui è situata.

Calcolati gli accelerogrammi per ogni realizzazione e zona censuaria è quindi possibile estrarre dagli accelerogrammi i vari parametri di interesse ingegneristico. In Figura 2b e 3b sono presentate due mappe calcolate in termini di accelerazione spettrale al periodo  $T=0.2$ s (periodo prossimo a quello medio di vibrazione dell'edificio in muratura di Gorizia) dalle quali si nota la variabilità del moto, sia in termini spaziali che di valori di picco, associata allo stesso scenario (faglia Medea,  $M_w=6.4$ ) ma per due diverse realizzazioni del processo di rottura

(la 12<sup>a</sup> e la 30<sup>a</sup>). Per illustrare in maniera alternativa questa variabilità, in Figura 4 sono rappresentati i 100 segnali calcolati per 2 siti selezionati, A e B. Tali siti presentano rispettivamente la minima e massima distanza dal bordo della faglia e la loro posizione è indicata in Figura 3b. Il segnale nero si riferisce alla 12<sup>a</sup> realizzazione mentre quello rosso alla 30<sup>a</sup>.

### 3 VULNERABILITÀ

La vulnerabilità dell'area urbana di Gorizia è stata rappresentata con una modellazione semplificata dell'edificio facendo riferimento alle caratteristiche tipologiche degli edifici raccolte in occasione del censimento della popolazione e delle abitazioni del 2011 (ISTAT 2011). Tuttavia non si sono utilizzati i dati direttamente reperibili dai portali dell'ISTAT in quanto con questi non risulta possibile effettuare l'intersezione dei diversi parametri raccolti durante il censimento e utili alla definizione delle caratteristiche dell'edificio. Data una zona censuaria, non è ad esempio possibile conoscere il numero di edifici realizzati in CA e che presentano un certo numero di piani, per esempio 4, in quanto per entrambi i parametri, "edifici in CA" ed "edifici con 4 piani", viene fornito solamente il numero totale di edifici presenti nella zona considerata. Per ovviare a questa problematica ci si è avvalsi di un'elaborazione sensibilmente più dettagliata, effettuata dall'ISTAT appositamente per questo studio, che consente di definire tali intersezioni.

A partire da questi dati, si è discretizzata l'area di studio nelle 286 zone censuarie in cui risulta divisa la città di Gorizia; si sono quindi considerati i baricentri di tali zone come

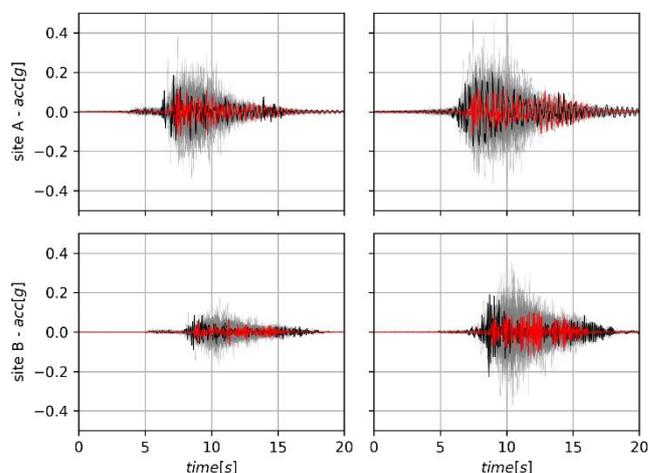


Figura 4. Accelerogrammi calcolati per i siti A e B (linee grigie), 12<sup>a</sup> e 30<sup>a</sup> realizzazione (linea nera e rossa)

ricevitori, punti in cui è valutato il moto del suolo dovuto alla sorgente considerata. Si è deciso quindi di stimare la risposta dell'edificio adottando un metodo di tipo meccanico.

Per individuare i modelli meccanici da associare alle diverse tipologie edilizie si è fatto riferimento a quanto indicato dalla metodologia LM2, proposta nell'ambito del progetto internazionale Risk-UE (Risk-UE, 2003), che prevede di rappresentare le caratteristiche medie delle diverse tipologie edilizie mediante SDOF non-lineari a comportamento lineare-perfettamente plastico, il cui diagramma forza-spostamento è riportato in Figura 5.

