

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile



Tesi di Laurea Magistrale

LA VALUTAZIONE DELLE PERDITE A SEGUITO DI DANNO SISMICO IN EDIFICI INDUSTRIALI ATTRAVERSO STRUMENTI DI ANALISI A SCALA TERRITORIALE

Relatore

Prof. Ing. Rosario Ceravolo

Correlatore

Arch. Erica Lenticchia

Candidato

Daniela Zedde

Anno Accademico 2018/2019

*“Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now
is the time to understand more, so that we may fear less”*

Marie Curie

Sommario

Introduzione	1
1 Stato dell'arte	3
1.1 Resilienza	5
1.1.1 La resilienza urbana	7
1.2 Il GIS come strumento per la rappresentazione e la valutazione del rischio sismico a scala urbana.....	9
1.3 I database e l'importanza dei dati open source.....	10
1.4 Il rischio sismico	12
2 Software utilizzati per la valutazione del rischio sismico	15
2.1 OpenQuake engine	15
2.1.1 Logic Tree model	17
2.1.2 Seismic Source Model.....	19
2.1.3 Equazioni di previsioni del movimento del terreno (GMPes).....	20
2.1.4 Exposure model.....	20
2.1.5 Fragility model	22
2.1.6 Consequence model.....	23
2.1.7 Vulnerability model.....	24
2.2 QGIS	26
3 Analisi della vulnerabilità sismica a scala territoriale.....	29
3.1 Fragilità	30
3.2 Vulnerabilità.....	33
3.2.1 La vulnerabilità degli edifici monumentali e delle chiese.....	36
4 Confronto tra i dati post terremoto e i risultati dell'analisi Scenario Damage.....	39
4.1 Il caso studio di Norcia.....	40
4.2 Dati delle schede AeDES	45
4.3 La costruzione della tassonomia e definizione del file di configurazione.....	49
4.4 La correlazione tra agibilità e livello di danno.....	51
4.5 Commenti sui risultati e considerazioni	59
5 Il rischio sismico di edifici industriali.....	63
5.1 Fragilità	64
5.2 Vulnerabilità.....	68
6 Il caso studio della città di Moncalieri	71
6.1 Moncalieri: cenni storici e rischio sismico.....	71
6.2 Costruzione del database.....	72
6.3 Analisi effettuate su gli edifici di Moncalieri.....	73

6.4	Valutazione della pericolosità sismica su gli edifici di Moncalieri.....	76
6.4.1	ESHM13-La modellazione dei terremoti	78
6.4.2	ESHM13- Il movimento del terreno.....	81
6.5	Valutazione del rischio sismico su gli edifici di Moncalieri e preparazione dei file di input	82
6.5.1	Il modello di rottura.....	82
6.5.2	Il modello di esposizione.....	83
6.5.3	Costruzione del modello di vulnerabilità	98
6.6	Definizione dei file di configurazione.....	106
6.7	Elaborazione dei file di output e interpretazione dei risultati.....	108
6.7.1	Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis output.....	113
6.7.2	Scenario damage assessment e scenario risk assessment analysis output	134
6.8	Considerazioni sui risultati.....	147
7	Analisi sugli edifici industriali di Moncalieri	151
7.1	Il terremoto del 2012 in Emilia Romagna e l'influenza sulla normativa specifica per gli edifici industriali	153
7.2	L'industria nel territorio piemontese.....	154
7.3	Cenni storici e attività industriali di rilevanza nel comune di Moncalieri.....	155
7.4	Creazione del database e definizione della nuova tassonomia	157
7.5	Preparazione dei file di input	162
7.5.1	Stima del valore economico delle componenti strutturali e non strutturali	162
7.5.2	Stima delle perdite dovute alle componenti fisiche non strutturali e ai contenuti... 163	
7.5.3	Definizione dell'occupazione.....	165
7.5.4	Definizione dei costi di interruzione dell'attività.....	168
7.5.5	Vulnerability model.....	170
7.6	Analisi effettuate su gli edifici industriali di Moncalieri ed elaborazione dei file di input	174
7.7	Elaborazione dei file di output	175
7.7.1	Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Risk Analysis output	177
7.7.2	Scenario Damage assessment e Scenario Risk assessment output	186
7.8	Considerazioni sui risultati relativi agli edifici industriali	207
8	Conclusioni e sviluppi futuri	210
9	Bibliografia	214

Introduzione

Negli ultimi anni gli eventi catastrofici si sono moltiplicati con conseguenze sempre maggiori sulla popolazione e sui beni materiali. Secondo l'ultimo bollettino (Climate&Weather. Annual Report 2018) riguardante le catastrofi avvenute durante il 2018 a livello globale gli eventi dell'anno passato si sono concentrati negli Stati Uniti, in Giappone, in Cina e nel centro e nel nord Europa con una perdita economica totale di 225 miliardi di dollari. Se si osserva il grafico relativo alle percentuali di incidenza delle singole voci sulla perdita economica totale dal 2000 sino al 2018 (pari a 4'210 miliardi), i terremoti risultano essere una parte incidente di tale perdite.

In Italia la situazione ha assunto carattere emergenziale: dal 2000 si sono registrate più di 30 alluvioni e 100 terremoti con danni ingenti. In tempi recenti due fenomeni sono stati devastanti per la nostra nazione: il terremoto del 2012 in Emilia Romagna e quello del 2016 nell'area di Amatrice, Accumoli e Norcia. Questi eventi hanno mostrato l'alta vulnerabilità del territorio nazionale, del patrimonio storico e la scarsa resistenza dei sistemi urbani. Le perdite economiche associate a tali eventi attestano lo scenario precedentemente descritto e sottolineano la necessità di definire una strategia corretta per contrastare tali eventi (De Masi e Porrini 2018).

Alla luce di quanto appena evidenziato risulta obbligatorio per gli enti governativi, per coloro che si occupano della pianificazione e per i cittadini rendersi partecipi di un cambiamento nella concezione di evento catastrofico e nella sua gestione. Alcune zone sono sismiche devono adottare misure idonee a contrastare effetti gravosi sul territorio, sulle costruzioni e sulla comunità. Il presente elaborato vuole infatti porre l'accento sullo stato attuale dei dati disponibili per condurre tali analisi e su quali strumenti si abbiano a disposizione per effettuarle, con la finalità di creare un sistema di valutazione per la mitigazione del rischio sismico e per la gestione dei piani di emergenza e gestione pre e post-evento.

Al fine di raggiungere tale risultato ci si propone di partire dallo studio e dalla definizione dello stato dell'arte, descrivendo l'obiettivo e le finalità del lavoro; nello stesso capitolo si porrà inoltre l'accento sull'importanza dei dati open-source e sulla concezione del rischio sismico. Il secondo capitolo si propone di presentare una panoramica circa i software open-source disponibili attualmente in Italia per condurre una valutazione del rischio sismico. Il terzo capitolo approfondirà temi fondamentali quali la definizione di vulnerabilità e di fragilità e del loro significato nel contesto degli studi effettuati. Successivamente, nel quarto capitolo verrà giustificato e validato il metodo cardine utilizzato per condurre l'analisi tramite l'applicazione dello stesso sul caso studio di Norcia. Il quinto capitolo si focalizza sul rischio sismico negli edifici industriali, introducendo il lettore verso l'argomento trattato nel settimo capitolo. Dopo aver capito le motivazioni e gli strumenti attualmente esistenti per affrontare tali analisi, il sesto capitolo introduce il caso studio di Moncalieri, con un'analisi che riguarderà inizialmente l'intera Municipalità, per poi focalizzarsi sugli edifici industriali nel settimo capitolo, argomento cardine del seguente elaborato. I recenti eventi naturali hanno infatti dimostrato che il danno subito dagli edifici industriali, con la conseguente interruzione delle attività, ha delle ricadute sociali ed economiche molto forti che rallentano il recupero dell'area colpita.

L'evento sismico del 2012 che ha colpito in modo particolare l'Emilia Romagna (oltre a Veneto e Lombardia) ha messo in luce la grande vulnerabilità degli edifici industriali costruiti nella maggior parte dei casi per resistere ai soli carichi verticali. Dopo tale evento le comunità di ricerca hanno condotto molti studi focalizzati sulle costruzioni in cemento armato prefabbricato, a scala territoriale e non.

Nel caso di edifici ordinari il rischio sismico viene definito, nella maggior parte dei casi, in termini di perdita economica derivante dai danni subiti dalla componente strutturale, ma, negli edifici industriali una stima di questo tipo risulta riduttiva, in quanto tale parte rappresenta soltanto una percentuale sul totale. Il passaggio ad una società più sicura e resiliente richiede strumenti migliori e standardizzati per la valutazione dei pericoli e dei rischi di eventi a bassa probabilità e ad alta conseguenza.

Sulla base dei dati definiti per tutti gli edifici del Comune, gli edifici industriali sono stati caratterizzati in maniera più approfondita tramite l'aggiunta di informazioni quali il settore, l'attività, il numero di occupanti. Il database così definito è stato utilizzato per stimare le perdite economiche derivanti da danni sulle componenti strutturali, non strutturali, sui contenuti (macchinari, attrezzature specifiche), dall'interruzione dell'attività; si è inoltre valutata la possibilità di perdite umane derivanti da determinati scenari e dall'analisi stocastica. L'elaborazione di tali dati ha portato alla definizione di mappe del rischio sismico per l'intero territorio di Moncalieri e successivamente per la zona industriale oggetto di studio. I risultati ottenuti rappresentano uno strumento utile agli enti pubblici per pianificare interventi di mitigazione e gestione del rischio sismico, fornendo un'individuazione puntuale degli edifici più vulnerabili ed esposti.

I risultati saranno poi oggetto di discussione nell'ultimo capitolo, che fornirà al lettore una visione d'insieme delle analisi effettuate e un punto di partenza per sviluppi futuri.

1 Stato dell'arte

Gli ultimi venti anni sono stati caratterizzati da un'antropizzazione sempre crescente e da cambiamenti climatici sempre più rilevanti, con conseguente aumento di disastri legati al clima, in tutto il mondo. Gli effetti dei cambiamenti climatici interessano infatti tutte le regioni a livello mondiale con l'aumento delle precipitazioni (o la siccità in alcuni casi) e delle temperature in alcuni casi, lo scioglimento dei ghiacciai ed incendi forestali. Il 2019 in particolare ha registrato dei disastri a livello mondiale come gli incendi in Amazzonia ed in Siberia, l'uragano Dorian nelle Bahamas, i cicloni Idai e Kenneth in Mozambico solo per citare i più recenti. Per quanto riguarda i fenomeni sismici degli ultimi anni a Sumatra (il 26 dicembre 2004) in Indonesia si è registrato uno dei terremoti più forti storicamente registrati, di magnitudo 9.3, seguito negli anni da due terremoti di fortissima entità nella stessa isola nel 2005 e nel 2011 (entrambi di magnitudo 8.6); nel settembre 2010 è stata la volta del Cile (il 27 febbraio 2010 sottoposta ad un evento di magnitudo 8.8) e successivamente del Giappone, dove a Sendai si sono registrate scosse di magnitudo 9.0.

In Italia, nonostante si registrino terremoti di intensità minore, il pericolo non è certamente da sottovalutare. Nel 2002 la provincia di Campobasso, in Molise, ha subito i danni causati da un terremoto di magnitudo momento 5.7, seguito poi nel 2009 dall'evento de L'Aquila, in Abruzzo, che ha registrato 309 vittime e 80.000 sfollati con degli effetti devastati; tre anni dopo in Emilia l'Italia trema nuovamente, con delle scosse di magnitudo momento 6.1. Fra l'agosto del 2016 e il gennaio del 2017 si registrano scosse di magnitudo momento 6.5, il terremoto più forte dopo quello dell'Irpinia nel 1980.

Le perdite registrate sono enormi, come messo in luce dal sito <https://www.munichre.com> il quale mostra un incremento delle perdite potenziali legate alle catastrofi sismiche, le quali sono responsabili di perdite dell'ordine del milione di dollari. *“In tutto il mondo, tra il 2006 e il 2015, i disastri naturali hanno colpito ogni anno circa 224 milioni di persone e ne hanno uccise 70.000, causando simultaneamente più di US\$ 135 miliardi di danni”* (Rus, Kilar e Koren 2018). In aggiunta alle perdite economiche questi eventi hanno causato anche centinaia di vittime. Le conseguenze di tali catastrofi e la rilevanza delle stesse, evidenziano una necessità sempre più crescente di conoscere la risposta delle strutture, le quali sono spesso costruite per resistere ai soli carichi verticali e dunque non presentano una resistenza all'azione sismica adeguata. Come evidenziato nell'introduzione, questo lavoro vuole porre l'accento sulla necessità di conoscere tali fenomeni e sull'esigenza di fornire alle autorità competenti gli strumenti per reagire alle emergenze. Per tale motivo, la valutazione della vulnerabilità e del rischio delle costruzioni rappresenta, soprattutto a scala territoriale, uno strumento fondamentale per gli interventi preventivi e per la gestione delle emergenze nella fase di post evento. L'Italia, luogo in cui si trovano le città che saranno oggetto di studio in questo lavoro, è caratterizzata da un rischio sismico elevato, infatti è attraversata dal confine tra la placca Euro-Asiatica e quest'ultima viene sospinta in direzione nord da quella africana. La nostra nazione è inoltre attraversata da una micro-

placca tettonica, quella adriatica, racchiusa tra le Alpi a nord e gli Appennini a ovest. La frizione tra la placca africana e quella euro-asiatica è la causa di fenomeni di tipo sismico di cui siamo ormai testimoni sempre più frequentemente. Per questo motivo le zone a più alto rischio sismico sono quelle localizzate lungo l'Appennino centro-meridionale e l'arco Calabro-siciliano.

Seppur gli ultimi terremoti si sono verificati nel centro Italia, storicamente il sud è stato il luogo in cui hanno avuto luogo i terremoti caratterizzati da magnitudo maggiori. Tra i terremoti più catastrofici si citano infatti quello di Messina-Reggio Calabria di magnitudo 7.2 che con epicentro al centro di Messina provocò 80.000 morti con dei danni elevatissimi come evidenziato dalla Figura 1-1 (entrambe le città furono rase al suolo), che lo rendono ancora oggi uno degli eventi sismici più disastrosi in Italia e la più grande catastrofe naturale in Europa.



1-1. Gli effetti del terremoto a Messina-Reggio Calabria, Cartoline storiche (TPINEWS 2018)

Nel 1980 ad Irpinia ci fu un altro evento sismico caratterizzato da una magnitudo di 6.8 con esiti catastrofici (di cui la Figura 1-2 fornisce testimonianza): provocò la morte di 3.000 persone e la distruzione di interi paesi (99 su 119 comuni riportano danni alle strutture).



1-2. Effetti del terremoto a Irpinia (Protezione Civile, <http://www.protezionecivile.gov.it/attivita-rischi/rischio-sismico/emergenze/irpinia-1980> 2016)

Gli enti socio economici hanno risposto alla necessità di avere degli organi competenti in materia: dopo i terremoti a Izmit in Turchia (1999) e successivamente ad Atene (1999), in Grecia, nasce la necessità di avere un programma globale per la valutazione e la mitigazione del rischio sismico. Per queste ragioni nello stesso anno (1999) nasce il programma RISK-UE al fine creare un metodo capace di simulare i terremoti e di compiere delle analisi sul rischio sulla base delle diverse caratteristiche delle città europee.

A causa inoltre dalle catastrofi naturali che hanno caratterizzato gli ultimi anni, le Nazioni unite hanno istituito “*Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*” finalizzato alla creazione di interventi di riduzione del rischio dei disastri e alla diminuzione delle perdite umane. La grande importanza di questo strumento è riassunta dalla decisione di intervenire nella “gestione del rischio di catastrofi” e non solo nella “gestione delle catastrofi” (concetto definito dal Quadro d’Azione di Hyogo 2005) e quindi di agire a monte del problema, attuando politiche di mitigazione del rischio e non solo di gestione del disastro post-evento (Protezione Civile 2018). Nel sito <https://www.unisdr.org/we/coordinate/sendai-framework> si possono leggere gli obiettivi primari e le quattro priorità del gruppo che rappresentano gli obiettivi comuni che le nazioni aderenti dovranno fronteggiare:

- Capire il rischio di disastro;
- Potenziamento degli organi di governo che si occupano di gestire il rischio di disastro;
- Investire nella riduzione del rischio di disastro al fine di ottenere centri urbani resilienti;
- Migliorare la preparazione dell’effettiva risposta nei confronti del disastro e ricostruire in maniera migliore (ponendo l’accento su una ricostruzione post disastro che miri a migliorare le condizioni sociali, ambientali ed economiche per creare una comunità più resiliente in un modo efficiente ed effettivo <https://buildbackbetter.co.nz/>).

I segnali sono chiari: investire nella ricerca e nella mitigazione del rischio di disastri naturali a livello mondiale è una priorità che non può essere rimandata.

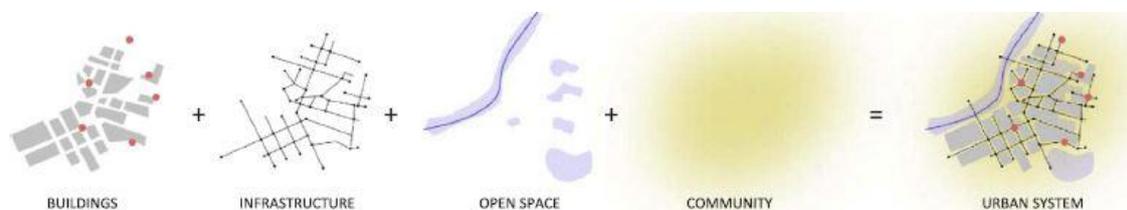
Il Sandai Framework ha raccolto l’adesione di 180 paesi, tra cui l’Italia, i quali hanno deciso di impegnarsi nel ridurre le perdite umane ed economiche e di intervenire per limitare il danno sulle infrastrutture e i servizi di base (Protezione Civile 2018). Si tratta quindi di una gestione che coinvolge diverse tipologie di rischio e che mira a rafforzare la resilienza di una data comunità.

“Il progresso nella riduzione del rischio di disastro ha mostrato che spesso non è solo il rischio che determina il disastro, ma la vulnerabilità, l’esposizione e l’abilità della popolazione di anticipare, rispondere e ricostruire dopo averne subito gli effetti” (Aitsi-Selmi, et al. 2015).

1.1 Resilienza

Il concetto di resilienza del sistema urbano ha quindi importanza fondamentale quando si parla di valutazione e prevenzione del rischio.

Il termine “resilienza” deriva dal latino “resiliere” e come evidenziato nell’enciclopedia Treccani è la velocità con cui una comunità (o un sistema ecologico) ritorna al suo stato iniziale, dopo essere stata sottoposta a una perturbazione che l’ha allontanata da quello stato (Meerow e Newell 2016). L’incremento dei disastri naturali, la crescita della popolazione e delle attività nei centri urbani hanno incentivato lo studio sulla gestione dei rischi. La ricorrenza dei fenomeni catastrofici e le molteplici discussioni successive agli stessi, ha portato ad un interesse sempre crescente per il termine resilienza sia come tema in campo politico che ambientale. Nel caso in questione, ovvero della resilienza in campo sismico ed ingegneristico, la parola significa tornare allo stato iniziale, dopo la perturbazione sismica, in tempi brevi e con un livello di danno non elevato. *“La dimensione temporale è essenziale quando si considerano tre intervalli temporali: il momento prima del disastro, il momento in cui il disastro avviene ed il tempo dopo il quale il disastro è avvenuto- corrispondenti alle fasi di preparazione, risposta, reazione e adattamento”* (Rus, Kilar e Koren 2018). Questa distinzione pone ulteriormente l’accento sugli interventi di prevenzione di pre-emergenza e sull’importanza di avere una coscienza a scala territoriale, in modo che gli interventi possano essere studiati prima del disastro. Il termine risulta spesso complesso da definire in maniera efficace quando esso risulta inerente ai centri urbani. Un sistema urbano è infatti caratterizzato da elementi diversi che si interfacciano tra di loro, sulla base di interazioni dinamiche come sintetizzato dalla Figura 1-3: le strade, le costruzioni, le infrastrutture e la comunità caratterizzano un sistema unico, i cui elementi differenti lo rendono diverso da qualsiasi altro. All’interno della città ogni fattore è strettamente legato all’altro ed ecco per quale motivo il sistema urbano è quindi l’esempio per eccellenza del sistema complesso (Meerow e Newell 2016).



1-3. Sistema complesso (Rus, Kilar e Koren 2018)

Intervenire sul sistema urbano e condurre degli studi a scala territoriale significa quindi comprendere la complessità di questo sistema e porre fin da subito il benessere (inteso come fisico e mentale) della comunità come fulcro centrale dello stesso. *“Tre sono le parole chiave per capire il concetto di resilienza di un sistema urbano: robustezza, ridondanza e rapidità”* (Rus, Kilar e Koren 2018).

Le parole scritte per descrivere la resilienza nel contesto oggetto di studio mettono in luce la necessità di creare un sistema capace di reagire ad un dato livello di stress mantenendo la sua funzionalità (robustezza), quanto più possibile affidabile tramite la creazione di risorse alternative per la ripresa nel caso in cui quelle principali siano inutilizzabili (ridondanza) e capace di reagire in tempi brevi (rapidità). Alcuni studiosi come (Brand e Nicholson 2016) e (Beltman e Mansfield 2018) pongono l’accento su una quarta parola chiave per descrivere la resilienza “l’educazione”:

insegnare alla comunità il significato del termine significa formare individui resilienti, capaci di rispondere in maniera opportuna in caso di necessità e di imparare dalle esperienze passate: durante un evento catastrofico la comunità deve infatti essere in grado di sopravvivere e di funzionare sotto condizioni uniche ed estreme (Godschalk 2003). La resilienza di un sistema è quindi senz'altro collegata alla possibilità di intervenire in maniera tempestiva nel recupero e nella ripresa delle attività che interessano un determinato centro urbano e quindi, in questo contesto, si inserisce il concetto di “post earthquake recovery” inteso come tutte quelle iniziative che possano portare la popolazione a rimanere nel luogo in cui si è manifestato l'evento e a partecipare attivamente alla sua rinascita. *“Le ricerche svolte in precedenza hanno infatti dimostrato che la pianificazione pre e post-evento è necessaria per garantire un intervento opportuno dopo l'evento”* (Burton, Miles e Kang 2006).

1.1.1 La resilienza urbana

In tutto il mondo la necessità di incrementare la resilienza urbana è diventata una priorità. *“Le città sono guidate dalle organizzazioni e dai governi tramite interventi e leggi che mirino a rendere le comunità più forti e resistenti nei confronti dei cambiamenti climatici, i quali hanno introdotto una incertezza aggiuntiva, causando pressioni sulle istituzioni locali affinché siano capaci di adattarsi”* (Meerow e Newell 2016). Come evidenziato nel capitolo paragrafo 1.1, le città hanno assistito ad una crescita demografica senza precedenti e ad un'edilizia sempre più invasiva e presente nei centri urbani. Le istituzioni stanno lentamente focalizzando il loro interesse verso la mitigazione del rischio del disastro, inteso non solo come intervento momentaneo e fugace dettato da un evento imprevisto e dannoso, ma come pianificazione preventiva. Per esempio, gli organi politici si impegnano ad intervenire per ricostituire le telecomunicazioni, le infrastrutture legate alle risorse idriche e ai relativi componenti degli impianti di distribuzione e all'elettricità il più velocemente possibile dopo il disastro poiché questo influenza la durata e l'intensità dello sforzo per il ritorno alla normalità nel centro urbano. *“Allo stesso tempo, dovrebbe essere messa in gioco anche una strategia a medio-lungo termine”* (Sanchez, Van der Heijden e Osmond 2018). Spesso è anche accaduto che il disastro diventasse un'occasione per la ricostruzione o la costituzione di una società più resiliente, come avvenuto nel caso di Seattle, sopravvissuta a numerosi eventi catastrofici (tra cui il “Grande incendio”, tre terremoti) è adesso leader nella mitigazione e nella gestione dei disastri naturali: tramite investimenti nelle stazioni antincendio, nei centri cittadini e nelle singole abitazioni civili (con il progetto *“City's Home Retrofit Program”*) ha reso gli i disastri ambientali un'occasione di implementare la sua resilienza. Uno dei programmi focalizzato su questo tema è il *“GFDRR's Resilient Recovery”* (finanziato dal World Bank Group) il quale si occupa di aiutare le comunità in difficili condizioni sociali, economiche a causa dei disastri a pianificare la ripresa post-evento e a rispondere ad eventuali disastri futuri in modo migliore: è il caso del terremoto in Nepal (2015) e dell'uragano nei Caraibi (2016), in cui il programma ha avuto un ruolo fondamentale nel

supportare il governo nella ricostruzione e nel discutere con esso le misure da adottare per la mitigazione del rischio futuro (Kull, et al. 2016).

Una manifestazione di tale necessità è sicuramente evidenziata dal progetto “100 Resilient Cities” volto ad aiutare le città del mondo a diventare più resilienti nei confronti delle sfide fisiche, sociali ed economiche che caratterizzano il ventunesimo secolo (<http://www.100resilientcities.org/about-us/>). Secondo tale concetto il diventare resiliente è un'evoluzione verso un concetto nuovo di città e di comunità, dove quest'ultima è preparata a gestire ed a mitigare l'effetto di un'eventuale catastrofe. *“Pensare in maniera resiliente significa quindi porre l'accento sul bisogno di controllare e adattarsi eventuali shock e stress, piuttosto che tentare di sistemare o intervenire su politiche esistenti che sono complici nella creazione di tali stati d'animo”* (Leitner, et al. 2018). Quindi cosa significa costruire o rendere delle città resilienti?

Anche in questo caso vengono fornite secondo la Rockefeller Foundation le caratteristiche che dovrebbe avere un buon organo di governo urbano:

- flessibile: ovvero abile di adottare strategie alternative in risposta alle circostanze che lo mettono alla prova;
- ridondante: creare delle alternative, delle “riserve” in modo tale da poter fare fronte ad eventuali interruzioni;
- robusto: essere un sistema ben concepito, strutturato e controllato;
- riconoscere modi differenti per sfruttare le risorse;
- riflessivo: usare le esperienze passate per compiere le decisioni future;
- inclusivo: dare priorità alle consultazioni su larga scala in modo tale da creare un senso decisionale collettivo nell'ambito decisionale.

“Tali concetti mettono in luce come l'incremento della resilienza in un sistema territoriale è basato sulla riduzione della vulnerabilità, sul perseguimento della capacità di apprendimento sociale e istituzionale e sul tentativo di ottenere un miglioramento nella gestione del territorio che aumenti la capacità di adattamento e riduca le vulnerabilità” (Brunetta, et al. 2019).

Sulla base di quanto appena evidenziato, nel mondo ed in Europa sono stati realizzati dei software e dei progetti di ricerca incentrati su tali temi. *“Dal 2001 al 2004 il progetto Risk-UE con l'obiettivo di ottenere una valutazione plausibile circa i danni diretti ed indiretti prodotti a seguito di un dato scenario sismico e di stimare le conseguenze di tali danni al fine di aumentare la consapevolezza all'interno delle sette città (oggetto di studio) necessario a ridurre efficacemente il rischio di terremoto”* (Mouroux e RISK-UE team 2004). Uno dei software più popolari per la valutazione e la gestione del rischio sismico, Hazus è stato realizzato negli USA nel 1997 e continua ancora oggi ad essere aggiornato ed implementato: *“è un software gratuito, proposto per la stima delle perdite dovute ai rischi naturali e per essere utilizzato da un numero elevato di persone e gruppi interessati alla mitigazione delle catastrofi naturali e al processo decisionale connesso agli stessi”* (Schneider e Schauser 2006). Attualmente uno dei progetti più

importanti mirati alla creazione di un modello uniforme per la valutazione del rischio in Europa è il progetto H2020 SERA (*Seismology and Earthquake Engineering Research Infrastructure Alliance for Europe*) che *“permette di generare dei parametri di valutazione del rischio (perdite medie annuali, perdite massime previste, mappe di rischio), essenziali per l’implementazione del strategie di riduzione del rischio sismico”* (Crowley, Rodrigues e Silva 2018).

Le tecnologie via via più evolute e la creazione di software e gruppi interessati all’argomento permettono di sviluppare piani decisionali utili ad aumentare la resilienza della comunità. L’Italia in particolare, deve essere fortemente interessata a tali argomenti di ricerca e allo sviluppo di piani strategici mirati, in quanto è uno degli stati più esposto per gli inestimabili beni in essa custoditi e che meno è preparata alla gestione delle emergenze, come dimostrano i recenti eventi del 2009 e del 2016. In particolare nel 2009 la gestione del post-evento all’Aquila ha evidenziato la difficoltà dello stato di reagire alla catastrofe: la comunità è stata dislocata in luoghi in cui mancavano completamente i servizi pubblici quali scuole, supermarket, poste ecc.; *“molte delle nuove abitazioni create per accogliere i cittadini sono state abbandonate a causa dell’impossibilità di gestire alcune attività primarie e delle cattive condizioni (seppur fossero appena state costruite): questo non è assolutamente in accordo con la definizione di “ripresa” dal disastro causato da un fenomeno naturale”* (Contreras, Blaschke e Hodgson 2017). In questo contesto la resilienza della comunità e della città è fortemente legata anche ai piani di gestione dell’evento a opera dei governi a livello comunale e nazionale, che devono essere in grado di fornire adeguati condizioni a coloro che vivono in zone esposte ai disastri naturali. La mancanza di resilienza è un problema nelle città con poca capacità di anticipare, far fronte e rialzarsi. *“La fase di post disastro offre l’opportunità di ridurre la vulnerabilità esistente e di migliorare le condizioni della comunità nella sfera fisica, sociale, economica, culturale, istituzionale ed ambientale”* (Contreras, Blaschke e Hodgson 2017).

1.2 Il GIS come strumento per la rappresentazione e la valutazione del rischio sismico a scala urbana

A partire dagli anni duemila, il GIS ha oltrepassato i confini dei laboratori dell’università per arrivare nel cuore delle più importanti pratiche di pianificazione; *“questo perché il GIS fornisce analisi spaziali e capacità di manipolazione che si allineano strettamente con le esigenze professionali di pianificatori urbani e regionali “* (Drummon e French 2008). Il mondo odierno e la velocità dello stesso richiedono che i pianificatori e gli individui (intesi come comunità) siano in grado di gestire una grande mole di informazioni, di comunicare rapidamente tali informazioni e di essere capaci di trarne profitto, qualunque sia il campo di applicazione.

Le analisi effettuate durante l’attività di ricerca, hanno richiesto l’utilizzo e la gestione di una grande mole di dati, che richiedeva di essere gestita tramite l’ausilio di software appositi: tale elaborazione è stata effettuata infatti con uno strumento di pianificazione, il GIS (*Geografic information System*).

L'utilizzo del GIS come strumento di rappresentazione, archiviazione, analisi e di divulgazione dei dati è costantemente in crescita e con il tempo la sua applicazione si è diffusa ai più disparati contesti. *“Anche nel campo del patrimonio architettonico, la tecnologia GIS è usata per collegare e mettere in relazione i dati derivanti da diverse discipline”* (Lenticchia e Coisson 2017). Nel caso dell'analisi sismica la spazializzazione dei dati risulta essere uno strumento fondamentale per la pianificazione a scala urbana. È sufficiente pensare alla semplicità di individuazione di un determinato luogo su mappa e all'immediatezza con cui una qualsiasi persona risulta essere in grado di riconoscere un luogo grazie al satellite di Google Maps: in questo modo un qualsiasi individuo, seppur non qualificato è capace di estrarre informazioni da una determinata mappa geolocalizzata. Si può quindi evidenziare come risulti intuitivo ed efficace servirsi di un tale strumento di rappresentazione non solo durante la fase di pianificazione pre-intervento, ma anche l'occorrere di un'emergenza. L'individuazione di edifici danneggiati, di zone soggette a maggior rischio, dei percorsi sicuri e dei punti di raccolta risultano essere solo degli esempi dell'enorme contributo che lo strumento è capace di dare. Gli strumenti che vengono utilizzati come base per le successive elaborazioni sono spesso reperibili nel Geoportale regionale, ma esse rappresentano solo un punto di partenza per coloro che vogliono utilizzare il GIS come strumento utile alla rappresentazione e alla valutazione del rischio sismico: a partire infatti dalle caratteristiche degli edifici (spesso definiti da soli attributi di superficie, altezza e posizione) è possibile comunicare una moltitudine di informazioni che rendono attualmente il GIS uno degli strumenti cardine della pianificazione a livello comunale, regionale e nazionale. È quindi cruciale integrare le conoscenze locali, il GIS e le mappe nel processo di gestione del rischio. Ci sono tre ragioni principali che spingono per questa integrazione: le mappe sul rischio giocano un ruolo chiave nell'identificazione del disastro ed uno strumento come questo rende questa conoscenza locale visibile. *“Conseguentemente l'obiettivo essenziale della metodologia partecipativa per la raccolta dei dati è quello di rendere visibile l'invisibile”* (Tran, et al. 2009).

1.3 I database e l'importanza dei dati open source

La redazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comporta la necessità di conoscere e di rappresentare i territori. *“La maggior disponibilità di open-data ha infatti accresciuto la capacità di tecnici e ricercatori di individuare e selezionare i dati utili ai processi di governo del territorio al fine di produrre le informazioni necessarie”* (Arena 2017).

“La definizione di una sistema di classificazione per la caratterizzazione dello stock di costruzioni esistenti e la descrizione del danno sulle stesse è uno step necessario per compiere un'analisi di rischio al fine di fornire un'interpretazione dei risultati” (Lagomarsino e Giovinazzi 2006). Come verrà spiegato più in dettaglio nel paragrafo 2.1.4, *“un modello di esposizione dovrebbe contenere la distribuzione spaziale, le caratteristiche strutturali e i costi di sostituzione per le costruzioni esistenti”* (Calderon e Silva 2018). Nel caso dell'Italia, queste informazioni sono reperibili nei Geoportali regionali, nei dataset opensource come Open data o WebGIS, o tramite la lettura di articoli e periodici reperibili online sui vari siti di ricerca.

La costruzione inoltre del SIT (Sistema Informativo Territoriale) costituisce uno strumento prezioso per la condivisione dei dati e per la pianificazione urbanistica. I file reperibili nei siti citati, sono però spesso limitati e limitanti per i tecnici o per coloro che vogliono effettuare valutazioni di tipo sismiche, in quanto i dati sono spesso incompleti. I vuoti sono soprattutto legati alle misure geometriche riguardanti i lati delle costruzioni, le altezze e i materiali da costruzione, ritenute informazioni fondamentali per un database completo e che possa portare a risultati efficienti. Contributo fondamentale all'analisi del rischio sismico potrebbe essere fornito nel caso in cui fossero reperibili i dati relativi al danneggiamento degli edifici post evento, strumento fondamentale per la creazione delle curve di vulnerabilità e per la definizione di un data base nazionale capace di riconoscere la tipologia e la gravità dei danni riferiti ad un dato territorio a livello storico. Con riferimento alla vulnerabilità sismica nelle aree urbane, l'analisi a scala territoriale richiedere infatti la reperibilità di una grande quantità di dati riguardanti un grande numero di costruzioni; *“l'uso di software per il calcolo strutturale è infatti una proposta difficile da realizzare a causa della numerose tipologie strutturali esistenti in Italia ed in Europa, a meno che non siano disponibili delle informazioni relative alla singola costruzione”* (Francini, et al. 2018). L'utilizzo e la gestione dei dati risulta essere fondamentale anche nella pianificazione urbanistica, dove *“la costruzione del quadro conoscitivo-fase iniziale e propedeutica del procedimento-coincide con il momento di scelta, raccolta ed organizzazione dei dati in ambiente GIS, al fine di realizzare una banca dati informatizzata utile nelle fasi successive di pianificazione e progettazione”* (Arena 2017).

Le problematiche maggiori sono legate non solo alla mancanza dei dati di cui si è appena discusso, ma anche alla non uniformità di quelli presenti nei vari siti a livello comunale o regionale: ogni mappa, ogni database contiene informazioni differenti, che impongono al pianificatore di confrontarsi con realtà spesso differenti. In America ed in Europa, si è tentato di uniformare tali dati con i progetti PAGER (*Prompt Assessment of Global Earthquake for Response*) (Earle, et al. 2009) e il progetto NERA (*Network of European research infrastructures for earthquake risk assessment and mitigation*); il primo si è occupato di raccogliere i dati relativi allo stock di costruzioni degli Stati Uniti grazie all'aiuto di esperti incaricati alla compilazione di database con le informazioni delle costruzioni e di uniformare la tipologia di dati raccolti oltre che di definire l'occupazione nei principali luoghi di aggregazione del paese sulla base del quale dopo pochi minuti dall'inizio di un evento sismico ovunque nel mondo lo strumento è in grado di valutare l'impatto sociale (Earle, et al. 2009), mentre il secondo ha cercato di svolgere le stesse mansioni, ma a livello europeo rispondendo al bisogno degli stati europei di valutare il rischio sismico in tempo reale (Faravelli, et al. 2013). In Italia la GEM (*Global Earthquake Model*) ha rappresentato e rappresenta un tentativo dell'Italia di creare dei database simili, ma il progetto è ancora in pieno svolgimento. La nostra nazione può attualmente contare sui dati reperibili nel sito dell'Istat (<https://www.istat.it/>) sulla base di un censimento che viene effettuato ogni 10 anni.

L'obiettivo ultimo dovrebbe essere quello di ottenere un database unico, dotato di dati sufficientemente aggiornati e open-source utili non solo al pianificatore e agli enti governativi,

ma anche alla popolazione: questo significherebbe creare non solo città resilienti, ma rendere tali le comunità che sussistono sui territori esposti al rischio sismico.

1.4 Il rischio sismico

Come evidenziato nei paragrafi precedenti, l'incorrere di catastrofi sempre più frequenti e dagli effetti via via più gravosi, ha portato ad un interesse crescente verso il rischio sismico. Il rischio sismico è definito come la probabilità che si verifichi un determinato livello di danno in un intervallo di tempo e in una determinata area.

In generale il rischio sismico può essere espresso come una funzione della pericolosità, della vulnerabilità e dell'esposizione:

$$R = f(P, V, E)$$

sulla base dell'equazione appena esposta P è la pericolosità sismica ovvero la probabilità di occorrenza di un evento sismico di data intensità e frequenza (chiamata anche sismicità del territorio), V è la vulnerabilità sismica che rappresenta l'attitudine di una determinata costruzione a danneggiarsi a causa di un sisma con intensità nota; E è invece l'esposizione ovvero è un indicatore del valore dei beni presenti in una data area (Hofer, et al. 2017).

Come intuibile dalla descrizione dei parametri da cui dipende il rischio sismico, la pericolosità P non è dipendente dalle azioni che l'uomo può svolgere per prevenire i danni provocati da un fenomeno sismico, ma è invece legato alle caratteristiche dell'area (Hofer, et al. 2017). Al fine di rendere la popolazione partecipe ed informata negli ultimi anni si è spinto verso la creazione mappa rappresentanti la microzonazione sismica, con l'obiettivo di mettere in luce le zone più soggette a fenomeni e di orientare la scelta di aree per futuri insediamenti. Tale strumento inoltre, fornisce un aiuto fondamentale nella costruzione di piani di emergenza e nella valutazione durante il progetto di nuove costruzioni (Menoni, Boni e Pergalani 2018). Per quanto concerne l'esposizione essa risulta essere fortemente dipendente dalla popolazione residente in una determinata area e dai beni culturali e architettonici ivi presenti (la cui presenza nel nostro territorio rende l'esposizione elevata) i quali per ovvie ragioni non possono essere spostati o manipolati: il contributo dell'uomo è quindi limitato alla possibilità di conoscere e di catalogare tali beni. Evidenziata l'impossibilità di intervento da parte dell'uomo di mitigare la pericolosità sismica e di adoperarsi nella diminuzione dell'esposizione è necessario mettere in luce il grande contributo che esso può offrire nei confronti della vulnerabilità sismica. Nota la definizione di vulnerabilità sismica l'unico modo per intervenire nella mitigazione del rischio sismica è quello di pianificare e attuare interventi di retrofit e di renderli resilienti nei confronti dell'evento sismico (Fleischhauer 2008). Due problemi rendono sicuramente difficile riuscire in quest'impresa nel breve termine: il primo è il problema dell'elevato costo che richiederebbe la messa in sicurezza degli edifici situati nelle zone sismiche.

Il secondo riguarda il fatto che nonostante le mappe sul rischio sismico per il territorio italiani siano basate su storiche ed accurate informazioni (più di 1000 anni), “*la maggior parte dei terremoti dal livello moderato a quello alto avvenuti negli ultimi dieci anni hanno causato delle accelerazioni sismiche significativamente più alte rispetto a quelle presenti nelle ultime normative*” (De Natale, et al. 2019). Questo mette in luce l'importanza di effettuare continui aggiornamenti sui dati esistenti e di intervenire tempestivamente nella registrazione dei dati post-evento.

Le misure risultano tanto più importanti tanto più è definito a rischio il territorio e come evidenziato dalla protezione civile l'Italia è uno dei paesi europei a maggior rischio sismico e dunque è necessità comune stimare il rischio sismico in una data area e le perdite potenziali al fine di elaborare un piano di controllo dell'emergenza (Polese, Di Ludovico e Prota, et al. 2013).

La Figura 1-4 rappresenta appunto quanto appena sottolineato, in quanto l'Italia, se si considera una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, risulta uno dei paesi soggetto ad accelerazioni maggiori.

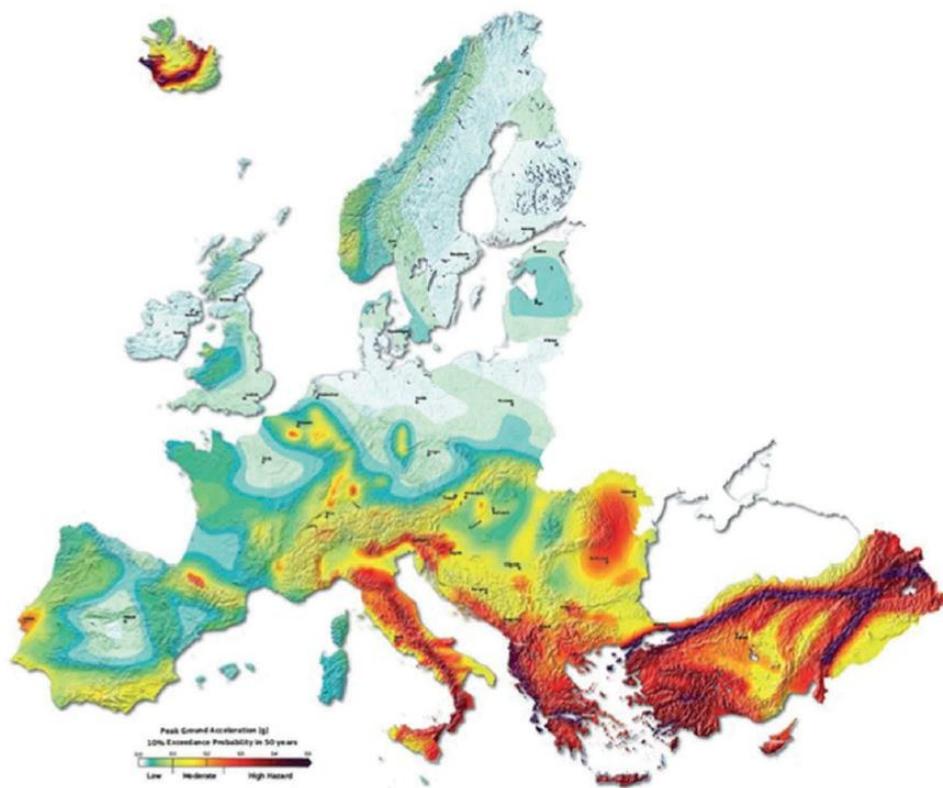


Figura 1-4 Mappa europea del rischio sismico in base alla PGA con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (equivalente ad un periodo di ritorno di 475 anni) stilata dal progetto SHARE, <http://www.share-eu.org/>.

2 Software utilizzati per la valutazione del rischio sismico

Gli strumenti ed i software reperibili sul mercato attualmente sono molteplici e caratterizzati da grande eterogeneità, così come i dati reperibili cominciano ad essere maggiori, sia a livello nazionale che regionale. Al fine di effettuare l'analisi del rischio sismico a scala territoriale sul caso studio di Norcia e successivamente su quello di Moncalieri, si sono utilizzati principalmente due software: OpenQuake engine (di cui verrà ampiamente discusso nel paragrafo 2.1) e QGIS (le cui caratteristiche saranno descritte nel paragrafo 2.2); il primo è uno strumento utile per l'analisi della pericolosità sismica e del rischio sismico, il secondo è fondamentale per la rappresentazione dei dati e la loro valutazione. I motivi di tale scelta sono riconducibili in primo luogo alla necessità di utilizzare software open-source (coerentemente con quanto esposto nel paragrafo 1.3) e in secondo luogo alla necessità di poter lavorare con due software capaci di interfacciarsi facilmente tra di loro; come verrà spiegato nei paragrafi successivi, infatti, OpenQuake è stato implementato per essere utilizzato con QGIS.

2.1 OpenQuake engine

Il software utilizzato nasce dalla necessità di uniformare e diffondere a livello mondiale le conoscenze in materia di rischio sismico (Silva, Pagani, et al. 2013). I recenti eventi sismici, in Italia così come ad Haiti, Chile, Giappone e Nuova Zelanda ricordano in maniera dolorosa al mondo quanto distruttivo sia l'impatto sismico e l'importanza dell'affidabilità delle informazioni relative al rischio di terremoti (Pinho 2012). *The Global Earthquake Model* (GEM) mira a combinare le caratteristiche principali dello stato dell'arte, della collaborazione e buy-in, trasparenza e apertura in un'iniziativa per calcolare e comunicare il rischio sismico in tutto il mondo (Silva, Pagani, et al. 2013). Al fine di realizzare questo obiettivo è stato creato OpenQuake Engine, piattaforma opensource che permette di calcolare e di computare le perdite umane ed economiche legate agli eventi sismici, considerando gli eventi che possono verificarsi in una determinata regione e di una data intensità. Il software è supportato da un gruppo di ricercatori dell'università di Pavia e dalla documentazione, dunque l'utente può autonomamente procedere con il caricamento dei file di esposizione, di vulnerabilità e di pericolosità. OpenQuake engine è un software opensource scritto in linguaggio di programmazione Python e permette di calcolare la pericolosità sismica ed il rischio sismico su diverse scale (è possibile anche il calcolo su scala regionale); *“esso risulta inoltre uno strumento fondamentale per la riduzione delle perdite umane ed economiche causate dai terremoti”* (Silva, Crowley, et al. 2014). La sua nascita risale al 2009 ed è stato implementato sino ad oggi al fine di renderlo più efficiente. Una delle innovazioni maggiori riguarda la creazione di un'interfaccia grafica (GUI), capace di interfacciarsi con Qgis, come meglio verrà esposto nel paragrafo.

La grande innovazione è stata quella di tentare di stabilire uno standard uniforme ed aperto per calcolare e comunicare il rischio sismico a livello mondiale. La piattaforma permette di fare cinque tipi di calcolo differente, per quanto riguarda la valutazione del rischio sismico, e tre analisi differenti per la valutazione del rischio sismico. Una sintesi di tali funzionalità è descritta di seguito, sulla base di quanto riportato sul manuale del software suddetto (GEM 2019). Nel caso della valutazione del rischio sismico è possibile utilizzare i seguenti calcolatori:

- *Scenario Risk Assessment*: questa tipologia di calcolatore è utile nel caso di gestione e pianificazione dell'emergenza e per sensibilizzare la società al rischio. In particolare permette di calcolare le perdite economiche e le perdite statistiche derivanti da un singolo scenario sismico sulla base delle variabili aleatorie ed epistemiche legate al movimento del suolo;
- *Scenario Damage Assessment*: il calcolo effettuato con tale modalità permette la stima della distribuzione del danno sui beni legata al singolo scenario di rottura e può essere utilizzato per capire durante l'intervento di gestione dell'emergenza o per valutare in maniera rapida qual è il bene più vulnerabili nei confronti del dato scenario;
- *Stochastic Event-Based Probabilistic Seismic Risk Analysis*: questo calcolatore computa le perdite e le statistiche sulle perdite per un dataset di eventi sulla base del rischio probabilistico. Le perdite vengono stimate sulla base di un approccio basato sugli eventi, in modo tale che siano simulate su un insieme (o portafoglio) di eventi. Il risultato di tale analisi è molto utile se il fine dell'analisi è quello di valutare le perdite attese aggregate per la raccolta di beni oggetto di studio.
- *Classical Probabilistic Seismic Risk Analysis*: il calcolatore in questione permette il calcolo delle perdite economiche relative alle singole attività sulla base di una descrizione probabilistica del pericolo. I risultati ottenuti sono è utile per la valutazione di rischi compatibili tra beni che si trovano in luoghi diversi. Questi dati ricavati dalle analisi possono essere utilizzati, a titolo di esempio, per la definizione delle priorità nell'impegno di mitigazione del rischio.
- *Classical Probabilistic Seismic Damage Analysis*: quest'analisi permette di valutare la probabilità che si verifichi un certo livello di danno in un periodo di tempo determinato. Permette di ottenere delle mappe riferite alla probabilità di collasso a partire dalle curve di pericolosità calcolate seguendo la classica procedura di integrazione;
- *Retrofit Benefit-cost ratio*: Questo calcolatore è uno strumento di supporto decisionale per valutare il vantaggio, dal punto di vista economico, di misure di adeguamento e rafforzamento su una raccolta di edifici esistenti. Questo output può essere utilizzato per dare la priorità alle regioni che necessitano di retrofitting o di interventi di rafforzamento o per valutare quale progetto sismico sia economicamente più adeguato per una data regione.

I calcolatori di OpenQuake funzionano grazie ad un linguaggio creato ad hoc per la trasmissione dei dati internamente ed esternamente al programma, chiamato NRML, basato su XML e influenzato dall'esperienza GEM1 (sviluppato nel 2009).

Attualmente tale linguaggio è utilizzato per creare i file di input necessari alle analisi: logic trees, fragility models, exposure models, vulnerability models, hazard source zone models, finite ruptures. Il funzionamento del software è sintetizzato nella Figura 2-1 che sintetizza il contributo del software nella costruzione dei modelli di esposizione, vulnerabilità e fragilità finalizzati al calcolo della pericolosità e del rischio. La piattaforma è inoltre opensource e permette agli utenti di partecipare nella creazione di contenuti.

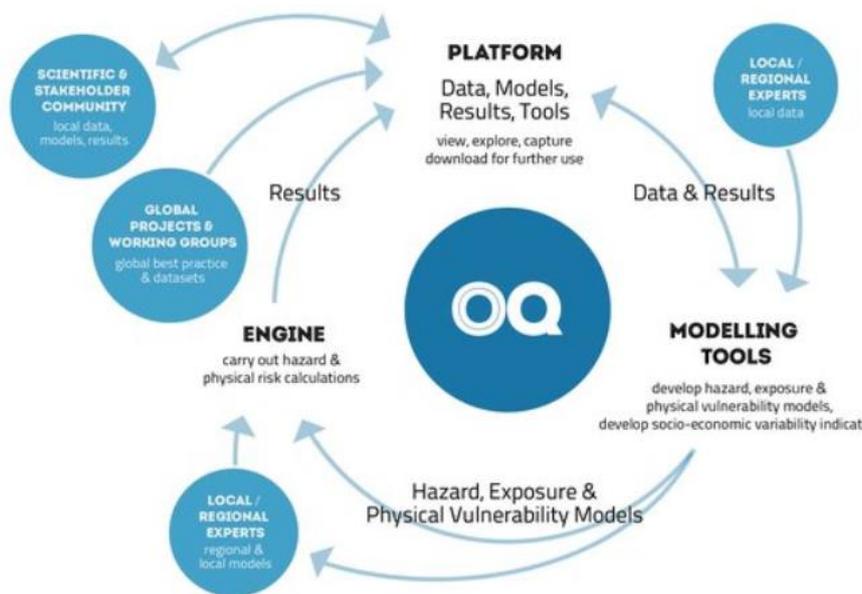


Figura 2-1 Funzionamento del software OpenQuake engine (GEM 2019)

Al fine di rendere più chiaro il funzionamento di tale software di seguito si procederà con una descrizione dei modelli utilizzati per il calcolo della pericolosità (2.1.1, 2.1.2, 2.1.3) e successivamente del rischio sismico (2.1.4, 2.1.5, 2.1.6, 2.1.7).

2.1.1 Logic Tree model

“Per una valutazione di pericolosità sismica è un requisito essenziale che il modello di pericolosità incorpori la descrizione delle incertezze epistemiche (considerando la possibilità di diversi modelli di sorgente, i parametri di attività, le equazioni di previsione del movimento del terreno): tutto questo si ottiene con il modello logico ad albero” (Pagani, Monelli e Weatherill 2014).

Nella versione attualmente in uso del software il logic tree è articolato come una sequenza di livelli di ramificazioni e ogni livello contiene al suo interno successive ramificazioni. Questa struttura ha il merito di descrivere sistematicamente il grado di incertezza collegato alle analisi di pericolosità e di rischio sismico; ogni braccio ha infatti il ruolo di esprimere un certo grado di incertezza epistemico. La definizione del modello ad albero può avvenire grazie alla conoscenza di particolari regioni tettoniche e alla complessa geometria delle faglie. Il *Logic Tree* fa uso di componenti fondamentali illustrati nella Figura 2-2, quali:

- Livello di rami o *Branching level*: è il livello principale, che non contiene e non esprime alcun livello di incertezza, ma ha la funzione di mantenere una logica e una struttura ordinata all'interno dell'albero;
- Set di ramificazioni o *Branching set*: ogni set di rami è identificato da un ID e da un tipo di incertezza. È un componente chiave del modello descritto in quanto fornisce un'interpretazione di un parametro o di un modello. Questo set di incertezze è applicato al *Seismic Source Model* o solamente ad un sottoinsieme;
- Rami o *Branch*: è la diramazione singola del modello e rappresenta la possibile interpretazione di valori assegnati ad un determinato tipo di incertezza al quale viene assegnato un parametro o un peso.

Non esiste nessuna restrizione nel numero dei “branch set” che possono far parte del “branch level”: ogni utente può quindi personalizzare la propria analisi.

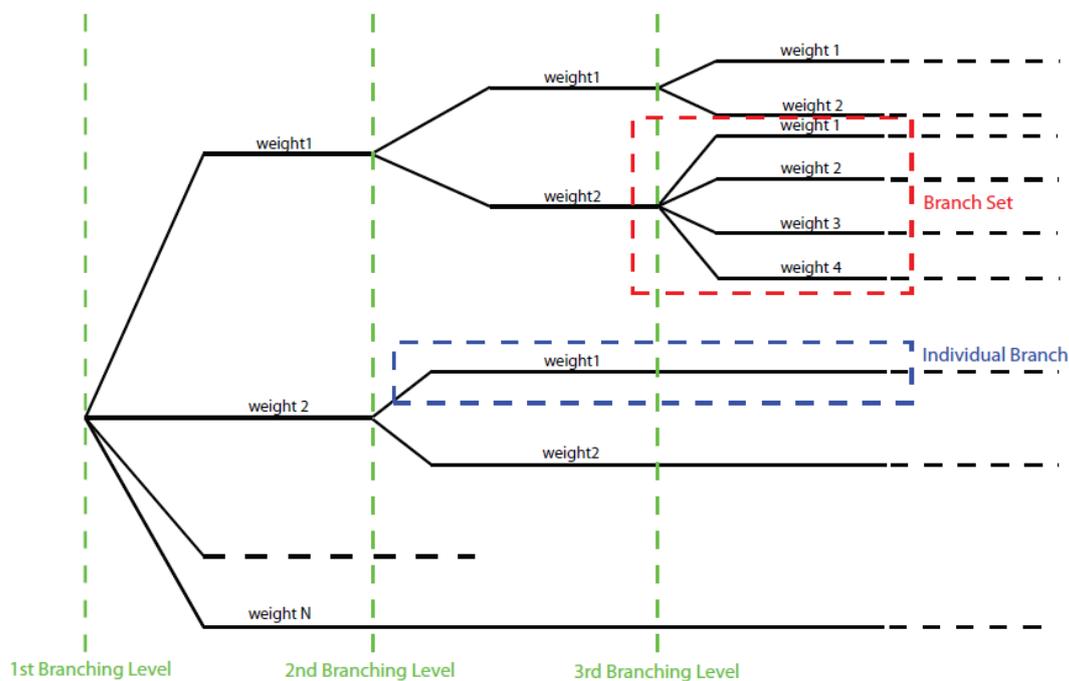


Figura 2-2 Struttura generica del Logic tree con la definizione dei vari elementi, (GEM 2019)

Al fine di poter effettuare un'analisi di pericolosità sismica devono essere definiti due input (GEM 2019):

- *Seismic source Logic tree*: la struttura descritta deve contenere come minimo un “branching level”. Questo livello del ramo viene utilizzato per definire la sorgente sismica iniziale nel modello di input (o nel caso in cui si trattasse di diverse bracci, si parla di iniziali modelli di input di sorgenti sismiche). Tale struttura dell'albero gestisce l'incertezza epistemica riguardante le caratteristiche della sorgente sismica che interessa il sito in esame (geometria, posizione);
- *Ground motion logic tree*: l'impianto in esame consiste in una lista di equazioni che prevedono i movimenti del terreno per ogni regione tettonica usata per caratterizzare le sorgenti nel modello di input per il calcolo della pericolosità sismica.

2.1.2 Seismic Source Model

Una parte essenziale in ogni valutazione della pericolosità sismica è il modello di rottura del terremoto: “questo determina distanza tra il sito e la rottura, e di conseguenza la distribuzione di movimento del terreno nel sito di interesse” (Pagani, Monelli, et al. 2012).

Questo modello risulta essere fondamentale per indicare indicazioni quali il luogo, la geometria e l'attività degli eventi collegati al modello: la definizione di tali parametri avviene attraverso la descrizione delle distribuzioni di frequenza di magnitudo. La sequenza di eventi sismici può essere descritta con l'utilizzo di metodi differenti. Nel caso in cui l'area geografica in esame non si riferisce a strutture di faglia, l'evento sismico può essere definito come un punto o un'area i quali differenziano rispettivamente la rottura su una singola superficie e quella su una regione geografica più ampia. In generale la sorgente sismica può essere di quattro tipologie: areale, puntuale, semplice, complessa. Nel primo caso si tratta di una regione poligonale con la quale si esprime una sismicità uniforme; il caso di sorgente puntuale riguarda invece il caso di un punto a sismicità concentrata. Tipologia semplice e complessa si riferiscono invece rispettivamente al caso di faglia regolare e di faglia complessa. Un esempio di faglia puntuale e di faglia complessa sono rappresentati nella Figura 2-3, al fine di chiarire la differenza tra le diverse sorgenti.

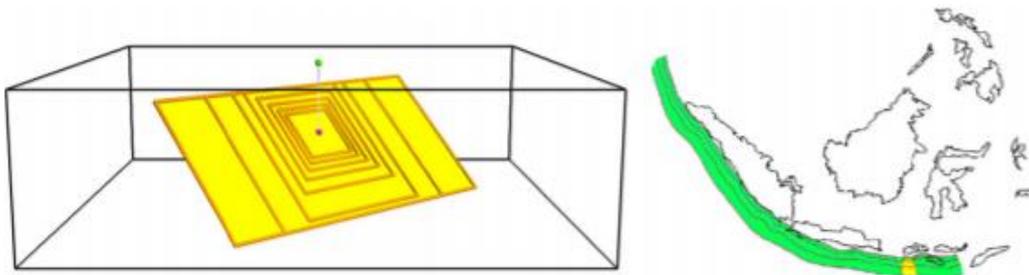


Figura 2-3 Esempio di sorgente puntuale (a sinistra) e di sorgente complessa (destra), (Silva, Pagani, et al. 2013)

2.1.3 Equazioni di previsioni del movimento del terreno (GMPes)

Le equazioni di previsione del moto specificano le informazioni comuni relative al calcolo della pericolosità e sono basate su equazioni empiriche, appunto GMPse. La definizione delle equazioni richiede il settaggio di alcuni parametri, quali la media e la deviazione standard che vengono associate ad un dato set di valori di variabili. Dal momento che ogni regione tettonica necessita di equazioni di previsione del movimento del terreno, il software è capace di estrarre quella più adatta al sito in esame dal GMPes. Nel caso si utilizzi un determinato scenario sismico devono invece essere definite delle caratteristiche specifiche.

2.1.4 Exposure model

Tutti i calcolatori di OpenQuake engine richiedono la definizione di un modello di esposizione, che deve essere scritto in linguaggio NRML (Natural hazards Risk Markup Language). Il modello di esposizione contiene una sezione di metadati che elenca le informazioni generali relative all'esposizione comprensiva di una sezione con i costi che descrive come le diverse aree, costi e occupazioni per le attività verranno definite al fine di valutare i dati per ogni singola attività nel portfolio.

La definizione del modello di esposizione richiede la definizione dei seguenti parametri:

- *id*: è una stringa obbligatoria che serve per identificare il modello di esposizione;
- *category*: è una caratteristica non obbligatoria, che permette di definire in maniera più specifica l'oggetto che verrà analizzato (costruzione, ponte ecc)
- *taxonomySource*: un attributo opzionale utilizzato per definire la tassonomia per descrivere la categoria del bene oggetto dell'analisi;
- *description*: una breve stringa che contiene informazioni sul modello di esposizione.

Nel modello di esposizione si richiede inoltre di definire i costi relative alle componenti strutturali dell'edificio, a quelle non strutturali, all'interruzione dell'attività e alla chiusura dell'attività per ogni bene presente nel portfolio. Al fine di chiarire a quale unità corrisponda il costo, è necessario definire se il costo sia riferimento come valore aggregato, per il bene nella sua interezza (per unità strutturale) o per unità di area (in questo caso deve essere specificata l'unità di area, che può per esempio essere il metro quadro). La definizione del modello di esposizione è fondamentale per definire la tipologia di analisi che verrà svolta. I dati necessari per la sua compilazione (sintetizzati nella Figura 2-3) sono spesso rintracciabili nei siti dei comuni (in particolar modo nel sito del Geoportale esistente ormai per tutte le regioni) e nel caso dell'Italia nel sito dell'Istat e contengono informazioni importanti circa la localizzazione geografica dei beni ed il numero di costruzioni presenti in una data area. Indicazione fondamentale, inoltre, sarà il costo relativo alla costruzione o al retrofit degli edifici.

Si descrivono adesso con più chiarezza e precisione i campi necessari alla definizione di tale modello, utilizzabili sia per ogni bene:

- *id*: è una stringa che individua in maniera precisa il bene oggetto di analisi in modo che il risultato possa essere legato in maniera opportuna al tipo di dato iniziale definito nel modello di esposizione;
- *taxonomy*: si tratta di un elemento chiave perché permette di descrivere la tipologia di costruzione. I mezzi per realizzare la tassonomia sono molteplici, si segnala in particolar modo la pagina GEM Taxonomy.
- *number*: è il numero di unità compreso in un determinato bene. Per esempio se il bene è un condominio, le unità saranno definite dal numero di proprietà presenti nello stesso. Per il calcolatore “risk calculations” questo attributo deve essere definito se l’area o i costi sono stati definiti per l’unità strutturale;
- *area*: sono le dimensioni del bene oggetto di studio, definiti nell’unità di misura adeguata. Questo elemento deve essere definito obbligatoriamente se i costi saranno calcolati per unità di area;
- *location*: sono le coordinate, espresse sotto forma di longitudine e latitudine del bene oggetto di analisi. Nel caso dell’analisi svolta in tale lavoro, tali coordinate geografiche sono relative al centroide di ogni bene, calcolato con il software QGIS;
- *costs*: per ogni bene viene definito un set di costi, in quanto è possibile che il costo sia di tipo strutturale, non strutturale, legato all’interruzione dell’attività;
- *occupancies*: al fine di valutare le perdite in termini economici relativi anche alla vita umana, deve essere definito il numero di occupanti presenti. Il numero di occupanti verrà definito per un determinato periodo: durante il giorno, in transito o durante la notte. Questa tipologia di informazione è obbligatoria nel caso si conduca un’analisi “scenario risk calculations” o “probabilistic”.

Nel caso in cui si voglia valutare la possibilità di retrofit o si voglia condurre un’analisi relative ai costi, è necessario definire anche i costi di retrofit (retrofitted).

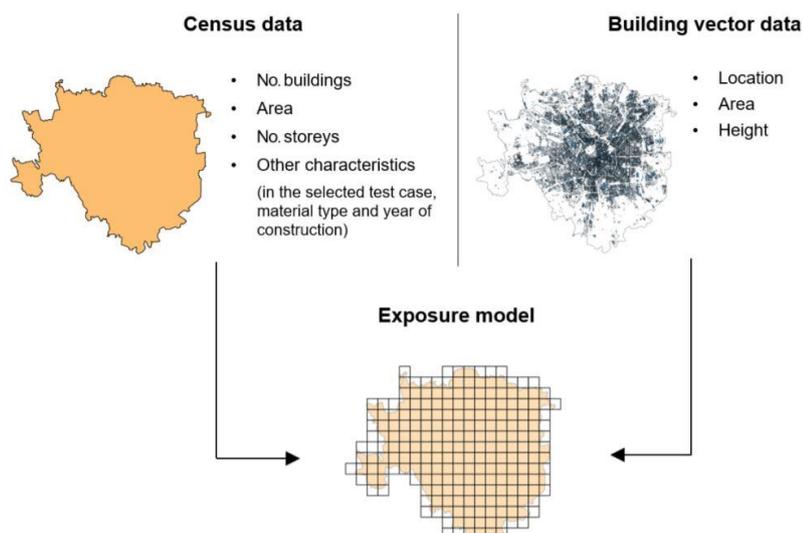


Figura 2-4 Dati necessari per la costruzione del modello di esposizione, (Figueiredo e Martina 2016)

2.1.5 Fragility model

Un modello di fragilità esprime la probabilità di superare un determinato stato limite o un determinato livello di danno. Questa tipologia di modello è richiesto nel caso in cui si voglia effettuare un'analisi di tipo “*Scenario damage calculator*” oppure “*Classical probabilistic seismic damage calculator*”, ma è anche propedeutico nel caso in cui si voglia valutare la vulnerabilità di un determinato stock di edifici. La funzione di fragilità dovrà essere definita per ogni tipologia di edificio e potrà essere discreta o continua. La probabilità di eccedenze è legata nel caso di tale modello a dei livelli di intensità definiti. Un esempio di funzione di fragilità di tipo continuo è riportato nella Figura 2.4 reperita sul manuale di OpenQuake.

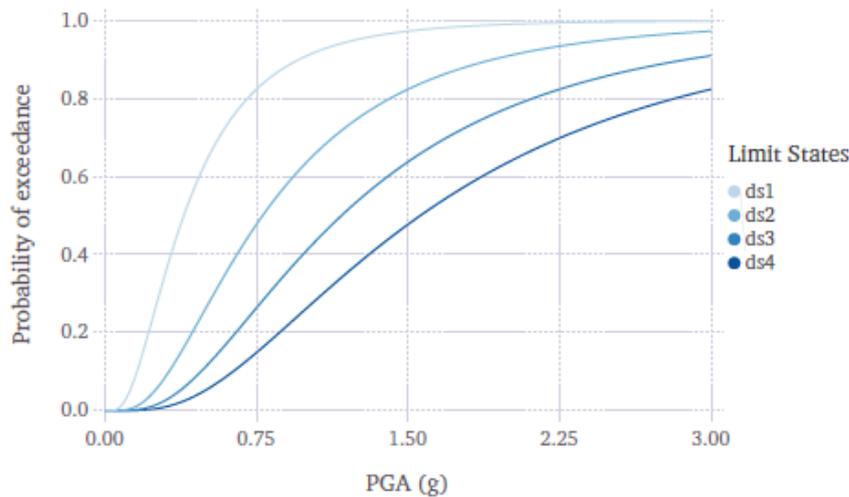


Figura 2-5 Esempio di funzione di fragilità, OpenQuake engine Manual, (GEM, 2019)

I campi da completare sono:

- *id*: è una stringa utilizzata per identificare il modello di fragilità;
- *assetCategory*: questo campo è utilizzato per definire la tipologia di elemento per ogni funzione di fragilità (costruzioni, edifici, linee vita);
- *lossCategory*: con questa caratteristica vengono descritte le perdite che si vogliono calcolare, che possono essere strutturali, non strutturali, relativi all'interruzione di un'attività o perdite di tipo umano;
- *description*: permette di specificare la fonte della funzione di vulnerabilità o di definire per quali edifici l'utilizzo della stessa sia idoneo. Quest'informazione è obbligatoria;
- *limitStates*: la stringa viene utilizzata per determinare il nome assegnato ad ogni stato limite.

La funzione può essere di tipo discreto di tipo continuo. Nel primo caso dovranno essere definiti i seguenti parametri:

- *id*: è una stringa che identifica la tassonomia per la quale sarà definita la funzione di fragilità. La stringa permette di riconoscere il bene descritto nel modello di esposizione e di collegarlo alla funzione di vulnerabilità;
- *format*: nel caso di questa tipologia di funzione, dovrà essere settato in “discrete”;
- *imls*: è un campo che definisce ogni livello di intensità per i quali saranno definite le probabilità di superamento di un dato stato limite. È in questo caso necessario definire l’unità di misura del livello di intensità;
- *poes*: è utilizzato per definire la probabilità di eccedenza per ogni stato limite relative alla funzione di fragilità discreta. È necessario inoltre definire la probabilità di eccedenza per ogni stato limite in una linea separata.

I campi sottostanti sono invece richiesti per definire la funzione di probabilità continua:

- *id*: quanto detto per la funzione di fragilità discreta continua a valere anche in questo caso;
- *format*: il campo in questione deve essere completato con l’attributo “continuous” al fine di mettere in evidenza il tipo di funzione utilizzata;
- *shape*: nel caso di funzioni di fragilità facenti uso della distribuzione lognormale, l’attributo dovrà essere settato con la stringa “logncdf”. Attualmente, solamente la distribuzione lognormale è ammessa al fine di rappresentare la funzione di fragilità continua;
- *imls*: questo campo è fondamentale e obbligatore per specificare gli aspetti relativi alla misura dell’intensità utilizzata dalle funzioni di fragilità. Al fine di determinare i valori minimi e massimi di intensità per cui è valida una determinata funzione di fragilità dovranno essere definite le stringe minIML e maxIML. Oltre al settaggio di tali parametri, è richiesta la definizione dell’unità relativa al livello di intensità ed è possibile anche definire il livello di intensità per il quale l’edificio non subisce nessun danno.
- *params*: la funzione di fragilità è descritta da parametri che devono essere definiti per ogni stato limite della funzione di fragilità. Se la distribuzione utilizzata è lognormale i parametri richiesti per definire la funzione sono la media e la deviazione standard del livello di intensità, le quali vengono definite per ogni stato limite usando come attributi le stringe “mean” e “stddev” rispettivamente.

2.1.6 Consequence model

Questo modello permette di stimare le conseguenze di un evento sismico sulla base della distribuzione del danno. Nel caso dell’analisi Scenario Damage calculation, si tratta di un file opzionale, che deve essere presente per ogni tipo di perdita considerata (strutturale, non strutturale, interruzione dell’attività ecc). Come per i modelli precedentemente descritti, il

risultato è ottenuto sulla base della definizione di una funzione di conseguenza, descritta come le perdite (o le conseguenze) relative ad un set di stati limite discreti. La funzione è descritta su OpenQuake specificando i parametri della distribuzione dei rapporti di perdita per ogni stato limite utilizzato nel modello di conseguenze.

Nel caso del modello suddetto devono essere compilati i seguenti campi:

- *id*: si tratta, come per gli altri modelli, di una stringa che definisce univocamente il livello di conseguenze;
- *assetCategory*: è una stringa opzionale che permette di definire la categoria del bene oggetto di analisi;
- *lossCategory*: campo obbligatorio nel quale sono definite le perdite oggetto di calcolo (strutturali, non strutturali ecc);
- *description*: si tratta di un campo che deve essere compilato obbligatoriamente, in quanto permette di indicare per quali beni sia o meno valido il modello;
- *limitStates*: al fine di definire le perdite associate ad ogni stato limite, ogni stato limite viene descritto da un numero e da una nomenclatura di riferimento. Non ci sono limitazioni per la nomenclatura, ma essa dovrà essere uguale a quella utilizzata nel modello di fragilità descritto nel paragrafo precedente.

La funzione di conseguenze viene descritta, invece, dai parametri descritti di seguito:

- *id*: come nel caso di tutte le funzioni esaminate, è una stringa che descrive la tassonomia per la quale è definita ogni funzione di conseguenze. Questa stringa è utilizzata per legare il campo in esame con il medesimo campo descritto nel modello di esposizione;
- *dist*: questo attributo deve essere correlato con la funzione di vulnerabilità. Nel caso di una distribuzione lognormale è necessario settare “LN”, contrariamente, nel caso di distribuzione beta, viene settato “BT”;
- *params*: questo campo è obbligatorio in quanto vengono settati i parametri utilizzati nella definizione delle perdite per ogni stato limite per la funzione di conseguenze. Nel caso di distribuzione lognormale i due parametri utilizzati sono la media e la deviazione standard e sono settati utilizzando gli attributi “mean” e “stddev” rispettivamente. I parametri dovranno essere definiti per ogni stato limite.

2.1.7 *Vulnerability model*

La costruzione del modello di vulnerabilità permette di definire la distribuzione probabilistica delle perdite, noto un noto livello di intensità misurata. Le funzioni di vulnerabilità (esempio in Figura 2-6) sono realizzate facendo corrispondere ad un dato valore di intensità un rapporto medio di perdita, associato alla varianza e alla distribuzione di probabilità. Al fine di ottenere un’analisi probabilistica o il calcolo del rischio per un dato scenario, deve essere definita una funzione di vulnerabilità per ogni edificio presente nel modello di esposizione.

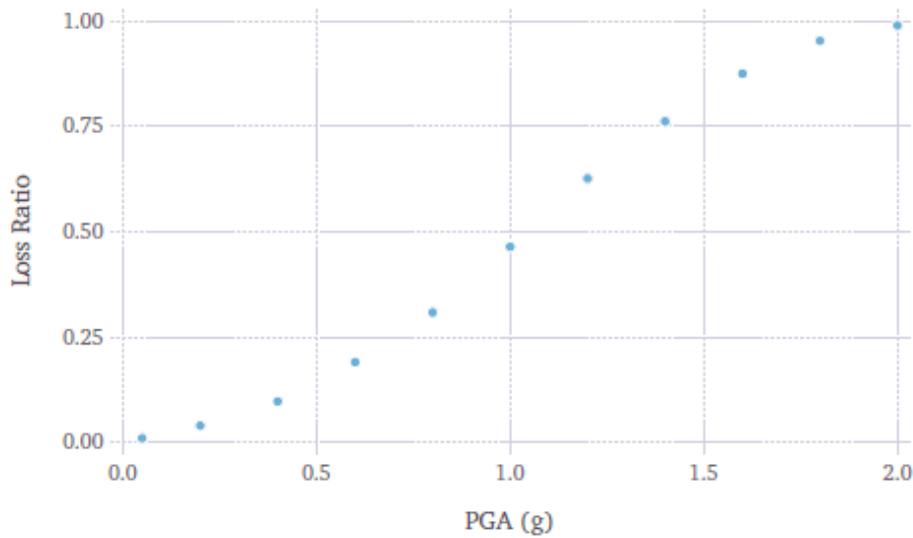


Figura 2-6 Esempio di una funzione di vulnerabilità, (GEM, 2019)

Al fine di determinare il modello di vulnerabilità è necessario definire la distribuzione dei rapporti di perdita relativi al gruppo di edifici oggetto di analisi. Tale dato è esprimibile tramite delle funzioni discrete e continue a seconda della tipologia di dati e non è necessario che le funzioni siano uguali per il gruppo di edifici oggetto dell'analisi; infatti nel file possono essere presenti entrambe le tipologie di funzioni.

Il modello di vulnerabilità deve in ogni caso contenere dei dati di input iniziali, quali:

- *id*: è una stringa che identifica il modello di vulnerabilità;
- *assetCategory*: definisce la tipologia di elemento (costruzione, linea vita ecc..) relativo alla funzione di vulnerabilità. Non è obbligatorio, ma costituisce un'informazione aggiuntiva inseribile;
- *lossCategory*: l'inserimento di tale informazione mira a definire quali tipi di perdite si vogliono calcolare. L'analisi può infatti fornire dati relativi alle perdite strutturali, non strutturali, relativi all'interruzione di un'attività o agli occupanti. Quest'informazione è ritenuta obbligatoria per l'esecuzione del calcolo;
- *description*: permette di specificare la fonte della funzione di vulnerabilità o di definire per quali edifici l'utilizzo della stessa sia idoneo. Quest'informazione è obbligatoria.

Come espresso precedentemente, si distinguono due tipi di funzioni, continua e discreta, per le quali si devono descrivere differenti caratteristiche.

Se la funzione utilizzata è definita da una distribuzione continua, dovranno essere definite le seguenti informazioni:

- *id*: è una stringa che indica la tassonomia per la quale si definisce la funzione di vulnerabilità. Essa può essere relativa ad un gruppo di edifici;
- *dist*: è un attributo obbligatorio, per il quale esistono due possibili modelli di distribuzione, “LN” o “BT”. Il primo relativo ad una distribuzione lognormale, il secondo per una distribuzione beta;
- *imls*: definisce i livelli di intensità per i quali sono definiti i valori medi dei rapporti di perdita. È inoltre necessario definire l’unità di misura del livello di intensità;
- *meanLRs*: con la seguente informazione si definisce il valore medio di rapporto di perdita per la funzione di vulnerabilità per ogni livello di intensità. È necessario definire un valore medio di rapporto di perdita per ogni livello di intensità;
- *covLRs*: il campo in esame definisce il valore del coefficiente di variazione per la distribuzione di rapporti di perdita per ogni funzione di vulnerabilità. Vale in questo caso quanto evidenziato per il campo analizzato in precedenza, *meanLRs*, ovvero dovrà essere definito un valore di covarianza per ogni livello di intensità.

Per quanto concerne la funzione di vulnerabilità discreta, è necessario definire i seguenti campi:

- *id*: vale quanto detto in precedenza per le funzioni di vulnerabilità continue;
- *dist*: nel caso in questione, l’attributo deve essere “PM”, in quanto si sta utilizzando una funzione discreta per definire l’incertezza legata al modello;
- *imls*: questo campo specifica i livelli di intensità per ogni parametro della distribuzione di perdite. Come indicato per le funzioni continue di vulnerabilità anche in questo caso è necessario definire l’unità di misura relativa al livello di intensità;
- *probabilità*: esprime la possibilità di osservare un certo livello di rapporto di danno relativi ad un set di livelli di intensità, i quali sono stati definiti nel campo relativo all’*imls*;

2.2 QGIS

QGIS (*Quantum Geographic information system*) “è il software GIS più utilizzato al mondo ed in quanto tale è stato adottato in maniera massiva nella pubblica amministrazione, nell’industria ed in una moltitudine di discipline di ricerca” (Graser e Olaya 2015). I motivi di tale diffusione sono molteplici e legati alla capacità di tale strumenti di permettere una moltitudine di analisi e di fornire lo strumento per la gestione di dati spesso diversi e complessi. La versione di QGIS utilizzata fa uso del *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS GIS) e di *System for Automated Geoscientific Analyses* (SAGA).

Nel caso del software in questione, QGIS è opensource, ovvero accessibile gratuitamente da tutti gli utenti ai quali è permessa la creazione di dati spaziali, la loro modifica, analisi e mappatura. È stato sviluppato nel 2002 al fine di spazializzare i dati, ma si velocemente trasformato in uno strumento potente di elaborazione e di modifica dei database. Attualmente è un tool utilizzabile da sistemi operativi quali Linux, Unix, Windows e Mac ed è stato implementato in C++ al fine di fornire uno strumento fondamentale per l'elaborazione dei dati: l'interfaccia Python (API), utilizzato per espandere le sue potenzialità. L'introduzione più importante è quella dello strumento di Processing il quale permette la geoprocessing dei dati e di implementare gli algoritmi già presente sul software. Processing è scritto in Python e permette di ottenere l'integrazione grafica tra tali applicazioni e QGIS, rendendo i codici più facili da utilizzare ed efficienti; se l'efficienza e l'automatismo sono parole chiave per capire il ruolo dello strumento di Processing, lo è anche la flessibilità, in quanto l'algoritmo può essere facilmente implementato dall'utente al fine di rispondere alle più svariate necessità. In particolar modo, grazie all'interfaccia grafica, gli algoritmi scritti in Python presenti in GRASS e SAGA possono essere letti e rielaborati, in modo tale da avvantaggiare coloro che intendono riadattarli alle proprie necessità e contribuire alla creazione di nuovi algoritmi senza riscrivere il codice da zero (operazione spesso onerosa e complessa).

3 Analisi della vulnerabilità sismica a scala territoriale

I cambiamenti climatici in atto nel nostro secolo e le conseguenze ad essi collegati, richiedono che le città e le comunità dimostrino la capacità di adattarsi e di reagire a fenomeni sempre più frequenti e con impatto sempre maggiore. In particolare, nell'ambito degli eventi sismici, i passati ed i recenti terremoti hanno mostrato la necessità della popolazione e dei centri urbani di attuare dei piani di tipo preventivo nei confronti delle catastrofi ambientali. Come noto, la vulnerabilità rappresenta l'intrinseca predisposizione della costruzione ad essere soggetta e danneggiata a causa dell'incorrere di un evento di data severità (Lagomarsino e Cattari 2013). Lo studio della vulnerabilità a scala territoriale è fondamentale per fornire una risposta concreta ad una domanda che probabilmente affligge tutti coloro che si trovano a vivere in un territorio soggetto ad alta sismicità: quali saranno le conseguenze del prossimo terremoto e quali saranno i luoghi più colpiti? La mia abitazione, il supermercato dove faccio la spesa, la chiesa dove mi reco la domenica mattina, saranno in grado di restare in piedi durante e dopo il prossimo terremoto? La valutazione degli edifici ad ampia scala permette di rispondere a questa domanda rendendo la comunità conscia dell'impatto di un possibile terremoto su gli edifici, di attuare dei piani atti ad intervenire per la mitigazione del rischio sismico e per pianificare la gestione delle emergenze post evento. Il rischio legato ad un evento sismico viene infatti definito come l'ammontare del danno atteso sugli elementi a rischio quali persone, oggetti e costruzioni per un determinato luogo geografico.

Al fine di condurre un'opportuna valutazione della vulnerabilità è necessario seguire alcuni step (Lagomarsino e Cattari 2013):

- acquisizione e analisi dei dati disponibili sull'area di interesse;
- per ogni classe di edifici definire dei parametri che la caratterizzino, in relazione alla mole e alla tipologia di dati si può trattare di uno stesso set di parametri o differenziato per micro-aree;
- dividere il territorio in un numero ideale di zone caratterizzato dalla stessa pericolosità e suddividere i dati di ogni modello di esposizione in classi omogenee per vulnerabilità;
- per ogni classe di costruzione della micro-area evidenziata, calcolare *il performance point*, le curve di fragilità e la probabilità di danno (tenendo conto in maniera più o meno accuratamente delle incertezze).

Noti questi presupposti, la preparazione nei confronti dei disastri e la gestione degli stessi sono componenti vitali di una strategia di adattamento e per definirli, è necessario comprendere meglio in che modo le persone e i sistemi (intesi come centri urbani o territori in base all'estensione), sono vulnerabili nei confronti delle catastrofi climatiche (Schiller, De Sherbinin e Pulsipher 2007). Nei paragrafi successivi verranno quindi definiti i concetti fondamentali di fragilità e vulnerabilità applicati alla ricerca oggetto di questo studio.

3.1 Fragilità

Come sarà chiarito nel paragrafo successivo (3.2) la conoscenza delle curve di vulnerabilità è un requisito fondamentale per effettuare delle analisi a scala urbana e territoriale. Uno dei metodi più utilizzati (utilizzato anche nell'ambito del presente studio) è quello di ricavare le curve di vulnerabilità a partire dalle curve di fragilità, le quali permettono di conoscere la probabilità che un edificio, soggetto ad un determinato input sismico (PGA nel caso in esame) raggiunga un determinato livello di danno (solitamente i livelli di danni sono cinque: D1-Slight, D2-Moderate, D3-Heavy, D4-Very Heavy e D5-Destruction; evidenziati nella Figura 3-1).

Damage Degree	Description of Damages (examples)	
	Masonry	Reinforced Concrete
0 Absence of damage		
1 Hair-line cracks in very few walls. Fall of small pieces of plaster only. Fall of loose stones from upper parts of buildings in very few cases.		Fine cracks in plaster over frame members or in walls at the base. Fine cracks in partitions and infills. 
2 Cracks in many walls. Fall of fairly large pieces of plaster. Partial collapse of chimneys.		Cracks in columns and beams of frames and in structural walls. Cracks in partition and infill walls; fall of brittle cladding and plaster. Falling mortar from the joints of wall panels. 
3 Large and extensive cracks in most walls. Roof tiles detach. Chimneys fracture at the roof line; failure of individual nonstructural elements (partitions, gable walls).		Cracks in columns and beam columns, joints of frames at the base and at joints of coupled walls. Chipping of concrete cover, buckling of reinforced rods. Large cracks in partition and infill walls, failure of individual infill panels. 
4 Serious failure of walls; partial structural failure of roofs and floors.		Large cracks in structural elements with compression, failure of concrete and fracture of rebars; bond failure of beam reinforced bars; tilting of columns. Collapse of a few columns or of a single upper floor. 
5 Total or near total collapse.		Collapse of ground floor or parts (e.g. wings) of buildings. 

Figura 3-1 Descrizione della scala di danno utilizzata per edifici in muratura (a) e cemento armato (b) secondo

l'EMS-98 (Redweik, et al. 2017)

Negli ultimi anni, gli studi e le ricerche hanno condotto alla definizione di una quantità sempre maggiore di curve di fragilità, differenziate in maniera sempre più precisa per i paesi e le tipologie

di edifici. In particolar modo, nel presente lavoro di tesi si è seguito quanto definito da (Giovinazzi 2005) e la probabilità di superare un certo livello di danno è stata espressa come segue:

$$P[ds|PGA]=\Phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln\left(\frac{PGA}{PGA_{ds}}\right)\right] \quad \text{Equazione 1}$$

Dove:

$P[ds|PGA]$: è la probabilità che venga superato un particolare livello di danno;

Φ è la funzione di densità di probabilità log-normale;

β_{ds} è la deviazione standard (o dispersione);

PGA: è l'accelerazione di picco al suolo in corrispondenza della costruzione;

PGA_{ds} è la media dell'accelerazione di picco al suolo per cui si verifica un uno specifico livello di danno.

In generale le curve di fragilità possono essere derivate per via empirica, analitica, tramite metodi basati sul giudizio di esperti o utilizzando un metodo ibrido (derivato dalla combinazione di due o più dei metodi precedentemente esposti): nel primo caso si tratta di raccogliere dati relativi ad un determinato evento sismico realmente accaduto storicamente e di elaborarlo al fine di ottenere le curve, mentre il secondo caso si basa su dei codici di calcolo che modellano i terremoti applicati su una determinata struttura su cui possono essere effettuate diverse analisi (analisi statiche lineari e non lineari derivate tramite l'ausilio di spettri di risposta, analisi dinamiche non lineari ottenute); nell'ultimo caso le curve di vulnerabilità sono generate grazie al parere e all'esperienza di esperti nel campo. Il primo metodo risulta condurre a risultati soddisfacenti se i dati sono utilizzati per una determinata area sismogenetica con caratteristiche delle costruzioni simili a quelle per le quali sono registrati i dati e dal punto di vista computazionale richiede un onere minore per l'utente; un problema può però verificarsi nel caso in cui i dati raccolti siano derivanti da fenomeni di intensità non rilevante, le cui derivanti curve non risultano idonee per descrivere fenomeni di intensità maggiore. Il metodo analitico al contrario, conduce a risultati maggiormente soddisfacenti e precisi, ma richiede un onere computazionale maggiore e conoscenze trasversali (spesso si richiede la gestione e l'implementazione di codici di calcolo complessi). Il metodo basato sulle conoscenze e l'esperienza degli esperti è ovviamente il più soggetto o critiche, perché affetto da una soggettività importante e da numerose approssimazioni; nonostante ciò alcune curve proposte dal software Hazus sono comunque state derivate con questo metodo (Cattari, Lagomarsino e Ottonelli 2014) (Rossetto e Elnashai 2003).

In Europa un contributo fondamentale per definire le curve di fragilità per le costruzioni europee è fornito dal progetto RISK-UE (partito nel 1999) con obiettivi fondamentali quali:

- identificare opportuni parametri per i movimenti del suolo che potessero permettere di conoscere e controllare la risposta delle strutture, focalizzando l'attenzione sulla creazione del danno e la propagazione dello stesso sull'edificio;

3. Analisi della vulnerabilità sismica a scala territoriale

- capire quali potessero essere i livelli di danno basando la scelta e lo studio degli stessi su passati eventi sismici;
- valutare quale fosse la probabilità per determinate categorie di edifici di raggiungere o superare un certo livello di danno, sulla base di un prefissato valore di intensità sismica.

Uno dei software creati per la generazione, archiviazione e la condivisione di un grande numero di curve di fragilità è il Fragility Function Manager Tool ad opera del progetto SYNER-G impegnato nella valutazione della vulnerabilità e nella stima e ricerca del rischio sismico; è inoltre un gruppo di ricerca che si occupa della creazione e della diffusione di dati open-source, come dimostra la creazione di questo strumento gratuito dall'uso intuitivo e semplificato. Sulla base di alcuni dati di input, quali il materiale, il sito oggetto di studio ed il numero di piani, il software si propone di fittare tali dati con la curva che meglio li incorpora, che viene messa a disposizione dell'utente e accompagnata da una descrizione circa il metodo utilizzato per la sua derivazione.

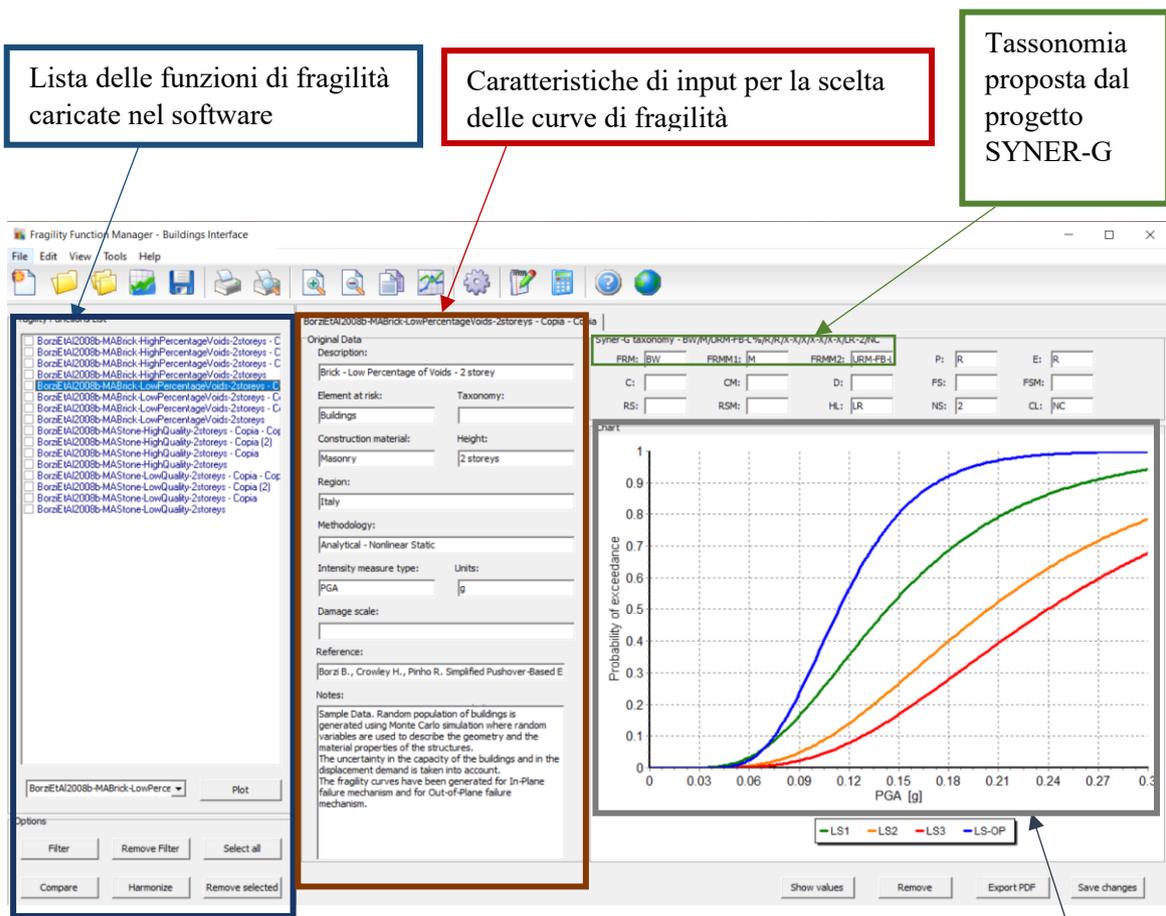


Figura 3-2 Funzionamento e output del software "Fragility Manager Tool"

Funzione selezionata dal set di funzioni di fragilità

3.2 Vulnerabilità

Le curve di vulnerabilità sono uno strumento grafico fondamentale per definire qual è la probabilità che una certa struttura, dotata di determinate caratteristiche e presente in un determinato luogo, raggiunga o superi un certo livello di danno soggetta ad una determinata azione sismica. Uno dei modi più efficaci per valutare l'effetto di un evento futuro su un dato territorio è conoscerne l'esposizione e la vulnerabilità, per questo motivo la valutazione della vulnerabilità sismica risulta essere un'attività fondamentale nel ramo dell'ingegneria sismica. *“In ambito ingegneristico, essa può essere definita come il grado di danno atteso relativo ad una determinata area e dovuto all'occorrenza di un terremoto e spesso definita in una scala da 0 (senza danno) a 1 (completamente danneggiata-collasso)”* (Chen, Chen e Chen 2001). Se si fa riferimento alla vulnerabilità intesa come valutazione delle perdite economiche legate al rischio sismico, il fattore di danneggiamento viene definito come (Chen, Chen e Chen 2001):

$$\text{Damage Factor (DF)} = \text{MDF} = \frac{\text{Dollar loss}}{\text{Replacement Cost}} \quad \text{Equazione 2}$$

Questa definizione pare però scarna, priva del carattere collettivo che caratterizza un territorio. La vulnerabilità non è infatti riferita solo ed esclusivamente agli edifici e alle infrastrutture, ma anche alle persone e alle attività ivi presenti: *“la vulnerabilità può essere definita come la caratteristica che influenza la capacità di una singola persona o di un gruppo di anticipare, resistere e riprendersi da un evento naturale pericoloso (un evento o un processo naturale estremo)”* (Wisner, et al. 2003). Uno dei metodi più conosciuti ed utilizzati per derivare tali curve è il metodo macrosismico, con il quale la vulnerabilità viene misurata facendo riferimento a due parametri: V indice di vulnerabilità e Q indice di duttilità, determinati tenendo presente le caratteristiche dell'edificio e la tipologia (Lagomarsino e Giovinazzi 2006). La pericolosità viene computata in termini di intensità macrosismica, in accordo con la scala macrosismica europea EMS-98, considerata come un parametro continuo ricavato in relazione alle condizioni del suolo; eventuali effetti di amplificazione vengono invece computati con l'utilizzo del parametro V. Secondo tale metodologia vengono definiti quattro stadi di danno: D₁ slight damage, D₂ moderate damage, D₃ heavy damage, D₄ very heavy damage, D₅ destruction (Tabella 3-1).

Damage Grade (D _G)	D _{G1}	D _{G2}	D _{G3}	D _{G4}	D _{G5}
Structural Damage	Slight	Moderate	Heavy	Very heavy	Destruction

Tabella 3-1 Definizione dei livelli di danno per il metodo macrosismico, (Giovinazzi 2005) e (Grüntal 1998)

La costruzione delle curve di vulnerabilità secondo il metodo macrosismico presuppone la conoscenza del valore medio di danno e della covarianza associata per dei prefissati valori di intensità macrosismica. In particolare la correlazione tra l'input sismico ed il valore di danno atteso, inteso come la valutazione della curva di vulnerabilità, è espresso in termini di curva di fragilità, attraverso la relazione seguente (Lagomarsino e Giovinazzi 2006):

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\left(\frac{I + 6.25V - 13.1}{Q} \right) \right) \right] \quad \text{Equazione 3}$$

Dove i parametri V e Q sono i parametri descritti precedentemente ed I è l'input espresso come intensità macrosismica. Per calcolare il valore medio di danno (*mean damage value*) μ_D (compreso tra 0 e 5) della distribuzione di danno atteso si fa riferimento alla seguente formula:

$$\mu_D = \sum_{k=0}^5 p_k k \quad \text{Equazione 4}$$

La valutazione di tipo probabilistico, in termini sia di distribuzione di danno che di curve di fragilità, per il valore medio di danno μ_D è fornito tramite l'equazione 4, è ottenuto assumendo una distribuzione binomiale. In ogni caso, la probabilità di verificarsi per ogni tipo di danno D_k (con k che varia da 0 a 5 in relazione ad ogni livello di danno) in relazione ad un dato valore di μ_D è ricavata in relazione alla funzione di probabilità di massa della distribuzione binomiale con l'equazione che segue:

$$p_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} \left(\frac{\mu_D}{5} \right)^k \cdot \left(1 - \frac{\mu_D}{5} \right)^{5-k} \quad \text{Equazione 5}$$

Lo scarto relativo alla distribuzione del danno viene invece espresso con la seguente equazione:

$$\sigma_D = \sqrt{\mu_D \cdot \left(1 - \frac{\mu_D}{5} \right)} \quad \text{Equazione 6}$$

Nel paragrafo 3.1 si è citato il progetto RISK-UE come importante per la derivazione delle curve di fragilità, ma il merito del progetto è anche quello di aver definito un altro metodo per derivare le curve di fragilità: il metodo meccanico, adottato anche dal software HAZUS.

Il metodo meccanico è basato sulla definizione del *performance point* (definito in questo modo dal metodo CSM, N2), che rappresenta il punto di incontro tra la curva di capacità e l'input sismico, espresso sotto forma di spettro di risposta. La struttura viene modellata come un sistema lineare ad un grado di libertà (SDOF) ed essa si ritiene equivalente ad una determinata tipologia di edificio (di cui si vuole appunto conoscere la curva di vulnerabilità) la quale viene descritta con l'ausilio di tre parametri: il periodo fondamentale, la duttilità e l'accelerazione. La risposta della struttura così modellata viene espressa in termini di curve forza spostamento, immaginando che l'azione sismica possa essere idealizzata come una forza orizzontale statica spingente (con andamento crescente) sull'edificio di cui si vuole conoscere la capacità sismica. Note le due curve che descrivono i comportamenti esposti, il livello di danno atteso è fornito dall'incontro delle due curve (Lagomarsino e Giovinazzi 2006) (Giovinazzi 2005). Questo è possibile poiché nella curva di capacità vengono evidenziati degli opportuni livelli di danno (in questo caso si evidenziano quattro livelli di danno) che si ritengono fondamentali per la determinazione dei due parametri di cui si è trattato anche nel caso del metodo macrosismico: la distribuzione dei livelli di danno e grazie a questi un indice di danno medio. Il confronto tra i livelli di danno per i due metodi descritti, rispettivamente macrosismico e meccanico è riassunto in Tabella 3-2.

	D₁	D₂	D₃	D₄	D₅
D_G	Slight (D _{G1})	Moderate (D _{G2})	Heavy (D _{G3})	Very heavy (D _{G4})	Destruction (D _{G5})
D_S	Slight (D _{S1})	Moderate (D _{S2})	Extensive (D _{S3})	Complete (D _{S4})	

Tabella 3-2 Livelli di danni nel metodo macrosismico e meccanico a confronto, (Giovinazzi 2005)

Seppur lo studio della vulnerabilità non possa essere ridotto solo ed esclusivamente ad un concetto puramente economico, nel caso della valutazione sismica è di interesse primario definire quali possano essere le perdite economiche derivanti da un evento sismico di data entità, sia in relazione al singolo edificio (può infatti essere interessante conoscere le perdite economiche relative ad un bene economico vincolato o di gran pregio), sia le perdite relative ad un determinato centro urbano, o per estensione, ad un territorio.

Il danno quindi può essere espresso in termini di perdita economica attraverso la definizione del parametro DF (damage factor), definito come un rapporto tra i costi di riparazione e quelli di ricostruzione (o meglio definito come valore della costruzione), si può quindi definire la seguente equazione come (Giovinazzi 2005):

$$Damage\ factor\ (DF) = MDF = \frac{Repair\ cost}{Building\ Value} \quad \text{Equazione 7}$$

La stima di questo fattore richiede di conoscere la probabilità che si manifesti un certo livello di danno espressa dall'Equazione 1, di cui si è discusso nel paragrafo 3.1. Per ogni livello di danno viene definito un altro parametro, il *Central Damage Factor*, il quale permette di calcolare il Mean Damage Factor secondo la seguente formula (Chen, Chen e Chen 2001):

$$MDF_1 = \sum_{DS=1}^5 P_{DSI} \cdot CDF_{DS} \quad \text{Equazione 8}$$

Nella quale MDF_1 rappresenta il *Mean Damage Factor* per una data intensità I , DS è lo stato di danno (o livello) e P_{DSI} è la probabilità che si manifesti un determinato livello di danno in caso di intensità I e CDF_{DS} è il *Central Damage Factor*. Secondo tale relazione si ritiene necessario definire il *Central Damage Factor* per ogni livello di danno, secondo la Tabella 3-3 riportata di seguito:

Damage grade	Damage ratio, %	Central damage factor, %
Grade 0: No damage	0	0
Grade 1: Negligible to slight damage	0–1	0.5
Grade 2: Moderate damage	1–20	10
Grade 3: Substantial to heavy damage	20–60	40
Grade 4: Very heavy damage	60–100	80
Grade 5: Destruction	100	100

Tabella 3-3 Definizione del Central Damage Factor, (Tyagunov, et al. 2006)

3.2.1 La vulnerabilità degli edifici monumentali e delle chiese

Il problema della vulnerabilità sismica assume una connotazione particolare quando ci si riferisce ad edifici storici di pregio o facenti parte del patrimonio culturale e artistico delle città, di cui esempio fondamentale sono le chiese (Lagomarsino e Podestà 2004). La vulnerabilità delle chiese in muratura è emersa in svariati episodi, tra cui: nel 1997 nel terremoto che colpì l'Umbria e le Marche più di 2000 chiese subirono grossi danni, in Emilia Romagna (1995) e in Piemonte (2000 e 2003) le chiese sono state le uniche tipologie di edifici a crollare sotto l'effetto di sismi di intensità bassa. Di recente il caso di Norcia (terremoto del 2016 che ha colpito Marche, Umbria e Abruzzo), ha messo nuovamente in luce che gli edifici residenziali hanno mostrato una resistenza elevata al fenomeno sismico, le chiese sono risultate tutte completamente inagibili (a causa di collassi parziali o totali) dopo l'evento. L'elevata vulnerabilità delle chiese, richiede quindi che lo studio della loro vulnerabilità venga trattato in maniera differente e con un'attenzione maggiore.

Se si pensa alle chiese, nonostante esse siano spesso costruite con dei materiali adeguati o siano state oggetto di retrofit dopo i passati i terremoti, la loro vulnerabilità è sicuramente influenzata

dalle loro dimensioni: ampie sale, lunghe e sottili volte a crociera, slanciate parti torreggianti o sporgenti, pareti sottili con grandi aperture (Lagomarsino 2006). Per questo motivo anche il problema legato agli edifici monumentali necessita di essere trattato a scala territoriale, dato che nelle zone sismiche si registra spesso un'alta concentrazione di edifici religiosi. Ripercorrendo il percorso svolto negli ultimi 20 anni per valutare la vulnerabilità delle chiese, nel 2004 Lagomarsino e Podestà (Lagomarsino e Podestà 2004) elaborarono un metodo che si basa sulla divisione della chiesa in macroelementi e sullo studio dei meccanismi di collasso che mirano alla definizione di metodi rapidi per la stima del danno, con utilità fondamentali per la gestione delle emergenze. La chiesa infatti non è solo un edificio di importanza storica e culturale importante solo in quanto opera d'arte, ma risulta spesso essere anche centro aggregazione per la comunità, che riconosce quindi il luogo come parte dell'identità del luogo: a questo proposito è impossibile non nominare la basilica di Collemaggio all'Aquila (Figura 3-3a), magnifico esempio dell'architettura romanica e patrimonio culturale abruzzese che subì il collasso del transetto o la chiesa di San Benedetto a Norcia (Figura 3-3b) di cui attualmente sono sopravvissuti solamente la facciata e l'abside.