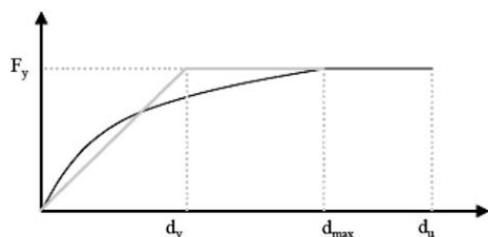


Figura 5. Legame elastico-perfettamente plastico assunto per gli SDOF equivalenti.

Nello specifico, per la zona urbana di Gorizia si sono selezionati 11 SDOFs equivalenti tra quelli presentati in Lagomarsino & Giovinazzi (2006) e le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 2. Al fine di fornire una visione d'insieme delle caratteristiche dell'edificio per la città di Gorizia, le Figure 6 e 7 illustrano rispettivamente la distribuzione spaziale del periodo proprio medio ( $T_m$ ) e dell'accelerazione spettrale media ( $S_{am}$ ) relativa alla 30<sup>a</sup> realizzazione. Tali valori sono valutati, per ciascuna zona censuaria, come la media pesata sul numero di edifici appartenenti alle tipologie edilizie in essa presenti. L'Equazione 1 illustra la relazione usata per definire  $S_{am}$ . Una relazione del tutto analoga è stata utilizzata per valutare il periodo proprio medio  $T_m$ .

$$S_{a_{m,r,i}} = \frac{\sum_{j=1}^{t_i} S_{a_{r,i}}(T_{i,j}) n_{i,j}}{\sum_{j=1}^{t_i} n_{i,j}} \quad (1)$$

dove, per ogni zona  $i$ , tipologia edilizia  $j$  e realizzazione  $r$ ,  $S_{a_{m,r,i}}$  rappresenta l'accelerazione spettrale media,  $t_i$  il numero di tipologie edilizie,  $S_{a_{r,i}}$  lo spettro in pseudo-accellerazione ed infine  $T_{i,j}$  e  $n_{i,j}$  rappresentano rispettivamente il periodo ed il numero di edifici della tipologia.

La Figura 7 si riferisce alla 30<sup>a</sup> realizzazione del processo di rottura (Figura 3a), e va confrontata con i risultati mostrati in Figura 3b. In questo modo, è possibile vedere come la

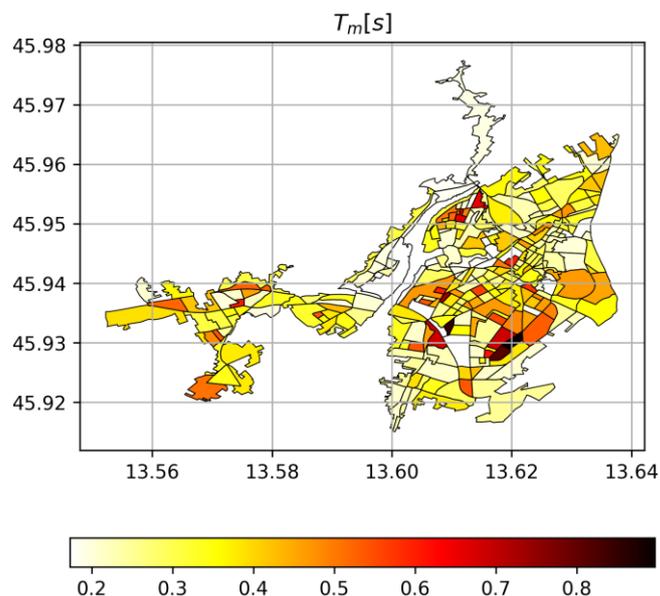


Figura 6. Distribuzione spaziale del periodo proprio medio  $T_m$ .

Tabella 2. Parametri degli SDOFs utilizzati per rappresentare le diverse tipologie (Lagomarsino & Giovinazzi 2006).

| Nome    | T(s)  | dy (mm) | du (mm) |
|---------|-------|---------|---------|
| M4_L    | 0.173 | 2.6     | 14.9    |
| M4_M    | 0.290 | 5.9     | 22.2    |
| M5_H    | 0.393 | 6.3     | 19.2    |
| M5_L    | 0.173 | 1.9     | 11.0    |
| M5_M    | 0.290 | 4.4     | 16.4    |
| M6.sm_L | 0.211 | 4.0     | 23.6    |
| M6.sm_M | 0.355 | 8.8     | 35.0    |
| M6.sm_H | 0.481 | 10.7    | 38.7    |
| RC1_L   | 0.539 | 15.0    | 45.1    |
| RC1_H   | 1.304 | 30.4    | 91.5    |

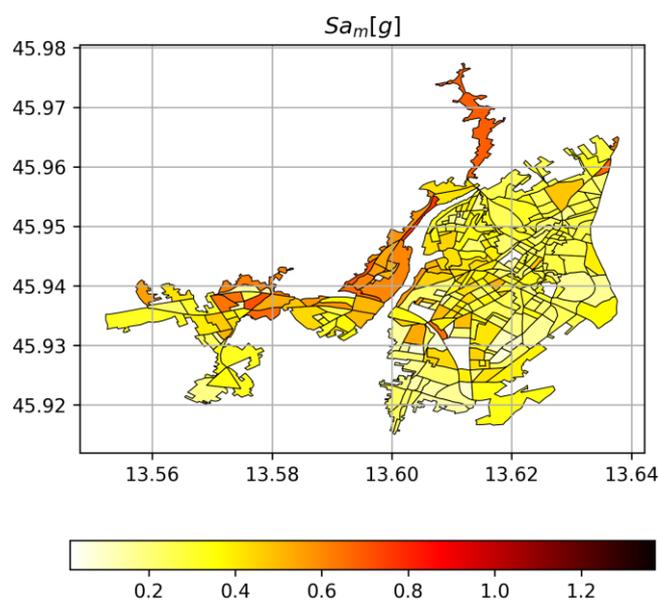


Figura 7. Distribuzione spaziale dell'accelerazione spettrale media  $S_{am}$  relativa alla 30<sup>a</sup> realizzazione.

pericolosità (in questo caso espressa in termini di Sa) vari in funzione delle caratteristiche dell'edificato.

#### 4 DANNO

Per valutare il danno atteso a seguito degli scenari sismici considerati si è fatto riferimento alla metodologia LM2 (Risk-UE 2003). In particolare, in questo lavoro si è fatto riferimento a tale metodologia soltanto per la definizione degli SDOFs da associare alle diverse tipologie edilizie, mentre la loro risposta è stata valutata mediante analisi dinamica non lineare al passo. Questo è reso possibile dalla definizione dell'input sismico in forma di accelerogrammi sintetici che ha permesso di non dover fare alcuna assunzione in merito alla relazione tra gli spostamenti elastici e plastici degli SDOFs (uguaglianza degli spostamenti/energie). Inoltre, seguendo tale approccio, non vi è la necessità di definire un parametro di sintesi del moto del suolo (intensità macrosismica, PGA, intensità di Housner o altri), passaggio che introduce ulteriori incertezze nella valutazione del grado di danno assunto.

In base ai valori dello spostamento massimo raggiunto dagli SDOF durante le analisi, per le diverse tipologie e per le diverse realizzazioni considerate, i danni attesi sono espressi in funzione del grado di danno (*damage grade*), definito come in Tabella 2, dove  $d_y$  e  $d_u$  rappresentano rispettivamente lo spostamento in corrispondenza dello snervamento e lo spostamento ultimo per lo SDOF considerato, come indicato in Figura 5.

Il grado di danno ha valori compresi tra 1 e 5. Tuttavia, l'analisi non consente di distinguere tra gli ultimi due, a meno di una trattazione più dettagliata. Per tale motivo spesso si considerano i gradi 4 e 5 come unici, per cui la scala va dal valore 0 (assenza di danno) al valore massimo 4 (danneggiamento grave o collasso).

Tabella 2. Definizione del grado di danno

|   | $D_k$                 |
|---|-----------------------|
| $0 < d_{max} \leq 0.7 d_y$              | Slight ( $D_0$ )      |
| $0.7 d_y < d_{max} \leq 1.5 d_y$        | Moderate ( $D_1$ )    |
| $1.5 d_y < d_{max} \leq 0.5(d_u + d_y)$ | Extensive ( $D_2$ )   |
| $0.5(d_u + d_y) < d_{max} \leq d_u$     | Very heavy ( $D_3$ )  |
| $> d_u$                                 | Destruction ( $D_4$ ) |

Le analisi dinamiche non lineari sono state condotte mediante il software OpenSees (McKenna et al. 2000, Mazzoni et al. 2003, McKenna 2011). Complessivamente, considerando il numero di realizzazioni, zone censuarie e tipologie edilizie presenti in ogni zona, sono risultate necessarie 194000 analisi.