Figura 3-3 Immagini che ritraggono (a) La basilica di Collemaggio all'Aquila dopo il terremoto del 2009 (Montanari 2014) e (b) la chiesa di San Benedetto a Norcia dopo il sisma del 2016 (Dari 2018)

A scala territoriale il comportamento della singola chiesa viene solitamente indagato fino al raggiungimento del primo livello di analisi (LV1) interpretando la chiesa come un edificio composto da macroelementi i cui meccanismi hanno una risposta strutturale praticamente autonoma dal resto della chiesa. Questa schematizzazione appena descritta è stata fondamentale per la creazione di scheda per il rilievo del danno e della vulnerabilità utilizzata a partire dal 1995 ed utile per intervenire sia nel post-evento per valutare la sicurezza dell'edificio religioso, sia nelle strategie pre-evento per valutare preventivamente il rischio sismico. Il primo passo per studiare la vulnerabilità degli edifici religiosi è quello di definire i meccanismi di collasso che possono attivarsi, selezionando questi ultimi tra i 28 disponibili, e, sulla base delle schede (in

particolare della seconda parte delle schede, relativa ai 28 meccanismi di collasso ed al rilievo dei macroelementi ivi presenti) definire l'indice di danno, compreso tra 0 e 1 (De Matteis, et al. 2019):

$$i_D = \frac{1}{5} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k d_k}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} \quad \text{Equazione 9}$$

È inoltre possibile definire un parametro aggiuntivo, l'indice di vulnerabilità con la relazione seguente:

$$i_D = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} \quad \text{Equazione 10}$$

Dove ρ_k è un parametro molto importante per pesare il danno legato al meccanismo k (si riconoscono 28 meccanismi di collasso) in accordo con l'importanza che il meccanismo di per sé ha per la stabilità della chiesa; v_{ki} e v_{kp} sono rispettivamente il punteggio ottenuto dal rilievo degli indicatori di vulnerabilità e dei presidi antisismici.

Una volta definiti l'indice di danno e l'indice di vulnerabilità, ad ogni meccanismo scelto viene associato un livello di danno (d_k) e viene associato un indice globale di danno (i_d) alla chiesa.

La valutazione del danno sulle chiese che porta alla definizione dei meccanismi di collasso potenzialmente attivabili sulle stesse, può essere utile al fine di :

- interpretare in maniera preliminare il comportamento sismico dell'edificio e la sua specifica vulnerabilità in modo da riconoscere quali chiese siano soggette maggiormente ad essere danneggiate;
- creare delle mappe del danno sulle chiese a scala territoriale, in modo tale da pianificare interventi di ristrutturazione o retrofit.

4 Confronto tra i dati post terremoto e i risultati dell'analisi Scenario Damage

La valutazione degli scenari di danno permette di conoscere importanti informazioni, quali l'area maggiormente colpita, le perdite attese in termine di vite umane, feriti, senza tetto ed il corrispondente danno economico, con ovvie ricadute sulle attività di Protezione Civile, sia nelle attività di pianificazione che di gestione dell'emergenza (Bramerini, Lucantoni e Sabetta 2007).

Il fine di questo studio è validare il metodo utilizzato per la determinazione del rischio sismico nei centri urbani. La validazione avviene tramite la comparazione degli effetti del terremoto del 2016 a Norcia calcolati con il software OpenQuake e le schede AeDES la cui compilazione ha permesso di raccogliere i dati post-evento.

Di recente, è stato rivolto molto interesse all'utilizzo di scenari sismici per identificare e quantificare le conseguenze di uno specifico evento sismico. *“I risultati di tali studi di scenario possono infatti costituire la base per la predisposizione di programmi di previsione e prevenzione, ma più frequentemente, vengono utilizzati per la pianificazione e la gestione dell'emergenza”* (Masi, et al. 2007).

I fenomeni che hanno colpito l'Italia centrale nel 2016, colpendo quattro regioni quali Lazio, Abruzzo, Umbria e Marche, hanno evidenziato l'influenza degli interventi di prevenzione sismica effettuati prima dell'evento sismico oggetto di analisi. Le scosse principali sono state la prima del 24 agosto 2016 con epicentro ad Accumuli e con magnitudo 6.0 e le altre due scosse rispettivamente del 26 ottobre entrambe con epicentro a Castel Sant'Angelo e del 30 ottobre con epicentro tra le frazioni di Campi di Norcia e Norcia (magnitudo 6.5); il terremoto si presenta come il più forte in Italia dal 1980 (Irpinia). Dal punto di vista dei danni causati dal terremoto, è necessario sottolineare una grande differenza con i centri storici di Amatrice, Accumuli, Pescara del Tronto e Arquata del Tronto, le quali hanno invece subito una moltitudine di danni, con crolli e collassi di numerosi edifici. Sulla base di quanto appena evidenziato, il centro storico di Norcia, contrariamente a quanto messo in luce nelle altre città, ha mostrato un comportamento ottimale nei confronti delle scosse che lo hanno perturbato, dovuto agli interventi effettuati dopo il terremoto del 1997 ai quali è stato soggetto. La ricostruzione post sisma 1997 Umbria-Marche è infatti stata riconosciuta, a livello tecnico-scientifico, tra le più evolute, rivedendo in chiave critica gli errori dei precedenti interventi pesanti ed invasivi in c.a. e indirizzando gli interventi verso soluzioni meno invasive riprendendo in chiave moderna le tradizionali tecniche costruttive (<https://www.ingegneri.cc/crolli-e-sisma-sotto-accusa-le-ntc.html>). Contrariamente a quanto registrato negli edifici di civile abitazione, i palazzi storici e le chiese hanno invece subito danni maggiori; in particolare gli edifici religiosi risultano essere tutti collassati. Si è scelto di analizzare proprio il centro di Norcia post-evento del 2016 al fine poiché ricco di notizie relative all'evento

registrato e alle “sue conseguenze e anche per il fatto che tale evento non ha portato al collasso di nessun edificio” residenziale, ma solo di quelli religiosi (Polese, Di Ludovico e Prota, et al. 2013). Motivo aggiuntivo per giustificare tale scelta è dovuto al fatto che si cercasse un caso studio in cui gli edifici non fossero gravemente danneggiati e solo pochi edifici raggiungessero il collasso.

L'importanza di tali studi che simulano eventi sismici risulta utile nei giorni immediatamente successivi all'evento sismico, in quanto avere un'idea (seppur spesso caratterizzata da un certo grado di incertezza) del livello di danno atteso e delle perdite causate dall'evento può aiutare a gestire e supportare le attività di soccorso (Borzi, Faravelli, et al. 2018).

4.1 Il caso studio di Norcia

Oggetto dello studio è la città di Norcia, ubicata in provincia di Perugia nella regione Umbria. La cittadina si trova a circa 600 metri altitudine e grazie a tale posizione fu importante centro strategico sin dai tempi degli etruschi; inizialmente il centro del paese sorgeva proprio nella parte sommitale della zona di Capo la Terra, ma nel 300 a.C. Norcia divenne prefettura e successivamente comune romano. Anche nei secoli successivi Norcia mantenne la sua importanza e nel IV divenne sede di Diocesi. Dopo i saccheggi subiti dai Longobardi e dai Saraceni e l'abbandono della città da parte dei cittadini nell'890, la ripresa fu lenta, ma nel 1200 Norcia si proclamò libero comune. Nei secoli successivi ed in particolare nel 1300 il comune crebbe fino a diventare insieme a Visso il comune più importante dei Monti Sibillini; durante questo periodo furono costruite le mura la cui presenza caratterizza tutt'oggi il comune. Il 1400 vide Norcia in lotta con i comuni circostanti con lo scopo di ottenere maggiore autonomia politica, fino a che nel 1484 divenne parte della Legazione Pontificia di Perugia; in questo periodo fu edificata la Castellina, progettata da Vignola. Il 1600 fu un secolo importante per l'edilizia e l'arte: all'inizio del secolo Norcia era infatti divisa in cinque parrocchie, vantava tre conventi maschili dentro le mura e quattro fuori dalle mura, sei monasteri di monache, quattro ospedali ed ospitava quattro otto confraternite, dieci collegi delle arti e circa cento chiese nel distretto. Si tratta quindi di una città ricca di patrimonio artistico culturale fin dai secoli passati, nonostante nel corso dei secoli sia stata scossa da fenomeni sismici (Gigliozzi 2019).

Il 1700 fu infatti ricordato per l'evento sismico che distrusse quanto costruito sino a quel momento. La ripresa fu lenta e nel 1809 Norcia entrò a far parte dell'impero francese, fino al 1820 in cui si instaurò nuovamente il governo pontificio e venne ripristinato l'antico vescovado.

Nel 1859 il terremoto fu nuovamente devastante: rimasero in piedi solo 76 case su 676 (Gigliozzi 2019).

Il 1860 come noto sancì l'annessione dell'Umbria al Regno d'Italia e successivamente a tale evento Norcia divenne sede di pregevoli opere pubbliche quali la Porta Romana, il monumento a San Benedetto, il teatro civico, il campanile di Santa Maria, il prospetto del teatro comunale e la splendida scalinata; furono inoltre costruite strade carrozzabili e l'acquedotto.

Il 1900 segna il destino di Norcia per quanto riguarda lo spopolamento: vede l'emigrazione in America di gran parte dei Nursini e la seconda guerra mondiale causa ulteriori perdite umane. A

tali tragedie si affianca però un grande miglioramento della vita nel comune: l'arrivo dell'energia elettrica e della prima ferrovia. La vera rinascita iniziò però dopo l'ennesimo arresto causato dal terremoto del 1979, nel quale solo poche case rimasero in piedi.

Come evidenziato dalla breve trattazione storica, la storia di Norcia è strettamente legata a quella dei terremoti. I diversi eventi sismici hanno contribuito a disegnare l'attuale assetto del borgo e come osservabile dal satellite, si tratta di una cittadina in cui gli edifici sono prevalentemente ad uno o due piani, in muratura (la scelta di non superare un certo numero di piani- 2 piani per un'altezza massima di 7 metri venne compiuta dopo il terremoto del 1859 come riportato da (Galadini, et al. 2016)). Fulcro della città è sicuramente la piazza principale su cui si affacciano gli edifici oggetto di interesse storico ed artistico: si segnala infatti la presenza della Basilica di San Benedetto e leggermente defilata la Concattedrale di Santa Maria Argentea. La scossa di magnitudo 6.5 del 30 ottobre 2016 ha gravemente danneggiato gli edifici monumentali di Norcia con particolare riferimento alle chiese, dunque è importante visualizzare la loro localizzazione all'interno del centro (Figura 4-1).



Figura 4-1 Alcuni dei monumenti del comune di Norcia

I monumenti di cui si è trattato nella Figura 4-1 meritano sicuramente di essere descritti e soprattutto di capire in quale condizione si presentavano alla data del sisma oggetto di studio, dati fondamentali per la costruzione della tassonomia.

Basilica di San Benedetto: l'impianto attuale della basilica risale al XIII secolo quando fu notevolmente ampliata. Un terremoto nel XVI secolo danneggiò la struttura che fu restaurata rispettando il gusto barocco; nel 1703 il terremoto dell'Aquila distrusse completamente il campanile medievale. Nei secoli successivi la Basilica fu spesso colpita dagli eventi sismici e nel 1997 fu lesionata in maniera importante dal terremoto Umbro-Marchigiano. Negli anni successivi fu sottoposta a restauro e riaperta nel 2000, finché nel 2016 a causa della scossa del 30 ottobre si assistette al crollo quasi totale della struttura: la chiesa non esiste praticamente più, è infatti rimasta in piedi solo la facciata tardogotica. Dopo il terremoto la chiesa è infatti stata scoperchiata e anche *'il portico delle misure', a fianco della basilica, si è sgretolato. Medesimo destino ha subito il campanile, una delle meraviglie dell'Umbria per la sua bellezza ed i suoi ornamenti (elevato nel 1338 e ricostruito dopo il terremoto del 1703)* (Cordella 2016).

Palazzo Comunale: il nucleo più antico del palazzo risale al XV, mentre l'aspetto attuale del palazzo risale al 1876, dalla ricostruzione che seguì il terremoto del 1859. Attualmente risulta inagibile, a causa del sisma del 2016 che ha causato il collasso parziale del palazzo e della torre civica. *"Dopo il terremoto la torre era infatti vittima di un dissesto nella parte della cella campanaria oltre che della quasi totale perdita di appoggio nel piedritto di sinistra"* (<http://uss-sisma2016.beniculturali.it/attivita/salvaguardia/conclusa-messa-in-sicurezza-torre-civica-di-norcia/>)

Chiesa di San Giovanni: situata a ridosso delle mura castellane, ha subito varie trasformazioni causate dagli eventi sismici che hanno caratterizzato l'aspetto. Non si conosce l'origine della chiesa, ma viene ritenuta molto antica; l'aspetto attuale è infatti successivo al sisma del 1703. Dopo il terremoto del 2016 non risulta essere visitabile in quanto parzialmente collassata (<https://www.sibilliniweb.it/citta/norcia-chiesa-di-san-giovanni-xiiiisc/>).

Monastero di Sant'Antonio: il monastero fu fondato nel 1400 e fu gravemente danneggiato dai terremoti del 1567 e del 1703. La chiesa, parte del complesso risale al 1500 ed è stata restaurata dopo il terremoto del 1980, insieme a tutto il complesso. Proprio la chiesa, indicata nella Figura 4-3 e posta nella zona orientale del paese in prossimità delle mura, è stata colpita gravemente dal sisma del 2016 e risulta inagibile (https://www.ansa.it/umbria/notizie/2019/02/10/monache-norcia-nel-container-di-clausura_b9021fb1-c15a-4e0c-9b1c-4d49a1a61a31.html).

Monastero Santa Maria della Pace: costruite intorno al XVI secolo e appartenute alle Clarisse è stato nel 1970 acquistato dal Monastero di Sant'Antonio e restaurato. Nel 2016 la parte che un tempo ospitava le Clarisse è collassata parzialmente (http://www.lavalnerina.it/dett_luogo.php?id_item=980).

Porta Palatino e cinta muraria: Norcia è caratterizzata da una cinta muraria, caratterizzata da sette porte di cui nella Figura 4-1 è stata indicata la Porta Palatino (importante per gli eventi del

2016) e la cinta muraria (profondamente colpite dal terremoto del 2016). La parte di Porta Palatino è infatti stata profondamente colpita con collasso parziale di molti aggregati; discorso analogo vale per la parte di Porta Ascolana posta nella parte bassa del paese (http://www.ansa.it/umbria/notizie/2018/02/18/completata-messa-sicurezza-mura-norcia_d96d51f1-d0b5-498b-9c8b-2259e5165fe9.html).

Chiesa del Crocifisso: la chiesa fu completamente ricostruita nel XVIII secolo, data alla quale risale anche il campanile a vela. La facciata venne rifatta dopo il terremoto del 1703, di cui ha conservato, prima del 2016, le decorazioni e l'impianto architettonico (<http://www.lavalnerina.it/luoghi/877/Chiesa%20del%20Crocifisso.html>). Nel 2016 è anch'essa crollata.

Chiesa di Sant'Agostino: la chiesa venne costruita nel 1300 e ristrutturata nel 1600 in stile barocco conservando però le decorazioni di fine '300. Conserva affreschi di notevole valore. “*La chiesa ha riportato gravissime ferite negli altari lignei e nelle sue pareti affrescate tra cui l'unico resto di una decorazione datata 1442*” (Cordella 2016).

Chiesa della Madonna Addolorata: la chiesa risale al 1300 è stata più volte colpita dagli eventi sismici dell'area e il suo aspetto attuale risale al 1800. Nel 2016 è completamente crollata ma nonostante ciò l'immagine della Madonna Addolorata, cara alla popolazione, è stata messa in sicurezza (<http://www.lavalnerina.it/luoghi/944/Chiesa%20dell%60Addolorata.html>).

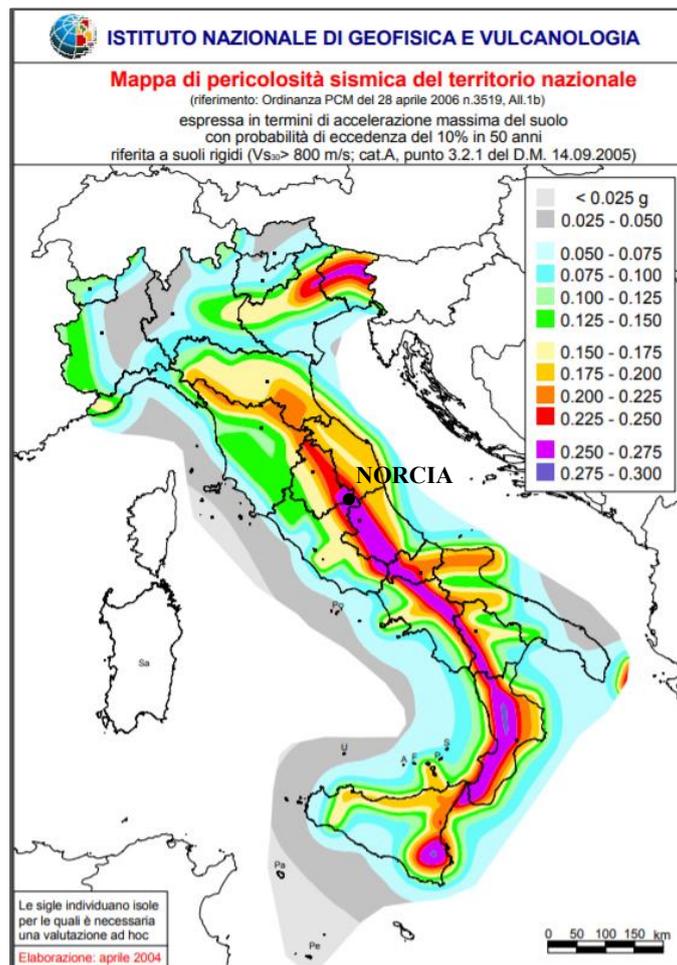
Chiesa di Santa Maria Argentea: la prima cattedrale fu eretta ove attualmente sorge la Castellina e solo successivamente, alla fine del 1500 eretta accanto alla Castellina. La storia della Cattedrale è stata da sempre segnata dai terremoti, nel XVIII secolo il campanile gotico crollò completamente e fu restaurata in stile neoclassico con impianto a tre navate. La cattedrale è crollata per due terzi seppellendo un importante organo settecentesco. Il sisma del 30 ottobre 2016 ha causato il crollo del tetto e di parte della facciata della cattedrale (<https://it.wikipedia.org/wiki/Norcia>) Il terremoto ha lesionato persino la speronatura di rinforzo costruita a ridosso della fiancata sinistra della chiesa: ora regge una parete vuota all'interno.

Museo della Castellina: l'edificio è stato realizzato nel 1554 come residenza fortificata, fu anche questo restaurato nel 1700 a seguito dei frequenti terremoti e nuovamente nel 1860 quando divenne sede di uffici comunali; nel 1967 divenne sede del museo. Il 1979 rappresenta nuovamente un anno chiave, in quanto fu restaurato dopo l'evento. L'edificio non ha subito nessun crollo a causa del terremoto del 2016, ma ritenuto inagibile, è stato nuovamente restaurato nel 2017 (https://it.wikipedia.org/wiki/La_Castellina).

Chiesa di San Francesco: chiesa trecentesca, custodiva fino al 2016 oggetti di valore culturale elevato scampati al terremoto del 1979 è stata distrutta a metà della sua navata. “*Le scosse hanno dato il colpo di grazia alla chiesa, la quale era stata ricostruita nel 1859 (era stata costruita nel 1385 dai francescani) e rappresentava uno degli edifici gotici più rappresentativi del territorio*” (<https://www.ilfattoquotidiano.it/2016/10/30/terremoto-norcia-la-basilica-di-san-benedetto-crollata-diventa-il-simbolo-del-sisma-come-se-fosse-venuta-giu-la-citta/3132253/>).

Chiesa della Misericordia (nota anche come *Chiesa di Santa Rita*): fu edificata a seguito dei sismi del XVIII secolo con pietre recuperate da edifici colpiti da tali eventi. Nel 2016 è crollata insieme al campanile; nonostante ciò alcune opere di pregio artistico e culturale sono state messe in sicurezza, evitando danni ancora maggiori per la (comunità <http://www.lavalnerina.it/luoghi/943/Chiesa%20della%20Misericordia%20o%20di%20Santa%20Rita.html> e <https://www.umbriaoggi.news/sisma-a-norcia-recuperate-alcune-tele-dallex-chiesa-della-misericordia/>)

Dal punto di vista sismico è noto che la fascia appenninica umbro-marchigiana è sede di sismicità elevate e diffusa (tra i principali eventi storici si ricordano quelli del 1328, 1703, 1730 e 1859); Norcia (PG) è stata durante il corso della sua storia interessata da terremoti di notevole entità e si sono registrati 2403 terremoti tra il 374 a.C e il 2018. La frequenza di tali eventi ha reso le istituzioni responsabili in materia di mitigazione del rischio particolarmente attente per quanto concerne le politiche di prevenzione. La zona per questi motivi è infatti classificata secondo la normativa come zona 1, ovvero la zona più pericolosa dal punto di vista sismico in Italia, con accelerazioni $a_g > 0.25g$ con probabilità di superamento del 10% in 50 anni come evidenziato nella Figura 4-2.



4-2. Mappa sismica dell'Italia relativa alla PGA con probabilità di superamento 10% in 50 anni, INGV

Dopo il terremoto del 1979, ultimo evento significativo prima del 2016, le conseguenze ebbero carattere emergenziale provocando danni su 773 edifici, di cui il 32% riportò danni gravi ed il 25% danni di media entità (Sisti, Di Ludovico e Prota 2019).

4.2 Dati delle schede AeDES

Tra gli effetti più complessi e decisivi della fase di gestione post-terremoto, si inseriscono senza dubbio le tecniche che devono essere utilizzate per favorire il ritorno alle normali condizioni di vita, la ripresa delle attività sociali ed economiche.

Il Dipartimento della Protezione Civile si occupa da anni di tale attività e tale impegno ha prodotto metodi, strumenti e procedure unitarie a livello nazionale al fine di garantire un approccio il più possibile uniforme nel trattamento e nella valutazione del danno. In questo contesto, per gli edifici ordinari sono state create le schede AeDES per agevolare le campagne di sopralluogo post-sisma (in uso dal terremoto del 1997 umbro-marchigiano). Le schede si prestano a descrivere in maniera ottimale i danni provocati negli edifici adibiti ad abitazione, i più presenti sul suolo nazionale e quelli che presentano delle caratteristiche tipologico-strutturali ben definite e definiti ambiti di variabilità che li rendono appunto “edifici ordinari”: non sono invece edifici ordinari quelli monumentali ed in particolar modo le chiese, i capannoni industriali (per le quali dal terremoto in Emilia Romagna vengono utilizzate le schede GL-AeDES), i magazzini e le palestre. Le chiese richiedono invece la compilazione di schede specifiche A-DC, così come i palazzi sono schedati con il modello B-DP.

Per comprendere i dati derivanti da tali schede è necessario sottolineare che quando si parla di verifica di agibilità sulla costruzione essa non mira a salvaguardare la costruzione da eventuali danni, ma solamente a salvaguardare la vita degli occupanti: si tratta infatti di una valutazione speditiva e temporanea, che deve essere condotta in tempi brevi da un esperto tramite analisi visiva o tramite la raccolta di informazioni reperibili in maniera semplice ed istantanea, atta ad attestare se l'edificio possa o meno essere utilizzato senza rischi per la vita umana. Il controllo deve essere fatto in modo tale che l'edificio possa resistere ad un evento di riferimento, che in Italia non è spesso definito; in paesi ad alta sismicità come California e Grecia, l'evento di riferimento è quello che ha motivato l'ispezione, criterio utilizzato anche in Italia in mancanza di specifiche differenti.

Dopo la sequenza sismica del 10 ottobre 2016, di magnitudo 6.5, i tecnici dell'Ufficio per il rischio sismico dell'Umbria, coordinati dalla protezione civile hanno svolto diverse ispezioni al fine di valutare il danno e l'usabilità delle costruzioni residenziali del centro storico di Norcia. Tramite le schede AeDES si è indicato un livello di agibilità da A a F: A rappresenta l'agibilità, con pochi danni, B viene utilizzato in caso di edificio agibile dopo interventi a breve termine (caso di danno strutturali limitati e danni non strutturali elevati), C ha lo stesso significato di B, ma limitato ad una porzione dell'edificio; il grado D definisce un edificio che necessita di altre ispezioni a causa di danno atipico, E per costruzioni non utilizzabili (danni gravi strutturali e non strutturali, gravi rischi esterni dovuti a condizioni geotecniche) che necessitano di interventi

importanti o di demolizione e successiva ricostruzione, F edificio non utilizzabile per rischio esterno.

Al fine di evidenziare in maniera più efficace gli effetti del sisma si è fatto riferimento alle AeDES (prodotte dal Servizio per il rischio sismico dell'Umbria per 686 edifici in murature e altri materiali facenti parte del centro storico) e si sono successivamente riportati i dati sul software Qgis, in modo da collegare in maniera opportuna l'informazione relativa all'edificio con l'identificativo dello stesso: è bene precisare che, i file relativi agli edifici nella città di Norcia (reperiti sul portale Open Data della regione Umbria), presentano spesso delle forme e delle suddivisioni differenti rispetto alle mappe utilizzate come riferimento.

I dati sono quindi stati spazializzati nella Figura 4-3 evidenziando quelli immediatamente agibili (categoria A schede AeDES), quelli agibili a breve termine o dopo interventi di piccola entità (le categorie sono state accorpate e corrispondono alle categorie B e C delle schede AeDES) e quelli inagibili (categoria E) (R. Sisti, M. Di Ludovico, et al. 2018). Le informazioni sono poi successivamente state aggiornate tramite i dati di (Borri, et al. 2017) e riportate in Figura 4-4. Si sono poi evidenziati gli edifici collassati e quelli danneggiati (Figura 4-5) ed infine quelli con destinazione d'uso residenziale rispetto a quelli con destinazione d'uso pubblica o religiosa (in Figura 4-6). Come osservato nella Figura 4-4 molte delle abitazioni risultano essere prive di danni gravi o che possano comprometterne l'uso dopo l'evento.

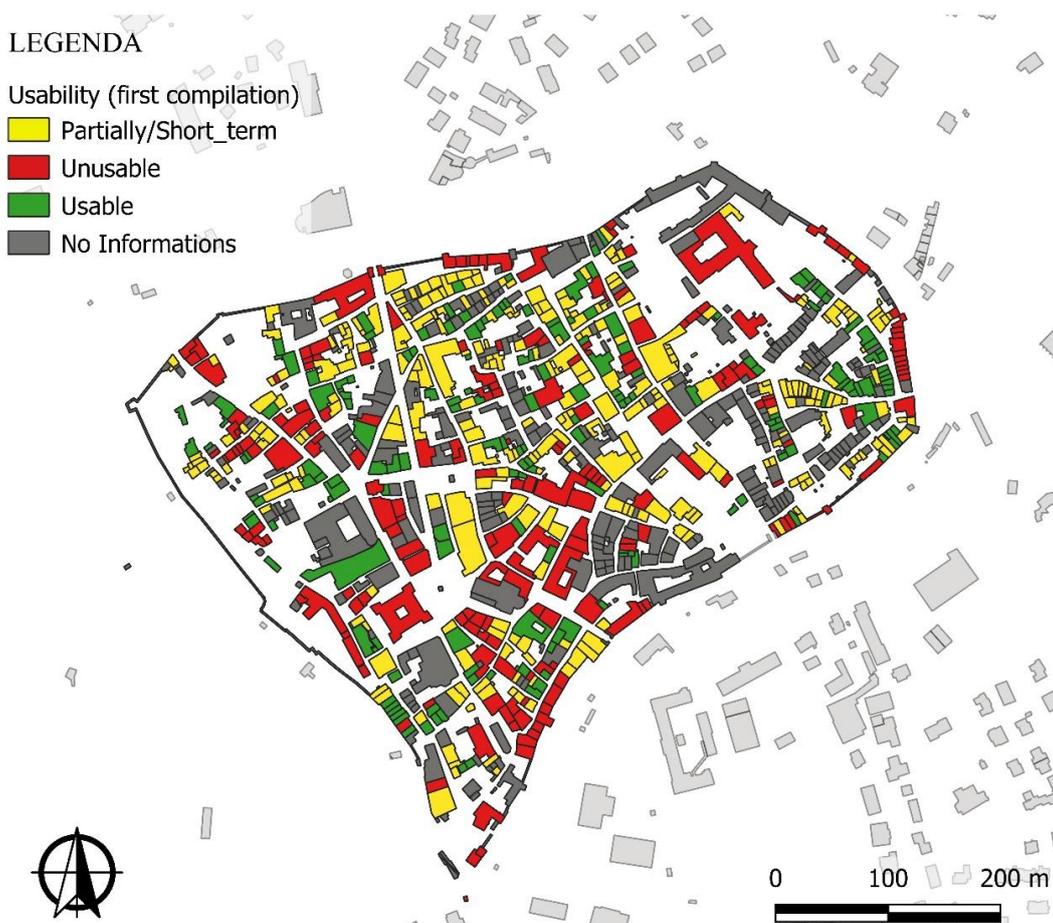


Figura 4-3 Definizione degli del centro di Norcia e dell'agibilità post-evento

È necessario sottolineare che dopo la scossa sismica del 30 ottobre 2016 tutti i sopralluoghi di agibilità e rilievo dei danni del centro storico di Norcia sono stati effettuati solo ed esclusivamente dal personale del Servizio Rischio Sismico della Regione Umbria per conto del Dipartimento di Protezione Civile: ogni edificio è stato visionato internamente ed esternamente e ciò ha permesso la conoscenza di informazioni aggiuntive rispetto alle schede AeDES.

Come evidenziato in precedenza si tratta di un metodo speditivo da utilizzare in situazione di emergenza ed il compito è stato reso ancora più difficile dato che il sopralluogo a seguito di forti scosse di assestamento ha prodotto peggioramenti nel quadro fessurativo degli edifici. Come noto le scosse continuarono anche per i sei mesi seguenti, in cui una seconda ispezione portò a rilevare quanto riportato in Figura 4-4.

LEGENDA

Usability (2017 compilation)

Partially/Short_term

Unusable

Usable

No Informations

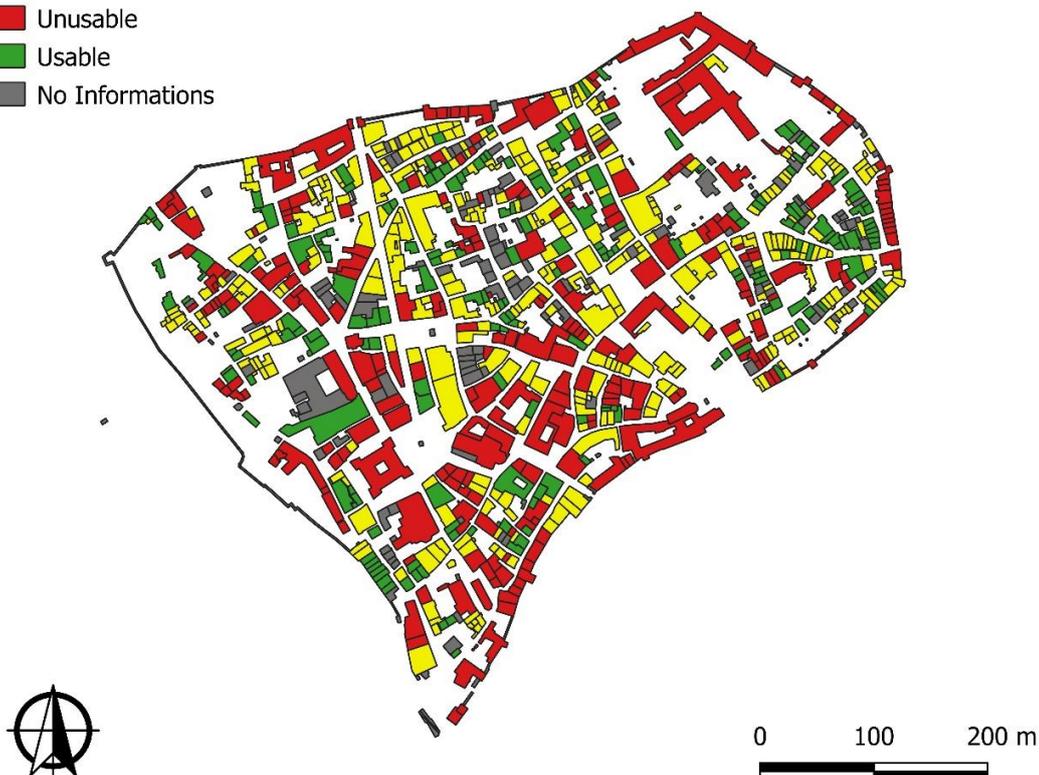


Figura 4-4 Esiti agibilità Norcia al Marzo 2017 (Borri, et al. 2017)

Eventuali errori nel riportare i dati sulla mappa sono spesso dovuti al fatto che gli elaborati utilizzati come base cartografica non presentavano le modifiche catastali recenti.

In accordo con quanto riportato nelle schede AeDES dopo l'evento sismico il 26% delle costruzioni è stato definito come agibile, il 32% inagibile ed il 42% è risultato essere parzialmente agibile o agibile dopo l'attuazione di alcune contromisure ("Short_term"). Nel caso del centro,

nonostante alcune costruzioni siano definite inagibili, soltanto poche costruzioni furono soggette a collasso parziale o totale. La percentuale di edifici agibili è soggetta a problematiche dovute alla vicinanza con altri edifici: la percentuale di agibilità decresce infatti dal 45% fino al 25% per edifici connessi tra di loro.

Dopo aver identificato la posizione di Norcia e aver identificato gli edifici non danneggiati o caratterizzati da agibilità totale o parziale, si osserva dalla Figura 4-6 che “l'effetto sul centro storico- limitando le considerazioni agli edifici residenziali- è stato quello di riportare danni limitati e un basso numero di collassi” (R. Sisti, M. Di Ludovico, et al. 2018).

La Figura 4-5 permette di identificare gli edifici parzialmente o totalmente collassati e la Figura 4-6 ne specifica le destinazioni d'uso (le informazioni sono limitate e per lo più mirano a dare informazioni circa la presenza di edifici monumentali).

LEGENDA

Collapse

Partial

Total

No Informations



Figura 4-5 Edifici collassati parzialmente o totalmente del centro storico di Norcia (R. Sisti, M. Di Ludovico, et al. 2018)

LEGENDA

Intended use

■ Cult_heritage

■ Residential

■ No Informations



Figura 4-6 Destinazioni d'uso degli edifici crollati del centro storico di Norcia (R. Sisti, M. Di Ludovico, et al. 2018)

La Figura 4-6 deriva dalla compilazione delle schede suddette e questo risulta un dato molto importante, in quanto tutte le chiese del centro storico crollarono, causando un danno enorme in termini di patrimonio storico. La Figura 4-6 deve infatti essere letta contestualmente alla Figura 4-5: tra gli edifici crollati, la maggior parte degli edifici sono parte del patrimonio culturale della città.

4.3 La costruzione della tassonomia e definizione del file di configurazione

Nel caso in esame si sono considerati 1044 edifici (in realtà questo numero risulta differente da quanto dichiarato in precedenza poiché gli edifici risultano suddivisi in particelle di dimensioni minori sulla base di come registrati nel catasto). Per quanto riguarda le informazioni reperibili è noto che dopo gli eventi del 1970 e del 1997, gli edifici di Norcia subirono degli interventi di rafforzamento: la muratura è stata confinata mediante uno strato di malta con una rete saldata di acciaio prefabbricato all'interno posta su entrambe le facce e collegate da barre in acciaio poste

ad una data distanza o utilizzando cavi di acciaio che fungono da collegamento tra le pareti parallele ed evitano i movimenti fuori piano delle pareti esterne (Stucchi, Fuchs e Meletti 2017) (R. Sisti, M. Di Ludovico, et al. 2018). Di queste caratteristiche è necessario tener conto nella definizione della tassonomia. Nel caso in esame verranno esaminati solo gli edifici del centro storico, in quanto le informazioni possedute sono relative a tali edifici.

In particolare si riportano alcune caratteristiche utili per la definizione della tassonomia, quali (R. Sisti, M. Di Ludovico, et al. 2018) e (Borri, et al. 2017):

- il campione utilizzato (686 schede AeDES) è costituito per il 94% da unità strutturali in muratura e per la parte restante da strutture costituite da materiali differenti;
- le costruzioni in muratura si presentano continue tra di loro, interconnesse tramite nodi strutturali che mirano a migliorarne il comportamento sotto l'effetto di azioni dinamiche;
- le costruzioni del centro storico si presentano per l'81% costruite prima del 1982 ed il restante dopo il 1982;
- il retrofit delle costruzioni ha coinvolto il 72% degli edifici dopo il 1982, il 12% è stata rinnovata in precedenza e il 9% non è stato oggetto di retrofit.

L'anno ricorrente è sicuramente il 1982 data chiave per comprendere il comportamento del centro storico di Norcia sotto l'azione del sisma: le costruzioni esistenti furono infatti rinnovate e le nuove costruzioni furono invece soggette alla normativa post-evento del 1979. Questi dati sono stati inseriti all'interno del calcolo tramite alcuni accorgimenti nella tassonomia: si è osservato che il collasso parziale o totale ha interessato maggiormente gli edifici privi di rinforzi in acciaio, dunque sulla base di tale informazione si è inserito il rinforzo nel caso di edifici ritenuti agibili o con agibilità parziale; in caso contrario tale accorgimento non è stato effettuato inserendo come materiale la sola muratura.

Dal momento che non si conosceva la data di costruzione degli elementi, si è ipotizzato che nel 1980 tutti gli edifici siano stati soggetti a retrofit o a miglioramenti strutturali effettuati in tale data.

Il numero di piani è stato fornito dalla tabella attributi dello shape file degli edifici reso disponibile dal sito Open Data della regione Umbria ed è quindi stato utilizzato come elemento caratterizzante della tassonomia utilizzata. Le schede AeDES contengono dati relativi alla destinazione d'uso che sono stati sfruttati per la costruzione della tassonomia: nel caso in cui fosse indicato chiaramente che si trattasse di un bene vincolato o di pregio artistico e culturale questa caratteristica è stata riportata nella tassonomia, mentre si sono considerati gli altri edifici con destinazione d'uso residenziale.

Riassumendo, la tassonomia è caratterizzata da tali informazioni:

- materiale: muratura o muratura con rinforzi in acciaio;
- data di retrofit o costruzione: 1980;
- numero di piani: ricavato dalla tabella attributi dello shape file;

- destinazione d'uso: dato presente nelle schede AeDES e riportato nell'articolo (R. Sisti, M. Di Ludovico, et al. 2018);
- edificio isolato o non isolato, dato ricavato da analisi Qgis e ritenuto importante dato che la caratteristica è ritenuta peggiorativa nei confronti dell'agibilità.

Sulla base di tali dati sono state definite 23 tassonomie per 1044 edifici facenti parte del centro storico.

La costruzione del modello di rottura e delle curve di vulnerabilità sarà discussa in maniera più approfondita nel capitolo 5 dedicato alla trattazione del caso studio.

Nel caso suddetto verrà utilizzato il calcolare Scenario Damage Assessment, ritenuto più idoneo per verificare che i danni riportati sulle schede AeDES siano coerenti con l'output di tale analisi. Tale analisi presuppone la preparazione del modello di esposizione e del modello di fragilità; inoltre è necessario indicare i parametri necessari per la definizione del sito in esame.

Il sito è caratterizzato tramite l'inserimento del parametro Vs30, ovvero quel parametro che corrisponde alla velocità in m/s delle onde di taglio negli strati di terreno presenti nel sito fino ad una profondità di 30 m dal piano di campagna. Tale parametro è stato definito da normativa, sulla base della relazione geologica effettuata sul suolo di Norcia: si riporta che *“consultando l'abaco relativo alle categorie tipo di sottosuolo e dei relativi spettri di risposta sismica, è possibile ipotizzare in prima approssimazione una stratigrafia di sottosuolo di tipo B”*, dunque il valore di Vs30 è stato fissato a 800 m/s, limite superiore definito da normativa (Comune di Perugia 2017). Altri parametri richiesti riguardano la profondità minima per cui le onde di taglio hanno una velocità maggiore di 2.5 km/s e 1 km/s, dati rispettivamente posti pari a 5 km e 100 m.

Il file di configurazione è realizzato al fine di simulare il terremoto del 2016 con ipocentro posto ad una distanza di 5 km da Norcia e profondo 9 km dal piano di campagna; si sono inoltre inserite le coordinate dell'ipocentro. Per il calcolo dei movimenti del terreno si è deciso di utilizzare l'equazione di Bindi coerente con la magnitudo del terremoto considerato (l'equazione di Bindi ammette valori magnitudo compresi tra 4.1 e 6.5); al fine di non sottostimare o sovrastimare le perdite si è inoltre inserita una correlazione spaziale definita da Jayaram e Baker (JB2009).

4.4 La correlazione tra agibilità e livello di danno

In seguito all'evento sismico, *“la valutazione del danno e dell'agibilità è rivolta in primo luogo a la valutazione delle condizioni di sicurezza sismica degli edifici danneggiati, per consentire alle persone di tornare a casa, di svolgere le consuete attività sociali ed economiche, per definire il numero di rifugi necessari ad accogliere gli sfollati* (Dolce e Di Bucci 2014).

La tipologia di analisi condotta con il software OpenQuake (Scenario Damage) permette, sulla base di uno scenario simulato (nel caso in esame il terremoto del 2016), di conoscere la probabilità che un edificio raggiunga un determinato livello di danno. Al fine di interpretare il danno in

relazione all'agibilità dell'edificio, e di definire un adeguato confronto, è necessario esplicitare la relazione tra agibilità e livello di danno, differenziando il caso di edifici residenziali e di edifici monumentali (il caso emblematico di Norcia sono le chiese).

In generale gli studi di vulnerabilità richiedono di associare un stato di danno univoco con la singola costruzione, a partire dalle informazioni di danno osservato riportato nella descrizione delle schede AeDES con un determinato livello di danno (Rosti, Rota e Penna 2018).

Molti autori hanno analizzato i dati relativi al danno degli edifici nella fase post-evento per trovare una relazione tra danno e agibilità (Del Gaudio, Di Domenico e Ricci 2018).

Come evidenziato nel paragrafo 4-3, le categorie definite sono sei, la cui sintesi è riportata nella Tabella 4-1.

Code	Description
A—usable	Building can be used w/o measures. Small damage, negligible risk for human life
B—usable with countermeasures	Building is damaged, but can be used when short-term countermeasures are taken
C—partially usable	Only a part of the building can be safely used
D—temporarily unusable	Building requiring a more detailed investigation
E—unusable	Building cannot be used due to high structural, non-structural or geotechnical risk for human life
F—unusable for external risk	Building could be used, but it cannot due to the high risk caused by external factors

Tabella 4-1 Classificazione dell'agibilità secondo le schede AeDES, (Rosti, Rota e Penna 2018)

Nel caso di edifici ordinari è stato osservato che a partire dal livello D2 di danno (*moderate*), c'è un decremento nel numero di edifici agibili, a prescindere dalla tipologia di edifici considerata e che molte delle costruzioni risultano inagibili a partire da un alto livello di danno, equivalente al livello D3 della scala EMS98 (Rosti, Rota e Penna 2018).

Nel caso di edifici monumentali e nella fattispecie di chiese, il livello di danno D1 (*slight damage*) è relativo ad uno stato di non rischio (“*safe*” o “*safe with precautions*”), mentre a partire dal livello due, praticamente tutte le chiese sono ritenute a rischio, dunque dal livello D2 al livello D3 le chiese richiedono in generale interventi di riparazione, prima di essere ritenuti agibili. Se viene superato il livello D3 esiste la possibilità di osservare un collasso parziale o totale, con danno crescente e con la possibilità di perdita di vite umane (Cescatti, Ceroni e da Porto 2019).

La correlazione verrà quindi effettuata sulla base delle informazioni riportate.

Al fine di poter effettuare la correlazione, si riportano nelle Figura 4-7, 4-8, 4-9 e 4-10 i risultati del calcolare Scenario Damage. I dati del terremoto sono invece riportati in Tabella 4-2.

Dati Terremoto	
Coordinate epicentro	Latitudine: 42.83
	Longitudine: 13.11
Nomenclatura evento	8863681
Data Evento	30 ottobre 2016
Profondità dell'ipocentro	9 km
Distanza da Norcia	4 km
Magnitudo	6.5

Tabella 4-2 Sintesi dei dati del terremoto simulato

LEGENDA

No Damage [%]	0.25 - 0.30
0.00 - 0.01	0.30 - 0.40
0.01 - 0.02	0.40 - 0.50
0.02 - 0.05	0.50 - 0.60
0.05 - 0.10	0.60 - 0.70
0.10 - 0.15	0.70 - 0.80
0.15 - 0.20	0.80 - 0.90
0.20 - 0.25	0.90 - 1.00

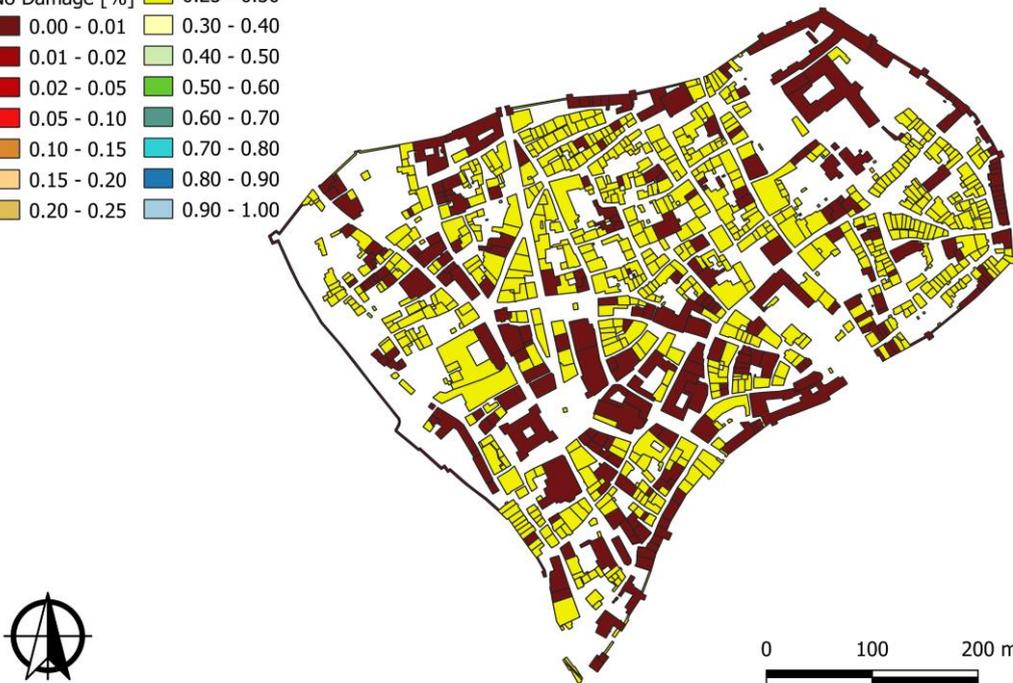


Figura 4-7 Distribuzione del danno nel centro storico di Norcia considerando il terremoto storico con epicentro tra i comuni di Norcia e Preci 2016 (Umbria) - No Damage

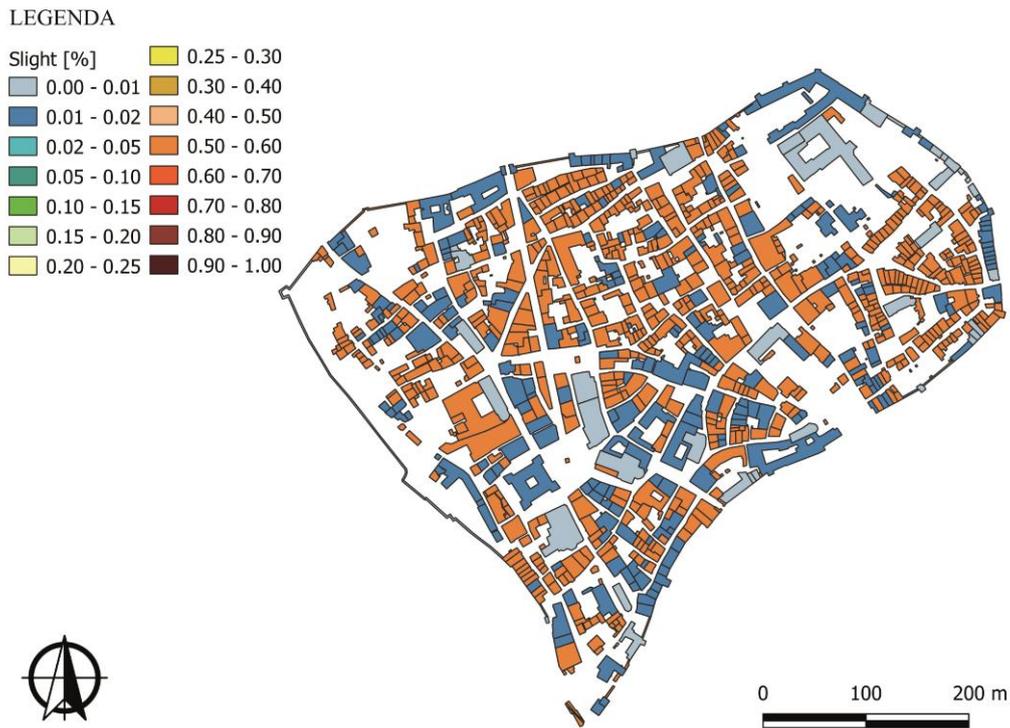


Figura 4-8 Distribuzione del danno nel centro storico di Norcia considerando il terremoto storico con epicentro tra i comuni di Norcia e Preci 2016 (Umbria) - Slight



Figura 4-9 Distribuzione del danno nel centro storico di Norcia considerando il terremoto storico con epicentro tra i comuni di Norcia e Preci 2016 (Umbria) - Moderate

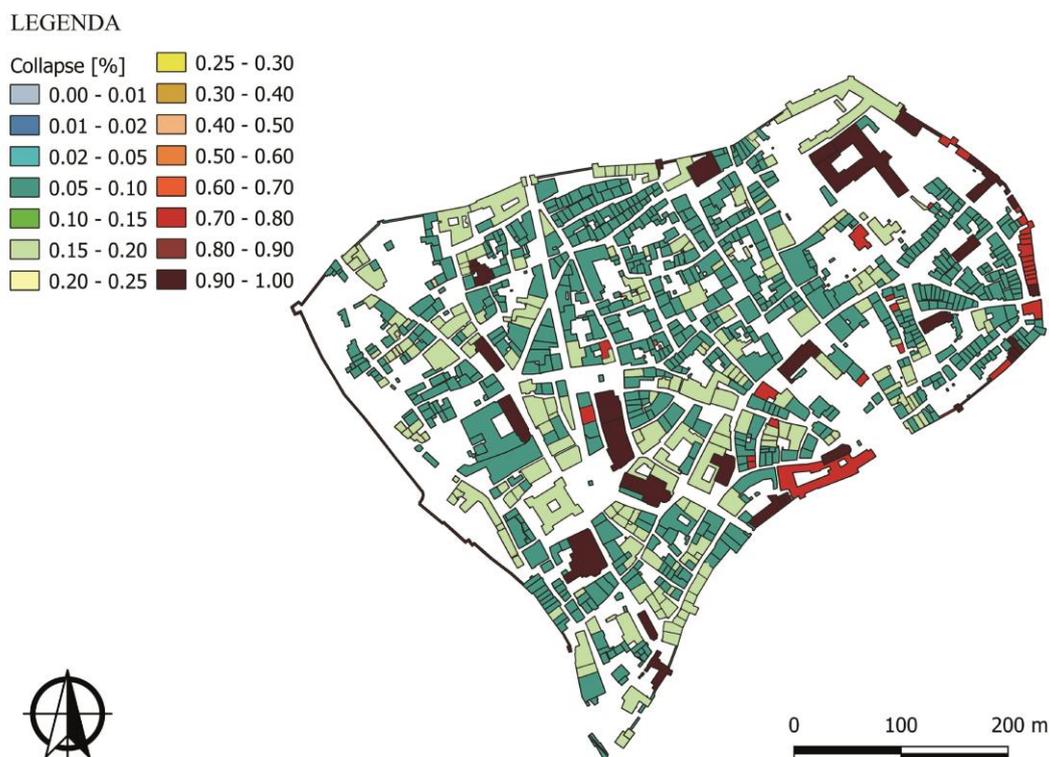


Figura 4-10 Distribuzione del danno nel centro storico di Norcia considerando il terremoto storico con epicentro tra i comuni di Norcia e Preci 2016 (Umbria) – Collapse

Nella Figura 4-7 evidenzia quanto atteso: le costruzioni ritenute agibili o parzialmente agibili (o in alcuni casi agibili dopo interventi a breve termine) rappresentano la maggioranza degli edifici del campione (evidenziato in giallo), i quali hanno una possibilità di non subire danno compresa tra il 25 ed il 30%. Se si osserva la Figura 4-8 gli stessi edifici hanno una probabilità di subire un danno lieve compresa tra il 50 ed il 60% e moderato tra il 5 ed il 10%. Gli edifici ritenuti inagibili evidenziati nella Figura 4-4 (danno moderato che comprende D3 e D4) hanno invece una probabilità elevata di subire un danno moderato e, per questo, sono state classificate come inagibili.