I risultati delle analisi hanno evidenziato come la variabilità del danno atteso risulti pronunciata, sia per quanto riguarda la distribuzione spaziale relativa alla singola realizzazione (intra-evento), che fra i valori di picco relativi a realizzazioni diverse (inter-evento). Per valutare il danno a livello urbano, si è quindi definito un parametro di sintesi, che rappresenta il danno per l'intera area cittadina. Questo indice è stato calcolato seguendo due approcci. Il primo, denominato Approccio 1 e che si potrebbe definire "standard", prevede di valutare il danno atteso considerando le diverse realizzazioni del processo di rottura interessare contemporaneamente l'area di studio, selezionando per ogni sito il valore più cautelativo, o un suo percentile, della domanda strutturale (massimo spostamento dello SDOF). Tale danno è valutato come in Equazione 2:

$$D_{p,A1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_z} D_{i,p} n_i}{n_{tot}} \quad (2)$$

dove, data la zona censuaria  $i$  e un valore del percentile  $p$ ,  $n_i$  e  $n_{tot}$  rappresentano rispettivamente il numero di edifici presenti nella zona  $i$  e il numero totale di edifici per l'intera zona urbana.

$D_{i,p}$ , a sua volta, è valutato per ogni zona censuaria  $i$ , come la media pesata del danno strutturale sulle diverse tipologie edilizie presenti nella zona stessa secondo quanto indicato dall'Equazione 3:

$$D_{i,p} = \frac{\sum_{j=1}^{t_i} D_{i,j,p} n_{i,j}}{n_i} \quad (3)$$

dove, data la zona censuaria  $i$ , la tipologia  $j$  e il percentile  $p$ ,  $D_{i,j,p}$  e  $n_{i,j}$  rappresentano rispettivamente il danno atteso e il numero di edifici per cui ci si aspetta tale danno.

$D_{i,j,p}$ , è invece valutato considerando un percentile  $p$  dello spostamento massimo raggiunto durante le analisi. Avendo considerato 100 realizzazioni, il valore del percentile è valutabile semplicemente ordinando gli spostamenti massimi e individuando il valore superato  $100 - p$  volte, cioè il valore con indice  $p$ . Quanto appena esposto è esprimibile tramite la relazione 4:

$$D_{i,j,p} = \vec{D}_{i,j,r,sorted}[p] \quad (4)$$

dove  $\vec{D}_{i,j,r,sorted}$  rappresenta il vettore dei gradi di danno relativi alla zona  $i$ , alla tipologia  $j$  e alla realizzazione  $r$  disposti in ordine crescente.

Tale approccio, adatto per un'analisi di pericolosità puntuale, potrebbe però sovrastimare la domanda per un sistema distribuito, come un centro urbano, in quanto data l'occorrenza di un evento sismico, esso sarà caratterizzato da un unico processo di rottura (i valori del moto del suolo associati a due diverse realizzazioni non si possono registrare contemporaneamente).

Per tale motivo si è seguita anche una seconda strada, considerando separatamente le diverse realizzazioni del processo di rottura, potendo così individuare distribuzioni spaziali del danno più realistiche. Secondo tale percorso, denominato Approccio 2, il danno a livello urbano relativo a un percentile  $p$  è valutato per ogni realizzazione, considerata separatamente, secondo l'Equazione 5:

$$D_{p,A2} = \vec{D}_{r,sorted}[p] \quad (5)$$

dove  $\vec{D}_{r,sorted}$  rappresenta il vettore dei danni  $D_r$  ordinato in ordine crescente.  $D_r$  è il danno urbano associato alla realizzazione  $r$  e si calcola secondo l'Equazione 6 che, formalmente, risulta del tutto simile all'Equazione 2:

$$D_r = \frac{\sum_{i=1}^{n_z} D_{i,r} n_i}{n_{tot}} \quad (6)$$

dove  $D_{i,r}$  rappresentata il danno valutato per la zona  $i$  e per la realizzazione  $r$  ed è calcolato secondo l'Equazione 7:

$$D_{i,r} = \frac{\sum_{j=1}^{t_i} D_{i,j,r} n_{i,j}}{n_i} \quad (7)$$

in cui, per la tipologia  $j$  della zona  $i$  in cui vi sono  $n_i$  edifici,  $D_{i,j,r}$  e  $n_{i,j}$  rappresentano rispettivamente il grado di danno atteso e il numero di edifici per cui ci si aspetta tale danno.

Le Figure 8 e 9 presentano, per i percentili 50° e 95°, un confronto tra la distribuzione spaziale del danno ottenuto con il primo (a - realizzazioni considerate concomitanti) e con il secondo (b – realizzazioni considerate separatamente) approccio. Queste figure presentano i risultati, per ciascuna zona censuaria, in termini di media pesata sulle diverse tipologie che in questa ricadono (Equazione 3 e 7).

In particolare, i percentili 50° e 95° del danno urbano calcolati secondo l'Approccio 2 (Figure 8b e 9b) corrispondono ai danni causati rispettivamente dalla 30<sup>a</sup> e dalla 12<sup>a</sup> realizzazione ( $D_{50,A2} = D_{r=30}$  e  $D_{95,A2} = D_{r=12}$ ). Il processo di rottura e il campo del moto relativi a tali

realizzazioni sono mostrati in Figura 3 e 2 rispettivamente.

Dai confronti si nota come l'entità e la distribuzione spaziale del danno strutturale atteso possano variare sensibilmente tra una realizzazione e l'altra. Considerazioni analoghe risultano valide se si confrontano i risultati ottenuti per le diverse realizzazioni e quelli relativi all'inviluppo degli scenari considerati. A tal riguardo si nota come per percentili bassi la singola realizzazione risulti più penalizzante, mentre per alti percentili si manifesti la tendenza opposta, la singola realizzazione risulta quindi meno penalizzante dell'inviluppo. Le Figure 10 e 11 si riferiscono alle stesse condizioni delle Figure 8 e 9, ma presentano per ciascun grado di danno la percentuale, riferita al numero totale di edifici presente a Gorizia, di edifici che presentano quel grado di danno. Nuovamente si nota come per bassi percentili la singola realizzazione risulti più penalizzante, mentre per quelli alti vi sia una sensibile riduzione degli edifici per cui si prevede un grado di danno 3 oppure 4. Graficamente tale fenomeno si traduce in uno spostamento degli istogrammi relativi alla singola realizzazione verso sinistra, cioè verso gradi di danno meno severi, arrivando anche all'assenza di danno.

In generale quindi, gli Approcci 1 e 2 conducono a risultati simili nel caso di un'analisi puntuale, dove la distribuzione del danno atteso varia in funzione della variabilità inter-evento associata allo scenario considerato.

Applicando l'Approccio 1 ad un sistema distribuito (area urbana, sistema infrastrutturale ecc..) si trascurerebbe quindi la variabilità intra-evento (su ogni singolo sito si ottiene lo stesso risultato di un'analisi puntuale) e di conseguenza si otterrebbe una stima non corretta dei danni attesi per l'intera area di studio.

L'Approccio 2, considera entrambe le fonti di variabilità del moto del suolo e rappresenta quindi una stima più accurata del danno atteso a livello urbano.