La Figura 4-10 risulta avere un ruolo chiave nella lettura dei risultati, infatti, gli edifici collassati evidenziati nella Figura 4-5 sono gli stessi che risultano avere una probabilità compresa tra il 90 ed il 100% di collasso: tali edifici sono gli edifici monumentali ed in particolar modo, come più volte sottolineato, le chiese. Di lettura più complessa risulta essere il caso di edifici ritenuti inagibili (Figura 4-4), ma non soggetti a collasso (Figura 4-6): la percentuale che tali edifici raggiungano il collasso è molto bassa e non supera il 20%: questo dato è coerente con quanto atteso, in quanto si ha dalle schede AeDES l'inagibilità, ma non il collasso dell'edificio.

Al fine di semplificare il confronto dei dati, la Figura 4-11 dimostra la corrispondenza tra edifici collassati evidenziati nelle schede post-evento e la probabilità di collasso degli edifici prevista con il calcolare Scenario Damage. Nella Figura 4-13 si propone invece l'identificazione degli

edifici agibili e non agibili (Figura 4-4) a confronto con i risultati di distribuzione di danno delle Figure 4-7, 4-8, 4-9 e 4-10.

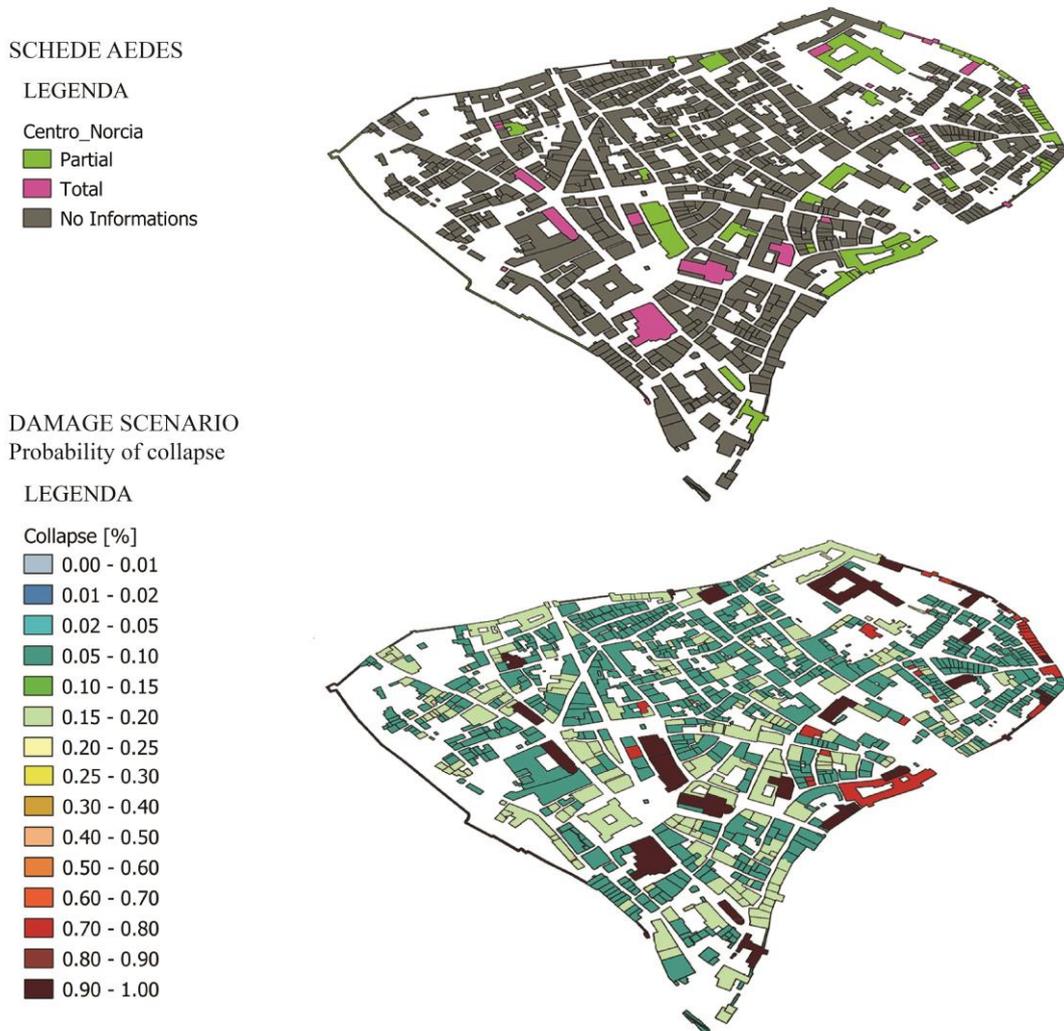


Figura 4-11 Confronto tra gli edifici crollati parzialmente o totalmente nelle schede AeDES (in alto) e i risultati dell'analisi Scenario Damage - Probability of collapse (in basso)

La Figura 4-11 permette di stimare la percentuale di matching tra i risultati attesi (dati forniti dalle schede AeDES) e dati calcolati (OpenQuake), i cui risultati sono sintetizzati nella Figura 4-12. Come evidenziato dalla Figura sottostante, il software non differenzia in maniera ottimale gli edifici crollati integralmente da quelli caratterizzati da crollo parziale. Il numero di edifici che raggiungono il collasso risultanti dalle due diverse metodologie risultano differenti in entrambi i casi, ma nel caso del collasso totale, OpenQuake attribuisce il crollo totale agli stessi edifici evidenziati dalle schede AeDES, ma arriva a stimarne di più in quanto alcuni crolli parziali vengono erroneamente identificati in quanto completi. Il matching risulta quindi perfetto nel caso degli edifici crollati integralmente, ma migliorabile nel secondo caso.

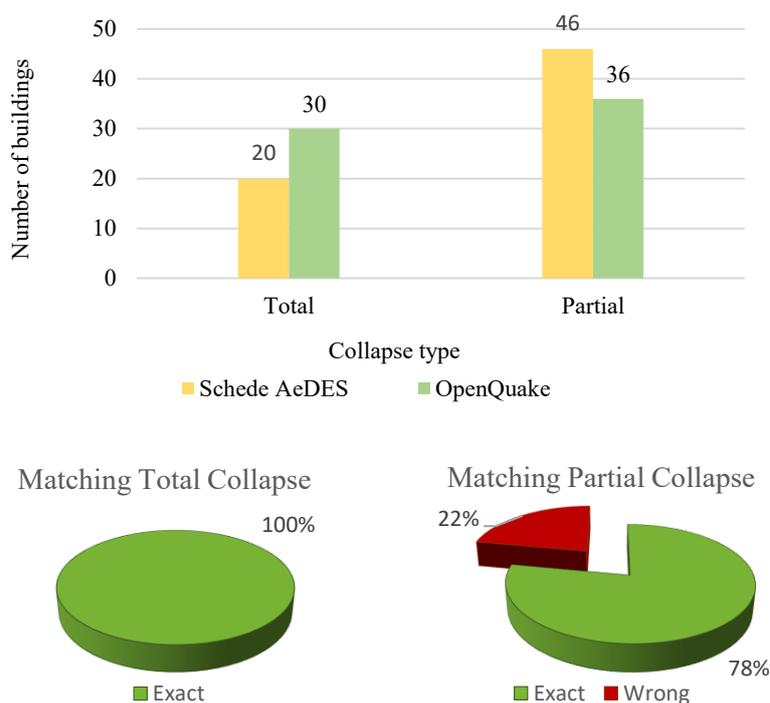


Figura 4-12 Confronto tra i dati delle schede AeDES e i risultati dell'analisi su OpenQuake

Al fine di confrontare i risultati in maniera più chiara e leggibile, le probabilità di danno sono state convertite in tre categorie (agibile, parzialmente o temporaneamente inagibile, non agibile), sulla base delle percentuali di probabilità ottenute. Sono state effettuate le seguenti ipotesi, supportate da quanto evidenziato da (Rosti, Rota e Penna 2018) e (Cescatti, Ceroni e da Porto 2019):

- tutti gli edifici hanno una probabilità molto bassa di non subire nessun danno e, per la maggior parte degli edifici residenziali, questa probabilità non supera il 25-30%. Dunque la Figura 4-7 risulta poco influente al fine di definire l'agibilità;
- dalla Figura 4-8 per gli stessi edifici, risulta una percentuale di subire un danno lieve del 50-60%, dunque tali edifici saranno definiti agibili e tale ipotesi è supportata anche dalle Figura 4-9 e 4-10 in cui viene evidenziato che la probabilità di subire un danno moderato e di collassare non supera il 10%;
- dalla Figura 4-7 si evince che molti edifici hanno una possibilità molto bassa di non subire nessun danno (inferiore all'1%) e di subire un danno lieve (minore del 2%), mentre mostrano una propensione elevata (maggiore del 90% di subire un danno moderato e se si osserva la Figura 4-10 la probabilità di raggiungere il collasso è contenuta entro il 20%. Per tali edifici è quindi stata definita la non agibilità, ma si considerano non soggetti a crollo;
- come evidenziato dalla Figura 4-10 le chiese, i monasteri e le mura hanno una probabilità di collassare maggiore del 90%.

La difficoltà, come risulta subito evidente dalla Figura 4-12 riguarda la definizione degli edifici con agibilità parziale o non agibilità temporanea.

SCHEDE AEDES

LEGENDA

- Usability
- Partially/Short_term
 - Unusable
 - Usable
 - No Informations



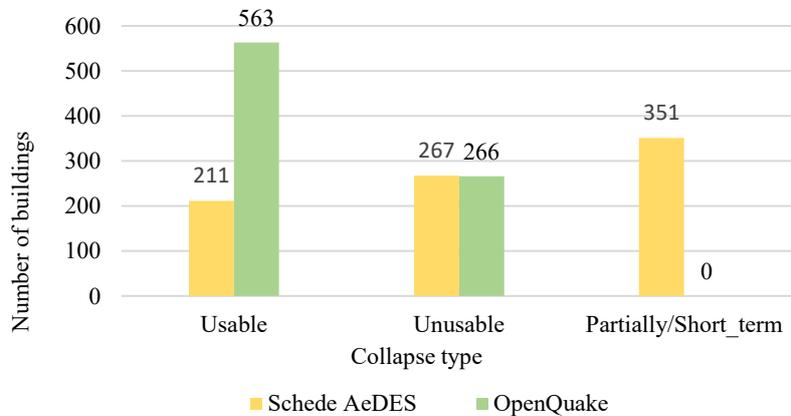
DAMAGE SCENARIO

LEGENDA

- Usability
- Unusable
 - Usable/Partially/Short_term



Figura 4-13 Confronto tra l'agibilità definita tramite le schede AeDES e i risultati dell'analisi Scenario Damage - espressi in termini di agibilità (in basso)



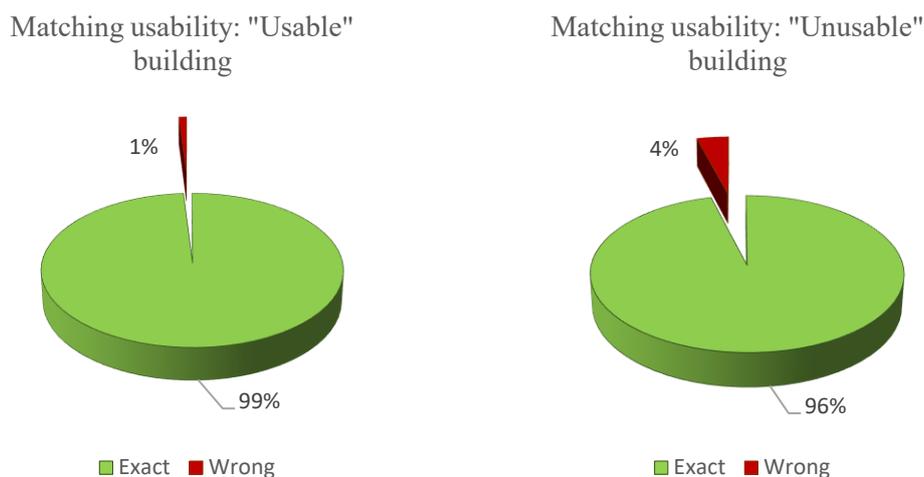


Figura 4-14 Confronto tra i dati di agibilità delle schede AeDES ed i risultati di OpenQuake

La Figura 4-14 evidenzia un buon matching tra i dati delle schede AeDes e i risultati del software OpenQuake per quanto riguarda gli edifici agibili e quelli non agibili; il contrario avviene invece per quanto riguarda l'agibilità parziale, per la quale OpenQuake non individua nessun edificio come mostrato dal grafico in Figura 4-14, questo risultato è probabilmente dovuto al fatto che la tassonomia utilizzata per descrivere tali edifici non risulta sufficientemente precisa.

4.5 Commenti sui risultati e considerazioni

L'ultimo evento sismico che ha colpito l'Italia centrale nel 2016, il cui sciame sismico continua fino ad oggi (1 settembre 2019, magnitudo 4.0), ha evidenziato ancora una volta la necessità di conoscere e di mitigare l'effetto degli eventi sismici sul territorio nazionale. Infatti, come segnalato nel sito dell'INGV da Lucia Margheriti, primo ricercatore dell'Osservatorio Nazionale Terremoti dell'INGV, la sequenza sismica che ha interessato l'Appennino centrale con numerose scosse non è ancora conclusa.

Nonostante quanto appena sottolineato, il comportamento degli edifici in muratura del centro storico di Norcia può essere visto come un esempio dal punto di vista degli interventi volti alla mitigazione del rischio sismico. Le schede AeDES e il software per la valutazione del rischio sismico OpenQuake, hanno infatti evidenziato che la maggior parte degli edifici sono risultati agibili o parzialmente agibili dopo il terremoto e che gli edifici residenziali, per la maggior parte, non hanno subito crolli.

La protezione civile ha istituito il sistema il Sige (*Sistema Informativo per la Gestione dell'Emergenza*) con lo scopo di fornire un quadro territoriale dell'area colpita (tra i parametri utilizzati per l'analisi si trovano popolazione, densità abitativa, numero e distribuzione stanze di albergo ecc) *consente di calcolare le perdite, in termini di numero atteso di abitazioni crollate, inagibili, danneggiate, nonché di vittime, feriti, senza tetto, con una risoluzione a scala municipale per tutti i comuni ricadenti in un intorno di 50 km dall'epicentro*, come si legge nel

sito di riferimento http://www.protezionecivile.gov.it/attivita-rischi/schede-tecniche/dettaglio/-/asset_publisher/default/content/sige-sistema-informativo-per-la-gestione-dell-emergenza; un esempio di mappa fornita da tale servizio è visionabile in Figura 4-15. Questa necessità di prevedere gli effetti di un evento sismico risulta essere di importanza primaria nella fase di mitigazione del rischio di disastro (attuando interventi di retrofit e di rinforzo strutturale che come evidenziato nel caso di Norcia si sono rivelati fondamentali per evitare collassi e danni rilevanti negli edifici residenziali) e nella gestione del rischio, conoscendo a priori gli edifici soggetti a danno elevato (non agibili) o a danni lievi o nulli (agibilità). Come evidenziato nelle Figure 4-11 e 4-13, il software OpenQuake si dimostra un utile strumento per prevedere l'effetto del terremoto sugli edifici: la probabilità di collasso rilevata dal Software fornisce risultati coerenti con quanto atteso (Figura 4-11) e permette di individuare gli edifici agibili e quelli non agibili. Ovviamente è palese che esistono ancora dei limiti nell'utilizzo dei software per questo scopo: dalla Figura 4-11 si evince infatti che l'analisi effettuata con OpenQuake non distingue in modo opportuno gli edifici che hanno subito un collasso parziale da quelli che hanno invece subito un collasso totale (esempio del Palazzo Comunale). Per quanto concerne la Figura 4-13, il database utilizzato, probabilmente per la caratterizzazione non adeguata riservata agli edifici definiti come "parzialmente agibili", non distingue in maniera opportuna (differenziando le probabilità di raggiungere un certo livello di danno), gli edifici agibili da gli edifici non agibili, dunque non si è in grado di distinguere in maniera opportuna tali edifici.

Tale risultato può essere legato a diversi fattori:

- l'ipotesi effettuata sulla data di retrofit degli edifici non è la stessa per tutti ed è probabile che tali edifici non abbiano subito adeguati rinforzi strutturali nel 1997;
- gli edifici potrebbero aver subito interventi di retrofit svolti in maniera poco opportuna nel 1980 e non modificati dopo il 1997;
- gli edifici non sono tutti in muratura (questo era stato evidenziato nel paragrafo 4.3) e possono essere composti da altri materiali (pietrame ecc) caratterizzati da maggior vulnerabilità.

Si ritiene che in ogni caso una migliore definizione della tassonomia e dunque, una classificazione maggiormente precisa degli edifici potrebbe portare a risultati più precisi e permette l'individuazione di edifici parzialmente o temporaneamente inagibili.

Il metodo speditivo e le ipotesi effettuate in questa fase del lavoro permettono comunque di ottenere importanti risultati e di fornire una lettura abbastanza coerente con quanto atteso degli effetti del sisma sul centro storico di Norcia. *“Le previsioni probabilistiche a medio e lungo termine di catastrofi, quali per esempio i terremoti, sono un importante strumento di prevenzione e mitigazione del rischio”* (Dolce e Di Bucci 2012).

Uno sviluppo futuro potrebbe essere quello di confrontare i risultati ottenuti dalla protezione civile con il Sige e verificare differenze e punti in comune tra i due strumenti di pianificazione al fine di poter migliorare ulteriormente lo strumento utilizzato.

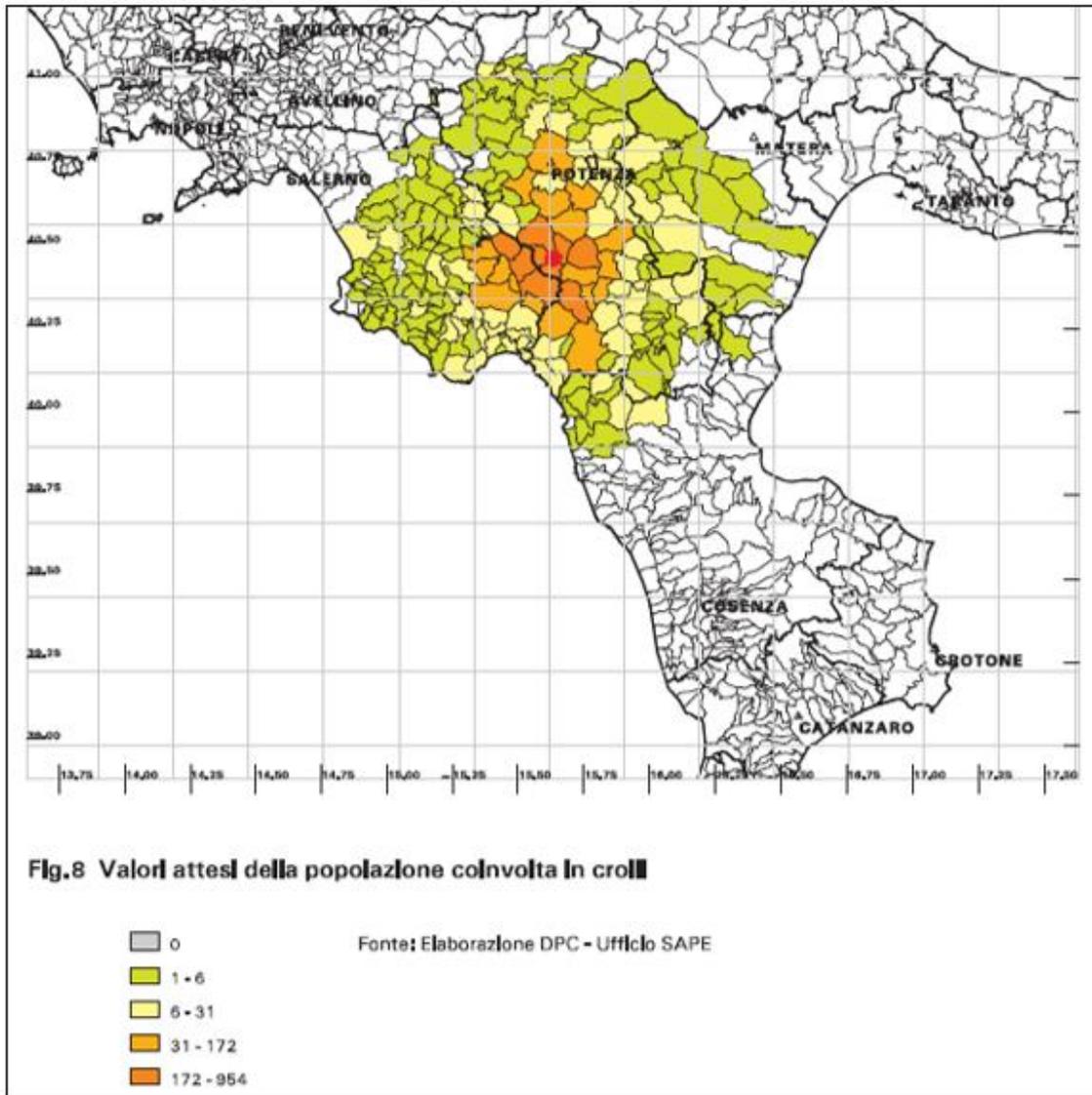


Figura 4-15 Esempio di output del sistema informativo Sige (Protezione Civile, Esercitazione Nazionale di Protezione Civile Rischio Sismico "Basilicata 2012" 2012)

5 Il rischio sismico di edifici industriali

Il terremoto rappresenta uno degli eventi che può significativamente incidere negativamente nell'economia di una regione a causa dei processi di ripresa lunghi (Cutler, et al. 2016). *“Quando le perdite sono particolarmente rilevanti l'azione sismica può essere l'innescò di incidenti industriali importanti”* (Campedel, et al. 2008), causando un impatto ancora maggiore. Gli eventi sismici recenti hanno dimostrato che le aree produttive colpite da terremoti patiscono fortemente gli effetti di tale eventi a causa di perdite economiche elevate (Hofer, et al. 2017). I devastanti terremoti in Cina (2008 e 2010), in Nuova Zelanda (2011), in Giappone (2011) e in Italia (2012) hanno obbligato la comunità e la politica a focalizzare l'attenzione sul rischio sismico delle strutture industriali.

Per edificio industriale si intende una struttura in cemento armato prefabbricato i cui elementi vengono assemblati in cantiere. Inizialmente tale tipologia costruttiva era utilizzato per edifici a scopo produttivo, ma negli ultimi anni è stata utilizzata anche per centri commerciali ed uffici multipiano (Fischinger, Zoubek e Isakovic 2014).

Il sistema strutturale più comune degli edifici industriali prefabbricati in Europa è costituita da colonne legate tra loro da travi, in cui il collegamento è offerto da tasselli in acciaio (Fischinger, Zoubek e Isakovic 2014); la risposta sismica offerta da tali costruzioni risulta essere poco soddisfacente. Il motivo è probabilmente legato al fatto che in Europa la maggior parte delle strutture in cemento armato non sono progettate in accordo con i moderni codici (Rossetto e Elnashai 2003) e questa tendenza è forte anche in Italia. La maggior parte delle strutture in cemento armato prefabbricate colpite da terremoti soffrono maggiormente il danno relativo al trasferimento dei carichi orizzontali da elementi non strutturali ad elementi strutturali (Belleri, et al. 2014).

Le normativa vigente (Aggiornamento delle <<Norme tecniche delle costruzioni>> 2018) così come le NTC del 2008 prescrive l'uso di dispositivi meccanici, i quali fungono da connessioni tra gli elementi strutturali e questa prescrizione è diventata obbligatoria per le aree sismiche a partire dagli anni '80 (Normative tecniche per la costruzione 1987), ma venne messa in atto in maniera sistematica solo a partire dagli anni '90 (Belleri, et al. 2014). Gli edifici costruiti in precedenza, sono stati soggetti ad interventi di consolidamento e di ristrutturazione solo nel caso in cui si trovassero in zone ritenute sismicamente pericolose.

Nel caso di tale tipologie di edifici, considerare solo ed esclusivamente il danno negli elementi strutturali risulta riduttivo. In molti eventi sismici che hanno colpito il Nord America nel ventesimo secolo, inclusi i recenti avvenuti a Seattle (2001) e nel 2006 a Kona nelle Hawaii, le perdite relative alle componenti non strutturali (elementi di tamponamento, macchinari, tubazioni e collegamenti elettrici necessari alla produzione) sono risultate maggiori rispetto a quello relative alle componenti strutturali e in effetti il danno subito dalle componenti non strutturali può influenzare pesantemente la funzionalità di strutture importanti quali ospedali e industrie, come messo in luce dal terremoto a Northridge (1994) e El Salvador (2001) (Filiatrault e Sullivan 2014). In America nell'edizione del 1964 del “Uniform Buildings Code” è stata inserita una parte

relativa alle componenti non strutturali, ma le edizioni recenti dei codici negli Stati Uniti non contengono nessuna specifica richiesta per la progettazione sismica degli elementi non strutturali e solo gli ultimi codici post terremoto del 1964 in Alaska e del 1971 a San Fernando contengono indicazioni più specifiche riguardanti tale problematica (Filiatrault e Sullivan 2014). Negli ultimi trent'anni sono state implementate guide e diffusi standard per la valutazione del retrofit su elementi non strutturali: l'obiettivo è una progettazione degli stessi che miri alla salvaguardia della vita e che quindi limiti spostamenti significativi di tali elementi (Filiatrault e Sullivan 2014). *“A seguito degli eventi sismici del maggio 2012 che hanno interessato Emilia Romagna e in modo marginale Lombardia e Veneto, una delle aree ritenute più produttive nel nostro territorio, ha subito notevoli danni in termini umani e materiali, provocando collassi di edifici produttivi sia di parti strutturali che non strutturali (quali pannelli prefabbricati, scaffalature interne, gru a ponte ecc)”* (Muratore, Nastasi e Di Gerolamo 2015).

Nel caso di edifici industriali assume rilievo anche il discorso della rioccupazione del luogo, infatti, non esistono riferimenti circa gli standard e i criteri per la rioccupazione dopo un danno subito a seguito di un evento sismico; l'argomento risulta quindi controverso: nessuna delle ordinanze è sufficientemente generale e abbastanza efficace per stabilire le norme sulla riparazione e la successiva riparazione e questo deve essere uno spunto per creare un valido sostegno alla prossima generazione di norme (Polese, Di Ludovico e Marcolini, et al. 2015).

5.1 Fragilità

La definizione di fragilità è stata chiarita nel paragrafo 3.1 e rimane valida anche nel caso di edifici industriali. Nel caso di tale tipologia di edifici le curve di fragilità vengono prevalentemente derivate per via empirica e per via analitica: l'approccio empirico è stato adottato a partire dai primi anni '70 (Romano, Zucconi e Ferracuti 2018) con l'elaborazione di una matrice probabilistica di danno per valutare e calibrare le funzioni di vulnerabilità continue e le curve di fragilità. Nel caso di curve di fragilità ricavate per via empirica i gruppi di ricerca hanno avuto a disposizione un gran numero di informazioni da terremoti passati che hanno reso maggiormente robusti i risultati ottenuti; la consultazione di differenti dati derivanti dai passati terremoti, se da una parte rappresenta la possibilità di avere a disposizione un gran set di dati, d'altra parte significa confrontarsi con dati non omogenei e con stime differenti dei livelli di danno (Romano, Zucconi e Ferracuti 2018). Nel caso di derivazioni analitiche i metodi sono generalmente distinti in due macro-categorie, la prima basata sugli spostamenti in cui il danno viene derivato considerando la relazione diretta tra spostamento e domanda sismica e utilizzando il metodo meccanico di cui si è discusso nel paragrafo 3.1: in questo caso, è fondamentale implementare un modello meccanico adatto ad una specifica tipologia di edificio, perché determinante nell'individuazione dei possibili meccanismi di crollo degli edifici. Il metodo adottato può essere più o meno complesso, a seconda del livello di precisione richiesto per descrivere l'edificio; il metodo proposto da (Lagomarsino e Giovinazzi 2006) considera un sistema SDOF assumendo preventivamente una curva di capacità per le differenti tipologie strutturali, come una funzione della capacità spettrale inelastica, del periodo elastico e della duttilità nello spostamento. La

tendenza attuale è quella di utilizzare metodi empirici per le valutazioni a scala territoriale i quali possono essere rilevanti se supportati da dati ricavati da terremoti con caratteristiche simili, in questo modo gli errori che incidono sul metodo possono essere ridotti; d'altra parte il metodo analitico permette di simulare più rapidamente scenari e pericolosità differenti in maniera più rapida.

Nel caso in esame, assume rilevanza il lavoro di (Grüntal 1998) il quale definisce anche per le costruzioni cemento armato una scala di danno (European Macroseismic Scale) e mette l'accento sull'importanza degli elementi di tamponamento come mostrato nella Tabella 5-1.

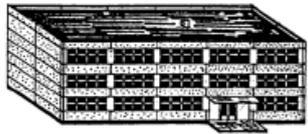
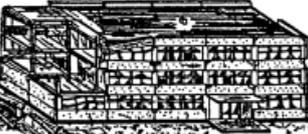
Classificazione del danno a edifici in cemento armato	
	Grado 1: Danno da trascurabile a leggero (nessun danno strutturale, leggero danno non strutturale) Crepe sottili nell'intonaco sopra elementi dell'intelaiatura o nei muri alla base. Crepe sottili nei tramezzi e nelle tamponature.
	Grado 2: Danno moderato (leggero danno strutturale, moderato danno non strutturale) Lesioni nei pilastri e nelle travi delle strutture a telaio e nelle pareti portanti. Lesioni in tramezzi e tamponature; caduta di rivestimenti esterni ed intonaco. Malta cade dai giunti dei pannelli murari.
	Grado 3: Danno da sostanziale a grave (moderato danno strutturale, grave danno non strutturale) Lesioni alla base dei pilastri e nei nodi delle strutture a telaio; lesioni alle intersezioni delle pareti accoppiate. Espulsione del copriferro, instabilità delle barre dell'armatura. Larghe lesioni in tramezzi e tamponature, cedimento di singoli pannelli.
	Grado 4: Danno molto grave (grave danno strutturale, danno non strutturale molto grave) Larghe lesioni in elementi strutturali con cedimento a compressione del cemento e rottura di barre d'armatura; sfilamento delle barre di armatura; inclinazione dei pilastri. Collasso di alcuni pilastri o di un singolo piano alto.
	Grado 5: Distruzione (danno strutturale molto grave) Collasso del piano terra o di parti (es. ali) di edifici.

Tabella 5-1 Livelli di danno per gli edifici in cemento armato, (Grüntal 1998)

I dati post terremoto raccolti nel caso dell'Emilia Romagna, hanno rappresentato un punto di partenza fondamentale per la costruzione di curve di fragilità per gli edifici industriali per il

Territorio nazionale. Un contributo importante deriva dal lavoro di (Buratti, et al. 2017) il quale grazie alla comparazione tra curve di fragilità per edifici industriali riportate in letteratura e curve di fragilità per edifici prefabbricati in cemento armato, evidenzia la maggior vulnerabilità di questi ultimi rispetto a quella riscontrata per le strutture gettate in opera. Sulla base dei dati relativi al danno subito dagli edifici raccolti da ingegneri strutturali esperti e dai proprietari delle attività (con la finalità di ricevere fondi necessari alla ricostruzione dell'edificio o alla ristrutturazione) sono state costruite delle curve di fragilità i cui livelli di danno sono riassunti nella Tabella 5-2.

Damage grade	Type of damage		Definition
	Non-structural	Structural	
D_0 (no damage)	–	–	No damage
D_1 (slight damage)	Slight	–	Local or distributed damage to up to 20% of horizontal and/or vertical partitions without collapses
D_2 (moderate damage)	Moderate	Slight	Local or distributed damage to more than 20% of horizontal and/or vertical partitions without collapses
D_3 (severe damage)	Heavy	Moderate	Severe damage to up to 15% of horizontal and/or vertical covering surfaces with collapses or at least one column with permanent drift larger than 2%
D_4 (heavy damage)	Very heavy	Heavy	Severe damage to up to 30% of horizontal and/or vertical covering surfaces with collapses or to up to 20% of columns, with permanent drift larger than 2%, or plastic hinge at the base section
D_5 (collapse)	Total or partial collapse		Collapses of more than 30% of horizontal and/or vertical covering surfaces or damage to more than 20% of columns

Tabella 5-2 Livelli di danno per gli edifici industriali, (Buratti, et al. 2017)

Per quanto concerne tali curve sono state proposte da enti governativi e istituti di ricerca diverse tipologie di curve per gli edifici in cemento armato e una revisione critica è stata fornita da (Rossetto e Elnashai 2003): nel loro lavoro le nuove relazioni empiriche derivano da 29 rapporti d'indagine pubblicati da gruppi di ricerca e da autorità governative e la base statistica è ricavata sulla base 99 dataset contenenti le osservazioni sui danni post-terremoti effettuate su 340.000 strutture in cemento armato per diciannove eventi. Le curve sono state differenziate in base alla tipologia strutturale. Un esempio di tale curve è riportato nella Figura 5-1, in cui la probabilità di eccedere un determinato livello di danno è stata definita per diversi parametri che esprimono il movimento del terreno. Nonostante il grande data-set utilizzato per la generazione di tali curve, gli effetti della qualità della costruzione e della progettazione sismica può essere presa in considerazione solo attraverso l'uso di insiemi separati di curve di vulnerabilità, generati per strutture di altezza e sismiche prevalentemente diverse e di diversa altezza codici di progettazione, dunque l'uso presuppone sempre una preventiva scomposizione degli edifici in base a delle caratteristiche omogenee per cui sono ritenute idonee solo delle specifiche curve.

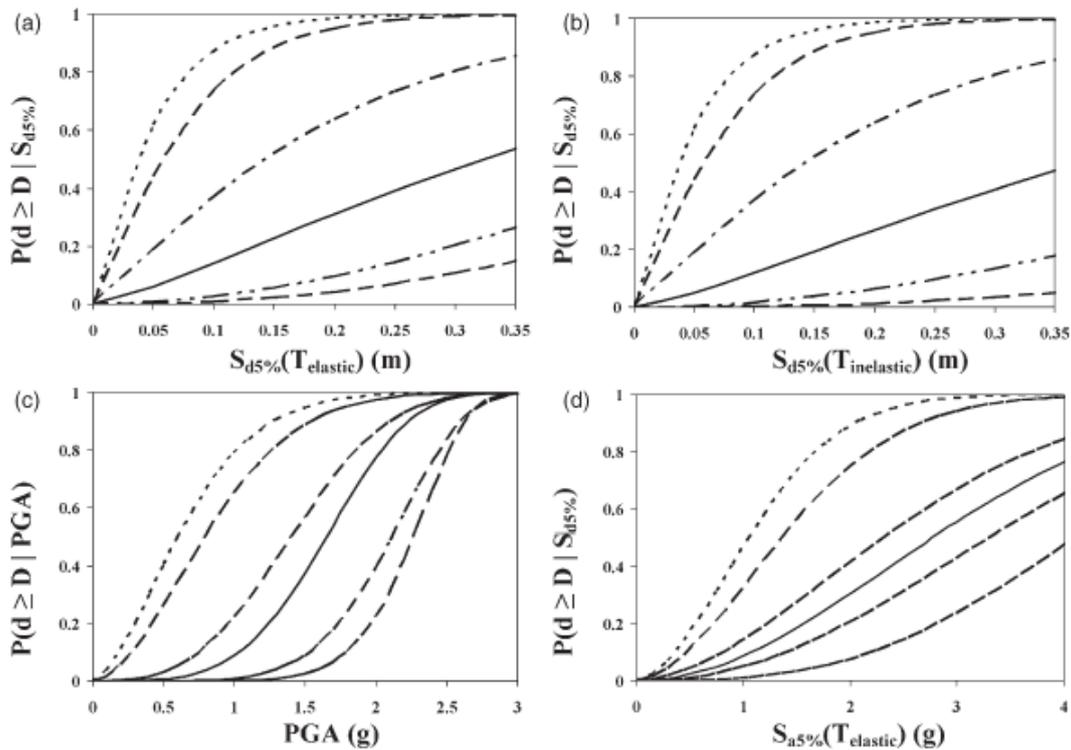


Figura 5-1 Esempi di curve di fragilità (Rossetto e Elnashai 2003)

Uno dei metodi più utilizzati per la derivazione analitica delle curve in Italia è il metodo (Casotto, et al. 2015), il quale si compone di tre step fondamentali (Beilic, et al. 2017):

- generazione casuale di strutture in cemento armato;
- progettazione, modellazione numerica e analisi di danno;
- derivazione delle curve di fragilità.

Gli edifici campione sono generati sulla base di una classificazione derivante dalla tipologia strutturale e dalla normativa che ne ha regolato la progettazione. (Casotto, et al. 2015) si è soffermato su una trattazione riguardante gli edifici costruiti prima della pubblicazione delle NTC2008, mentre il lavoro di (Beilic, et al. 2017) introduce una nuova categoria di edifici, costruiti post normativa.

Nel caso degli edifici industriali risulta di importanza fondamentale valutare la fragilità e la vulnerabilità delle componenti non strutturali e tale tema è stato approfondito da (Babic e Dolsek 2016) che, utilizzando il metodo proposto da (Casotto, et al. 2015) che prevede l'ausilio della simulazione di Montecarlo per generare un campione di 12 classi di edifici differenti (per utilizzare un modello il più possibile vario per quanto riguarda geometria e proprietà meccanica e successivamente), hanno studiato la risposta di tali edifici a 70 eventi sismici simulati per derivarne delle curve di fragilità per la componente strutturale e per quella non strutturale. La difficoltà evidenziata dagli autori è quella di modellare in maniera corretta il comportamento dei pannelli e della muratura (tamponamenti del telaio in cemento armato) e quindi di calibrare in modo corretto il modello (Babic e Dolsek 2016).

5.2 Vulnerabilità

Una grande parte delle strutture RC in Europa e nel Mediterraneo ha generalmente alta vulnerabilità nei confronti dei terremoti. Nel corso degli anni sono stati formulati diversi approcci per la valutazione della vulnerabilità sismica e tali risultati sono disponibili in letteratura.

Come evidenziato nel paragrafo 3.2, per valutare la vulnerabilità di un edificio è necessario definire preventivamente una scala di danno, che può riferirsi alla componente strutturale, agli elementi di tamponamento o generalmente alle componenti non strutturali (Romano, Zucconi e Ferracuti 2018).

La derivazione di tale curve si basa sulle equazioni già evidenziate nel paragrafo suddetto, ma nel presente paragrafo è necessario effettuare alcune precisazioni per gli edifici industriali, in quanto la determinazione della vulnerabilità dei settori industriali è fortemente influenzata dalle perdite indirette derivanti da un evento sismico ed un focus su tale problematica risulta necessaria: queste sono una componente importante per la valutazione del rischio sismico (Hiete e Merz 2009). La vulnerabilità di un'industria ha infatti due dimensioni: danni indiretti e danni diretti. Nella produzione e nel commercio i danni diretti sono infatti per la maggior parte causati dal parziale o totale danno subito dalla costruzione, dai macchinari, dalle installazioni. *“In molti settori industriali i disastri possono indurre anche danni secondari diretti”* (Cruz e Okada 2008): basti pensare alla conseguenza di un disastro in un'industria chimica, nella quale possono insorgere processi che culminano in incendi e rischi per l'ambiente. Gli effetti secondari ricordano le perdite indotte dall'interruzione dell'attività (*downtime*)-in questo caso si tratta di perdite primarie indirette- e dell'influenza dei giorni di chiusura dell'attività sul mercato (perdite indirette secondarie). Data la grande moltitudine di fattori che influenza la vulnerabilità di un sistema produttivo e commerciale e per la sua dipendenza da altri fattori (per esempio i collegamenti forniti da infrastrutture per l'acquisto e la vendita delle merci) la valutazione e la stima della vulnerabilità può essere complessa.

Nel paragrafo 3.2 si è discusso delle metodologie utilizzate per ricavare tali curve e si sono descritte nel dettaglio le metodologie. Nel caso di edifici industriali uno dei metodi più utilizzati è quello analitico, per il quale sono stati definiti diversi metodi di derivazione delle curve di vulnerabilità. Un approccio molto semplice può essere quello di ridurre la struttura utilizzata ad un sistema SDOF (*single degree of freedom*) in modo da aggirare il problema legato ad una scarsa reperibilità dei dati; metodi più raffinati richiedono, infatti, dati specifici per la caratterizzazione dell'edificio e dunque, tali metodi vengono utilizzati per analizzare il singolo edificio, il quale si presume essere rappresentativo della popolazione (Polese, Verderame, et al. 2008).

Come verrà esplicitato nel paragrafo 7.5.2. nel caso di valutazione del rischio sismico industriale, non deve essere valutata la vulnerabilità esclusiva degli elementi strutturali, ma anche quella delle componenti non strutturali. In particolare devono essere valutate differenti curve di vulnerabilità in base al bene oggetto di indagine. Un esempio, i cui studi hanno fornito gli strumenti per le analisi svolte nel capitolo 7, sono le curve ricavate da (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018), i cui modelli di vulnerabilità sono riportati nella Figura 5-2.

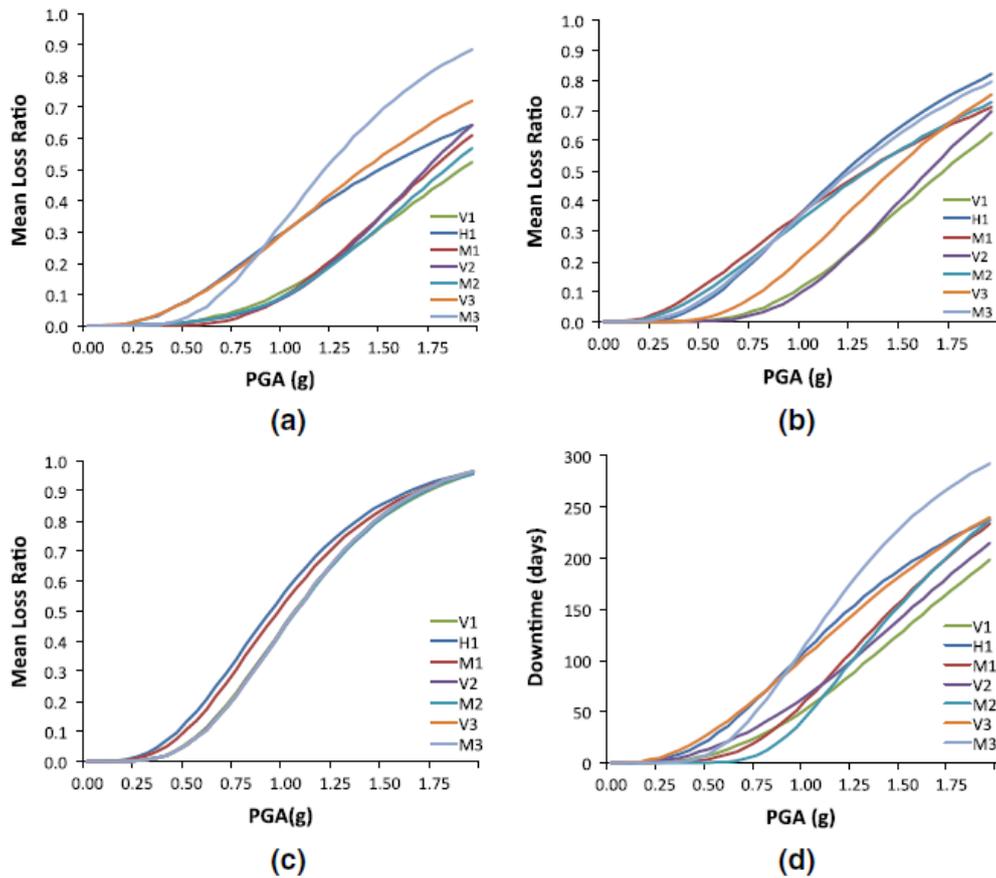


Figura 5-2 Modello di vulnerabilità per a) strutture; b) componenti non strutturali; c) contenuti; d) interruzione dell'attività.

Le curve di vulnerabilità sono state elaborate tramite metodi differenti, “in quanto esiste una difficoltà nel reperire dati affidabili sulle perdite causate da terremoti passati che contraddistinguono tra perdite strutturali, non strutturali, contenuti e interruzione dell'attività”. Quindi, la vulnerabilità sono tipicamente derivate dalla combinazione di funzioni di fragilità (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018), i cui dati, dopo esser stati elaborati seguendo la trattazione esplicitata nel paragrafo 3.2, sono stati utilizzati per la costruzione dei suddetti modelli di vulnerabilità. La difficoltà incontrata nella definizione delle perdite associate all'interruzione dell'attività è sottolineata anche da tale autore, il quale si è riferito a quanto elaborato per il software Hazus.

Una trattazione circa l'importanza nel ruolo della valutazione della vulnerabilità dei componenti non strutturali è presente anche nel lavoro di (Babic e Dolsek 2016), i quali hanno indagato con attenzione la vulnerabilità dei pannelli e della muratura utilizzati come tamponamenti nelle costruzioni industriali.

6 Il caso studio della città di Moncalieri

Questo capitolo è dedicato alla valutazione della pericolosità sismica e del rischio sismico del Comune di Moncalieri. La decisione di confrontarsi preventivamente con tutti gli edifici facenti parte della Municipalità nasce dalla necessità di capire, tramite il confronto tra i risultati relativi a diverse tipologie di edifici, quali parametri possano influire in un'analisi a scala territoriale e di quale livello di approfondimento necessitino gli edifici industriali. Infatti, come verrà meglio esplicitato nel capitolo 7, sulla base dei dati definiti per tutti gli edifici dell'intero Comune, gli edifici industriali sono stati caratterizzati in modo più specifico.

6.1 Moncalieri: cenni storici e rischio sismico

Moncalieri è un comune della Città metropolitana di Torino, situato in Piemonte. Il territorio di Moncalieri si compone di una parte prettamente collinare, ricca di boschi e vegetazione, di una zona medio-bassa collinare che comprende il centro storico del paese e la zona del Castello di Moncalieri; la parte fluviale pianeggiante è invece presente a nord (dove è presente un tratto del po' e il torrente Sangone) e sud (dove si ha la confluenza del torrente Chisola sul Po).

Il primo borgo nell'area meridionale di Torino nasce nel 1228 e fino al XVI controlla un vasto territorio che comprende anche le aree sud di Torino (Lingotto-Nizza-Millefonti, Nichelino e La Loggia). Successivamente la città cresce grazie alla sua vicinanza con il Po, diventando, anche grazie alla costruzione del Castello e alla sua strategica posizione collinare, una città importante per i Savoia data la sua difendibilità. Negli ultimi tre secoli di storia la città ha visto sorgere (in particolar modo a partire dal XIX secolo) varie industrie, in particolare nei settori legati all'automobile, del design industriale, dell'editoria e della grafica. Con la crisi del 2009 queste fabbriche vennero tuttavia in buona parte dismesse, anche se rimane particolarmente attiva la zona a sud del comune, ai confini di Trofarello (<https://www.comune.moncalieri.to.it>).

Dal punto di vista del patrimonio culturale, nella città è presente il Castello di Moncalieri, inserito dal 1997 nel patrimonio dell'UNESCO.

Oltre il castello, la maggior parte dei beni culturali sono situati nel borgo antico di Moncalieri, il quale si sviluppa attorno alla piazza principale del suddetto paese, piazzetta Vittorio Emanuele II. Nella zona settentrionale della piazza si ha infatti l'accesso al Palazzo Comunale (al fianco del quale sorge anche la Collegiata S. Maria della Scala e la Chiesa di Sant'Egidio), edificato nel 1778; nella parte sud-orientale è ubicata la Chiesa di San Francesco (costruita nel 1787 per sostituire l'antica chiesa ormai caratterizzata da forte degrado) mentre le altre parti sono caratterizzate dai portici dei palazzi del Duc, dei Grana, de Vassallo da Dogliani e dei Provana, i quali contribuiscono al caratteristico aspetto medievale .

Nella stessa zona, ma in posizione maggiormente defilata sorgono il Real Collegio di Carlo Alberto (ampliato e terminato nel 1858), la Chiesa del Gesù (1619 in stile Barocco) e la Porta Navina (il cui ultimo intervento risale al XIX secolo).

Tra gli altri edifici storici di interesse culturale-artistico si citano ancora le chiese di Santa Croce, Santissima Trinità, Santa Maria di Borgata Testona, il convento e la chiesa di Carmelo San Giuseppe; tra gli edifici si ricordano anche il Castello di Revigliasco, il Castello de La Rotta e l'Abbazia di Santa Maria di Carpice (Cavallaro 2012).

Gli edifici industriali, i quali saranno oggetto di studio nel capitolo 7, sono invece concentrati fuori dal centro storico e si presentano prevalentemente in cemento.

Dal punto di vista sismico, Moncalieri si trova in zona 4, dunque è caratterizzata da una pericolosità sismica molto bassa; in particolare i valori dell'accelerazione massima al suolo risultano essere compresi tra 0.05 e 0.075 (espressi in g).

Le zone interessate da sismicità maggiore sono quelle del fronte occidentale dell'Appennino settentrionale e il suo prolungamento sul Monferrato-Tortonese, la quale ha il suo picco nell'area pinerolese. Le massime intensità macrosismiche a partire dall'anno mille vengono registrate nell'area metropolitana torinese ed in particolare proprio nel comune di Moncalieri, anche se comunque risultano inferiori al 6° grado della scala MCS (Piano Comunale di Emergenza 2015). Il comune infatti, nonostante sia ubicato in zona 4, si trova non lontano da comuni ricadenti invece in zona 3, dunque gli scuotimenti a cui il territorio è soggetto derivano da aree sismogenetiche non lontane. Per questo motivo, il rischio sismico nella città di Moncalieri non è da sottovalutare (https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/approfondimenti/terremoti/rischio_sismico/attiv-sismica-desc.html).

6.2 Costruzione del database

Come evidenziato nel paragrafo 1.3, la costruzione di un database è un passaggio fondamentale per la valutazione del rischio sismico a scala territoriale. Il primo passo è quello di verificare la possibilità di reperire file utili alla composizione del database. La ricerca è improntata verso il reperimento di servizi WMS (capaci di fornire la base per la definizione del territorio), di shape file utilizzabili in QGIS e di notizie circa lo stock abitativo del comune oggetto di studio. I dati digitali devono comunque essere sempre accompagnati da opportune ricerche quali la storia del territorio oggetto di studio, le pratiche costruttive, l'organizzazione urbana e sociale e via discorrendo.

La regione Piemonte, consente di scaricare tramite il sito del Geoportale (<http://www.geoportale.piemonte.it/cms/>) e dall'Arpa Piemonte (<http://www.arpa.piemonte.it/>). In particolar modo il Geoportale della regione Piemonte permette di scaricare file vettoriale, che oltre a contenere dei poligoni descrittivi la forma degli edifici del Comune, conteneva anche delle informazioni fondamentali quali: la destinazione d'uso, l'area, il perimetro, l'altezza e l'epoca di costruzione. L'altezza indicata è stata calcolata dall'Arpa Piemonte come differenza tra i valori medi di DSM (Modello digitale delle superfici) e DTM (Modello digitale del terreno); qualora tale operazione non fosse possibile, è stata comunque attribuita una quota simbolica. Come verrà spiegato in maniera più approfondita nel paragrafo 6.3.1, si è ritenuto importante definire il numero di piani di ogni abitazioni, per tale motivo si sono effettuate le seguenti

suddivisioni sulla base di una relazione ENEA (Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'Energia e lo sviluppo Economico sostenibile) (Margiotta e Puglisi 2009) per cui si è definita:

- altezza di interpiano pari a 3.6 m per edifici costruiti prima del 1820;
- altezza di interpiano pari a 3.5 m per edifici costruiti tra il 1820 ed il 1880;
- altezza di interpiano pari a 3.4 m per edifici costruiti tra il 1880 ed il 1920;
- altezza di interpiano pari a 3.2 m per edifici costruiti tra il 1920 ed il 1960;
- altezza di interpiano pari a 3.0 m per edifici costruiti prima del 1960 ed il 1990;
- altezza di interpiano pari a 2.7 m per edifici costruiti dal 2000 sino ad oggi.

Oltre al numero di piani, si è ritenuto di dover ricavare un'altra caratteristica fondamentale, la tipologia costruttiva. Nota l'epoca, si sono quindi effettuate le supposizioni sotto sintetizzate:

- gli edifici costruiti tra il 1800 ed il 1900 sono in muratura;
- gli edifici costruiti tra il 1900 ed il 2000 presentano una struttura portante in cemento armato e tamponamenti in muratura;
- gli edifici costruiti in epoca dal 2000 in avanti sono costruiti in cemento armato con tamponamenti dello stesso materiale.