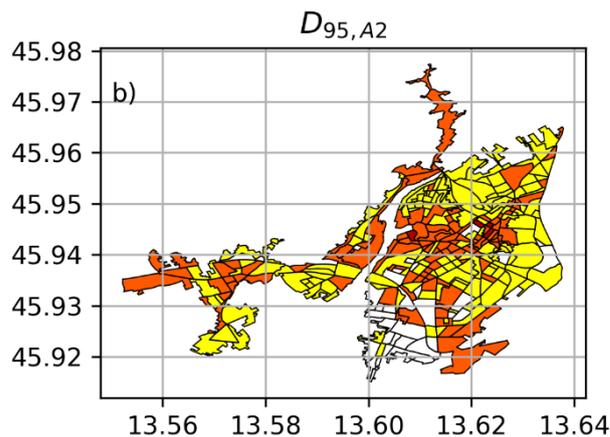
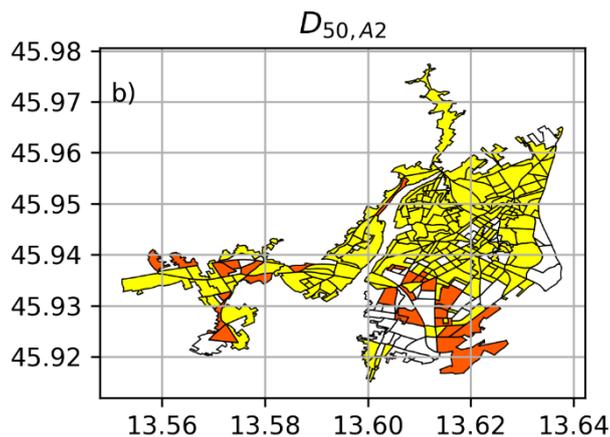
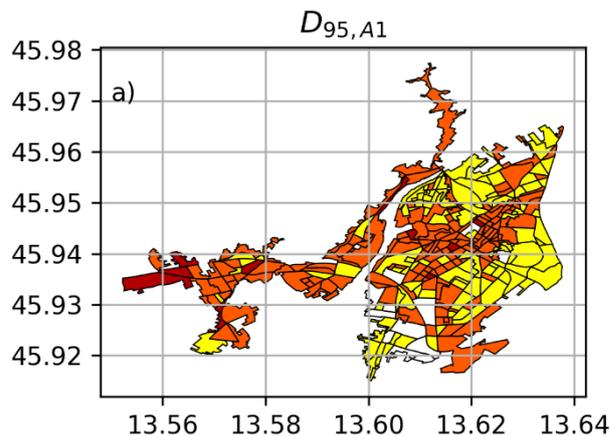
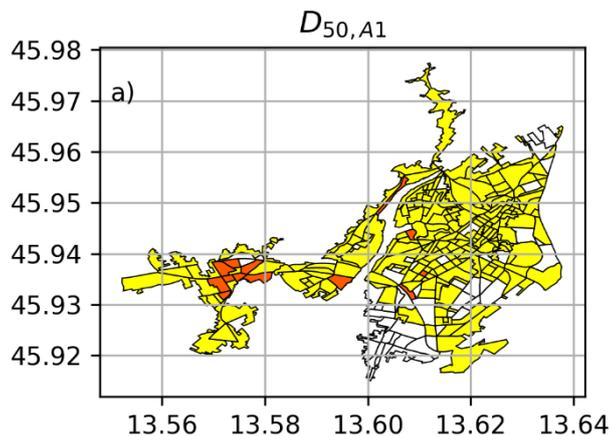


Figura 8. 50° percentile del danno urbano atteso: a) Approccio 1 - realizzazioni considerate concomitanti e b) Approccio 2 - realizzazioni considerate singolarmente (30<sup>a</sup> realizzazione)

Figura 9. 95° percentile del danno urbano atteso: a) Approccio 1 - realizzazioni considerate concomitanti e b) Approccio 2 - realizzazioni considerate singolarmente (12<sup>a</sup> realizzazione)

## 5 CONCLUSIONI

In questa memoria si è presentato uno studio sullo scuotimento e il danno atteso per la città di Gorizia conseguente a un evento sismico di magnitudo 6.4 sulla faglia “Medea”. Gorizia ricade in una zona potenzialmente attiva dal punto di vista sismico a causa della vicinanza di diverse sorgenti. Inoltre il terreno su cui sorge la città è in molte aree di tipo alluvionale e quindi soggetto a possibili fenomeni di amplificazione locale.

Lo scuotimento al suolo è valutato utilizzando una metodologia “*physics-based*”, che si basa sulla modellazione della propagazione delle onde sismiche a partire dalla conoscenza delle sorgenti e delle proprietà strutturali della terra. Tale tecnica fornisce accelerogrammi sintetici realistici e permette di tenere conto della cinematica del processo di rottura della sorgente

sismica nonché degli effetti del sito, quindi di considerare la variabilità spaziale intra- ed inter-evento del moto del suolo.

La vulnerabilità è stata rappresentata attraverso SDOF non lineari, facendo riferimento alla metodologia LM2, proposta nell’ambito del progetto internazionale RiskUE (Milutinovic & Trendafiloski 2003, RiskUE 2003), mentre la risposta in termini di spostamento è stata valutata mediante analisi dinamica non lineare.