Questa suddivisione è stata utilizzata nelle successive fasi di analisi.

6.3 Analisi effettuate su gli edifici di Moncalieri

In questa prima fase, si sono analizzati i 12.499 edifici del Comune di Moncalieri (dato reperito dallo shape file fornito dalla Regione Piemonte) al fine di definire la pericolosità sismica ed il rischio sismico della Municipalità, considerando tutti gli edifici facenti parte dello stesso. Si sono effettuate tre analisi: *Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Analysis*, *Scenario Damage assessment* e *Scenario Risk assessment*.

Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Analysis è stato utilizzato per valutare in modo probabilistico il rischio, in quanto permette di definire le perdite economiche causate da un set di eventi sismici relativi ad un periodo di indagine definito dall'utente. L'output prodotto sono delle mappe relative alla pericolosità sismica e le mappe di rischio sismico espresso in termine di perdite economiche. L'approccio utilizzato è quello basato sulla simulazione Moncarlo, utilizzato comunemente per esprimere incertezze legate ai rischi naturali.

Ogni terremoto è caratterizzato nell'evento stocastico tramite di parametri quali la sua magnitudo, profondità sismogenetica minima e massima e l'ipocentro, in modo tale da simulare un sisma specifico sulle strutture e da permettere un calcolo di tipo deterministico. Il terremoto viene simulato sulla base delle equazioni che prevedono il movimento del terreno (alle quali viene abbinato un logic tree che possa esprimere le incertezze ad essere correlate). Oltre a queste informazioni, la definizione del file richiede di introdurre la Vs30 (in modo che il calcolatore possa generare in maniera opportuna i valori di amplificazione di scuotimento del terreno), il

modello di esposizione (relativo alla popolazione di beni analizzata) e il modello di vulnerabilità per ogni tipo di perdita (si può decidere se definire delle perdite di tipo strutturale, sui contenuti, sugli occupanti e sulle parti non strutturali).

Il principale output (come evidenziato dalla Figura 6-1) di questo calcolo sono le curve relative alle perdite economiche, che descrivono la probabilità di eccedere dei livelli di perdita fissati per un determinato intervallo di tempo; le perdite sono inoltre rappresentate nelle mappe di rischio sismico che, sulla base del modello di esposizione, permettono di conoscere le perdite relative ad ogni bene facente parte del modello (Calderon e Silva 2018).

Un altro output di natura interessante, è quello relativo alle perdite totali per ogni evento sismico calcolate per un determinato periodo di tempo preimpostato.

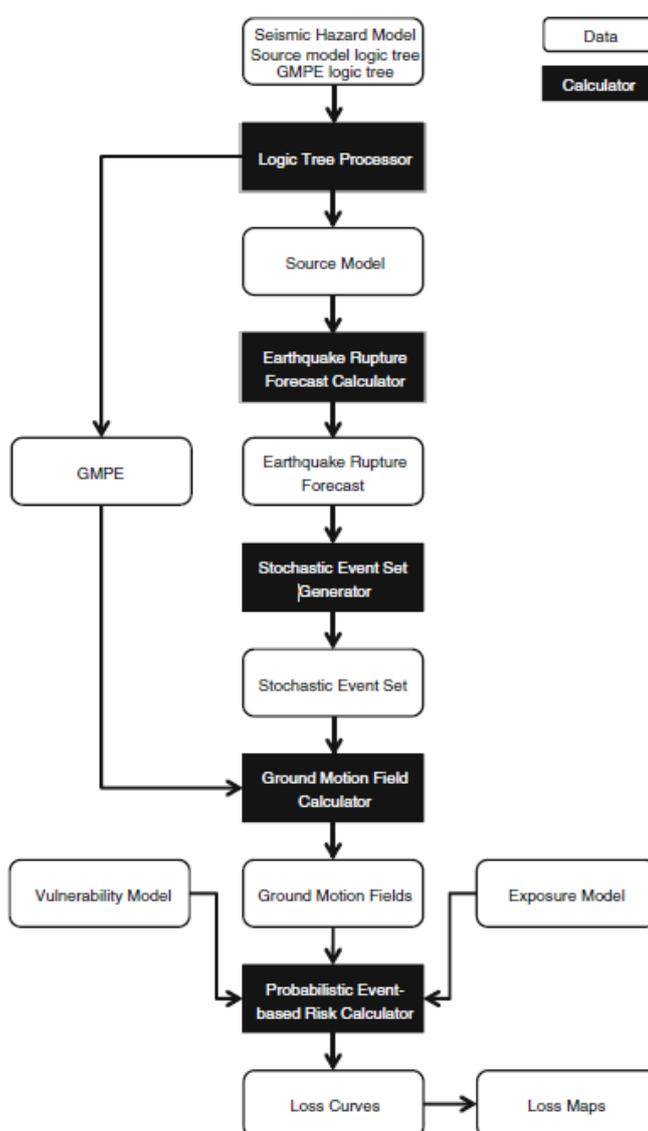


Figura 6-1 Fasi di lavoro del calcolatore Event-based Probabilistic Seismic risk analysis, (Silva, Pagani, et al. 2013)

Questa tipologia di analisi verrà quindi utilizzata per definire la pericolosità sismica del sito in esame e le mappe relative ad eventi stocastici definiti per un determinato periodo di indagine.

L'analisi *Scenario Damage Assessment* permette di calcolare la distribuzione del danno relativo ad un singolo scenario di terremoto sulla base dei dati relativi a tale terremoto (i dati possono essere relativi a eventi sismici storici o simulati) e di un determinato stock di edifici descritto nel modello di esposizione. Il calcolo, il cui funzionamento è illustrato nella Figura 6-2, permette di definire quali edifici e quanti edifici (e quindi di definire anche un percentuale sul totale) raggiungono un determinato livello di danno sulla base del modello di fragilità fornito come file di input. Rispetto a quanto definito per il modello precedente, in cui l'incertezza legata ai dati di input era definita tramite l'ausilio del logic tree, nel caso in esame le caratteristiche relative al singolo scenario di rottura (tra le quali si citano la geometria della faglia, l'ipocentro e la magnitudo) sono definite in maniera deterministica.

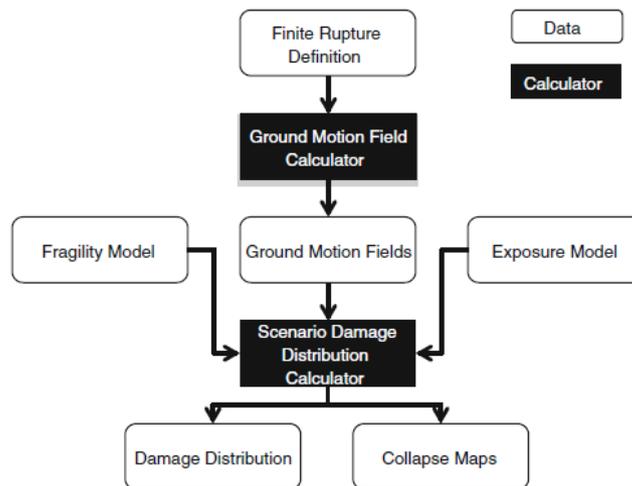


Figura 6-2 Progressione di lavoro del calcolare Scenario Damage Assessment, (Silva, Pagani, et al. 2013)

L'analisi *Scenario Risk Assessment* permette di calcolare le perdite e le perdite statistiche (i due output sono infatti sottolineati nella Figura 6-3) relative ad un singolo evento sismico per un determinato numero di edifici. Il calcolo viene effettuato sulla base di un modello di rottura e di un file GMPE che esprima le incertezze legate ai movimenti del terreno. I file relativi alla rottura del terreno, i modelli di vulnerabilità e di esposizione definiti per gli edifici considerati consentono di calcolare le perdite. Questo modello mira a modellare il fatto che è probabile che siano stati costruiti edifici all'interno di una determinata regione con materiali simili e con tecniche costruttive simili, e quindi il loro comportamento sarà correlato, sebbene non necessariamente in modo perfetto (Silva, Pagani, et al. 2013).

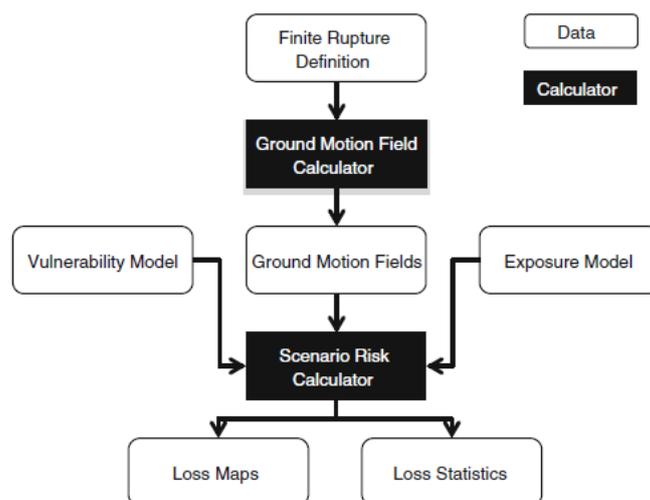


Figura 6-3 Progresso del lavoro nel calcolare Scenario Risk Assessment (Silva, Pagani, et al. 2013)

Nella pratica lo studio della pericolosità a livello probabilistico permette di ottenere i valori massimi relativi ad eventi probabilistici che possono interessare l'aria in esame e anche le perdite (sia economiche che strutturali) avranno carattere probabilistico: essa è utile a fini preventivi, in quanto tiene conto degli eventi che potrebbero verificarsi all'interno di una determinata finestra temporale.

La seconda tipologia di analisi, ovvero quella relativa al singolo scenario sismico, mira a generare un terremoto artificiale o uno storicamente avvenuto, come nel caso di Moncalieri con epicentro in Val Pelice ed in Liguria (nella zona di Imperia): questa fase permette di ottenere informazioni fondamentali nella fase di gestione dell'emergenza sismica, in quanto sulla base dei risultati è possibile prevedere quali saranno gli edifici maggiormente colpiti e quindi elaborare in anticipo delle strategie di protezione civile nella fase immediatamente successiva all'evento considerato.

6.4 Valutazione della pericolosità sismica su gli edifici di Moncalieri

La conoscenza del rischio sismico del comune di Moncalieri presuppone la definizione della pericolosità sismica del territorio interessato. Il funzionamento del software OpenQuake evidenzia questa dipendenza in maniera importante: il calcolo del rischio è subordinato al calcolo della pericolosità sismica, calcolata grazie al fatto che il software simula i movimenti del terreno nell'area interessata. È semplice intuire che la costruzione di un file simile, che descriva in maniera completa la faglia, le rotture nel terreno e la magnitudo, sia sufficientemente complesso da realizzare e per questo motivo molti gruppi si sono occupati di formulare tali file e di renderli opensource: uno di questi progetti è il progetto SHARE (*Seismic Hazard Harmonization in Europe*) la cui evoluzione è sintetizzata nella Figura 6-4: questo ha avuto importanza fondamentale per l'Europa, in quanto per la prima volta si è tentato di uniformare e armonizzare

le caratteristiche ed i parametri sismici a livello europeo, non considerando i confini geografici come motivo di separazione (Giardini 2014).

L'area oggetto dello studio iniziato dal gruppo comprende la dorsale medio atlantica fino all'Est Europa, percorre le zone di subduzione del Mediterraneo e termina con la faglia in Turchia fino alla zona Baltica. La variabilità enorme legata soprattutto alle differenti zone tettoniche nel territorio oggetto di analisi, sottolinea ulteriormente la complessità di definizione di un modello. Il progetto SHARE detiene anche il merito di aver determinato che l'Italia, i Balcani, la Grecia, la Bulgaria, la Romania e la Turchia siano le aree più esposte a livello Europeo al rischio sismico (Woessener, et al. 2015).

Il database alla base di tale studio è stato definito grazie alla consultazione dell'archivio storico dei terremoti europei AHEAD (*European Archive for Historical Earthquake Data*), incrociati poi con i dati rilevati da 1100 faglie attive di lunghezza superiore ai 64'000 km e presenti nell'area citata. I primi due anni del progetto si sono infatti focalizzati sulla raccolta e la compilazione dei dati in modo da creare le basi per futuri modelli e approcci; i successivi mesi sono invece stati dedicati alla creazione di un modello di pericolosità sulla base di riunioni continue e costanti tra esperti provenienti da tutta Europa.

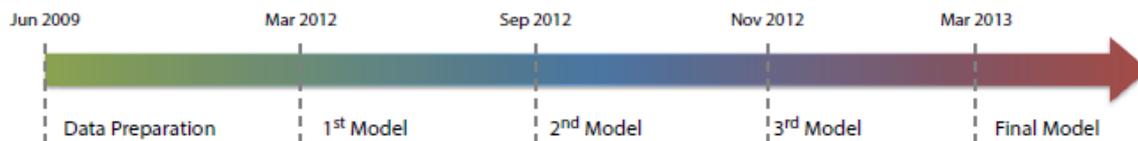


Figura 6-4 Linea del tempo del progetto SHARE (Woessener, et al. 2015)

Il risultato di tale progetto, terminato nel 2013, è un modello globale della pericolosità sismica, l'ESHM13 (*European Seismic Hazard Model 2013*). Il modello lanciato nel 2013 dal progetto SHARE è pensato per l'Europa e la Turchia e come evidenziato nel paragrafo 6.4 supera i confini geografici e mira alla creazione di un database unificato che possa al suo interno includere anche le incertezze ad esso collegate (un esempio è fornito in Figura 5-5 per i terremoti avvenuti tra il 2000 ed il 2006) ed è pensato per quella che allora era la normativa vigente (Eurocode 8). Esso fornisce un punto di riferimento fondamentale per varie applicazioni, dalla preparazione all'evento sismico fino alla pianificazione di strategie di mitigazione del terremoto; il contributo di tale modello è inoltre importante nel caso di modifiche delle normative vigenti e future per la costruzione degli edifici, per una maggiore sicurezza futura e per compiere dei miglioramenti nelle costruzioni pubbliche e private a scala regionale e nazionale per tutta la zona coperta dal modello. Il risultato del modello ESHM13 consiste in più di 500 mappe rappresentanti il livello di scuotimento del terreno che si prevede di raggiungere o superare in un periodo di tempo compreso tra i 70 ed i 5000 anni per una un territorio la quale superficie supera i 120000 km, suddivisi in aree di 10 km.

L'approccio utilizzato dal progetto SHARE, descritto nel paragrafo 6.4.1 in maniera approfondita, presenta un *logic tree* costituito da 900 bracci indipendenti rappresentanti le opinioni degli autori e le diverse parametrizzazioni e assunzioni (Giardini 2014). Il modello ha quindi una rilevanza fondamentale a livello europeo, specialmente per la predizione dei terremoti futuri e tale procedura è stata fondamentale per la collaborazione futura a larga scala con la *Global Earthquake Model* (GEM): il modello ESHM13 è infatti il primo contributo regionale per l'iniziativa della GEM, in quanto il progetto SHARE ha utilizzato il software OpenQuake per definirlo.

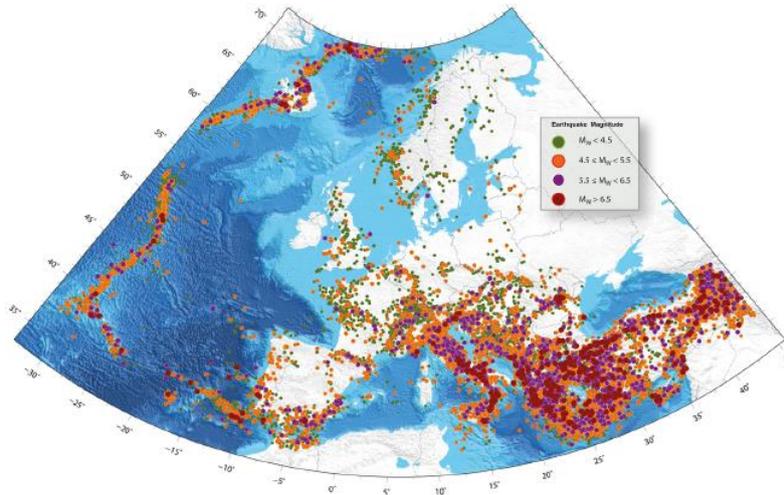


Figura 6-5 *Mappa progetto SHARE: terremoti avvenuti in Europa (con estensione alla Turchia) nel periodo compreso tra il 2000 ed il 2006*

Tutti i dati del progetto SHARE sono aperti e disponibili attraverso il loro sito web e il Fondo Europeo per l'Earthquake Hazard and Risk.

Come evidenziato i modelli del progetto SHARE sono alla base del calcolo della pericolosità del software OpenQuake: essi sono stati oggetto di modifiche da parte della GEM e sono parte integrante del calcolatore utilizzato per il calcolo della pericolosità oggetto di analisi. Nel paragrafo successivo viene appunto illustrato quali modelli sono stati utilizzati nel presente lavoro.

6.4.1 ESHM13-La modellazione dei terremoti

I modelli sviluppati dal progetto SHARE forniscono una modellazione dei terremoti basata su informazioni di carattere tettonico, geologico, sismologico e geodetico, che permettono di calcolare l'attività sismica attuale e di ridistribuire quella futura. Il modello è indipendente dal tempo e presuppone che il terremoto si verifichi con una frequenza media costante senza che l'evento successivo sia subordinato da quello precedente (processo senza memoria).

Le sorgenti vengono definite secondo tre modelli alternativi:

- AS-model (Area Source model): basato sulla definizione di sorgenti areali definite separatamente per ogni attività sismica;
- SEIFA model: le attività sismiche considerate si basano sulla distribuzione di frequenza-magnitudo del catalogo del progetto SHARE;
- FSBG model: basato sull'identificazioni di grandi sorgenti sismiche individuate tramite l'ausilio di dati relative zone tettoniche e alla geofisica.

Area Source Model

Questo modello è stato per anni utilizzato per la valutazione della pericolosità sismica a livello europeo e mondiale. Esso si basa su due concetti principali: il primo è quello secondo cui un terremoto può avvenire in ogni punto di una zona tettonica e il secondo è quello per cui la sismicità terrestre è limitata a profondità massima di 40 km. Le zone tettoniche sono presentate nella Figura 5-6, delimitate dai bordi neri marcati e sono frutto di una valutazione di un gruppo di esperti, i quali si sono occupati di definire anche l'incertezza legato ad ogni confine della zona tettonica. Il grande risultato del seguente modello è quello di racchiudere informazioni provenienti da zone tettoniche completamente differenti, armonizzandone i confini e arrivando ad un modello di 432 aree che ha permesso di ottenere maggiori informazioni su alcune faglie, come per esempio quella presente al sud della Spagna. Il catalogo finale include 8.000 eventi, ma nonostante ciò si tratta anche di un modello con alcune problematiche riguardanti per esempio la mancanza di informazioni delle faglie presenti nella zona nord dell'Europa e la definizione di pochissimi eventi di riferimento (spesso circa ad una decina) per tantissime zone europee.

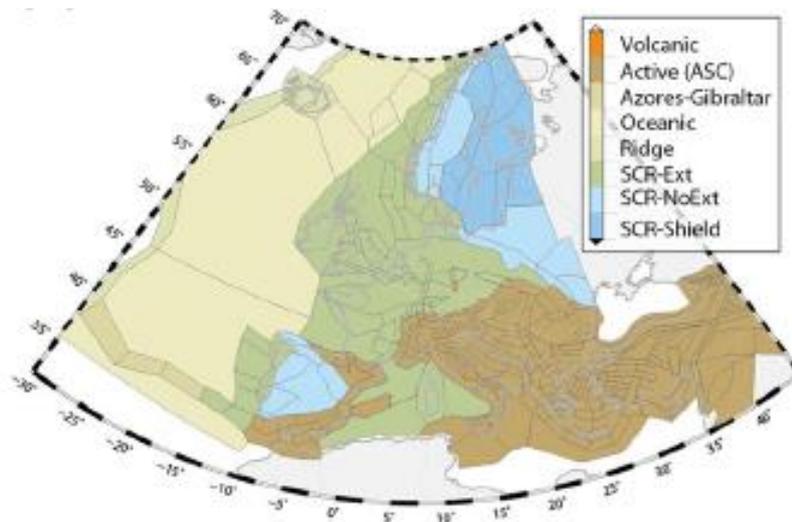


Figura 6-6 Zone tettoniche definite nel modello AS, (Woessener, et al. 2015)

Seismicity and accumulated fault model (SEIFA)

Questo modello risulta essere più raffinato rispetto agli altri modelli, in quanto utilizza delle stime sulla produttività totale e sulla distribuzione frequenza magnitudo provenienti dal catalogo SHEEC (SHARE European Earthquake Catalogue). Il pensiero portante di tale modello è tale per cui il metodo migliore per stimare la produttività e la distribuzione dei sismi sia quello di riferirsi alla distribuzione frequenza-magnitudo dei terremoti passati, in quanto i terremoti futuri si verificheranno con molta probabilità nelle vicinanze di quelli passati e si localizzeranno nelle faglie precedentemente individuate o in quelle di scorrimento. Nella prima fase si sono utilizzati i cataloghi completi, mentre nella seconda fase i tassi di terremoto sono stati distribuiti spazialmente sulla base di una combinazione pesata di due funzioni, rispettivamente di probabilità spaziale e di densità; *“il peso assegnato a ciascuna delle funzioni è deciso in relazione alla magnitudo dei terremoti determinata attraverso esperimenti pseudo prospettici”* (Woessener, et al. 2015). Il modello proposto inizialmente era utilizzabile solo per la California ed è stato solo successivamente implementato per l'Europa, considerando i dati di terremoti avvenuti nei primi 40 km di profondità e le faglie attive. Nel caso delle zone di subduzione, esse sono state modellate separatamente, combinando i modelli del territorio calabrese, di quello ellenico e di Cipro; esse vengono inoltre trattate come faglie attive. Nella Figura 5-7 è rappresentata la previsione del tasso annuale riferito alla sismicità della superficie terrestre.

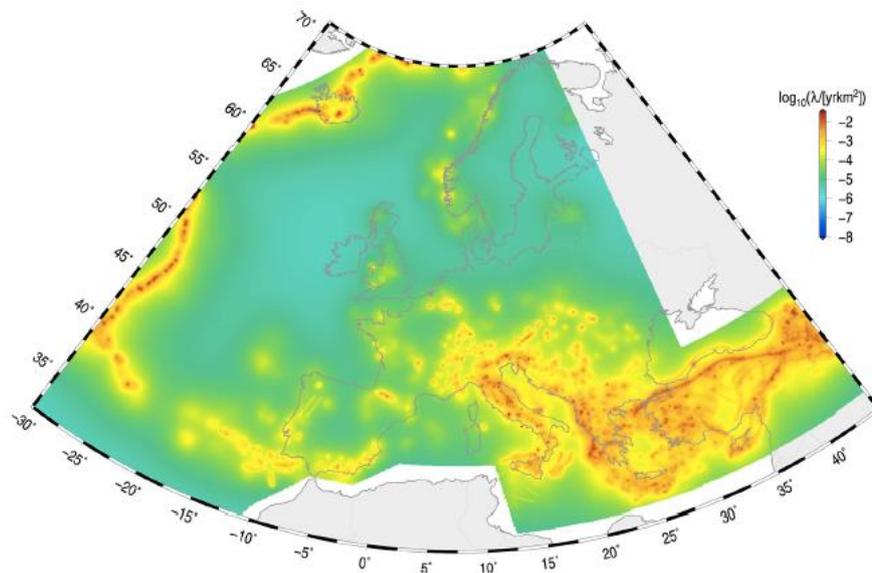


Figura 6-7 Distribuzione de tasso di terremoti atteso secondo il modello SEIFA, (Woessener, et al. 2015)

Fault Source and Background model

In questo modello i tassi di attività delle faglie mappate sono determinate tramite dati reperibili sulle deformazioni e il loro valore dipende principalmente dallo scorrimento e dalla massima

magnitudo delle faglie. L'area di interesse è quella del sud dell'Europa, della Turchia e alcune parti del nord Europa, concentrandosi in particolar modo sulle aree del mediterraneo settentrionale e sull'area nota come *Lower Rhine Embayment*, nell'Europa settentrionale. Come evidenziato nella Figura 6-8, questo modello prevede un movimento maggiore rispetto alle zone caratterizzate da uno scorrimento veloce delle faglie (come ad esempio in Turchia), mentre nel caso delle faglie dell'Europa sud-orientale e dell'Italia in particolar modo, caratterizzate da scorrimento più lento, prevedono una pericolosità da bassa a moderata: questo dipende da come il modello è stato concepito, in quanto si è modellato il tasso relativo alle faglie più veloci in modo che superassero la sismicità osservata di un fattore pari a dieci e si è invece scelto di assegnare dei tassi minori (pari a quelli osservati) per le faglie a scorrimento lento.

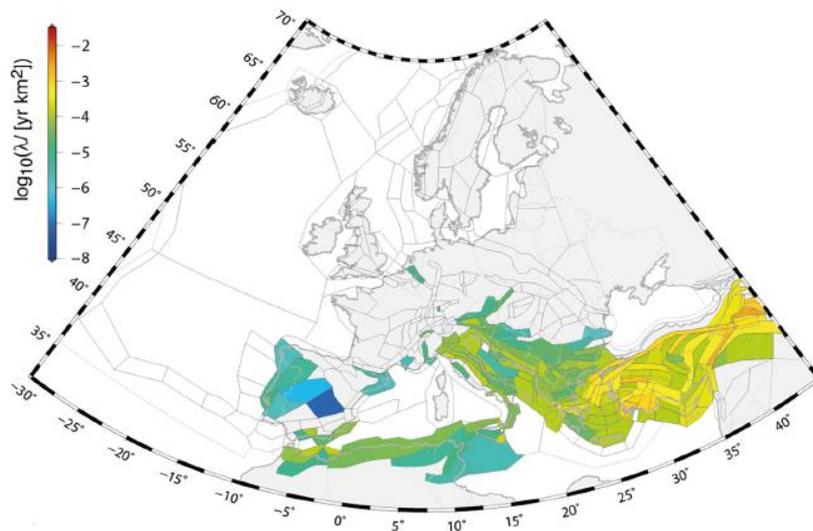


Figura 6-8 Tasso dei terremoti secondo il modello FSGB, (Woessener, et al. 2015)

6.4.2 ESHM13- Il movimento del terreno

Come evidenziato nel paragrafo 6.3 il calcolo della pericolosità presuppone l'inserimento del *logic tree* che simuli i movimenti del terreno (GMPEs). La sua costruzione si basa su una nuova metodologia capace di combinare le conoscenze di esperti europei con dati oggettivi derivanti da dati ricavati tramite procedura iterativa con il fine di prevedere i movimenti futuri del terreno. La fase di test svolti sui dati e la compilazione di un data-set opportuno ha portato alla selezione di quattordici GMPEs che permettono di caratterizzare i movimenti futuri del suolo in relazione a caratteristiche quali: la magnitudo, la profondità e la distanza per ogni tipo di sorgente esistente in Europa. Le equazioni capaci di prevedere i movimenti del terreno si basano proprio su questi dati, che possono contare sull'ausilio del database del progetto SHARE, il quale ne garantisce la solidità. Il database completo contiene 13500 documenti relativi a 2268 eventi derivanti da 3708

stazioni) opportunamente depurato (tramite approccio gerarchico) da eventuali dati superflui o ripetitivi quali doppie voci riguardanti lo stesso evento, informazioni sulle stazioni irrilevanti e forme d'onda.

La composizione finale del database permette il suo utilizzo a livello mondiale, comprendente zone quali l'Europa, il Medio Oriente, la California ed il Giappone.

Le fasi di lavoro sono riassunte da (Woessener, et al. 2015) e sono le seguenti:

- preselezione di un set di GMPEs opportuno per le regioni tettoniche considerate;
- valutazione da parte di esperti, tramite criteri ben definiti, delle equazioni selezionate con il fine di definire se tali equazioni siano realmente idonee per predire i movimenti del terreno di una data regione tettonica;
- test obiettivo delle equazioni selezionate tramite procedura descritta da (Scherbaum, Delavaud e Riggelsen 2009);
- combinazione dei risultati ottenuti dai due punti precedenti all'interno di uno schema pesato;
- valutazione sensitiva dei pesi proposti del *logic tree* per ogni regione tettonica e revisione, nel caso si ritenga necessaria, dei pesi scelti;
- definizione finale dei pesi.

Il processo descritto ha portato alla definizione di quattro equazioni per la crosta superficiale attiva della placca oceanica, cinque per le regioni continentali ritenute stabili; quattro modelli per le zone in subduzione e di un modello per le zone vulcaniche.

6.5 Valutazione del rischio sismico su gli edifici di Moncalieri e preparazione dei file di input

La valutazione del rischio sismico su un insieme di edifici rappresenta il primo step per il miglioramento delle strategie di riduzione del rischio, e generalmente richiede tre componenti: un modello probabilistico di pericolosità sismica, un modello di esposizione per il data-set di edifici e un insieme di curve di vulnerabilità (Silva, Akkar, et al. 2019). La loro preparazione e la discussione della loro utilità sarà descritta nei paragrafi successivi.

6.5.1 Il modello di rottura

La valutazione del rischio sismico è affrontata tramite due tipologie di analisi descritte nel paragrafo 6.3: una mira a prevedere le perdite economiche relative ad un set di eventi stocastici, mentre l'altra presuppone la definizione di un evento sismico ben definito al fine di permettere il calcolo della distribuzione del danno e della perdita economica. Nel primo caso, i movimenti del terreno sono stati definiti tramite l'inserimento del GMPEs, contenente tutte le informazioni atte

a simulare degli eventi stocastici; la seconda tipologia di valutazione richiede invece che siano definiti dei precisi eventi sismici.

Sulla base di quanto appena definito, la scelta dei terremoti da simulare ha richiesto una ricerca atta a definire i terremoti storici a cui l'area è stata soggetta. Sono stati selezionati il terremoto in Val Pellice, nel Pinerolese avvenuto nel 1808 distante circa 55 km da Moncalieri e caratterizzato da magnitudo pari a 5.7, ipocentro posto ad una profondità di 25 km, ed il terremoto del 1887 localizzato ad Imperia e distante da Moncalieri 126 km, di magnitudo 6.3 ed ipocentro posto ad una profondità di 15 km. Il primo terremoto è stato selezionato poiché furono registrati dei danni leggeri nella città di Torino e dunque si suppone che anche a Moncalieri si sentirono gli effetti dell'evento sismico, nonostante gli effetti maggiori furono sentiti prevalentemente nei paesi situati nelle valli dei torrenti Pellice e Chisone con danni gravi e crolli parziali e talvolta totali. Il secondo terremoto ebbe effetti terribili in molte aree, con scosse che interessano in maniera particolari nei territori di Mentone ed Albisola posti nella costa ligure e nella regione montuosa che disegna il confine tra la catena appenninica e le alpi marittime; tale terremoto è stato selezionato in quanto gli effetti vennero sentiti anche a Moncalieri.

Sulla base dei terremoti storici selezionati, si sono valutate in primis le probabilità associate al raggiungimento di ogni stato di danno per i terremoti storici (in quanto valutare le perdite economiche associate agli scenari storici non avrebbe avuto senso data la differente moneta); in una fase successiva si sono considerati i terremoti simulati ad Imperia ed in Val Pellice, di magnitudo crescente da 4.5 a 6, ipotizzando che la profondità dell'ipocentro fosse pari a 10 m.

La tipologia di analisi richiede dei dati aggiuntivi rispetto a quelli inseriti per l'analisi stocastica, quali:

- *hanging wall*: blocco presente sopra la faglia;
- *strike*: angolo misurato in senso orario, formato dalla traccia della faglia con il nord geografico;
- *rake*: è la direzione con cui l'*hanging wall* si muove durante la rottura misurato in relazione allo *strike* ed al piano di faglia, posto pari a 90°;
- *dip*: angolo misurato nel piano verticale tra la linea di massima pendenza sul piano di faglia ed il piano orizzontale.

Tali informazioni non sono reperibili per i terremoti storici, dunque sono stati ipotizzati uguali agli altri scenari simulati.

6.5.2 Il modello di esposizione

Nel modello di esposizione sono stati inseriti 12.499 edifici, descritti, tramite le seguenti informazioni contenute nel modello di esposizione: fid, coordinate geografiche in termini di longitudine e latitudine, tassonomia, costo parametrico per la ricostruzione o per il retrofit dell'edificio e la superficie di ogni edificio determinata con il software QGIS (in quanto si è deciso di utilizzare dei costi per unità di area). Alcune tra le caratteristiche elencate non richiedono un

particolare approfondimento, mentre le altre saranno oggetto di trattazione nei paragrafi successivi.

Definizione della tassonomia

Al fine di verificare l'incidenza di determinati parametri sui risultati delle analisi effettuate, si è ritenuto opportuno definire due tassonomie differenti. Inizialmente si è costruita una tassonomia che contenesse informazioni basilari, reperibili da informazioni presenti nel Geoportale della regione Piemonte, evidenziati nel paragrafo 6.2.

Tale scelta è stata portata avanti in quanto si è deciso di condurre inizialmente un'analisi iperspeditiva, che contenesse informazioni essenziali e semplici da ottenere, data la grande mole di dati trattata. Si è scelto, in primo luogo, di utilizzare come dati per la tassonomia quelli relativi al numero di piani, il materiale, l'epoca di costruzione (o di retrofit) presunta ed il tipo di occupazione. Per quanto riguarda le destinazioni d'uso si sono effettuate le classificazioni in Figura 6-10, in quanto la definizione del seguente attributo ha influenza sull'esposizione dell'edificio: un ospedale o una scuola avrà infatti un indice di esposizione più alto se confrontato con un edificio a destinazione d'uso commerciale o residenziale: questa considerazione dovrebbe trovare conferma negli output riguardanti il rischio sismico, dal momento che il rischio è definito come indicato nel paragrafo 1.4. Per quanto concerne l'inserimento della tipologia del materiale, la sua influenza, come evidenziato anche nella Figura 6-1 sopra riportata, è di primaria importanza.

I dati utilizzati nella prima tassonomia sono quindi:

- il numero di piani: stimati in base all'anno di costruzione e all'altezza complessiva dell'edificio reperita tramite il sito dell'Arpa Piemonte;
- materiale costruttivo: valutato in base all'anno di costruzione. Si sono considerati gli edifici costruiti tra il 1800 e il 1900 in muratura, quelli tra il 1900 e il 2000 in cemento armato con tamponamento in muratura e negli anni successivi al 2000 in cemento armato e pannelli dello stesso materiale;
- destinazione d'uso: si è seguita la differenziazione presente nella tabella attributi dello shape file poligonale, la quale prevedeva una distinzione tra edifici residenziali, industriali, stazione, municipio, sede di scuola, sede di ospedale, commerciale, agricolturale, sede religiosa, non conosciuta;
- anno di costruzione: reperito dal sito del Geoportale.

Sulla base di tali considerazioni e tenendo presente quanto sottolineato da (Stone 2017) si è scartata l'influenza dell'altezza degli edifici (seppur fosse un dato reperibile) e si è preso spunto dalla Figura 6-9 per la scelta dei parametri per costruire la tassonomia.

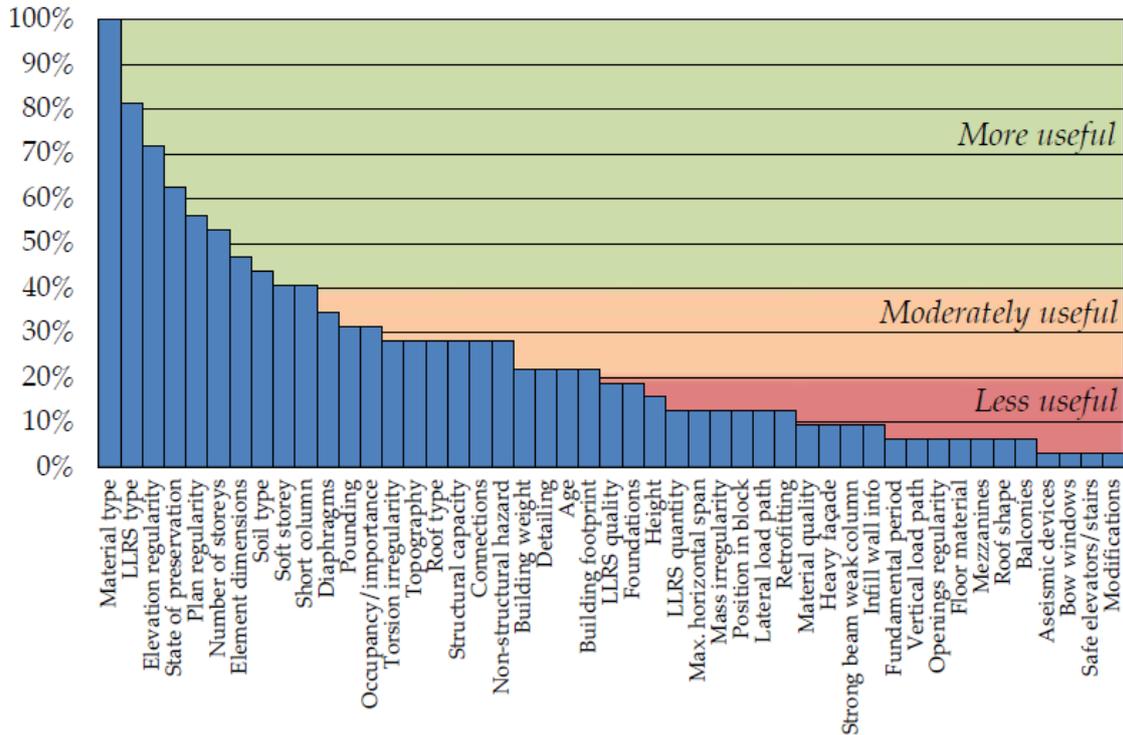


Figura 6-9 Stima dell'utilità di alcuni parametri nell'analisi sismica degli edifici (Stone 2017)

Gli edifici sono stati successivamente catalogati su Excel al fine di definire in maniera più dettagliata le percentuali di edifici in relazione ad una data caratteristica (Figura 6-10) e successivamente, in base alla destinazione d'uso e al numero di piani (tenendo come parametro fisso il dato relativo all'epoca di costruzione), i dati sono stati incrociati ed i risultati sono stati riportati nella Figura 6-11 e nella Figura 6-12 al fine di avere successivamente più chiari i risultati e da poter dedurre informazioni fondamentali quali:

- la maggior parte degli edifici sono stati costruiti con telaio in cemento armato e tamponamenti in muratura e sono stati costruiti tra il 1920 ed il 1960;
- gli edifici industriali (composti per la maggior parte da edifici in cemento armato e pannelli dello stesso materiale) sono stati costruiti per la maggior parte nel ventesimo secolo;
- trattandosi di un centro abitato di dimensioni ridotte gli ospedali, le scuole e le chiese sono presenti, ma in numero ridotto;
- la maggior parte degli edifici ha una destinazione d'uso residenziale e, quando essi sono in muratura, sono per lo più localizzati nel centro storico;
- la maggior parte degli edifici ha un solo piano piano, a seguire il numero di edifici con più piani diminuisce al crescere del numero dei piani. Le percentuali considerate riguardano solo gli edifici fino a sette piani, in quanto gli edifici con più piani non risultano essere incidenti sul numero totale.

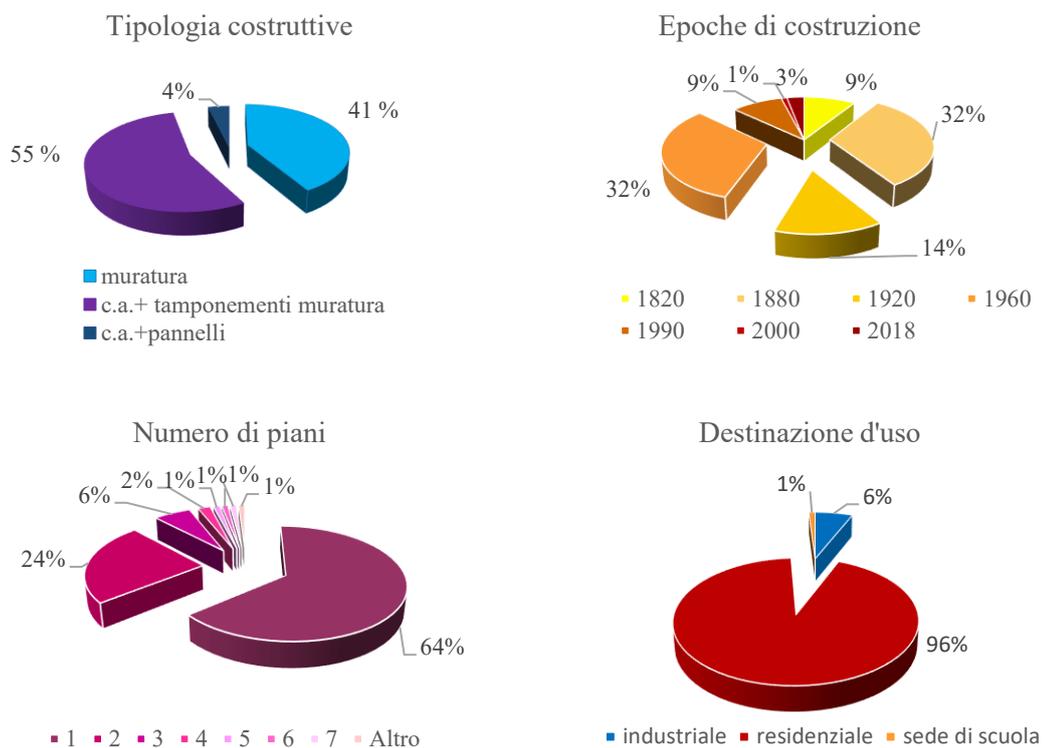


Figura 6-10 Grafici riassuntivi rappresentanti i parametri scelti per la definizione della tassonomia ultra-speditiva

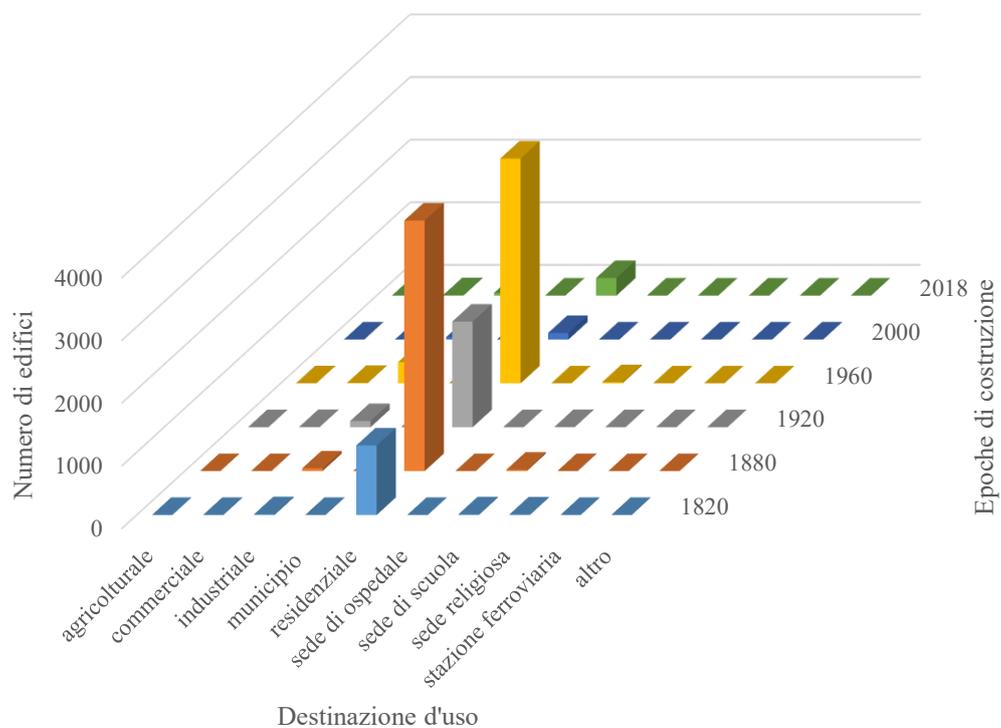


Figura 6-11 Classificazione degli edifici in base a epoca e destinazione d'uso

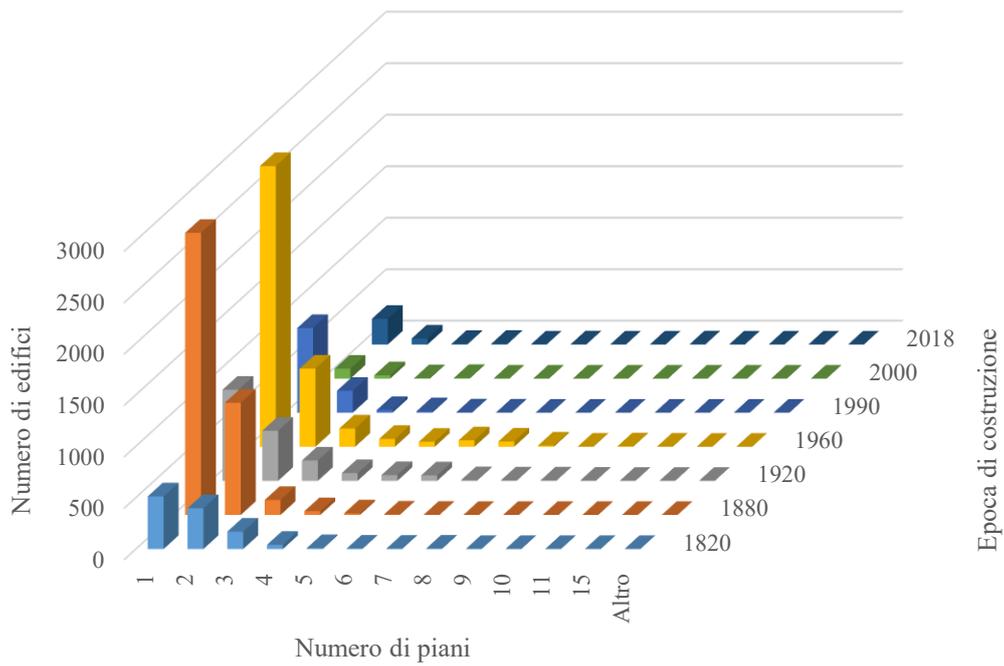


Figura 6-12 Classificazione degli edifici in base all'epoca e al numero di piani

Al fine di comunicare in modo efficace le caratteristiche degli edifici considerati, si è scelto di spazializzare (utilizzando come base l'Ortofoto fornita dalla Regione Piemonte <http://www.dati.piemonte.it/catalogodati/>) la distribuzione dei parametri. I risultati sono visibili nella Figura 6-13 (destinazione d'uso), Figura 6-14 (epoca), Figura 6-15 (tipologia costruttiva) e Figura 6-16 (numero di piani).

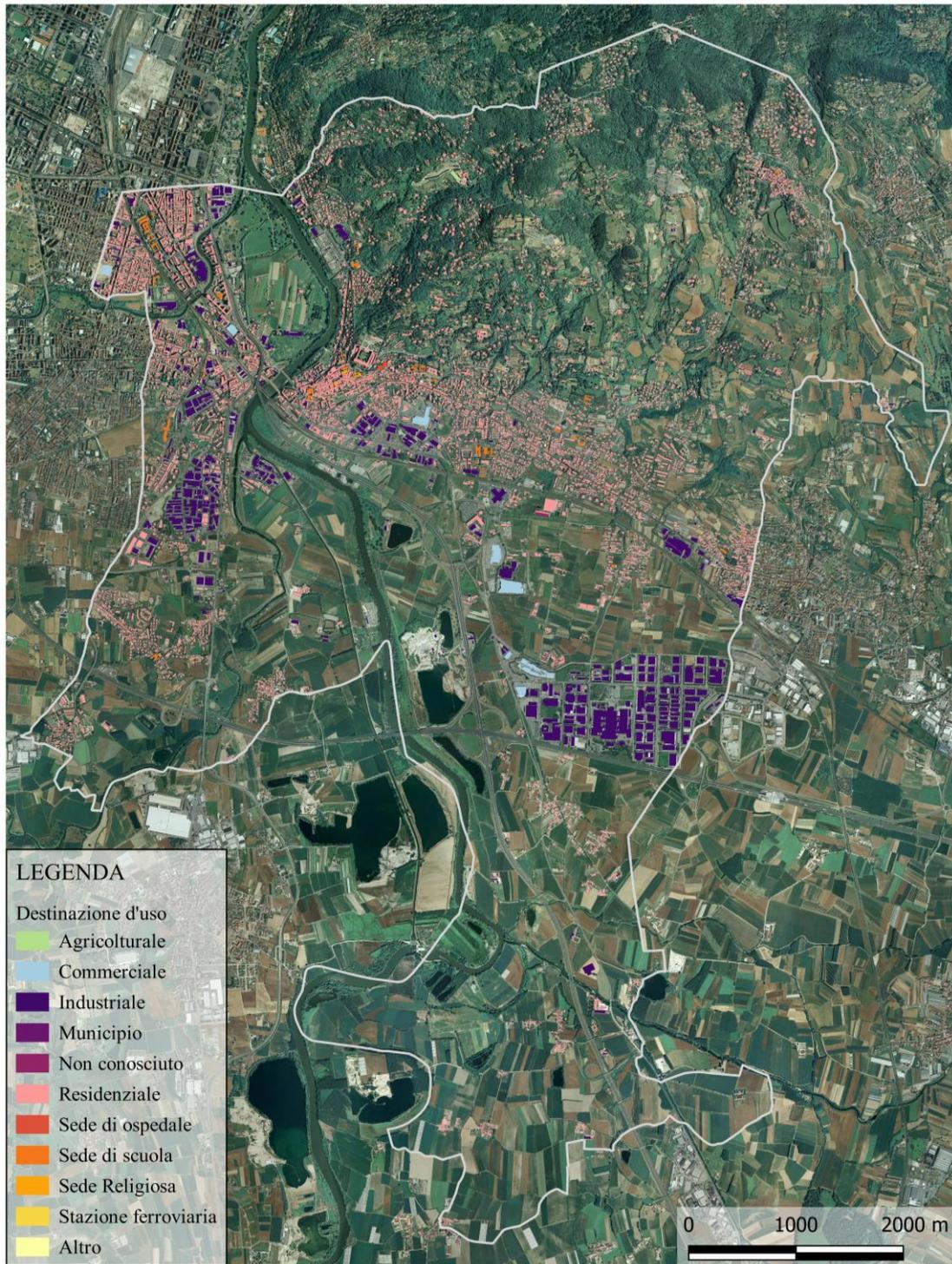


Figura 6-13 Ortofoto di Moncalieri con classificazione degli edifici in base alla destinazione d'uso, QGIS

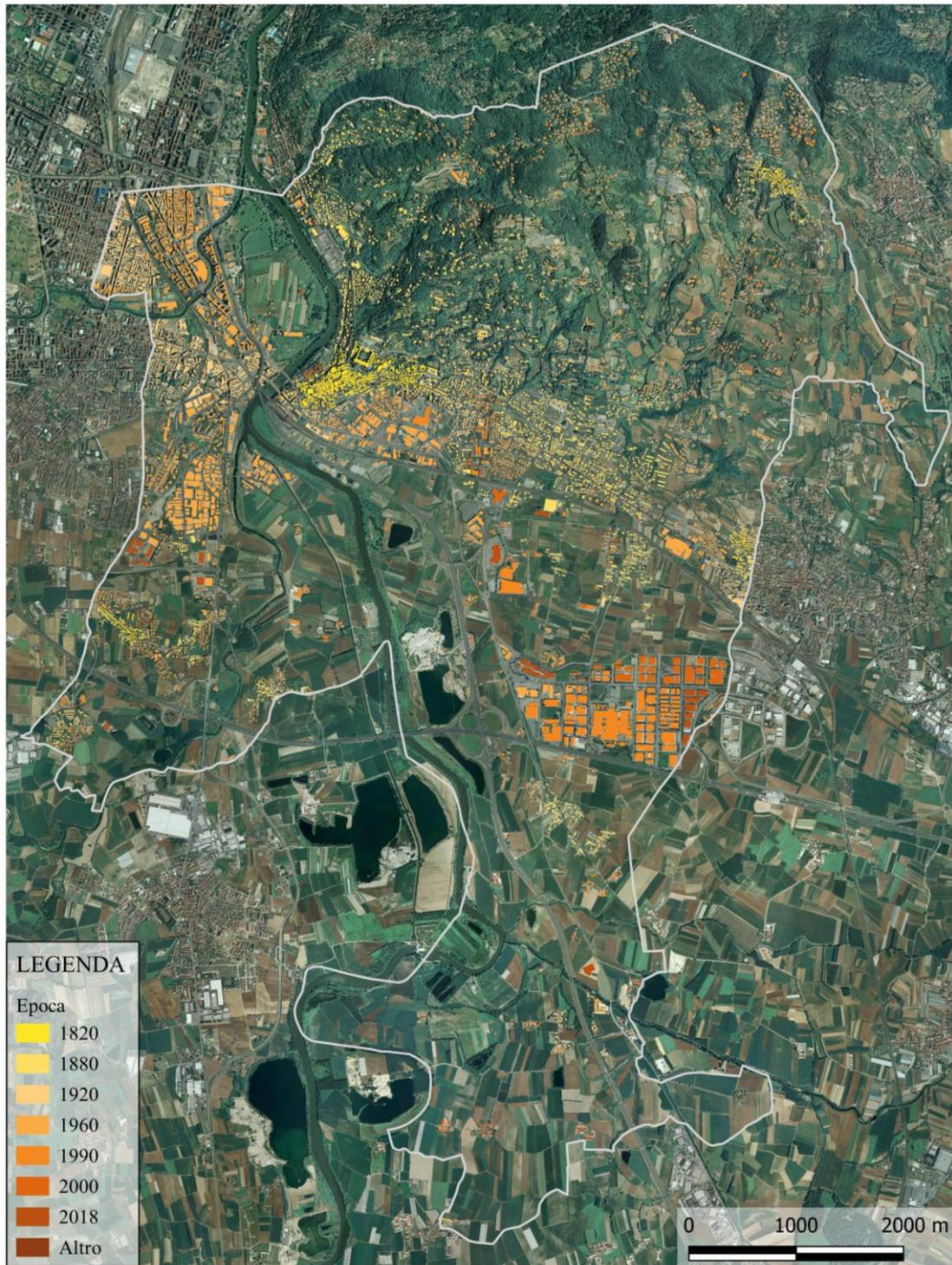


Figura 6-14 Ortofoto di Moncalieri con classificazione degli edifici in base all'epoca di costruzione, QGIS

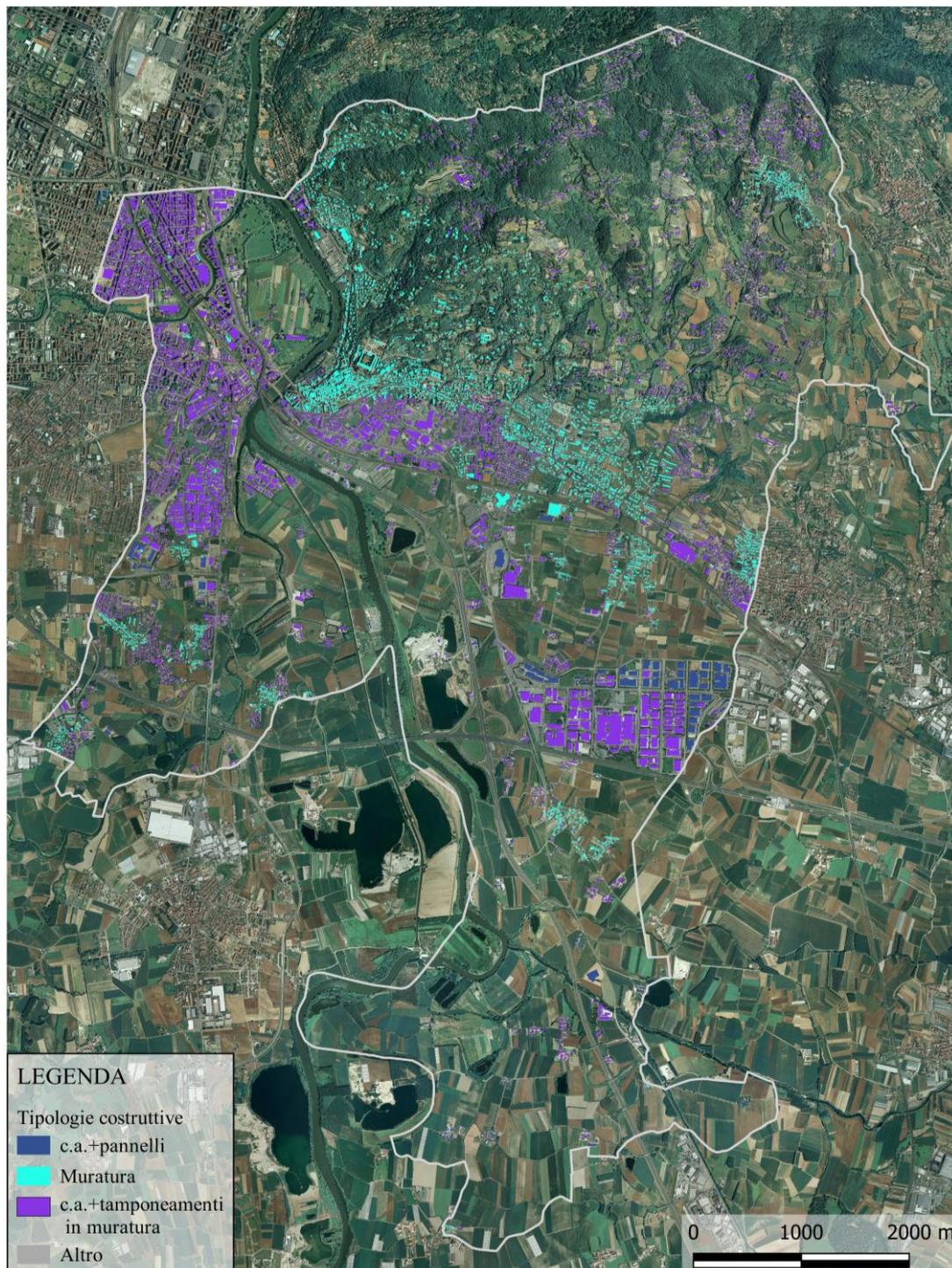


Figura 6-15 Ortofoto di Moncalieri con classificazione degli edifici in base alla tipologia costruttiva, QGIS



Figura 6-16 Ortofoto di Moncalieri con classificazione degli edifici in base al numero di piani, QGIS

Sulla base di questi primi parametri, si sono determinate 116 tassonomie, di cui alcuni esempi sono visualizzabili nella Tabella 6-1.

TASSONOMIA 1
M99/HEX:1/YEX:1880/RES
CR/HEX:1/YEX:1960/IND/EWMA
CR/HEX:2/YEX:1960/RES/EWMA
CR/HEX:6/YEX:1960/RES/EWMA
M99/HEX:1/YEX:1880/RES
CR/HEX:1/YEX:1920/RES/EWC
CR/HEX:2/YEX:1920/RES/EWMA
M99/HEX:2/YEX:1820/RES
M99/HEX:4/YEX:1820/RES
M99/HEX:1/YEX:1880/RES
M99/HEX:2/YEX:1880/RES
CR/HEX:1/YEX:1960/IND/EWMA
CR/HEX:1/YEX:1960/RES/EWMA
M99/HEX:1/YEX:1880/RES
C99/HEX:1/YEX:2018/RES/EWMA
CR/HEX:1/YEX:1960/RES/EWMA
CR/HEX:2/YEX:1990/RES/EWMA
M99/HEX:1/YEX:1880/RES
M99/HEX:1/YEX:1880/RES
M99/HEX:2/YEX:1820/RES
CR/HEX:1/YEX:1920/RES/EWMA
M99/HEX:2/YEX:1820/RES
C99/HEX:1/YEX:2000/IND/EWC
CR/HEX:1/YEX:1960/IND/EWMA
CR/HEX:1/YEX:1960/RES/EWMA
CR/HEX:8/YEX:1960/RES/EWMA
M99/HEX:1/YEX:1820/RES
M99/HEX:1/YEX:1880/RES
M99/HEX:2/YEX:1880/RES
M99/HEX:2/YEX:1880/RES
CR/HEX:1/YEX:1960/EDU/EWMA
M99/HEX:2/YEX:1880/RES
M99/HEX:1/YEX:1880/RES
CR/HEX:1/YEX:1960/EDU/EWMA
CR/HEX:1/YEX:1990/IND/EWC
CR/HEX:1/YEX:1960/EDU/EWMA
CR/HEX:2/YEX:1920/RES
M99/HEX:1/YEX:1880/RES
CR/HEX:1/YEX:1920/RES/EWMA
CR/HEX:2/YEX:1990/RES/EWMA
CR/HEX:5/YEX:1920/RES/EWMA
CR/HEX:6/YEX:1960/RES/EWMA
M99/HEX:1/YEX:1880/RES
M99/HEX:2/YEX:1820/RES
CR/HEX:1/YEX:1960/IND/EWC

Tabella 6-1 Esempio di tassonomie utilizzate per la prima analisi

Stima di parametri aggiuntivi e costruzione di una seconda tassonomia

Al fine di verificare quale sia l'influenza di ulteriori indici sull'analisi svolta, nella seconda fase dell'analisi, si sono aggiunti tre diversi parametri per l'elaborazione di una nuova tassonomia più precisa. In particolare la scelta è ricaduta:

- su LLRS (Lateral load-resisting system);
- sulla regolarità in pianta;
- sulla posizione dell'edificio (inteso come la definizione della vicinanza dell'edificio ad un altro o sulla caratterizzazione dell'edificio inteso come isolato).

Per quanto concerne “*LLRS type*” (*Load Later Resisting System*) si è optato per una stima approssimata, relativa al materiale portante dell'edificio. Nel caso in cui si trattasse di muratura portante si è impostato “*Wall*”, nel caso delle per le costruzioni in cemento armato (e pannelli dello stesso materiale) si è utilizzato l'attributo “*Moment frame*”; nel caso delle costruzioni composte sia da cemento armato che da muratura, si è deciso di impostare come LLRS type “*Moment frame*”, dal momento che si tratta di un telaio in c.a. con tamponamento in muratura.

La definizione della regolarità in pianta è avvenuta utilizzando preventivamente la funzione di “Geometria di delimitazione” del software QGIS, la quale permette di circoscrivere il poligono all'interno di una figura geometrica rettangolare o quadrata che meglio ne approssimi la forma.

Sulla base di questa prima fase di elaborazione dei dati e sulla base del calcolo dell'area dei poligoni esistenti (estratti dal Geoportale come shape file) e del poligono di delimitazione, è stato creato uno script Python che permettesse di distinguere, utilizzando questi parametri in modo appropriato, se il poligono fosse un quadrato, un rettangolo o una figura differente.

La distinzione precedentemente descritta è stata effettuata sulla base delle seguenti osservazioni (la cui validità è stata confermata da controlli a campione):

- se il rapporto tra i lati (tra il lato lungo ed il lato corto del poligono che circoscrive il poligono esistente) è compreso tra 1 e 1.1 e il rapporto delle aree (quella del poligono reale e quello dell'area che lo circoscrive) è inferiore di 1.1 la figura è un quadrato;
- se il rapporto tra i lati (si tratta come spiegato sopra dei lati della geometria che circoscrive il poligono) è minore di 1 o maggiore di 1.1 ma il rapporto tra le aree (intese come sopra descritto) è compreso tra 1 e 1.1 allora si tratta di un rettangolo;
- nel caso in cui le condizioni sopra elencate non sono soddisfatte, la figura analizzata è classificata come “altra figura” e considerata successivamente come non regolare.

Al fine di ottenere tale classificazione, si è utilizzata “Pandas”, una libreria di Python dotata di strumenti fondamentali e pratici per la gestione di grandi dataset. “*La libreria è provvista di procedure integrate ed intuitive per effettuare delle manipolazioni di dati comuni e analisi su tali set di dati*” (McKinney 2011). L'utilità consiste nel poter lavorare in maniera semplice ed efficace con dei data-set strutturati-comuni a molteplici campi di studio (nel caso in esame derivanti da QGIS e quindi in formato .csv) e quindi di elaborare un metodo speditivo al fine di distinguere, seppur in modo grossolano, le varie tipologie di edifici in tre grandi categorie come sopra

descritto. Il risultato proposto è stato ottenuto per mezzo del codice e della classificazione mostrata in Figura 6-16; in Figura 6-17 è invece evidenziata la prevalenza di figure di forma irregolare e di forma rettangola, con presenza invece ridotta di edifici quadrati: questa prima approssimazione può senza dubbio sembrare corretta, in quanto osservando il comune in pianta si potrebbe arrivare alle stesse conclusioni.

```

*definizione_della_forma.py - C:\Users\danie\Desktop\TESI\Tesi_data\PYTHON\definizione_d...
File Edit Format Run Options Window Help
#definire la forma dell'edificio
import pandas as pd
Tabella = pd.read_csv ("confronto_aree.csv", sep=";", header= 0)
#print (Tabella)
lato_corto=Tabella.loc[:, 'Shrt_axis']
#print (lato_corto)
lato_lungo=Tabella.loc[:, 'Lng_axis']
#print (lato_lungo)
area_rett=Tabella.loc[:, 'area_rett']
#print (area_rett)
area=Tabella.loc[:, 'area']
#print (area)
import operator
import numpy as np
rapp_lati=(lato_lungo/lato_corto)
rapp_ree=(area_rett/area)
rapporto_lati=round(rapp_lati,3)
rapporto_ree=round(rapp_ree,3)
print (rapporto_lati)
print (rapporto_ree)
Tabella['rapporto_lati']=rapporto_lati
Tabella['rapporto_ree']=rapporto_ree
print (Tabella)
Tabella.to_csv('confronto_aree.csv')
import pandas as pd
lettore= pd.read_csv ("rapporti_tutti.csv", sep=";", header= 0)
print (lettore)
fig_type=0
#filling new column 'fig_type' according to conditions
lettore.loc[(Tabella['rapporto_lati'] >= 1) & (Tabella['rapporto_lati'] <= 1.1)
lettore.loc[(Tabella['rapporto_lati'] >= 1.1) | (Tabella['rapporto_lati'] <= 1)
# at last fill all other types that we didn't cover
lettore['fig_type'].fillna('altra figura', inplace=True)
lettore.to_csv('rapporti_tutti.csv')

```

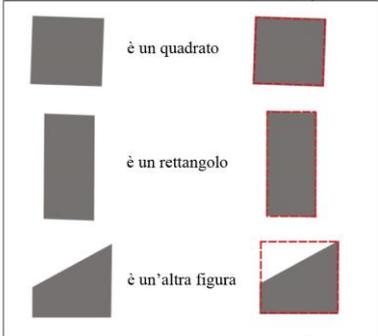


Figura 6-17 Esempio del codice utilizzato e classificazione degli edifici

Geometria dell'impronta dell'edificio

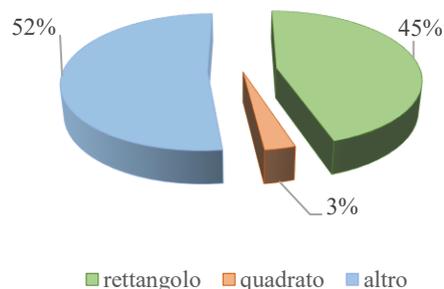


Figura 6-18 Percentuale di edifici aventi una tipologia di impronta

La Figura 6-17 mette in luce il fatto che questa prima divisione può risultare utile in quanto la maggior parte degli edifici verrà classificata come irregolare e, sarà possibile visualizzare quale sia l'influenza di tale parametro. Il secondo parametro che si è scelto di aggiungere è invece relativo alla posizione dell'edificio nel blocco. Data l'impossibilità di lavorare con la matrice di distanza considerando la distanza di un edificio rispetto a tutti gli altri che si trovano in prossimità dello stesso, si è utilizzata una procedura semplificata. Al fine di stimare l'effettiva utilità di tale parametro si è ricavata per ogni edificio la minima distanza rispetto all'edificio che si trova nella posizione più prossima utilizzando il Plug in di Qgis NNjoin che funziona con file vettoriali di input. Il motivo per il quale si è scelto di effettuare di utilizzare ed aggiungere quest'informazione nella tassonomia è legato al fatto che *se la distanza tra costruzioni adiacenti non è adeguata possono insorgere fenomeni di vibrazione fuori fase se gli edifici hanno differenti caratteristiche dinamiche* (Jeng-Hsiang e Cheng-Chiang 2001). Questo tipo di analisi è molto importante per le abitazioni che si trovano nei centri storici in quanto il fenomeno di martellamento (Figura 6-19) tende a verificarsi nelle aree urbane a causa della poca distanza ivi esistente (Isteita e Porter 2017).

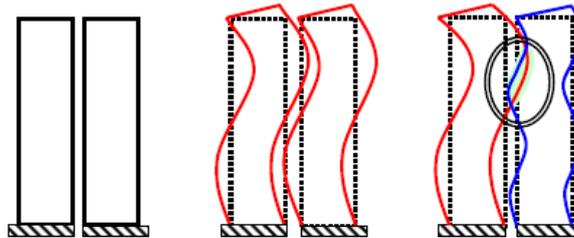


Figura 6-19 Comportamento differente di due costruzioni adiacenti (Dogan e Gunaydin 2009)

Data l'impossibilità di condurre un'analisi specifica su tutti gli edifici che richiederebbe un'analisi relativa al periodo naturale dell'edificio, si è scelto un valore discriminante pari a 0.5 metri (si è infatti considerata la possibilità che spesso la distanza risulta esistere solo per motivazioni legati alla rappresentazione) per definire se un edificio fosse immediatamente adiacente ad un altro o meno. Nonostante la scelta risulti sicuramente dettata da ragionamenti semplificati, si è ritenuto comunque interessante valutare quale fosse l'influenza dell'aggiunta di tale parametro, considerando che gli edifici sono così divisi.

La definizione di tali parametri aggiuntivi ha condotto alla definizione di 299 tassonomie, numero nettamente maggiore rispetto a quello evidenziato per la tassonomia iper speditiva. L'aggiunta di soli questi due parametri ha richiesto sicuramente uno sforzo aggiuntivo e ha richiesto una mole di tempo considerevole, richiesta sia per la scrittura di codici (nonostante si tratti di codici semplici), sia uno studio effettuato sulle possibilità di effettuare delle analisi con il software. Perché si è scelto quindi di condurla? Il fine è quello di dimostrare che lavorare con dei data-set con uno stock di edifici numerosi sarebbe complesso e soprattutto oneroso se richiedesse delle analisi in sito o delle visite nel luogo in cui si sta effettuando l'analisi, per questo motivo compito

del pianificatore e dei tecnici è trovare degli strumenti surrogati che possano semplificarli il compito. Come evidenziato infatti nel paragrafo 2.2, gli strumenti di *Processing* di QGIS sono uno strumento fondamentale durante questo processo di analisi dei dati. Di seguito, Tabella 6-2 si riportano degli esempi delle tassonomie utilizzate in questa seconda fase.

TASSONOMIA 2
CR/LFM/HEX:1/YEX:2000/COM+COM2/BPD/PLFR/IRRE/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:2000/IND/BP1/PLFR/IRRE/EWC/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:2000/IND/BPD/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN/EWC/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:2000/IND/BPD/PLFR/IRRE/EWC/FC
CR/LFM/YEX:2000/RES/BP1/PLFR/IRRE/EWMA/FC
CR/LFM/YEX:2000/RES/BP1/PLFR/IRRE/EWMA/FC
CR/LFM/YEX:2000/RES/BP1/PLFR/IRRE/EWMA/FC
CR/LFM/YEX:2000/RES/BPD/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN
CR/LFM/YEX:2018/COM+COM2/BPD/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN
CR/LFM/HEX:1/YEX:1920/IND/BPD/PLFP/IRIR+IRPP:TOR+IRPS:IRN/EWMA/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:1920/IND/BPD/PLFR/IRRE/EWMA/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:1920/RES/BP1/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN/EWMA/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:1920/RES/BP1/PLFR/IRRE/EWMA/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:1920/RES/BPD/PLFSQ/IRRE/EWMA/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:1960/IND/BPD/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN/EWMA/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:1960/RES/BP1/PLFR/IRRE/EWMA/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:1960/RES/BPD/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN/EWMA/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:1960/RES/BPD/PLFR/IRRE/EWMA/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:1990/IND/BPD/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN/EWMA/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:1990/RES/BP1/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN/EWMA/FC
CR/LFM/HEX:1/YEX:1990/RES/BP1/PLFR/IRRE/EWMA/FC
M99/LWAL/HEX:1/YEX:1820/ASS+ASS1/BP1/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN
M99/LWAL/HEX:1/YEX:1820/ASS+ASS1/BP1/PLFR/EWMA
M99/LWAL/HEX:1/YEX:1820/COM+COM6/BPD/PLFR/EWMA
M99/LWAL/HEX:1/YEX:1820/RES/BP1/PLFR/EWMA
M99/LWAL/HEX:1/YEX:1820/RES/BPD/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN
M99/LWAL/HEX:1/YEX:1820/RES/BPD/PLFR/EWMA
M99/LWAL/HEX:1/YEX:1880/EDU+EDU2/BPD/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN
M99/LWAL/HEX:1/YEX:1880/RES/BP1/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN
M99/LWAL/HEX:1/YEX:1880/RES/BP1/PLFR/EWMA
M99/LWAL/HEX:2/YEX:1820/RES/BP1/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN

Tabella 6-2 Esempio di tassonomie utilizzate per la seconda analisi

Come evidenziato dalla Tabella 6-1 e 6-2 la definizione del materiale rappresentante la chiusura verticale del telaio in cemento armato è stata inserita aggiungendo l'attributo "EWMA" (chiusura esterna in muratura) o "EWC" (chiusura esterna in cemento armato), "LLRS" nella tassonomia 6-2 è stato distinto in "LWAL" per la muratura e in "LFM" per gli edifici in cemento armato (di entrambe le tipologie), l'irregolarità o la regolarità è stata assegnata tramite codice specifico di OpenQuake evidenziato nella tassonomia più approfondita. La caratteristica "isolato" o "non isolato" è invece espressa tramite l'ausilio del codice "BDP" (isolato) o BP1 (adiacente ad un altro edificio).

Dopo aver evidenziato le differenze nella tassonomia, nella successiva trattazione si farà riferimento alle strutture in cemento armato e chiusure in muratura come “cemento armato e muratura” e a quelle in cemento armato e pannelli come “cemento armato”.

Stima del valore economico

Come evidenziato in precedenza nel paragrafo 1.2.4 oltre alla definizione della distribuzione spaziale delle costruzioni è fondamentale definire il valore economico associato alla perdita, “*al fine di creare dei piani di emergenza post disastro e di progettare delle strategie per la mitigazione del rischio sismico*” (Chaulagain, et al. 2015). In questo lavoro la scelta è stata quella di assegnare come costo di ricostruzione, quello attualmente sul mercato per costruzioni della stessa tipologia, legato quindi non solo all’area, ma anche al materiale ed alla zona in cui il bene è ubicato. La stima è stata effettuata sulla base del Decreto del Presidente della Repubblica del 9 settembre 2016 definito per la ricostruzione degli edifici ubicati nei luoghi colpiti dal sisma del 24 agosto 2016 per le regioni di Abruzzo, Lazio, Marche e Umbria. Si sottolinea che, dal momento che la stima del danno a seguito dell’evento non era in nessun modo effettuabile nel caso di Moncalieri, si è supposto un livello operativo, considerando il fatto che la Moncalieri si trovi in zona 4 e quindi in una zona a bassa sismicità. Per la stima del costo al mq è necessario stimare il livello operativo da considerare sulla base della preventiva definizione di due parametri da cui esso dipende: lo stato di danno e la vulnerabilità. Si è supposta una vulnerabilità bassa (coerente con la sismicità della zona) e uno stato di danno di livello due, ovvero riferito ad edifici danneggiati in modo importante, ma con minor diffusione nel fabbricato. Al fine di agevolare il lettore, nella tabella sovrastante sono definiti i valori in relazione ai mq e al livello operativo.

Costo parametrico	Livello operativo L0	Livello operativo L1	Livello operativo L2	Livello operativo L3	Livello operativo L4
Fino a 130 mq.	400	850	1100	1250	1450
Da 130 a 220 mq.	330	750	900	1100	1250
Oltre i 220 mq.	300	650	800	950	1100

Tabella 6-3 Costi di ristrutturazione post evento sismico, (D.P.R, 7 aprile 2017)

Per gli edifici residenziali non vincolati e non facenti parte del centro storico si è utilizzato un valore di 650 €/ m² di base; si è poi incrementata tale somma del 40% nel caso di edifici di interesse culturale quali chiese ed edifici vincolati dalla sovrintendenza (chiese, il castello di Moncalieri, Municipio ecc), mentre si è applicato un supplemento del 20% nel caso di edifici facenti parte del centro storico supponendo che essi siano soggetti a vincoli particolari (D.P.R 7 aprile 2017).

6.5.3 Costruzione del modello di vulnerabilità

Come evidenziato nel paragrafo 2.1.4 riguardante il file di esposizione, si è sottolineato che per ogni tassonomia deve definita una curva di vulnerabilità. Nel caso in esame si è scelto in primo luogo di utilizzare due tipologie di curve differenti per edifici non monumentali e per edifici monumentali, e successivamente, per gli edifici non monumentali di distinguere le curve in base a due parametri: il materiale ed il numero di piani.

La difficoltà maggiore nella definizione delle curve di vulnerabilità è legata al fatto che le esse debbano essere espresse in funzione della PGA (per evitare conversioni dall'intensità macrosismica alla PGA) per poter essere lette nel software e che debbano, preferibilmente essere state elaborate per l'Italia, in modo tale da rappresentare in maniera migliore le caratteristiche dello stock di edifici considerati. Si sono quindi preventivamente scelte le curve di fragilità sulla base del database disponibile dal *Fragility Functions Manager* della SYNER-G e poi si sono eseguite le seguenti operazioni:

- scelte le curve di fragilità, si sono ricavati i valori tramite l'ausilio di uno strumento per la lettura dei dati nelle curve (selezionate dal software Fragility Manager Tool) <https://apps.automeris.io/wpd/> che hanno permesso di stimare la probabilità che si verifichi un certo livello di danno (ordinate) in relazione ad una certa intensità (ascisse) ;
- i valori di probabilità trovati devono essere successivamente moltiplicati per il *Central Damage Factor*;
- in relazione ai valori assunti dalle curve di fragilità, si definiscono degli intervalli appropriati di *Peak Ground Acceleration* (PGA).

Per quanto concerne la prima fase di elaborazione (la scelta delle curve di fragilità), sono state scelte due tipologie di curve differenti per il cemento armato e la muratura.

Edifici in muratura non monumentali

Per quanto concerne gli edifici in muratura non monumentali sono state utilizzate le curve di (Borzi, Crowley e Pinho 2008b) create proprio con riferimento all'Italia sulla base di un metodo analitico statico non lineare, in cui la probabilità di superamento di un certo livello di danno è riportata in relazione alla PGA: Le curve sono riportate nelle Figure sottostanti, per edifici fino a 2 piani (Figura 6-20), fino a 3 piani (Figura 6-21), fino a 4 (Figura 6-22) e da 5 piani in su (Figura 6-23).

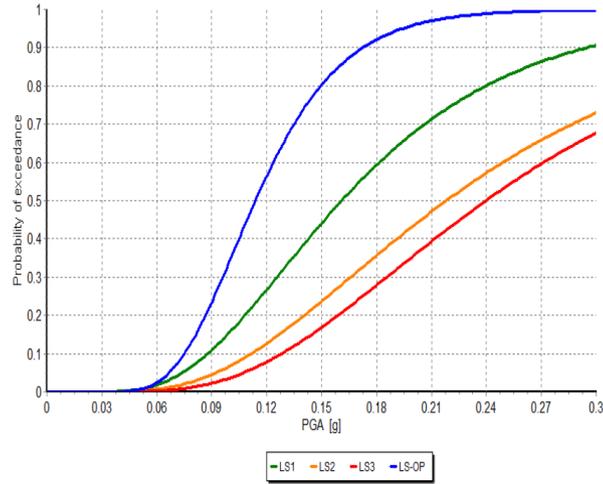


Figura 6-20 Curve di fragilità per edifici in muratura fino a due piani, (Borzi, Crowley e Pinho 2008b)

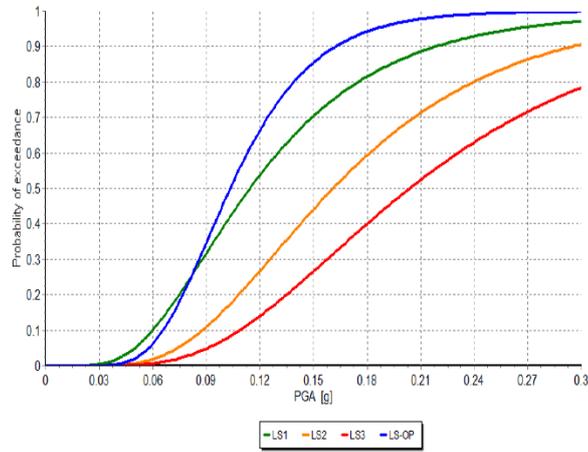


Figura 6-21 Curve di fragilità per edifici in muratura fino a tre piani, (Borzi, Crowley e Pinho 2008b)

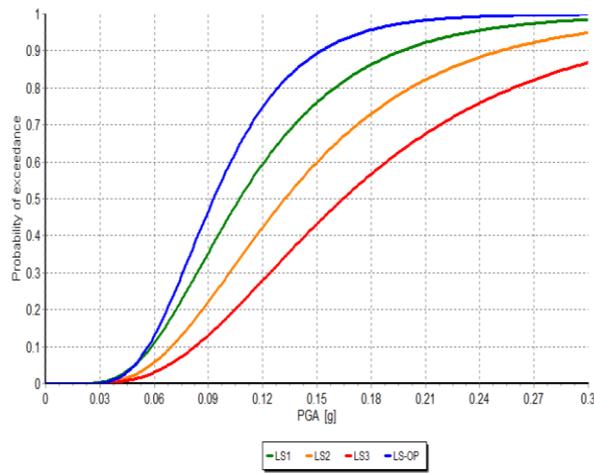


Figura 6-22 Curve di fragilità per edifici in muratura fino a quattro piani, (Borzi, Crowley e Pinho 2008b)

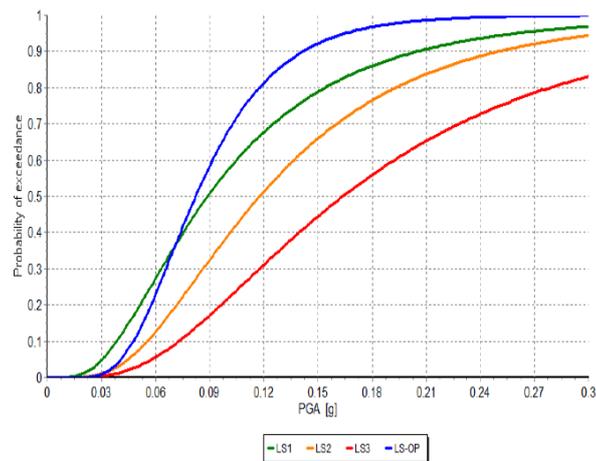


Figura 6-23 Curve di fragilità per edifici in muratura dai cinque piani (Borzi, Crowley e Pinho 2008b)

Edifici in cemento armato non monumentali

Per quanto riguarda il cemento armato si sono scelte le stesse curve sia per gli edifici in cui le chiusure verticali fossero caratterizzati da cemento armato, sia per edifici in cui le chiusure verticali fossero caratterizzate da muratura in quanto il materiale portante era comunque il medesimo (tale distinzione è stata mantenuta solo nella tassonomia); la scelta è ricaduta su curve elaborate dagli stessi autori delle curve scelte per la muratura, ricavate con metodo analitico non lineare per l'Italia (Borzi, Crowley e Pinho 2008a). Le curve sono stata definite in base al numero di piani: nella Figura 6-24 per edifici fino a 2 piani, nella Figura 6-25 per edifici fino a 4 piani, in Figura 6-26 fino a 5, la Figura 6-27 fino a 6 piani ed infine in Figura 6-28 fino a 8 piani.

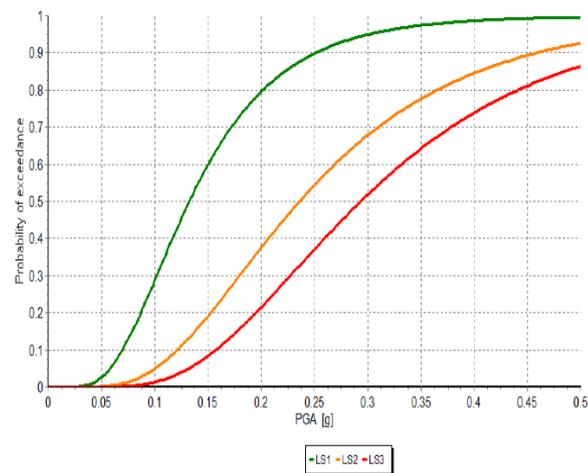


Figura 6-24 Curve di fragilità per edifici in cemento armato fino a due piani, (Borzi, Crowley e Pinho 2008a)

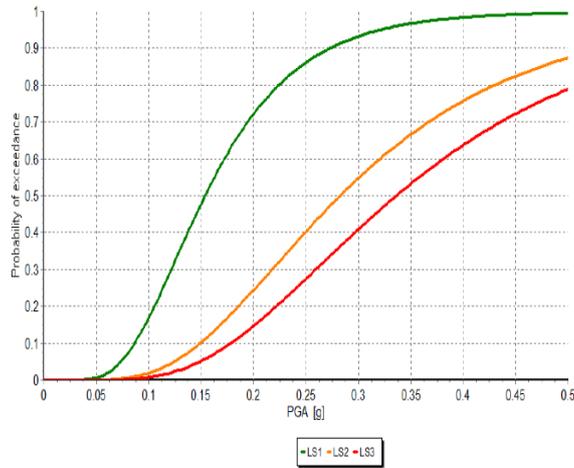


Figura 6-25 Curve di fragilità per edifici in cemento armato fino a quattro piani, (Borzi, Crowley e Pinho 2008a)

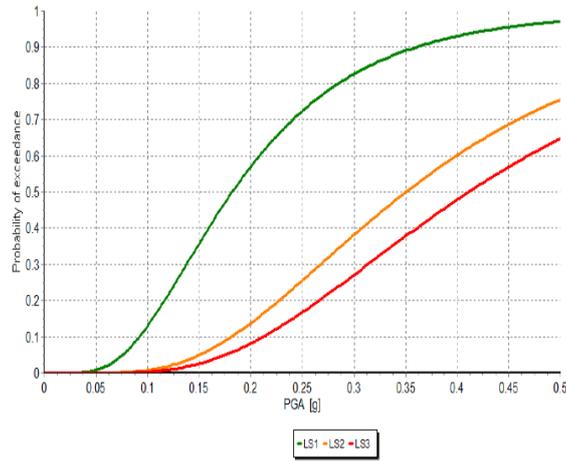


Figura 6-26 Curve di fragilità per edifici in cemento armato fino a cinque piani, (Borzi, Crowley e Pinho 2008a)

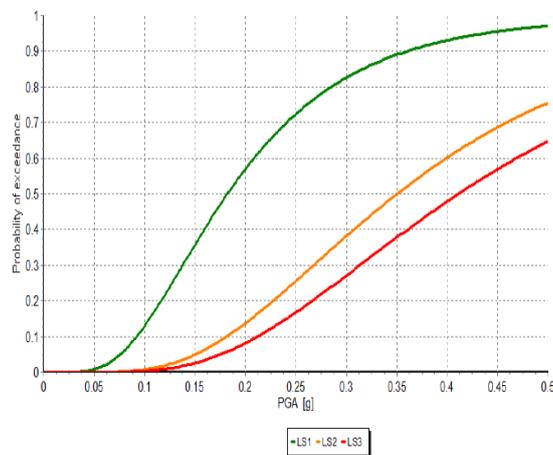


Figura 6-27 Curve di fragilità per edifici in cemento armato fino a sei piani, (Borzi, Crowley e Pinho 2008a)

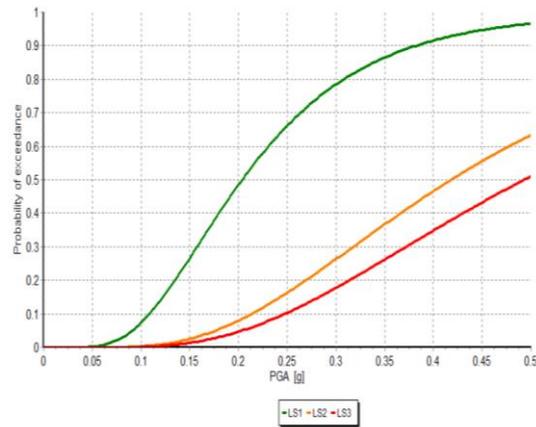


Figura 6-28 Curve di fragilità per edifici in cemento armato da otto piani in su, (Borzi, Crowley e Pinho 2008a)

Edifici monumentali in muratura

Gli edifici monumentali richiedono delle funzioni di fragilità differenti, in quanto hanno dimostrato di avere dei meccanismi di collasso diversi rispetto agli edifici non monumentali. Per tale motivo si sono ricercate delle curve di fragilità adatte alle chiese sulla base degli studi compiuti da (Lagomarsino e Podestà 2004).

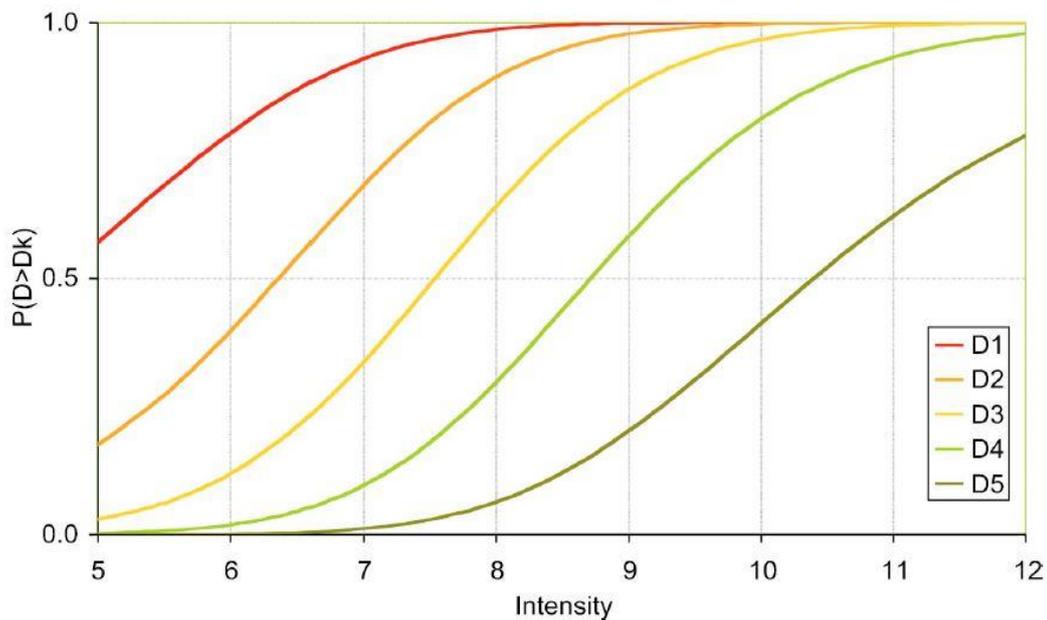


Figura 6-29 Curve di fragilità per edifici monumentali in muratura (chiese), con indice di vulnerabilità pari a 0.89 (Lagomarsino e Podestà 2004)

Come evidenziato nella Figura 6-29, diversamente da quanto evidenziato nelle curve per gli edifici non monumentali, le curve sono state costruite in relazione all'intensità macrosismica. Queste curve sono ricavate da una nuova metodologia per la valutazione del danno che considera i più significativi meccanismi di collasso in ogni parte architettonica della chiesa (macro-elementi) e sulla base di questo è possibile definire la matrice di probabilità di danno per ogni meccanismo considerato (Lagomarsino e Podestà 2004) sulla base dei dati sulle chiese reperibili nei database di Umbria e Marche, il cui numero di dati ridotto non permetteva, però, di portare avanti un'analisi di natura statistica soddisfacente (circa 100 edifici); per questo motivo si è definito un punteggio globale di danno sulla base del quale sono state successivamente ottenute le curve. L'obiettivo raggiunto è infatti quello di ottenere un livello medio atteso di danno per ogni classe di chiese e di poterlo relazionare ad un evento sismico di data intensità. Si è scelta la curva che meglio rappresentasse il comportamento delle chiese italiane, per cui nella maggior parte dei casi si sceglie un indice di vulnerabilità pari a 0.89. Al fine di poter avere delle curve coerenti tra di loro e di facilitare l'inserimento sul software OpenQuake, si sono trasformate le intensità macrosismiche in PGA, secondo quanto evidenziato da (Giovinazzi 2005): la maggior parte delle relazioni esistenti tra PGA ed intensità macrosismica possono infatti essere espresse con la funzione seguente:

$$a_g = c_1 c_2^{(I-5)}$$

Equazione 11

dove i parametri c_1 e c_2 rappresentano rispettivamente il fattore moltiplicativo e la base della funzione per il calcolo della PGA, ovvero c_2 misura l'incremento della *peak ground acceleration* in relazione all'intensità. Per la scelta dei parametri si fa riferimento alla Tabella 6-4 sottostante in cui sono indicati tre metodi per la definizione dei parametri sopra descritti:

I-a_g correlation	c_1	c_2
Guagenti-Petrini (2.2)	0.018	1.8
Margottini (2.3a)	0.04	1.5
Assumed correlation	0.03	1.6

Tabella 6-4 Valori di c_1 e c_2 per differenti leggi I- a_g , (Giovinazzi, 2005)

Nel caso in esame si è scelto il metodo di Margottini in quanto i valori di PGA ottenuti si avvicinavano di più a quelli utilizzati nelle altre curve.

Definiti quindi i modelli di fragilità, è necessario ottenere le funzioni di vulnerabilità al fine di calcolare la vulnerabilità sismica per ogni tipologia di edificio situato nel Comune di Moncalieri.

Come descritto in precedenza, sono state definite un totale di 9 curve per gli edifici non monumentali e una per gli edifici monumentali, che verrà applicata per la costruzione del modello di vulnerabilità delle chiese e dei conventi (entrambi definiti come beni vincolati). Nel paragrafo 3.1 si è trattato il procedimento per l'ottenimento delle curve, che prevede il calcolo del *mean damage factor* e la successiva correlazione tra esso (che rappresenta il danno provocato dal sisma in termini di perdite economiche) e l'accelerazione al suolo (PGA): si è ottenuta in questo modo la definizione delle curve di vulnerabilità in termini di perdite economiche. La funzione di vulnerabilità è correlata dall'incertezza espressa dal *mean damage factor* e dalla covarianza (Figura 6-30). Per definire la covarianza si assume che le perdite condizionate dallo stato di danneggiamento siano uniformemente distribuite tra il limite minimo e massimo per ogni componente dello stato di danno. Questa risulta essere un'assunzione fondamentale, ma comunque giustificata perché non si conosce la distribuzione reale in accordo con quanto definito da (Porter, Cho e Farakhnia 2010).

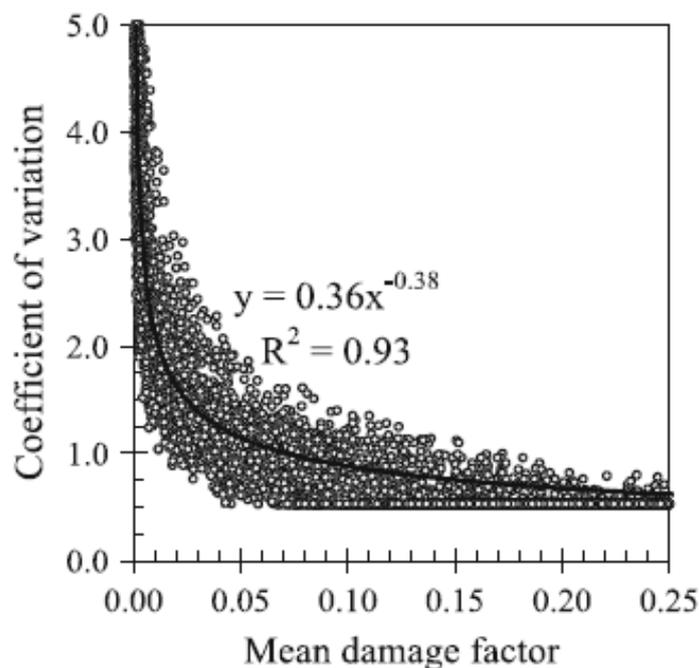


Figura 6-30 Andamento del coefficiente di varianza (COV) in relazione al valore medio del rapporto di perdita), (Porter, Cho e Farakhnia 2010)

Come visibile in figura, il coefficiente di varianza decresce al crescere del valore del *mean damage factor*. Una volta definiti quindi i valori del *mean damage factor* e del *coefficient of variation* si è definito il modello di vulnerabilità con il software OpenQuake in formato NRML, fase indispensabile per costruire il file di configurazione.

Si sono ottenute le seguenti curve: per gli edifici non monumentali in muratura riportate in Figura 6-31, per gli edifici in muratura e in Figura 6-32 per gli edifici in cemento armato; per gli edifici monumentali (le chiese) si è invece ottenuta la curva di vulnerabilità riportata in Figura 6-33.

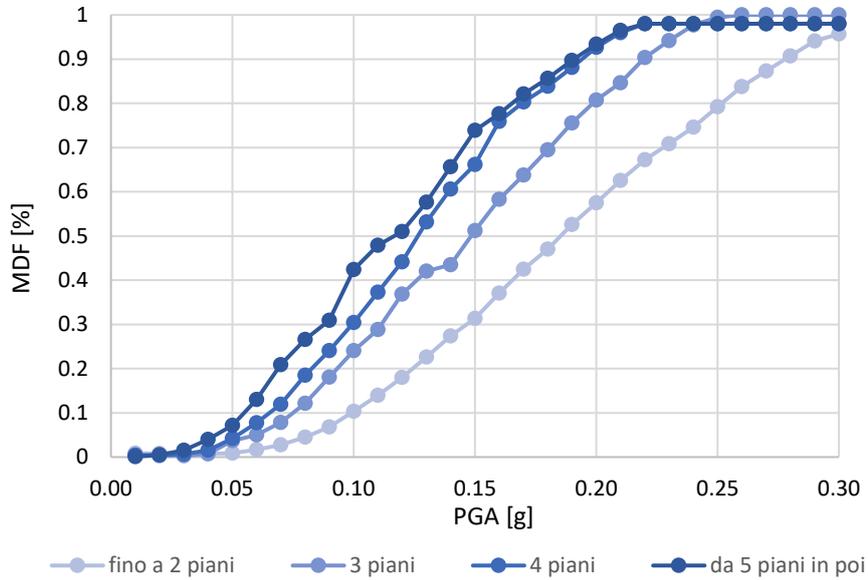


Figura 6-31 Curve di vulnerabilità per edifici non monumentali in muratura

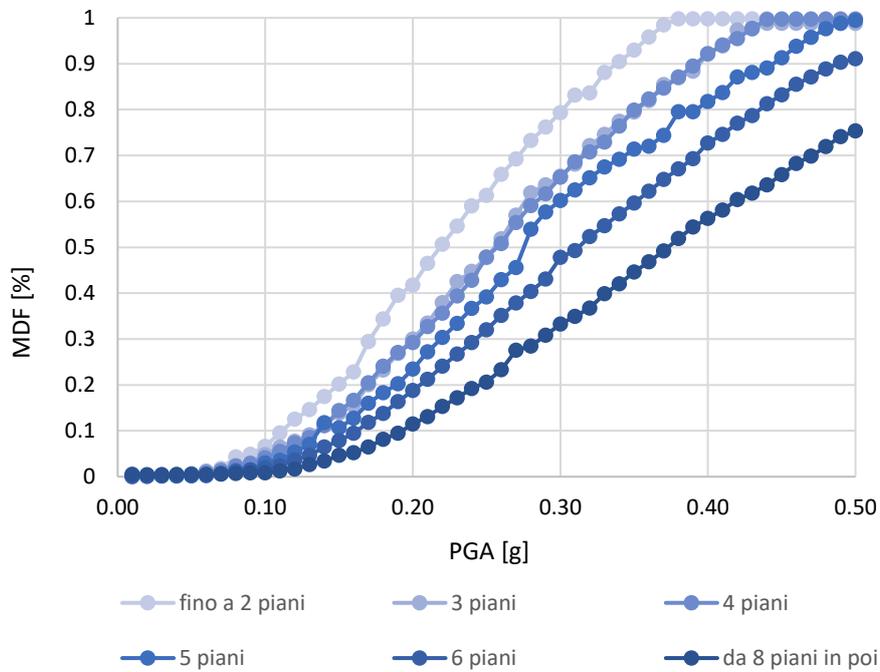


Figura 6-32 Curve di vulnerabilità per edifici non monumentali in cemento armato

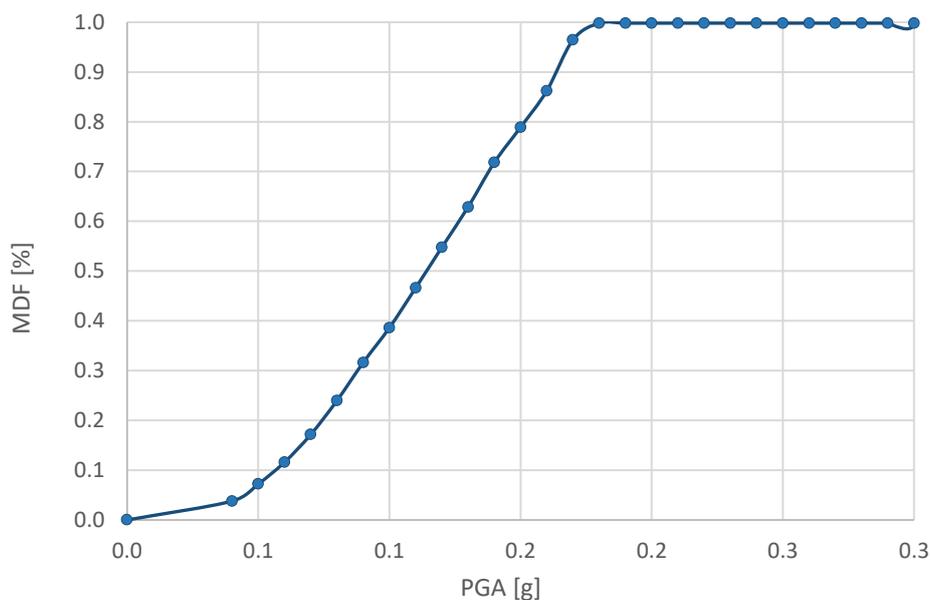


Figura 6-33 Curva di vulnerabilità per edifici monumentali in muratura

6.6 Definizione dei file di configurazione

L'analisi con il software OpenQuake presuppone la preventiva creazione di un file zip, contenente tutti i file di input precedentemente definiti. Oltre a questi, devono essere inserite delle informazioni differenti a seconda dell'analisi. Per quanto riguarda il calcolatore *Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Risk Analysis* il file dovrà contenere le informazioni evidenziate nel paragrafo 6.2.1 per la valutazione della pericolosità sismica, il modello di vulnerabilità e di esposizione. Il software permette inoltre di aggiungere dei parametri, relativi alle condizioni del sito e alla sismicità del luogo considerato: in particolar modo il sito viene caratterizzato grazie all'inserimento del parametro V_{s30} , ovvero la velocità con cui le onde di taglio (o secondarie) si propagano negli strati di terreno presenti nel sito oggetto di analisi. Nel caso in esame si è scelto di imporre una velocità di 800 m/s, valore di default (limite superiore della categoria B della Tabella 6-5) per siti caratterizzati da depositi di sabbie e ghiaie consistenti o argille altrettanto consistenti; si sono inoltre aggiunte delle informazioni circa le profondità minime per le quali si ha una velocità maggiore di 5 km/s e 1 km/s, poste rispettivamente pari a 5 km e 100 m. Il calcolo della pericolosità richiede anche la definizione della massima distanza tra la sorgente ed il sito, imposta pari a 200 km, il troncamento della distribuzione gaussiana pari a 3 ed il periodo di indagine per il calcolo della pericolosità posto pari a 100 anni (si è scelto un periodo abbastanza lungo in quanto la zona come evidenziato numerose volte non è soggetta a fenomeni sismici particolarmente violenti).

Si sottolinea inoltre la possibilità di decidere il percorso del *Logic Tree* per il quale si è definito un set di 960 eventi stocastici e di sottolineare l'eventuale correlazione spaziale nel calcolo del movimento del terreno, per il quale non è stata invece aggiunto nessun input.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Tabella 6-5 Tabella per la definizione della Vs30, NTC2018

Questi parametri vengono poi utilizzati dal programma per creare il file di configurazione in formato zip, che verrà elaborato successivamente dal calcolatore.