La definizione di un parametro di sintesi del danno atteso per l’intera zona urbana ha consentito il confronto tra due approcci diversi per la stima del danno a seguito di uno scenario sismico. Un primo approccio, che si potrebbe definire “standard”, prevede di valutare il danno atteso considerando le diverse realizzazioni del processo di rottura interessare contemporaneamente l’area urbana, selezionando per ogni sito il valore più severo (o un suo percentile) di

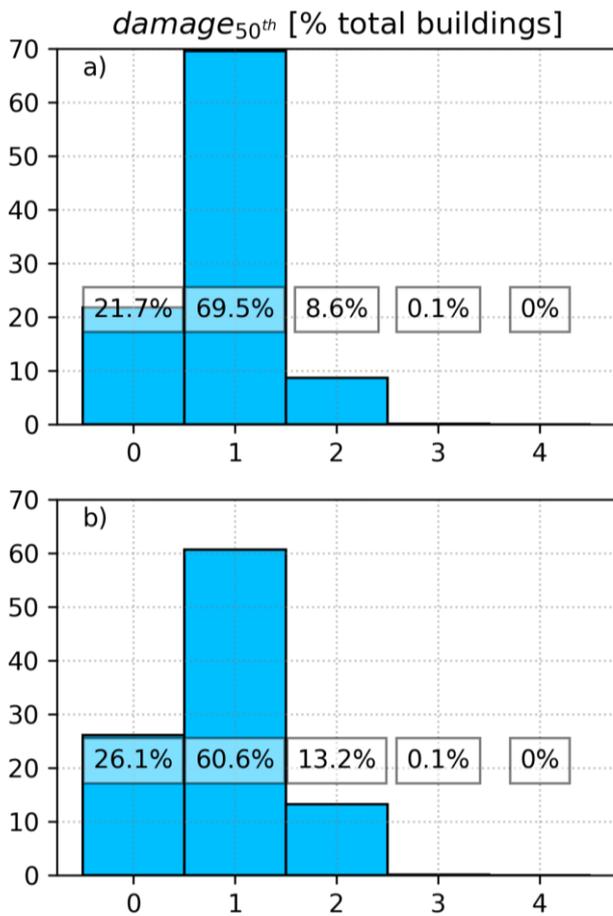


Figura 10. Percentuale di edifici interessati in funzione del grado di danno. Inviluppo (a) e 30<sup>a</sup> realizzazione (b).

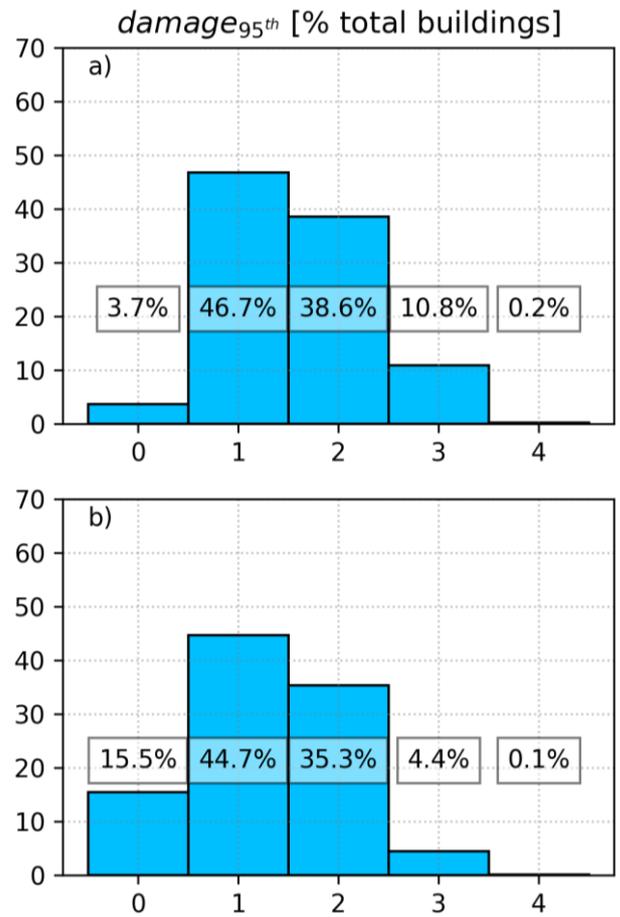


Figura 11. Percentuale di edifici interessati in funzione del grado di danno. Inviluppo (a) e 12<sup>a</sup> realizzazione (b).

un parametro di domanda della struttura (*Engineering Demand Parameter – EDP*).