Per quanto riguarda invece i calcolatori Scenario *Damage Assessment* e *Scenario Risk Assessment* oltre alla definizione del modello di rottura, si rende necessario l'inserimento del modello di fragilità per la prima tipologia di analisi e il modello di vulnerabilità per la seconda. Per la definizione degli altri parametri, si è deciso di far riferimento a quanto definito nel caso dell'analisi probabilistica *Stochastic Event Based*, ovvero si sono scelti nuovamente gli stessi parametri per descrivere il livello di troncamento della gaussiana e per la correlazione spaziale. Tali calcolatori forniscono la possibilità di inserire un'equazione idonea a descrivere i movimenti del terreno e a rappresentare la variazione di intensità sismica al variare della distanza epicentrale. Si è scelta l'equazione definita da Bindi 2011 (quelle più usate nel territorio italiano sono appunto quelle di Sabetta&Pugliese, Ambraseys, Bragato&Slejko e Bindi), valida per magnitudo momento comprese tra i 4.1 ed i 6.9 e quindi idonee per la zona italiana. L'espressione matematica utilizzata è la seguente:

$$\text{Log}_{10}Y = e_1 + F_D(R, M) + F_M(M) + F_S + F_{Sof} \pm \sigma \quad \text{Equazione 12}$$

Dove:

Y è la misura dell'intensità sismica (nel caso della PGA espressa in cm/s^2 e nel caso della PGD in cm/s);

e_1 è un parametro costante;

$F_D(R, M)$ è funzione della distanza: dipende dalla distanza epicentrale R e dalla magnitudo M ;

$F_M(M)$ è funzione di scala della magnitudo;

F_S funzione del tipo di suolo e dell'amplificazione da esso fornita;

F_{Sof} funzione della tipologia di faglia;

σ è la deviazione standard del logaritmo di Y .

Nel caso dell'analisi Scenario Damage Analysis e Scenario Risk Analysis si è introdotta una correlazione spaziale nel calcolo del movimento del terreno.

Si è scelto di inserire la correlazione spaziale definita di Jayaram e Baker (definita dal software come JB2009): l'aggiunta di tale equazione permette di conoscere i diversi effetti del terremoto in siti differenti. La correlazione tra gli spostamenti del terreno nei vari siti è elevata quando questi sono vicini tra di loro, mentre diminuisce quando si ha una grande distanza tra gli stessi (Jayaram e Baker 2009). Per questo motivo, nel caso di forte correlazione spaziale, non inserire quest'informazione porta ad una perdita sostanziale di informazioni negli output del calcolo, causando la sovrastima nel calcolo delle perdite di eventi frequenti e la sottostima nel caso di eventi rari (Jayaram e Baker 2009).

6.7 Elaborazione dei file di output e interpretazione dei risultati

Prima di mostrare i risultati ottenuti, è necessario mettere in luce che durante il calcolo si è ritenuto necessario procedere con la suddivisione del modello di esposizione in tre sotto-file differenti, in quanto il codice richiedeva un tempo di esecuzione elevato, non supportato da un qualsiasi computer portatile. La scelta è stata quella di suddividere i file di esposizione in base alla tipologia strutturale, in modo tale da facilitare l'esecuzione del codice e quindi la correlazione tra la tassonomia e la curva di vulnerabilità adeguata.

Una volta terminata l'analisi con i parametri scelti per la prima fase descritti nel paragrafo 4.1.3 si è utilizzato il plugin OpenQuake IRMT (OpenQuake Integrated Risk Modelling Toolkit) sviluppato dai medesimi creatori di OpenQuake Engine (GEM) per visualizzare i risultati sulla piattaforma QGIS. Il sistema integrato permette di visualizzare gli indicatori relativi alla vulnerabilità sociale intesa come la potenzialità di incorrere in perdite o danni di un determinato luogo.

Al fine di poter leggere in modo corretto i dati e di poterne provare la veridicità, si riportano in Figura 6-34 e Figura 6-35, 6-36 le mappe di pericolosità sismica riferite rispettivamente ad un tempo di ritorno di 50 con probabilità di eccedenza del 2%, 5%, 10%; le Figure 6-37, 6-38 sono invece riferite a probabilità di eccedenza del 39% e del 50%.

Mappa Pericolosità Sismica del Piemonte

Mappa pericolosità sismica del Piemonte, considerando una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 2475 anni.

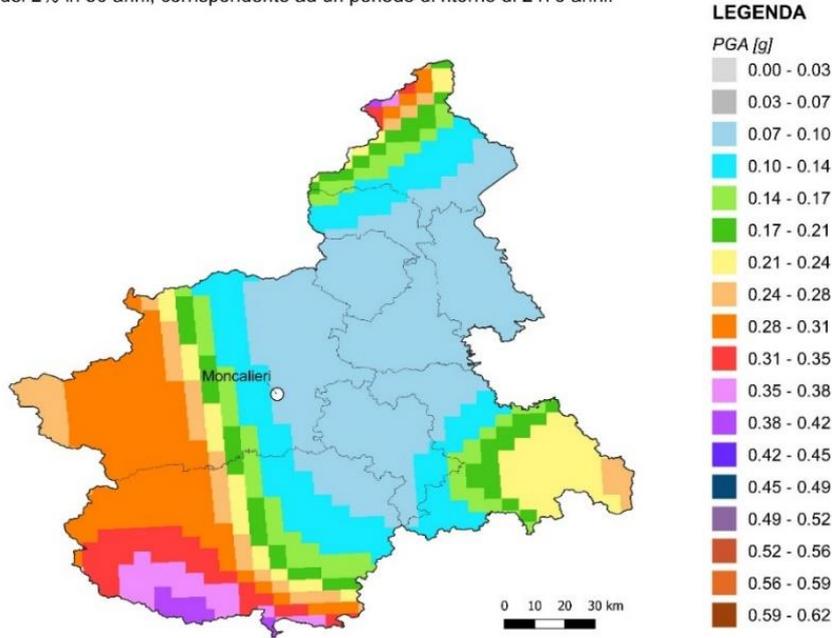


Figura 6-34 Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni

Mappa Pericolosità Sismica del Piemonte

Mappa pericolosità sismica del Piemonte, considerando una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 975 anni.

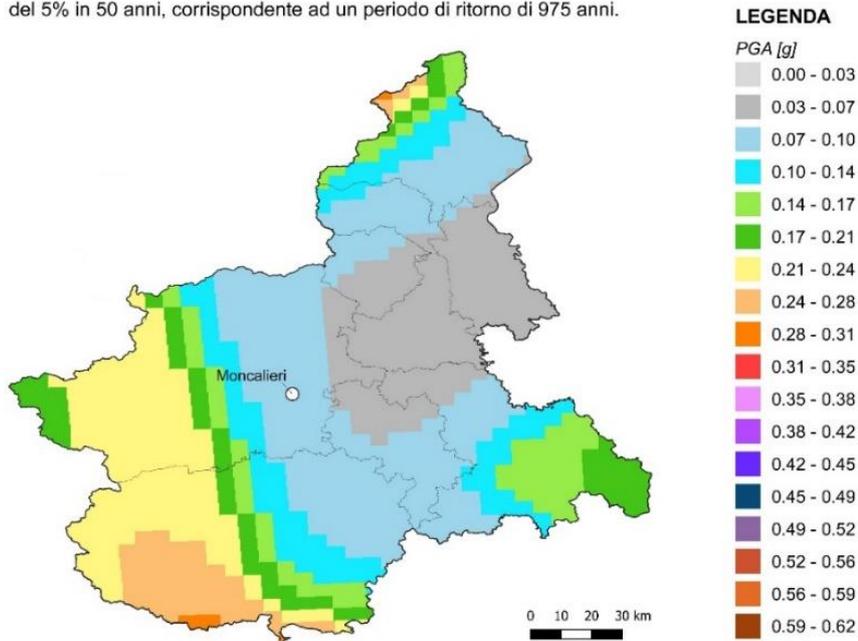


Figura 6-35 Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni

Mappa Pericolosità Sismica del Piemonte

Mappa pericolosità sismica del Piemonte, considerando una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 475 anni.

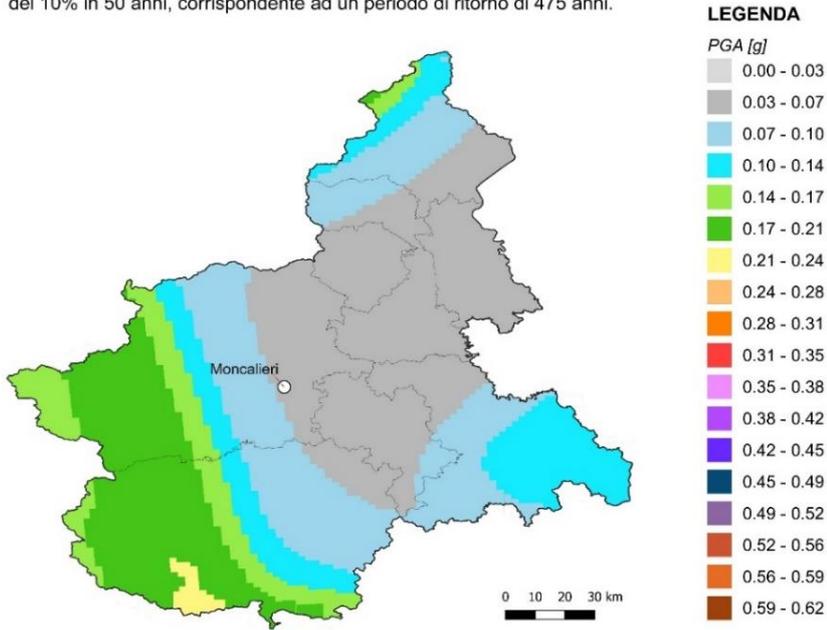


Figura 6-36 Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni

Mappa Pericolosità Sismica del Piemonte

Mappa pericolosità sismica del Piemonte, considerando una probabilità di eccedenza del 39% in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 101 anni.

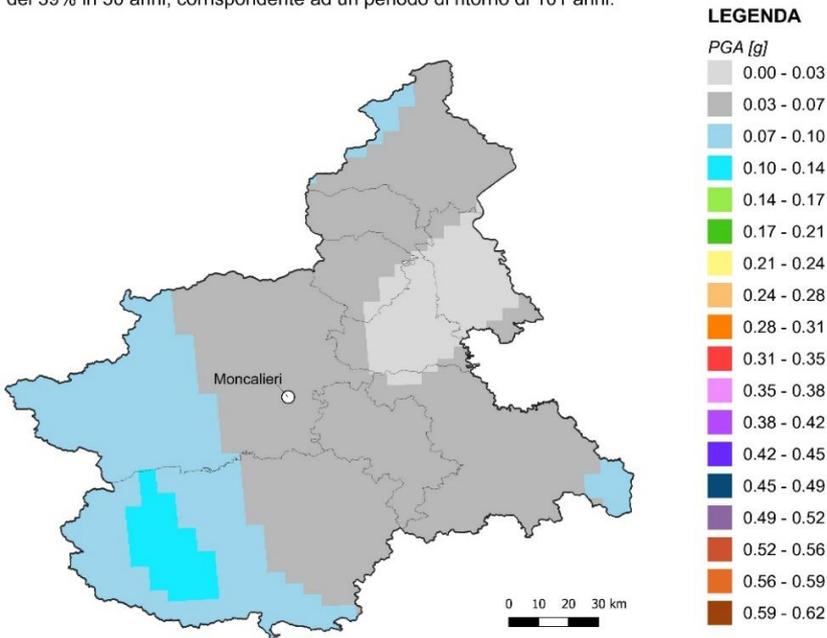


Figura 6-37 Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 39% in 50 anni

Mapa Pericolosità Sismica del Piemonte

Mapa pericolosità sismica del Piemonte, considerando una probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 72 anni.

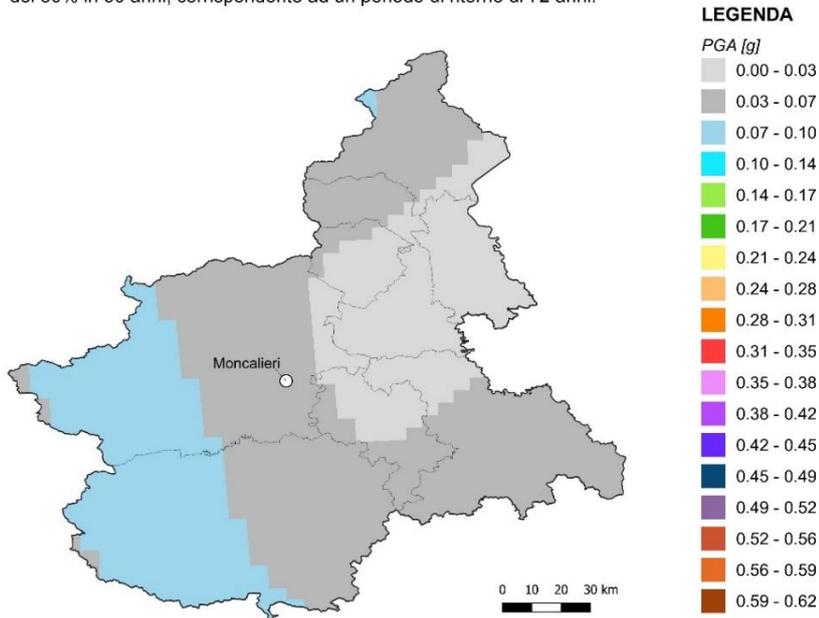


Figura 6-38 Mapa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni

Come noto, i risultati possono essere influenzati anche dalle pendenze del paesaggio, che influenzano, a causa dell'amplificazione stratigrafica, il valore dell'accelerazione al suolo (Campagnoni, et al. 2007), al fine di visualizzare le pendenze che caratterizzano il comune di Moncalieri, la Figura 6-39 permette di avere un'idea dell'orografia del territorio: come anticipato nel paragrafo 6.1 il territorio si presenta per lo più pianeggiante nella zona sud, occidentale ed orientale, mentre i rilievi e la zona collinare sono concentrati nella zona settentrionale.

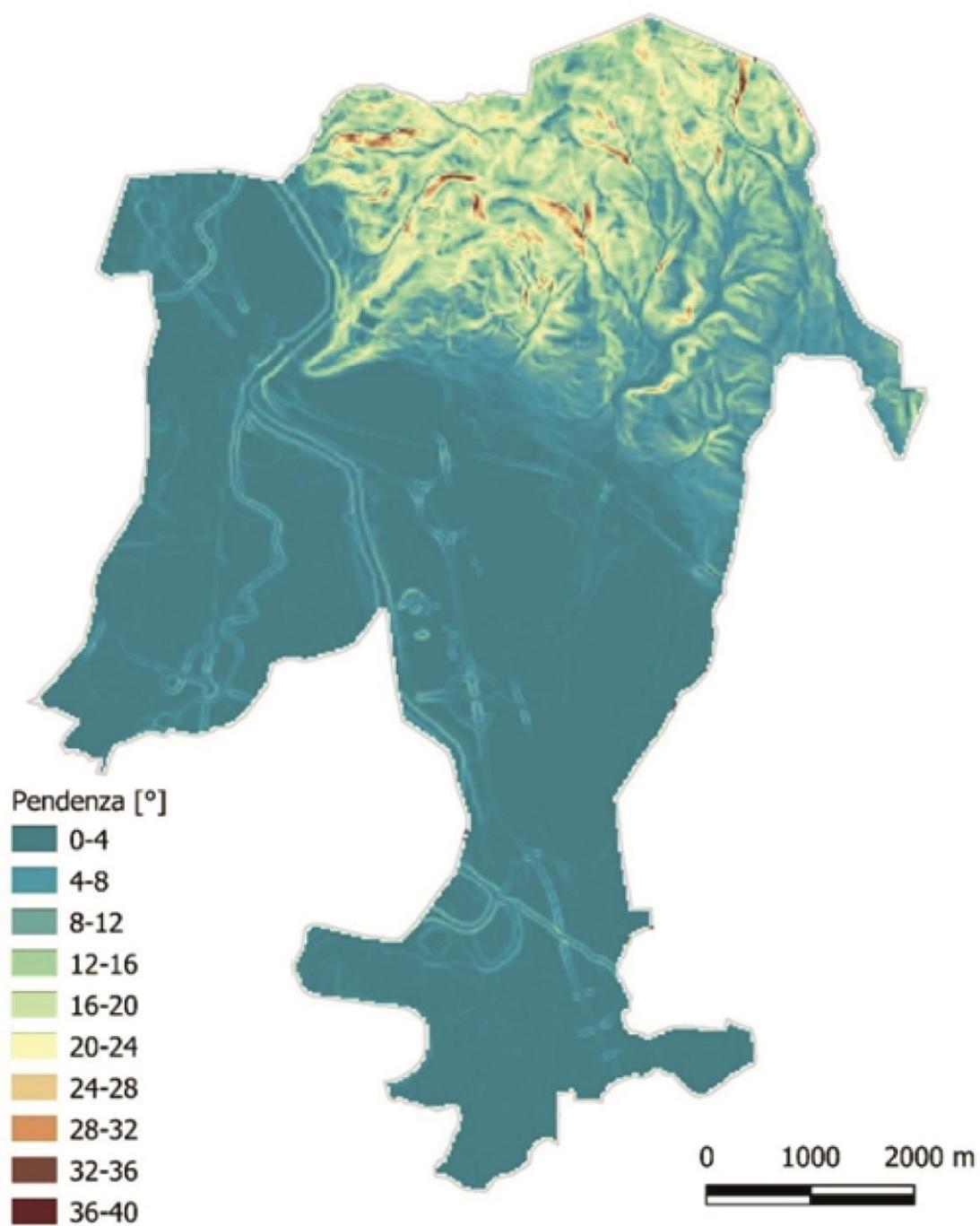


Figura 6-39 Andamento altimetrico del territorio di Moncalieri

6.7.1 Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis output

Questa tipologia di calcolatore permette di valutare la pericolosità sismica della zona in esame e le perdite statiche medie associate ad un periodo di ritorno di 100 anni.

Per quanto concerne le mappe di pericolosità sismica, si è ritenuto opportuno fornire una panoramica complessiva di tutto il territorio, mirando quindi alla costruzione di una mappa che includessero la totalità delle tipologie costruttive, seppur è necessario evidenziare nuovamente l'elaborazione separata dei file.

Discorso differente invece, riguarda le mappe relative alle perdite economiche, nelle quali si è ritenuto mantenere la divisione evidenziata nel paragrafo 6.5, in quanto per ogni tipologia costruttiva sono forniti degli stralci differenti, con il fine di fornire indicazioni puntuali, altrimenti difficilmente rilevabili nel caso di mappe complessive.

Al fine di rendere maggiormente chiara la localizzazione degli edifici in cemento armato (con tamponamenti del medesimo materiale), in cemento armato (con chiusure verticali in muratura) ed in muratura, si riporta di seguito un'individuazione degli stessi rispettivamente nella Figura 6-40, 6-41, 6-42.

Inizialmente è stata calcolata la pericolosità sismica del territorio comunale sulla base di un set di eventi probabilistici: il software permette infatti di valutare, in relazione alla pericolosità sismica, diverse realizzazioni per un periodo di tempo predefinito, impostato, nel presente caso, pari a 100 anni.

Come evidenziato dalla Figura 6-43 (probabilità di eccedenza pari all'1%), dalla Figura 6-44 (probabilità pari al 2%), dalla Figura 6-45 e infine 6-46 (rispettivamente per una probabilità di eccedenza del 39% e del 50%), Moncalieri presenta una sismicità bassa, anche se non trascurabile.

Il calcolo del rischio sismico risulta invece subordinato al calcolo della pericolosità e questo viene sottolineato anche dall'elaborazione del file zip sul software OpenQuake.

Nelle mappe di rischio sismico riportate, rispettivamente nella Figura 6-47, 6-48, 6-49 per gli edifici in cemento armato (con tamponamenti in cemento armato), Figura 6-50, 6-51, 6-52 per gli edifici in cemento armato (chiusure in muratura) e 6-53, 6-54, 6-55 per gli edifici in muratura, le perdite economiche variano in base alla probabilità di eccedenza considerata.

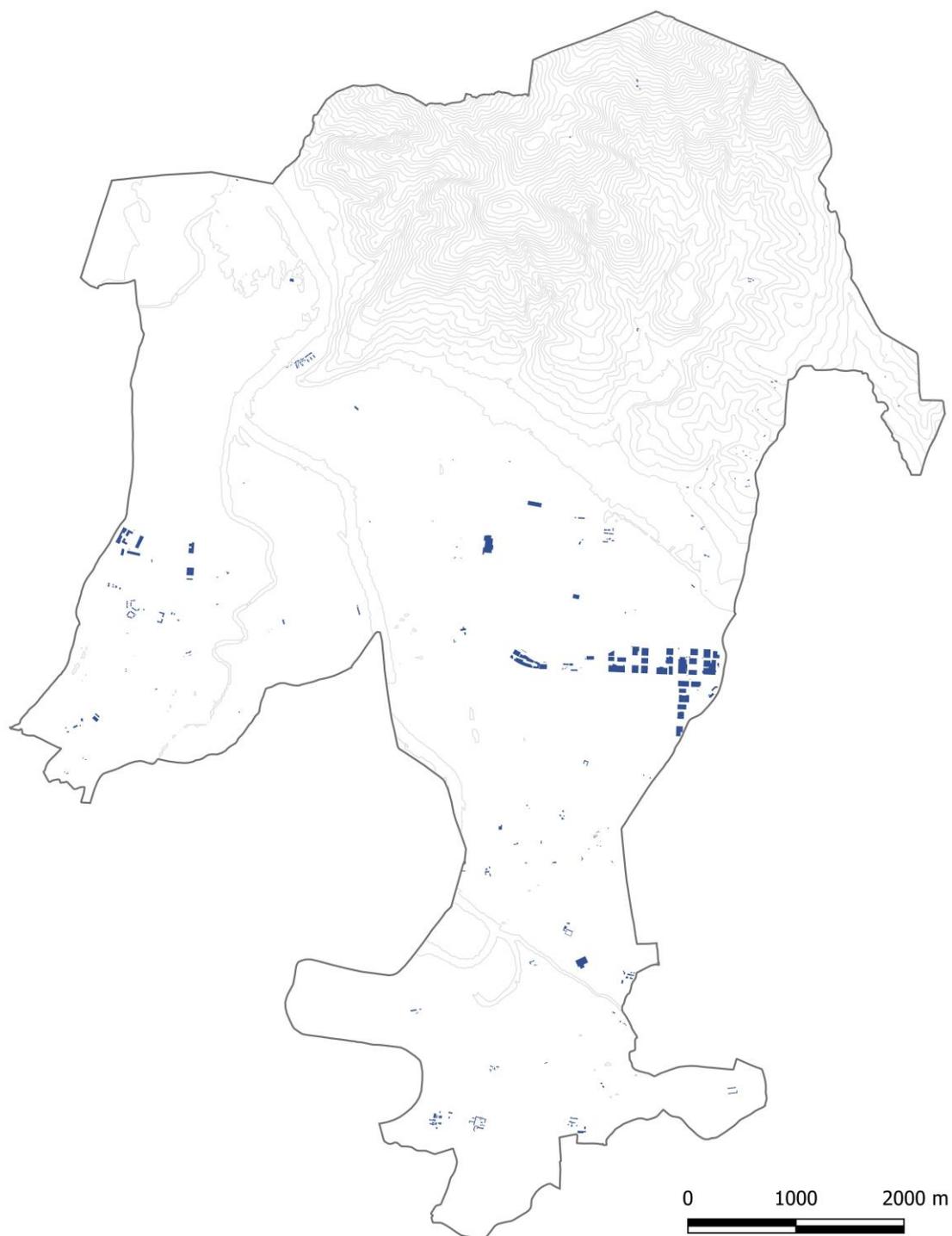


Figura 6-40 Distribuzione nel territorio di Moncalieri degli edifici in cemento armato

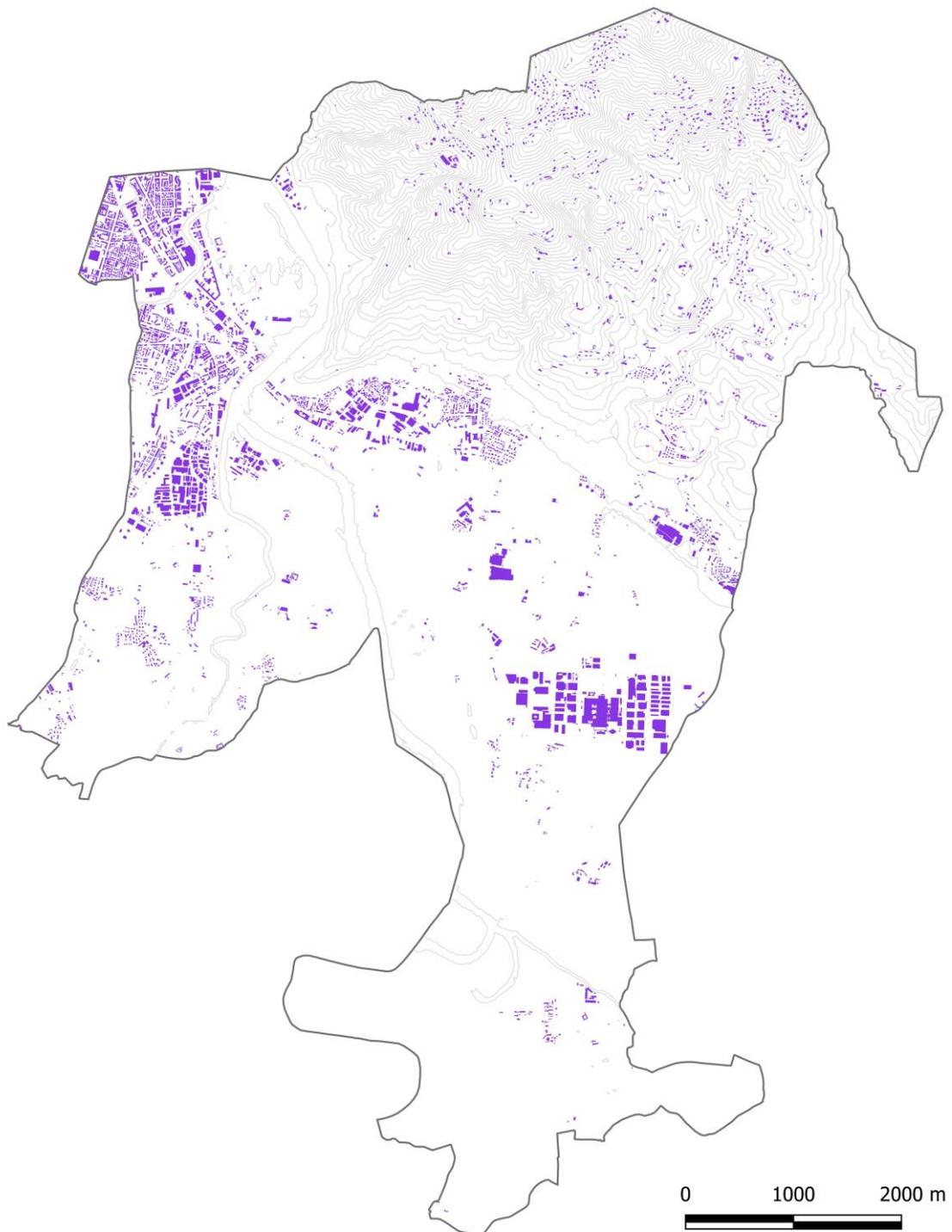


Figura 6-41 Distribuzione nel territorio di Moncalieri degli edifici in cemento armato e muratura

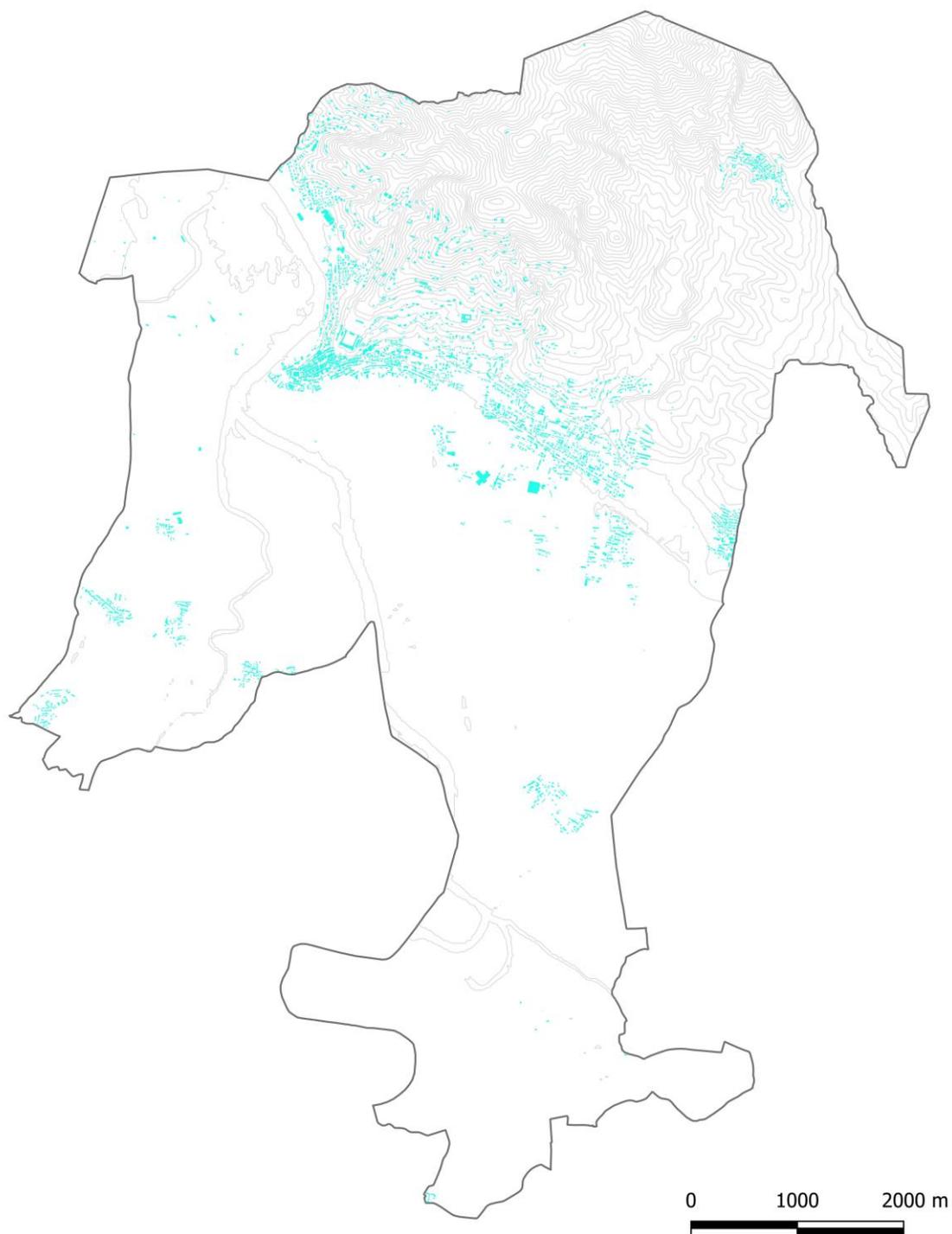


Figura 6-42 Distribuzione nel territorio di Moncalieri degli edifici in muratura

Mappe di pericolosità sismica

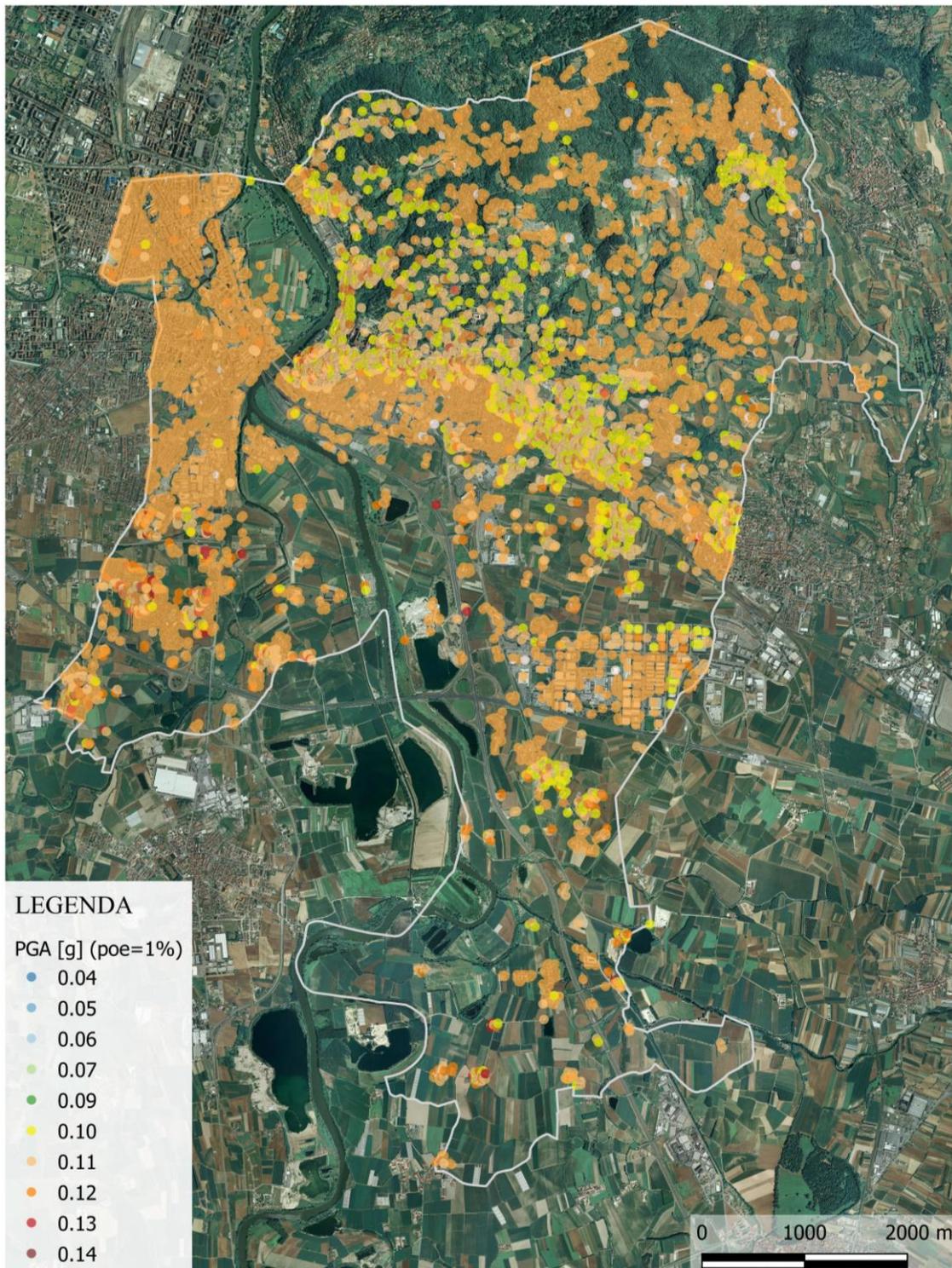


Figura 6-43 Mappa di pericolosità per gli edifici in cemento armato del comune di Moncalieri con probabilità di eccedenza pari all'1% in 100 anni (quantile=0.50)

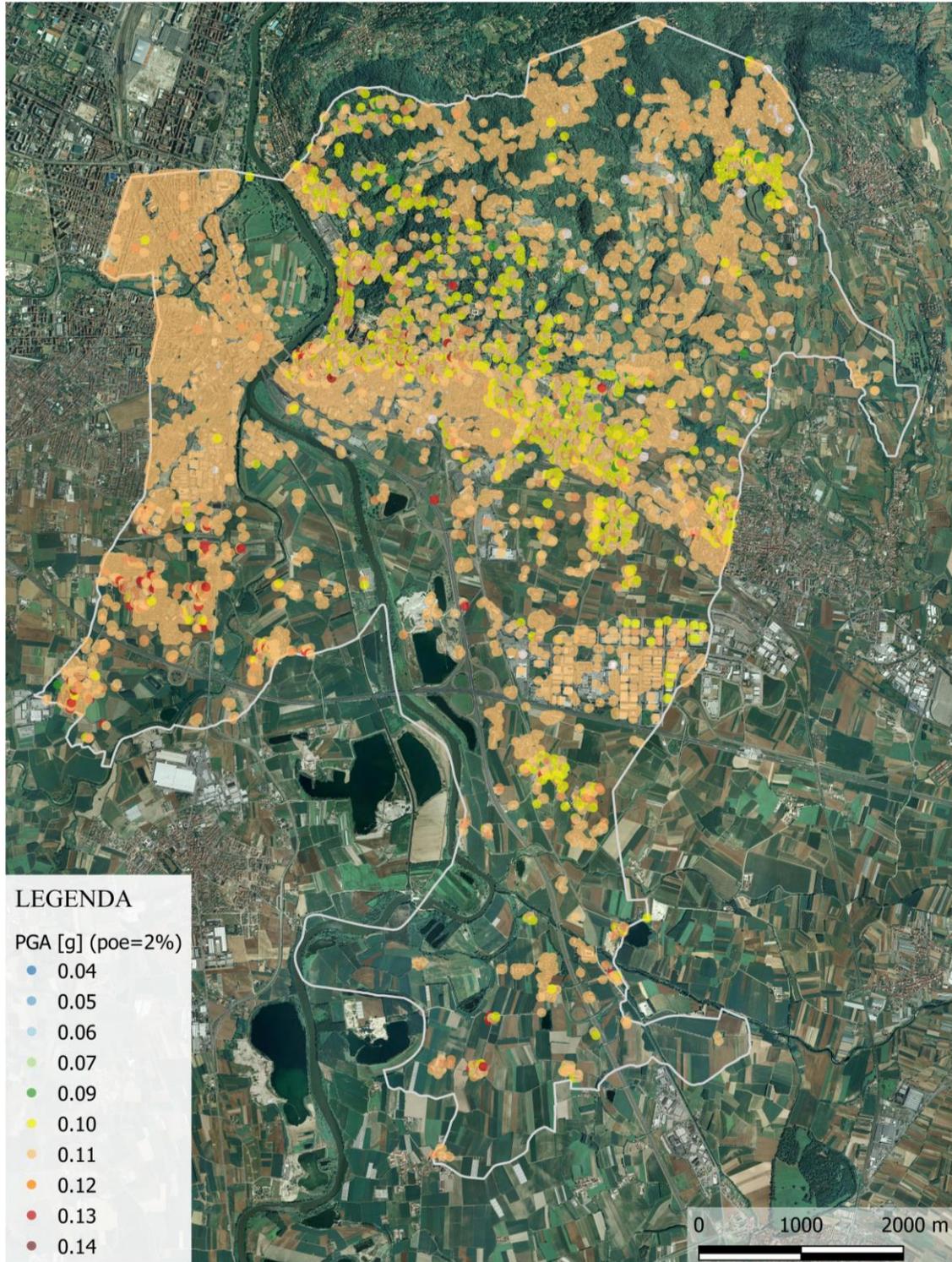


Figura 6-44 Mappa di pericolosità per gli edifici in cemento armato del comune di Moncalieri con probabilità di eccedenza pari al 2% e al 5% in 100 anni (quantile=0.50)

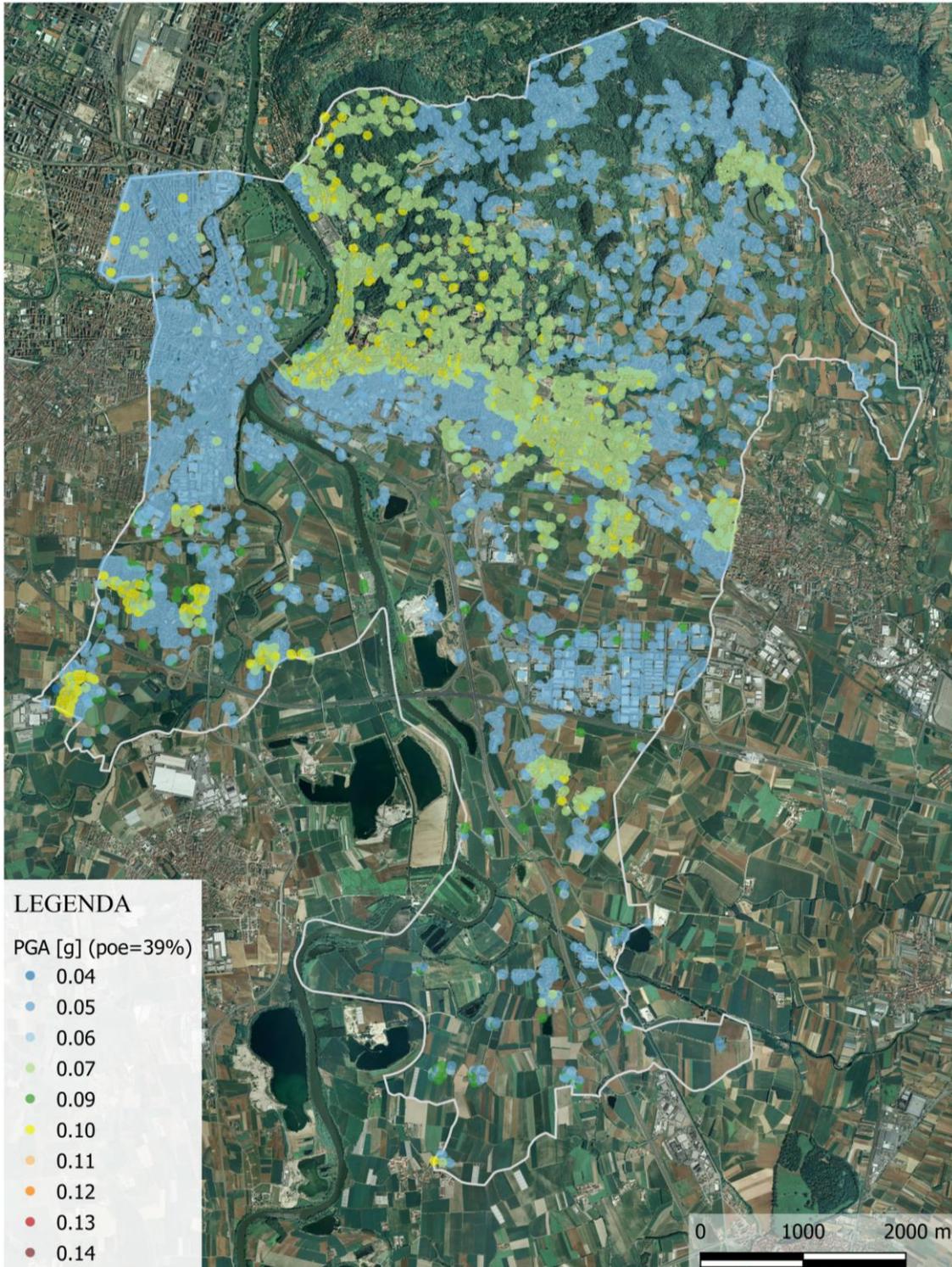


Figura 6-45 Mappa di pericolosità per gli edifici in cemento armato del comune di Moncalieri con probabilità di eccedenza pari al 39% in 100 anni (quantile=0.50)

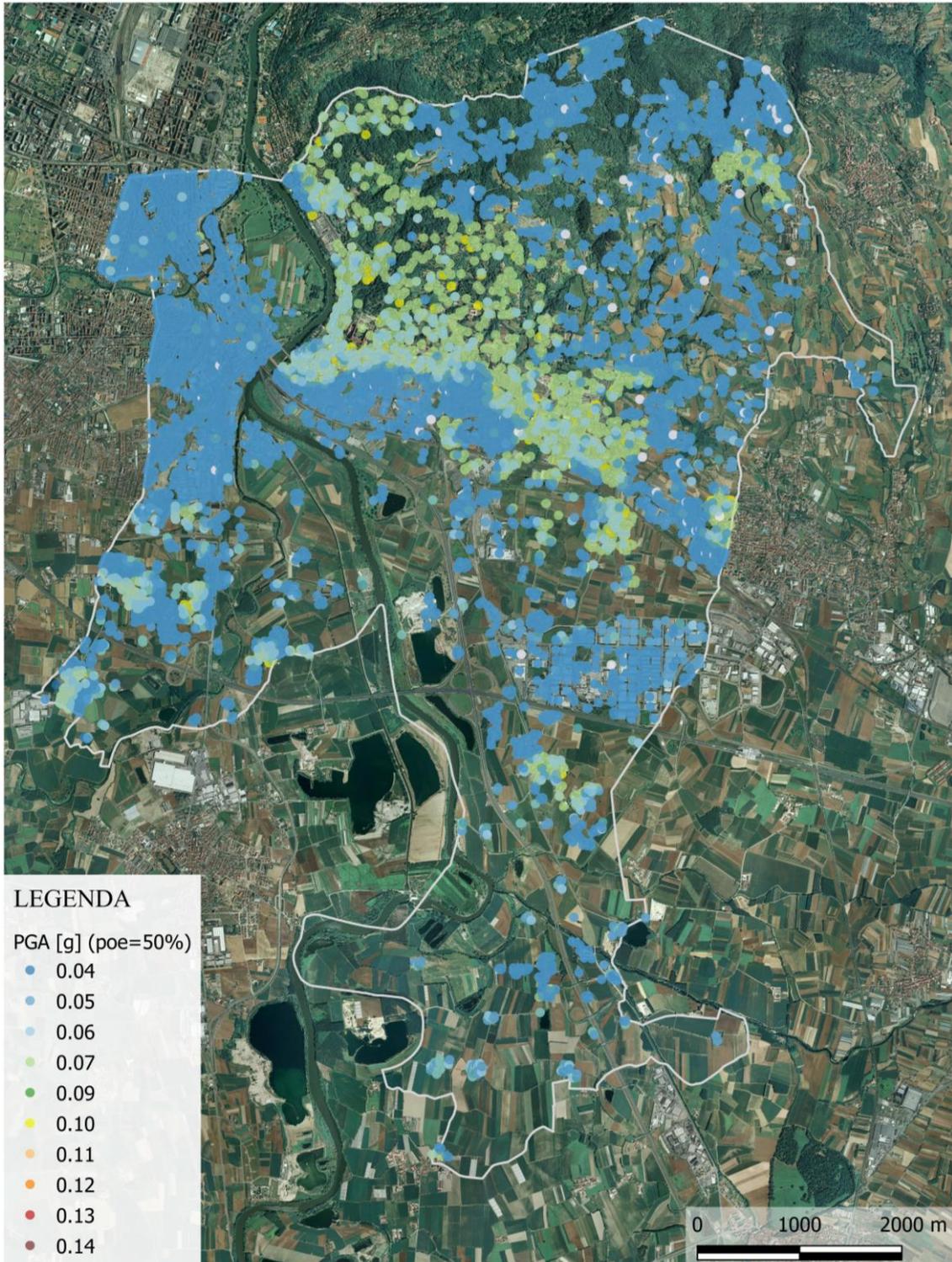


Figura 6-46 Mappa di pericolosità per gli edifici in cemento armato del comune di Moncalieri con probabilità di eccedenza pari al 50% in 100 anni (quantile=0.50)

Loss maps

CEMENTO ARMATO

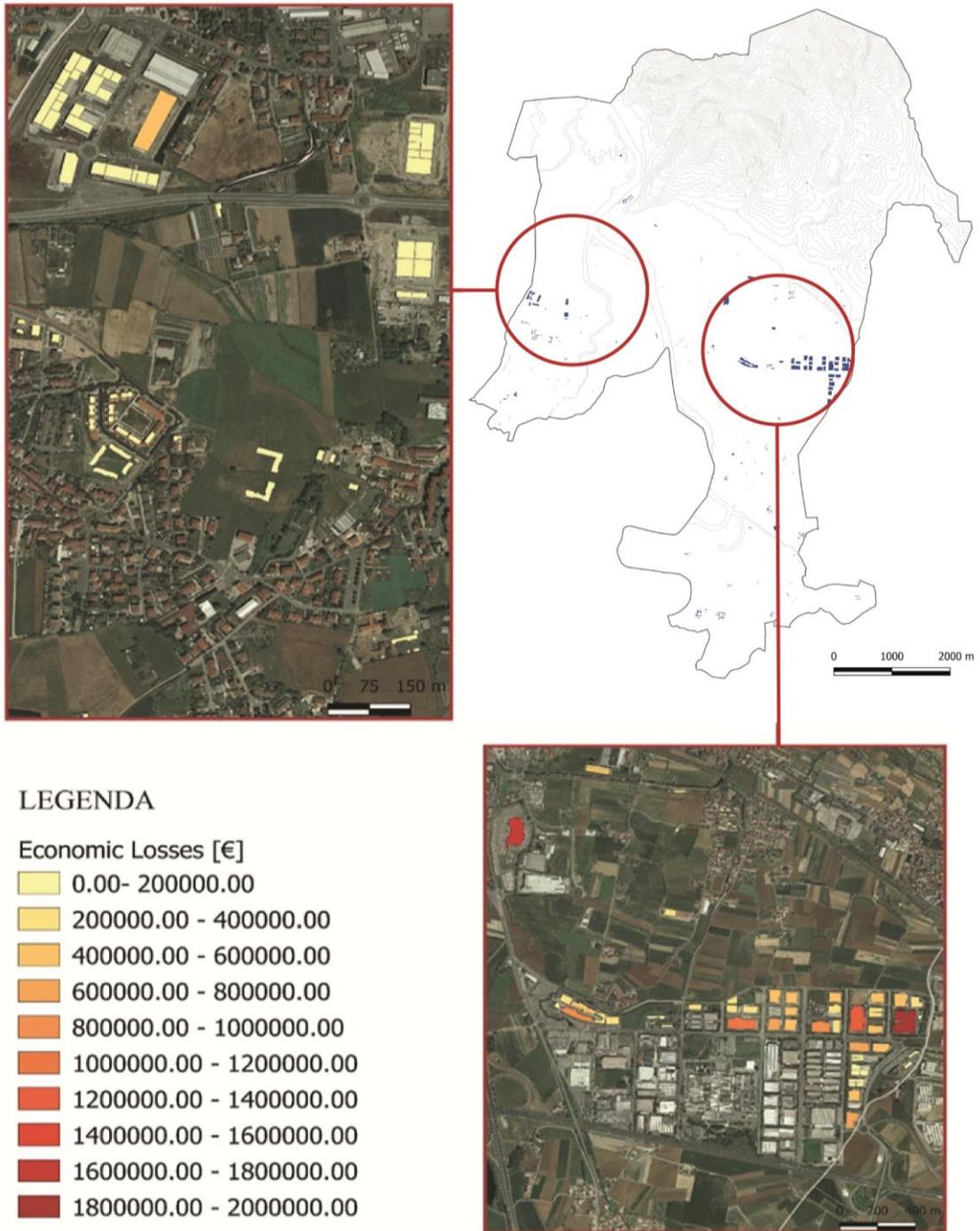


Figura 6-47 Perdite economiche medie, calcolate per un periodo di 100 anni con probabilità di eccedenza dell'1% e del 2%