Il secondo approccio, considera separatamente gli effetti in termini di danno delle diverse realizzazioni del processo di rottura. In generale tali approcci risultano equivalenti nel caso di un'analisi puntuale, dove la distribuzione del danno atteso varia in funzione della variabilità inter-evento associata allo scenario considerato. L'Approccio 2 qui proposto considera invece entrambe le fonti di variabilità del moto del suolo e rappresenta quindi una stima più accurata del danno atteso a livello urbano.

Grazie all'uso della modellazione su base fisica del moto del suolo, la metodologia presentata in questo studio consente una rappresentazione realistica del fenomeno sismico e quindi può portare a stime più accurate dell'impatto di un evento su un'area di interesse rispetto a metodi basati su valutazioni empiriche.

## 6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bisiani F., 1989. Indagine geologico-tecnica del territorio comunale di Gorizia.
- DISS Working Group, 2018. *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS)*, Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- Esposito S., Iervolino I., 2011. PGA and PGV spatial correlation models based on European multi-event datasets. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(5), 2532–41.
- Esposito S., Iervolino I., 2012. Spatial Correlation of Spectral Acceleration in European Data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**(6), 2781. <http://dx.doi.org/10.1785/0120120068>
- Fasan M., 2017. Advanced seismological and engineering analysis for structural seismic design, *PhD. Thesis*, University of Trieste.
- Grego B., Iadarola F., 1998. Relazione geologica per la variante generale al piano regolatore generale comunale.

- Gusev A., 2011. Broadband kinematic stochastic simulation of an earthquake source: a refined procedure for application in seismic hazard studies. *Pure and Applied Geophysics*, **168**, 155–200.
- ISTAT 2011. *Censimento della popolazione e delle abitazioni*. UniData - Bicocca Data Archive, Milano. Codice indagine DA0443. Versione del file di dati 1.0.
- Jayaram N., Baker J., W., 2009. Correlation model for spatially distributed ground-motion intensities. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, **38**, 1687-1708. doi:10.1002/eqe.922
- Lagomarsino S., Giovinazzi S., 2006. Macro seismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin Earthquake Engineering*, **4**, 415–443.
- Mazzoni S., McKenna F., Scott, M., H., Fenves, G., L., Jeremic B., 2003. *OpenSees Command Language Manual*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
- McKenna F., 2011. OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, **13**(4), 58–66.
- McKenna F., Fenves, G., L., Scott M., H., 2000. *Object oriented program, OpenSees; Open System for Earthquake Engineering Simulation*. <http://opensees.berkeley.edu>, Pacific Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley.
- Milutinovic Z., M., Trendafiloski G., S., 2003. *An advanced approach for earthquake risk scenarios with applications to different European towns*. WP-4: vulnerability of current buildings. Risk-UE Project, European Commission.
- Panza G., F., Romanelli F., Vaccari F., 2001. Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: Theory and applications to seismic zonation. *Advances in Geophysics*, **43**, 1–95.
- Panza G., F., La Mura C., Peresan A., Romanelli F., Vaccari F., 2012. Seismic Hazard Scenarios as Preventive Tools for a Disaster Resilient Society, *Advance in Geophysics*, **53**, 93-165.
- Pavlov. V., M., 2009. Matrix impedance in the problem of the calculation of synthetic seismograms for a layered-homogeneous isotropic elastic medium. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, **45**(10), 850–860.
- Pavlov, V., M., 2013. Algorithm for calculating synthetic seismograms in a layered half-space with application of matrix impedance. *Phys. Solid Earth*, **49**, 24.
- Risk-UE 2003. *An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns*. Projet europe'en, EVK4-CT-2000-00014.
- Weatherill G., A., Silva V., Crowley H., Bazzurro P., 2015. Exploring the impact of spatial correlations and uncertainties for portfolio analysis in probabilistic seismic loss estimation. *Bull Earthquake En*, **13**, 957. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9730-5>