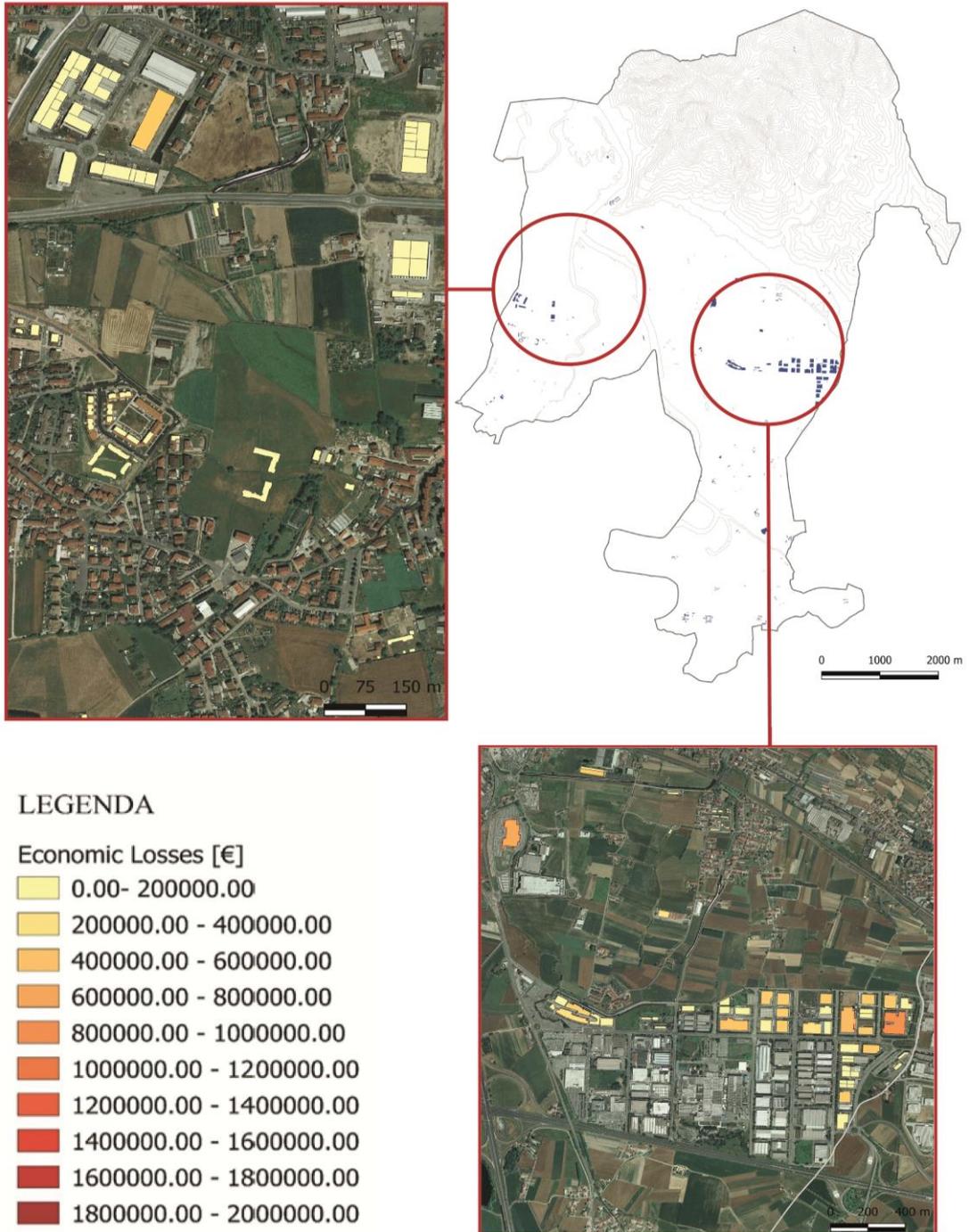


Figura 6-48 Perdite economiche medie, calcolate per un periodo di 100 anni con probabilità di eccedenza del 39%

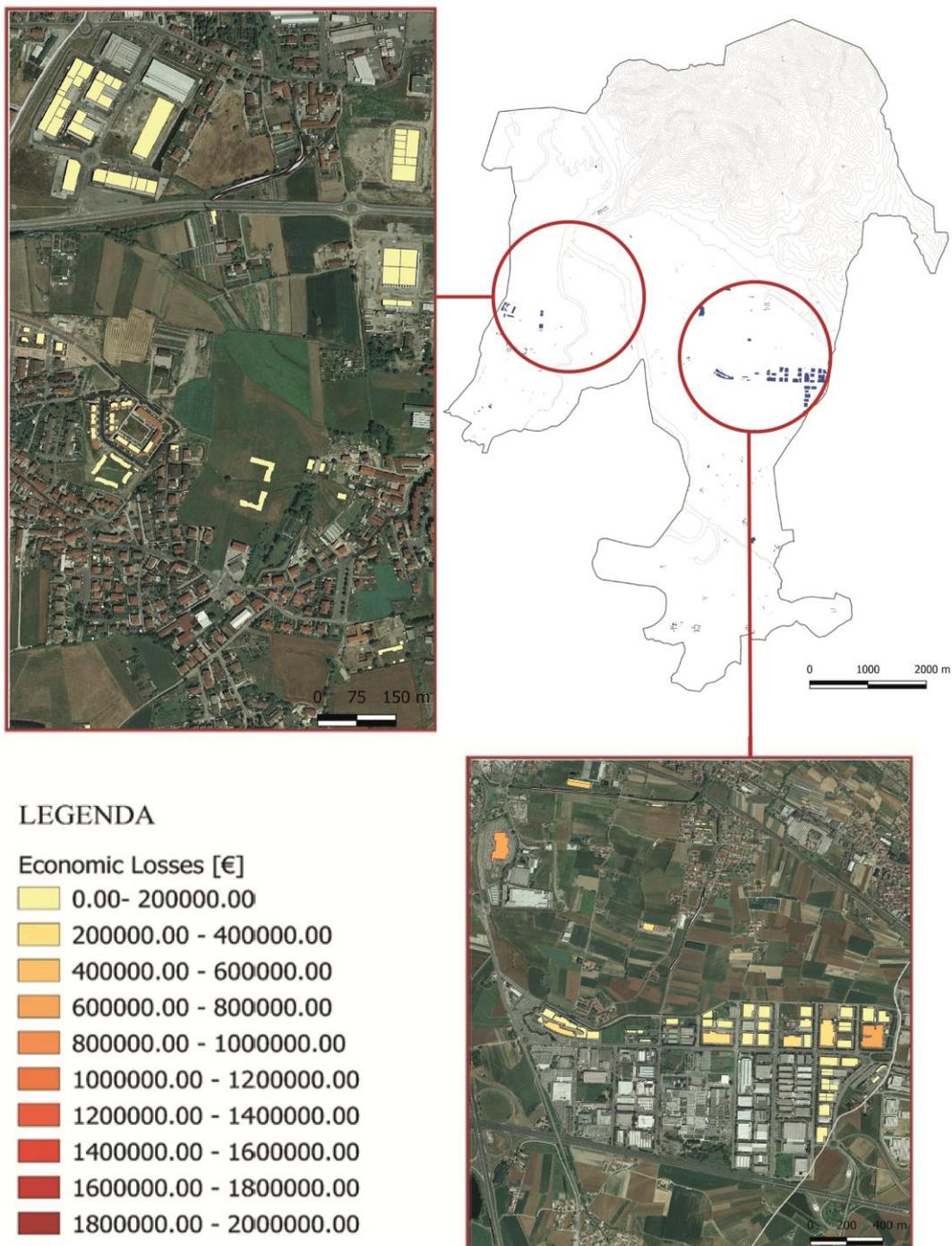


Figura 6-49 Perdite economiche medie, calcolate per un periodo di 100 anni con probabilità di eccedenza 50%

EDIFICI DI CEMENTO ARMATO E MURATURA

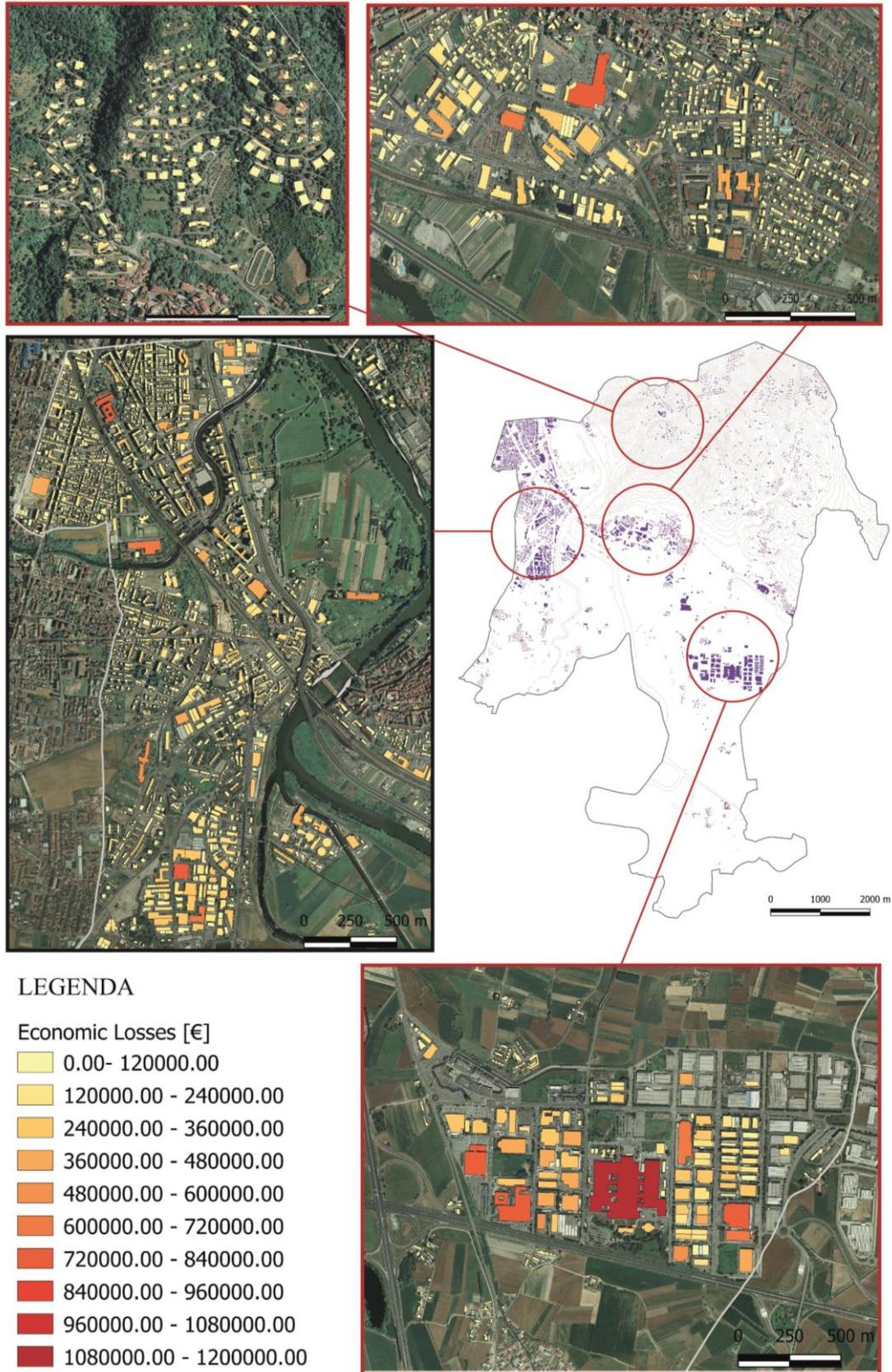


Figura 6-50 Perdite economiche medie per edifici in muratura con probabilità di eccedenza dell'1% e del 2%

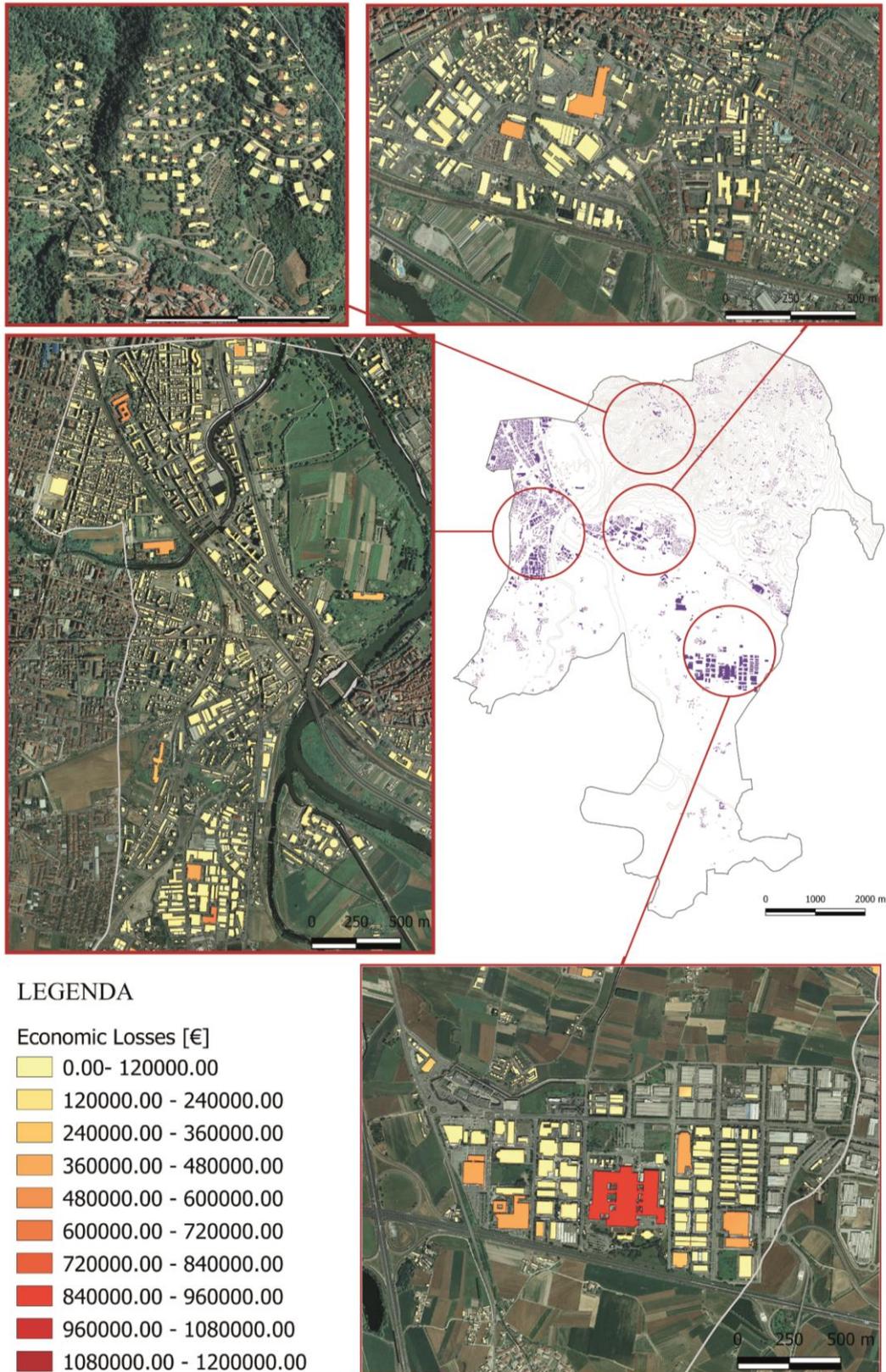


Figura 6-51 Perdite economiche medie per edifici in muratura con probabilità di eccedenza del 39%

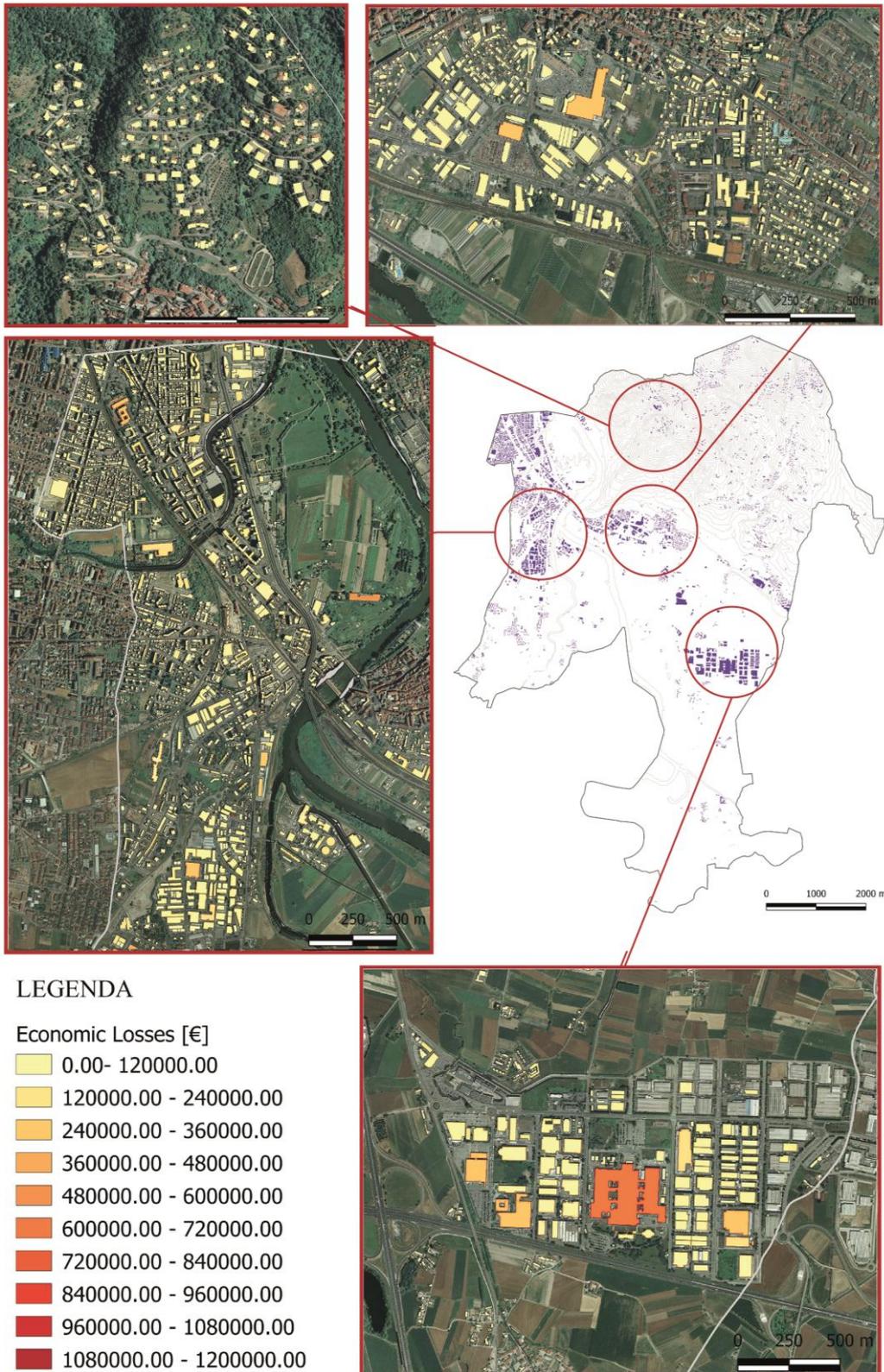


Figura 6-52 Perdite economiche medie per edifici in muratura con probabilità di eccedenza del 50%

MURATURA

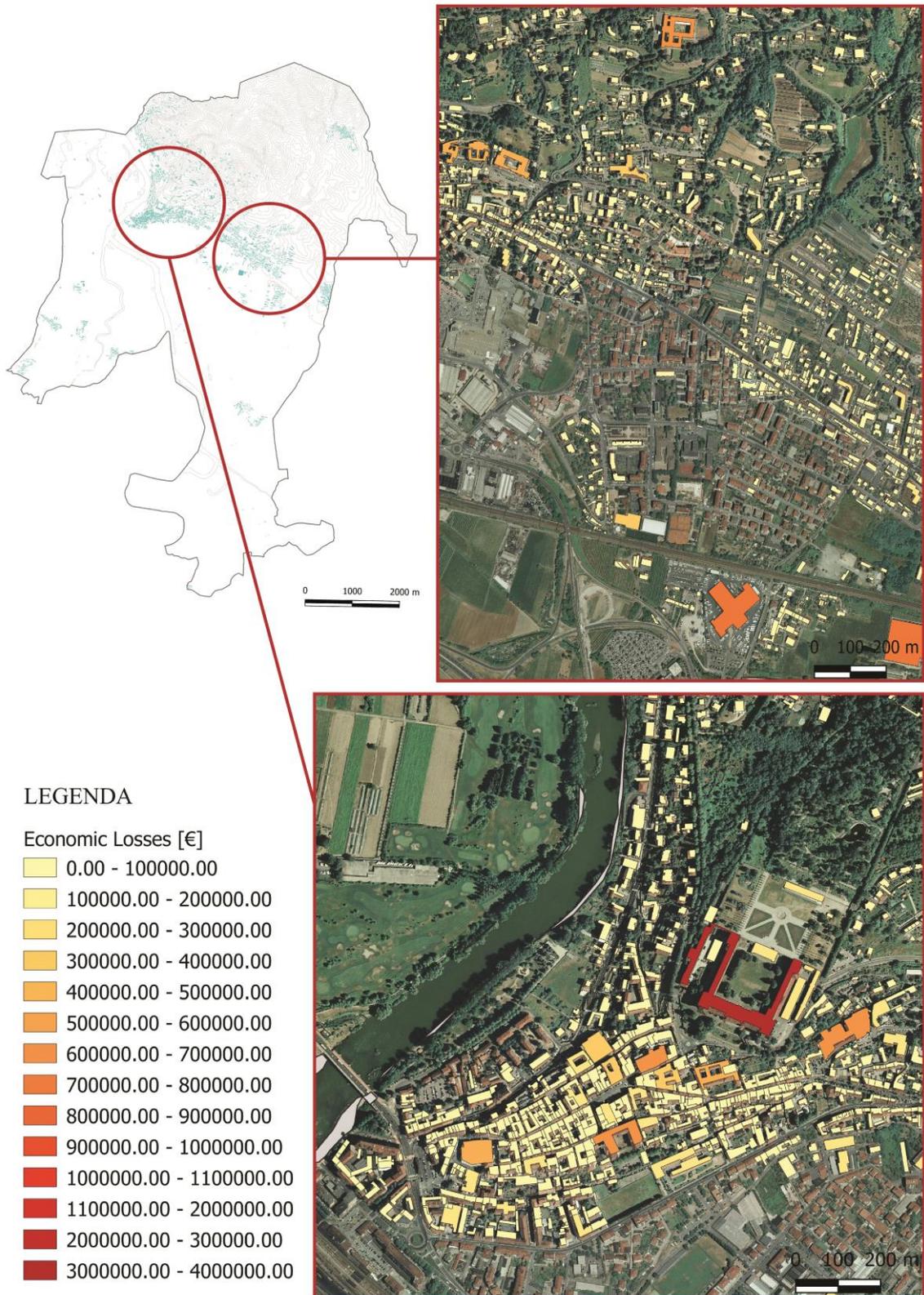


Figura 6-53 Perdite economiche medie per edifici in muratura con probabilità di eccedenza dell'1% e del 2%

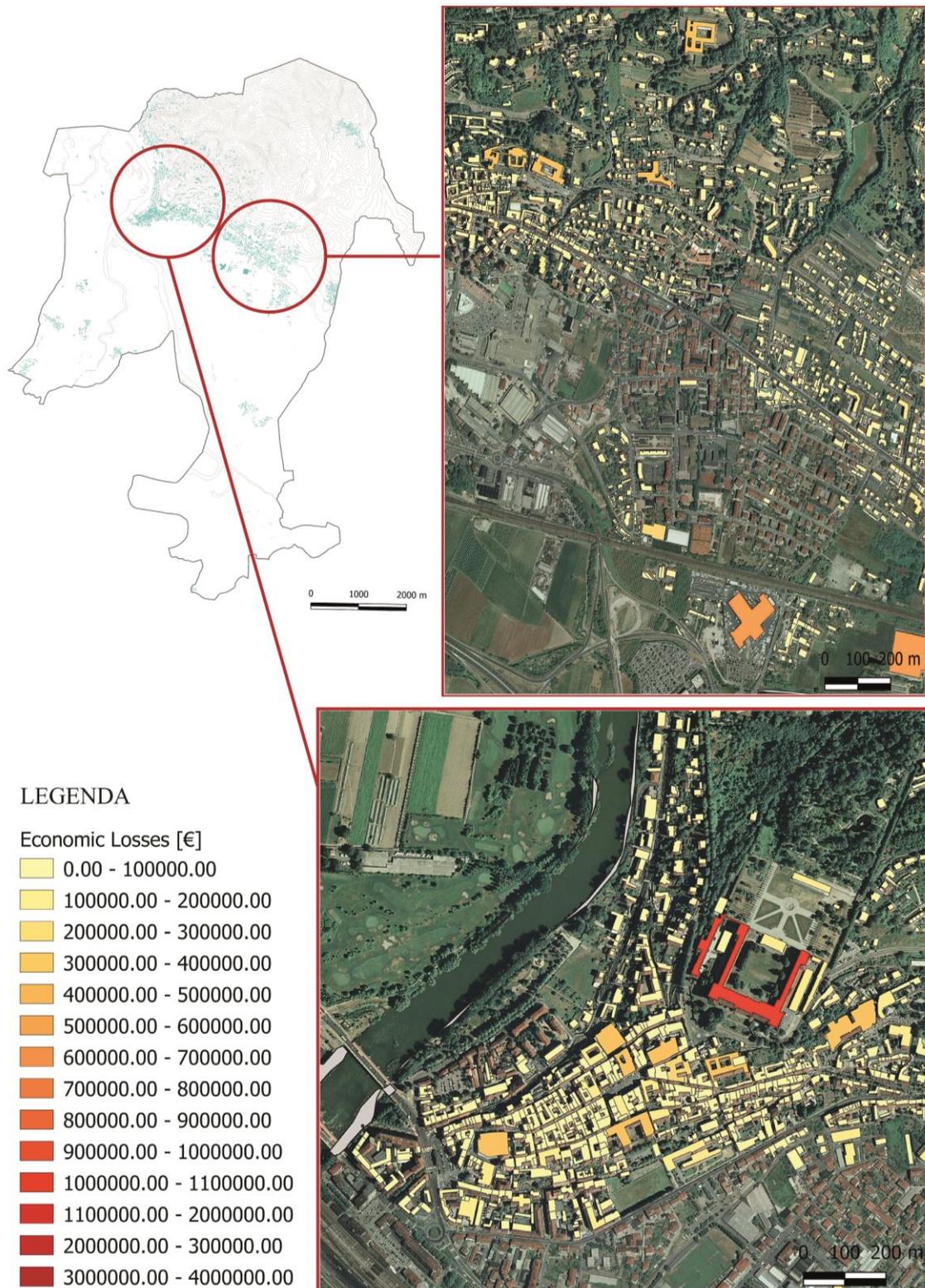


Figura 6-54 Perdite economiche medie per edifici in muratura con probabilità di eccedenza del 39%

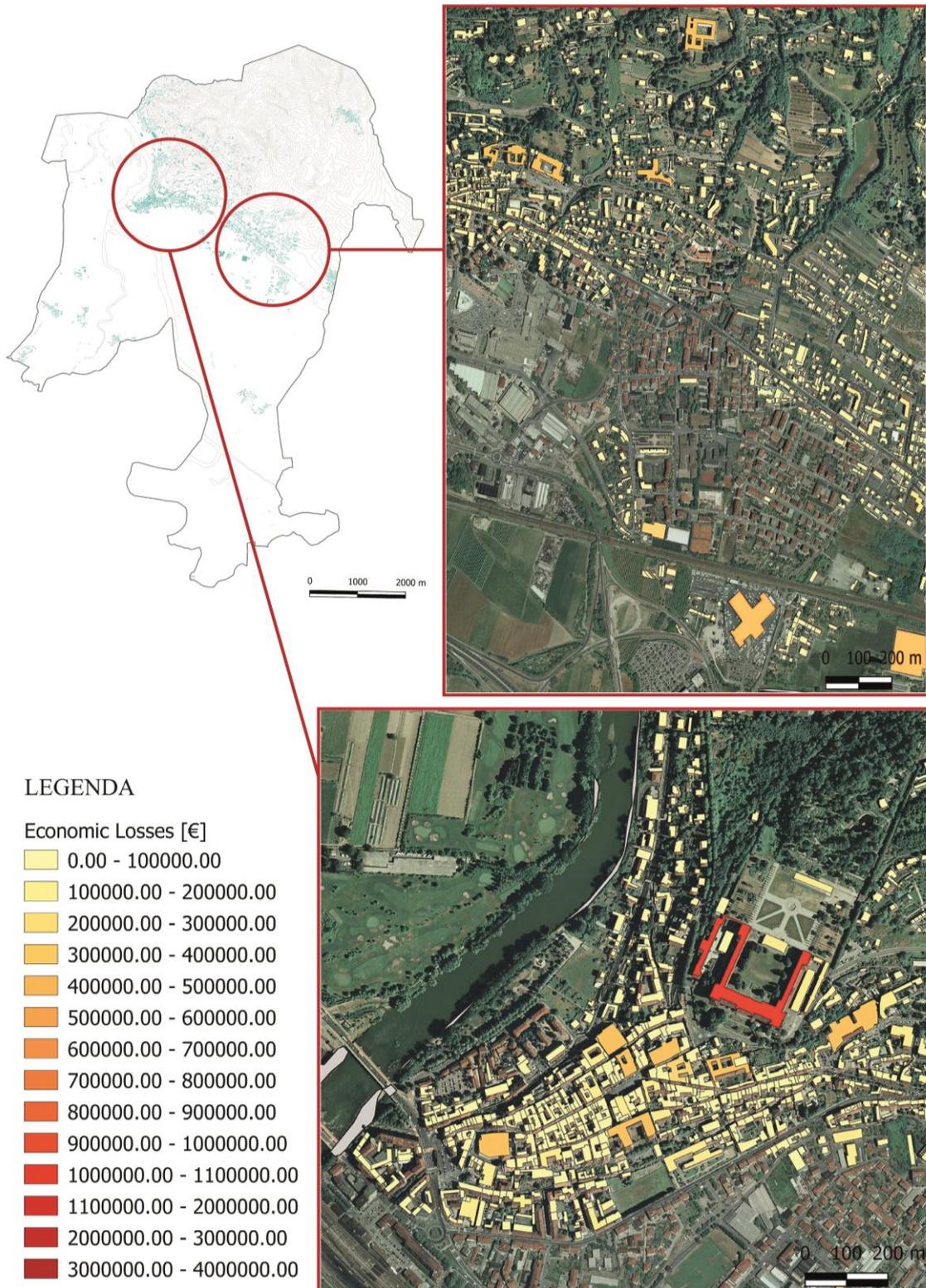


Figura 6-55 Perdite economiche medie per edifici in muratura con probabilità di eccedenza del 50%

Come evidenziato dalle mappe di pericolosità sismica divise per tipologia costruttive, il territorio è soggetto ad un'accelerazione di picco al suolo decisamente ridotta (mostrando valori compresi tra 0.05 per tempi di ritorno più bassi e 0.14 per periodi di ritorno elevati) che influenza in maniera importante i risultati. Sulla base di quanto evidenziato, confrontando i risultati ottenuti con le mappe di pericolosità della regione Piemonte, si può senz'altro evidenziare come queste siano coerenti con quanto atteso. Per quanto concerne le perdite in termine economico, anche esse risultano basse se confrontate con quelle rilevate in altre zone a sismicità più elevate: le perdite sono infatti prevalentemente connesse alla metratura dell'edificio ed al costo di ricostruzione ad esso collegato (come evidenziato nella Figura 6-56).

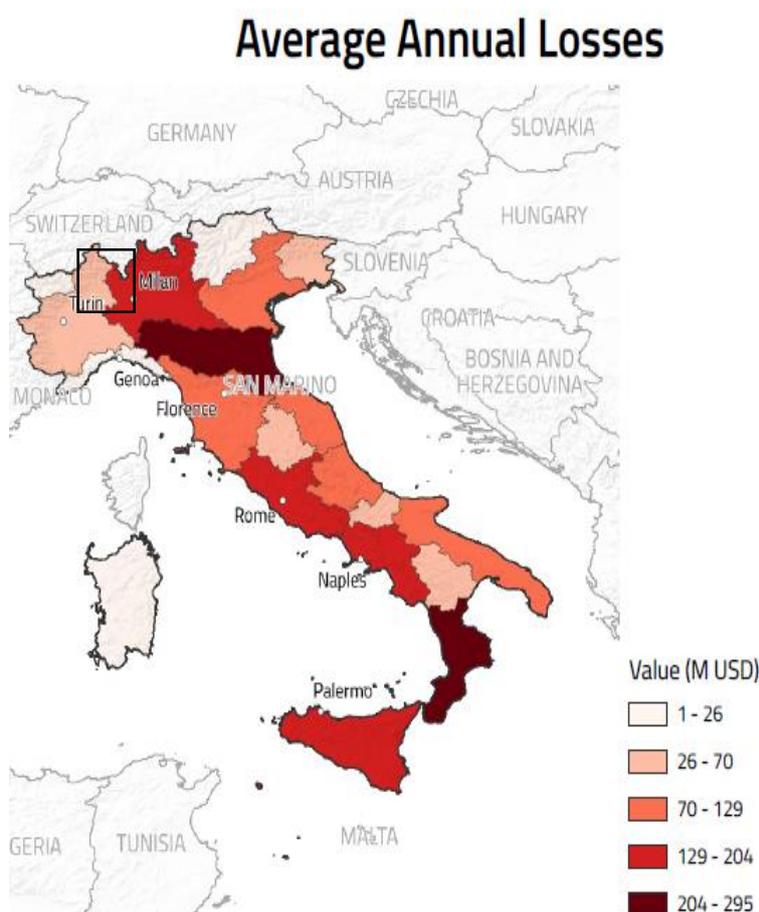


Figura 6-56 Perdite medie annuali per le regioni italiane, elaborata della GEM per il territorio italiano

Noto quanto appena detto le perdite legate agli edifici in cemento armato risultano sensibilmente più basse se confrontate a quelle legate agli edifici in muratura ai quali è stato attribuito un costo di ricostruzione al metro quadro maggiore. Al fine di valutare le perdite totali relative agli edifici delle tre tipologie considerate, si riporta nel grafico seguente (Figura 6-57) un confronto tra le

curve di perdita: queste curve possono avere un ruolo fondamentale nella scelta degli interventi di ristrutturazione degli edifici in quanto permettono di capire quale tipologia di strutture sia maggiormente a rischio e possa essere causa di perdite economiche maggiori. Le perdite economiche risultano maggiori nel caso del cemento armato con tamponamenti in muratura, ma questo fatto è dovuto solamente al maggior numero di elementi analizzati (6825).

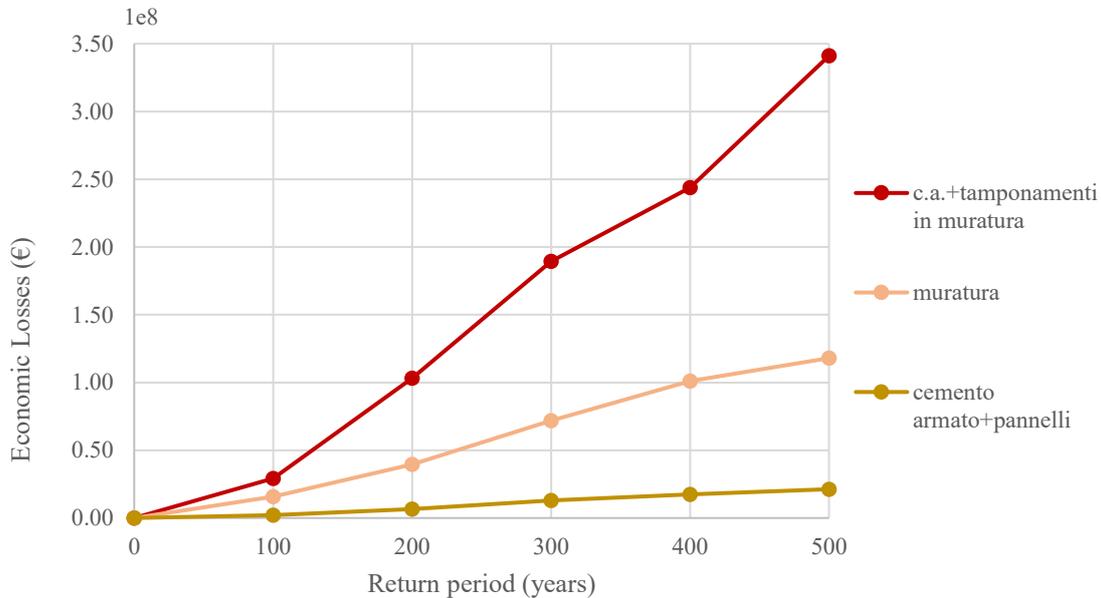


Figura 6-57 Andamento delle perdite economiche legate alle componenti strutturali per le tre tipologie costruttive considerando un quantile medio (le perdite non sono normalizzate)

Nel paragrafo 6.5.1. e in particolar modo nella parte riguardante la creazione della tassonomia, dopo una prima analisi effettuata sulla base dei dati forniti dalla regione Piemonte (Geoportale e Arpa Piemonte), si è tentato di utilizzare dei parametri aggiuntivi per caratterizzare in maniera migliore gli edifici. Si dichiara sin da subito che data la bassa sismicità della zona tali parametri potrebbero aver meno rilevanza rispetto alla loro applicazione in una tassonomia relativa a edifici costruiti in zone caratterizzate da alta sismicità, ma tale tentativo si ritiene importante perché può fornire degli spunti per l'elaborazione di dati a scala territoriale tagliando completamente i costi relativi alle valutazioni in sito.

Risulterebbe del tutto inutile mappare nuovamente la pericolosità sismica, dunque l'analisi riguarderà solo le perdite economiche, con l'obiettivo di valutare se l'inserimento di determinati parametri influenzi le perdite economiche collegate agli edifici.

Nel caso del cemento armato, prima di iniziare con la seconda fase di analisi, si è valutato quanti edifici avessero delle caratteristiche sfavorevoli tra quelle indicate. Nel caso di edifici in cemento armato caratterizzati da chiusure dello stesso materiale si è presupposto che la caratteristica di irregolarità avesse influenza sulle perdite economiche e per questo motivo, sulla base della Figura 6-58, ci si aspetta un aumento delle perdite, ma non di ingente valore, dal momento che la

maggioranza degli edifici in cemento armato si presentano di forma rettangolare (dato piuttosto plausibile, dato che per la maggior parte si tratta di edifici costruiti recentemente- si sono considerati appartenenti a tale categoria gli edifici costruiti dal 2000 in poi) e quindi costruiti sulla base di normative moderne o di capannoni industriali i quali presentano solitamente una forma rettangolare). Per quanto riguarda la muratura, in questo caso gli edifici si presentano di forma prettamente irregolare e questo è un dato veritiero se ci si riferisce ai centri storici costruiti precedentemente alla nascita di normative adeguate dal punto di vista sismico: nel caso della muratura ci si aspetta un incremento ingente delle perdite, dovuta ad una doppia situazione sfavorevole: la vicinanza ad altri edifici e l'irregolarità in pianta. Gli edifici in cemento armato e muratura, presentano caratteristiche di interpretazione più complessa: quando essi sono infatti localizzati vicino al centro o in aree con maggioranza di edifici ad uso residenziale, essi presentano irregolarità; discorso differente riguarda invece gli edifici che ospitano attività industriali o commerciali: per tale motivo ci si aspetta un aumento delle perdite limitato, la cui influenza può essere data dalla reciproca vicinanza tra gli edifici

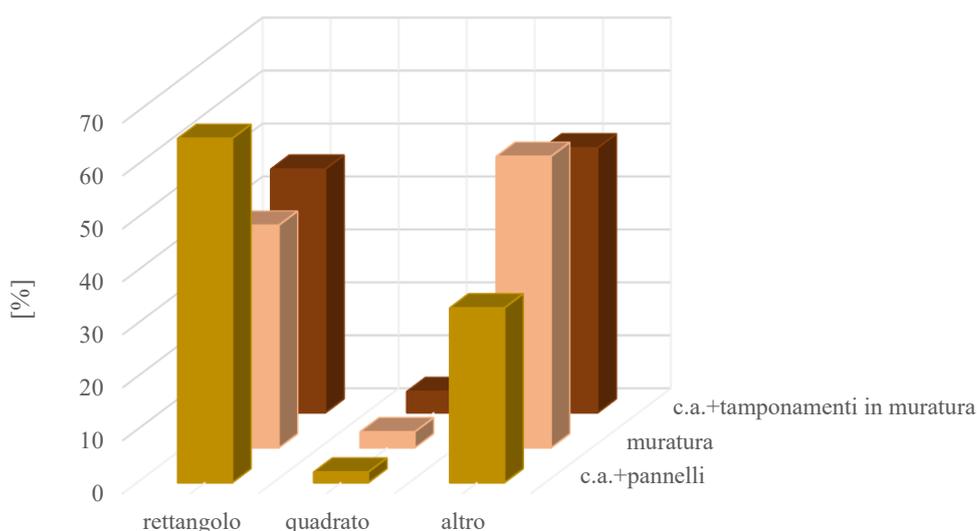


Figura 6-58 Confronto tra le tipologie costruttive e la forma dell'impronta dell'edificio

Risulta molto più complesso valutare invece gli effetti su un edificio che si trova “isolato” o “non isolato”, questa caratteristica infatti è di difficile interpretazione qualora non si ritengano disponibili dati aggiuntivi quali: presenza di ancoraggi, differenza importante di altezza tra gli edifici adiacenti ecc. È però possibile però supporre che, dal momento che Moncalieri non è soggetta a fenomeni sismici rilevanti, tali meccanismi siano quasi sicuramente assenti e che dunque la vicinanza ad un edificio possa ritenersi una caratteristica negativa, capace di influenzare la risposta sismica della costruzione.

L'aggiunta della caratteristica "LLRS type" (inserimento di meccanismo resistente alle azioni orizzontali), si presenta invece come una caratteristica aggiuntiva in grado di migliorare sicuramente la precisione dell'analisi.

Si riporta in Figura 6-59 un confronto tra le perdite economiche ottenute con l'utilizzo della prima tassonomia e quelle ottenute con la seconda tassonomia, dove le ipotesi sopra effettuate trovano riscontro nei risultati: come visibile nella suddetta figura, nel caso del cemento armato si assiste ad un aumento delle perdite lievi (le curve sono praticamente sovrapposte), dovuto come spiegato in precedenza alla regolarità della struttura e al fatto che gli edifici in cemento armato sono solitamente associati a destinazioni d'uso industriali, dunque si trovano prevalentemente isolati e fuori dal centro abitato e quindi distanziati tra loro. Nel caso delle strutture in cemento armato e muratura, si registra un aumento delle perdite economiche, ma dal momento che a tali strutture non è stato associato un prezzo al metroquadrato maggiore, la differenza si presenta comunque lieve; nell'ultimo caso, invece, delle strutture in muratura, queste, in quanto detentrici di caratteristiche considerate negative, quali l'irregolarità in pianta e la vicinanza ad altri edifici, soprattutto nel lungo periodo mostrano un andamento crescente delle perdite, che si discosta da quanto ottenuto in precedenza (basti pensare all'influenza del Castello di Moncalieri, il quale noto già in precedenza per le perdite economiche elevate ad esso associate è stato definito "irregolare in pianta").

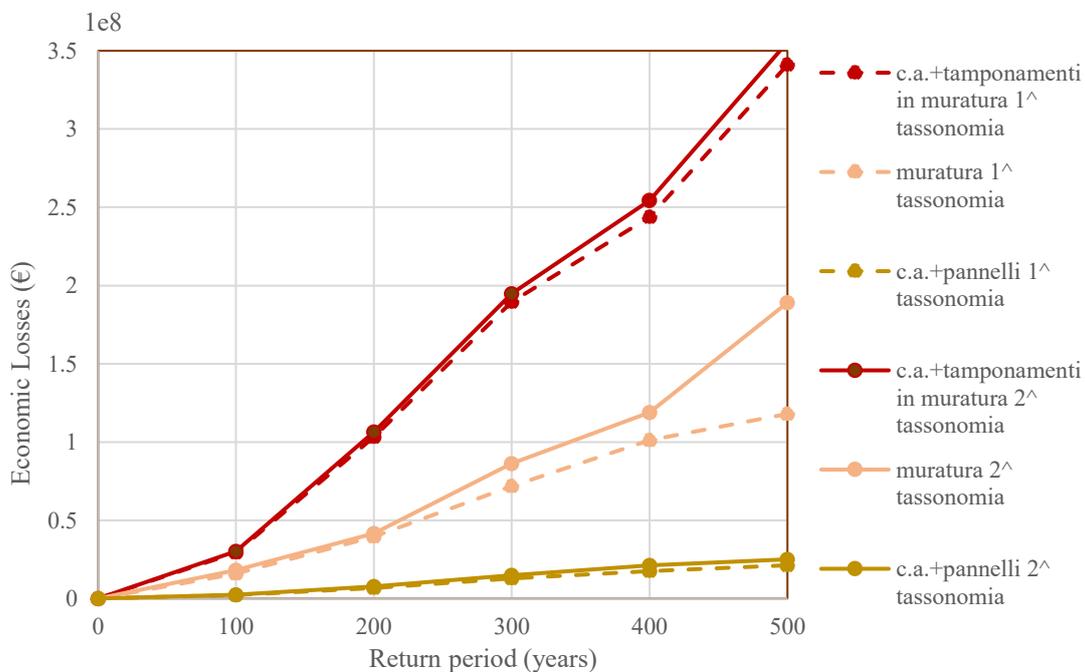


Figura 6-59 Confronto tra le perdite economiche ottenute dalla prima tassonomia e quelle ottenute con la seconda tassonomia considerando un quantile medio

6.7.2 Scenario damage assessment e scenario risk assessment analysis output

Anche in questo caso si sono mantenute le stesse divisioni attuate per l'analisi stocastica, dunque la distribuzione del danno e le perdite economiche verranno mappate separatamente (edifici in cemento armato con pannelli nella Figura 6-60, nella Figura 6-61 e nella Figura 6-62, edifici in c.a. (chiusure verticali in muratura) nella Figura 6-64, nella Figura 6-65 e nella Figura 6-66; muratura nella Figura 6-68 e nella Figura 6-69), procedendo in questo caso con un confronto diretto tra le due tassonomie (Figura 6-63 per strutture in cemento armato e pannelli, Figura 6-67 per edifici in cemento armato e muratura e Figura 6-70 per la muratura) in modo da poter apprezzare eventuali differenze. In questo paragrafo verranno analizzati prima gli effetti del terremoto di Imperia, partendo da quello storico e proseguendo con terremoti simulati di magnitudo crescenti e successivamente lo stesso percorso verrà seguito per il terremoto di Val Pellice. Si sottolinea sin da subito che la valutazione delle perdite economiche ha riguardato solo i terremoti simulati, in quanto la città all'epoca dei terremoti si presentava sicuramente diversamente ed in particolare, la moneta utilizzata era differente: non avrebbe per tali motivi senso valutare le perdite relative a tali terremoti. I risultati del calcolatore *Scenario damage assessment* sono rappresentati da mappe che illustrano la probabilità che si verifichi un determinato livello di danno, sulla base di quattro livelli di danno quali: no damage, slight, moderate e collapse legati ad un singolo evento sismico. I risultati dell'analisi *Scenario risk assessment* riguardano invece le perdite economiche legate a ogni scenario sismico. Nelle Tabelle 6-6 e 6-7 sono riportati i dati relativi ai terremoti storici di Imperia (Liguria) e di Val Pellice (Piemonte). Come sottolineato nel paragrafo 6.7 le simulazioni considerano tali epicentri, ma si prende in considerazione una profondità standard dell'ipocentro pari a 10 km e delle magnitudo rispettivamente pari a : 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5.

Dati Terremoto Imperia (Liguria)	
Coordinate epicentro	Latitudine: 43.89
	Longitudine: 7.99
Data Evento	23 febbraio 1887
Profondità dell'ipocentro	15 km
Distanza da Moncalieri	126 km
Magnitudo	6.5

Tabella 6-6 Dati principali del terremoto del 1887 ad Imperia (Liguria)

Dati Terremoto Val Pellice (Piemonte)	
Coordinate epicentro	Latitudine: 44.84
	Longitudine: 7.25
Data Evento	2 aprile 1808
Profondità	25 km
Distanza dall'epicentro	55 km
Magnitudo	5.7

Tabella 6-7 Dati principali del terremoto del 1807 a Val Pellice (Piemonte)

CEMENTO ARMATO (CON CHIUSURE VERTICALI IN CEMENTO)

Nel caso di edifici della tipologia discusse, il terremoto di Imperia non determina il danneggiamento delle costruzioni, le quali mostrano una probabilità di non danneggiarsi compresa tra il 90 ed il 100%. Tale caratteristica è valida per tutti i casi di terremoto ad Imperia, storico e simulato. Per questo motivo le mappe relative a tutti i livelli di danno risultano obsolete e di scarso interesse, così come le perdite ad essi associate, che risultano essere in tutti i casi nulle. Noti quindi i risultati delle analisi per il terremoto storico ad Imperia, i terremoti simulati di magnitudo 4.5, 5, 5.5 e 6, si procede con la valutazione dei livelli di danno associati all'altro terremoto simulato, quello in Val Pellice (nel Pinerolese).

Le medesime considerazioni effettuate per i terremoti simulati in Liguria hanno la stessa valenza nel caso in cui si consideri il terremoto storico di Val Pellice nel 1808 e i terremoti simulati di magnitudo 4.5 e 5.

Nel caso di terremoto in Val Pellice di magnitudo 5.5 e 6, i dati subiscono una variazione, che, mentre nel caso della magnitudo 5.5 si presenta comunque ridotta (la probabilità per le costruzioni in cemento armato di non subire danni è comunque pari al 90-100% e la probabilità di subire un danno lieve non super il 10%), in caso di magnitudo maggiore si iniziano a osservare dei danni di importanza maggiore, i cui risultati sono rappresentati nella Figura 6-60.

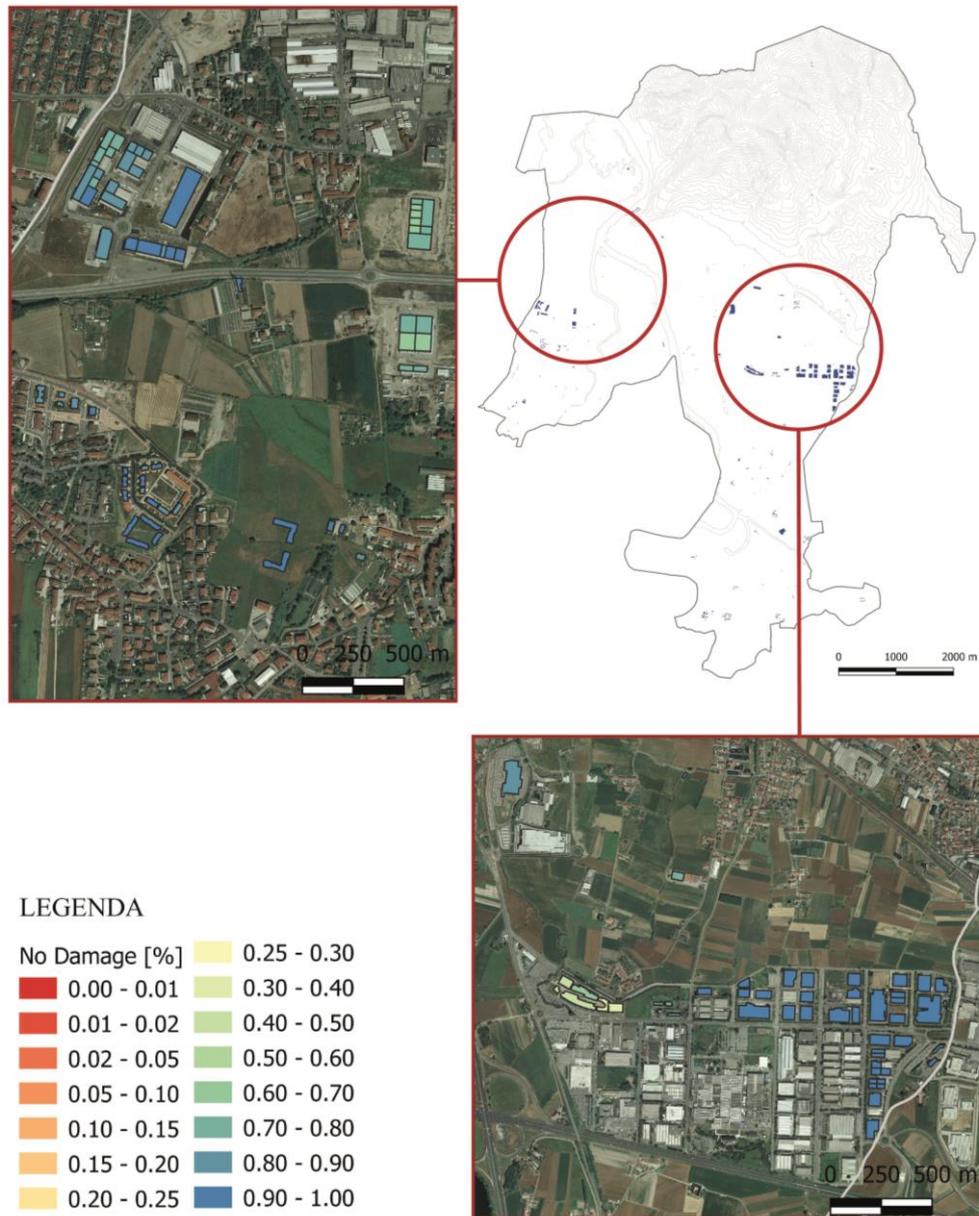


Figura 6-60 Distribuzione del danno in una zona del comune di Moncalieri con edifici in cemento armato, considerando il terremoto simulato di magnitudo 6 a Val Pellice

Nel caso del terremoto simulato a Val Pellice di Magnitudo 6.0 si osserva che la maggior parte degli edifici hanno una probabilità pari al 100% di non danneggiarsi, mentre si riconosce chiaramente la presenza di alcuni edifici la cui probabilità di non subire danno è maggiore. Per questo motivo si è deciso di indagare in maniera più approfondita gli effetti di tale terremoto su tali edifici (e quindi focalizzando l'attenzione su una determinata zona), i cui effetti sono visibili nella Figura 5-62.

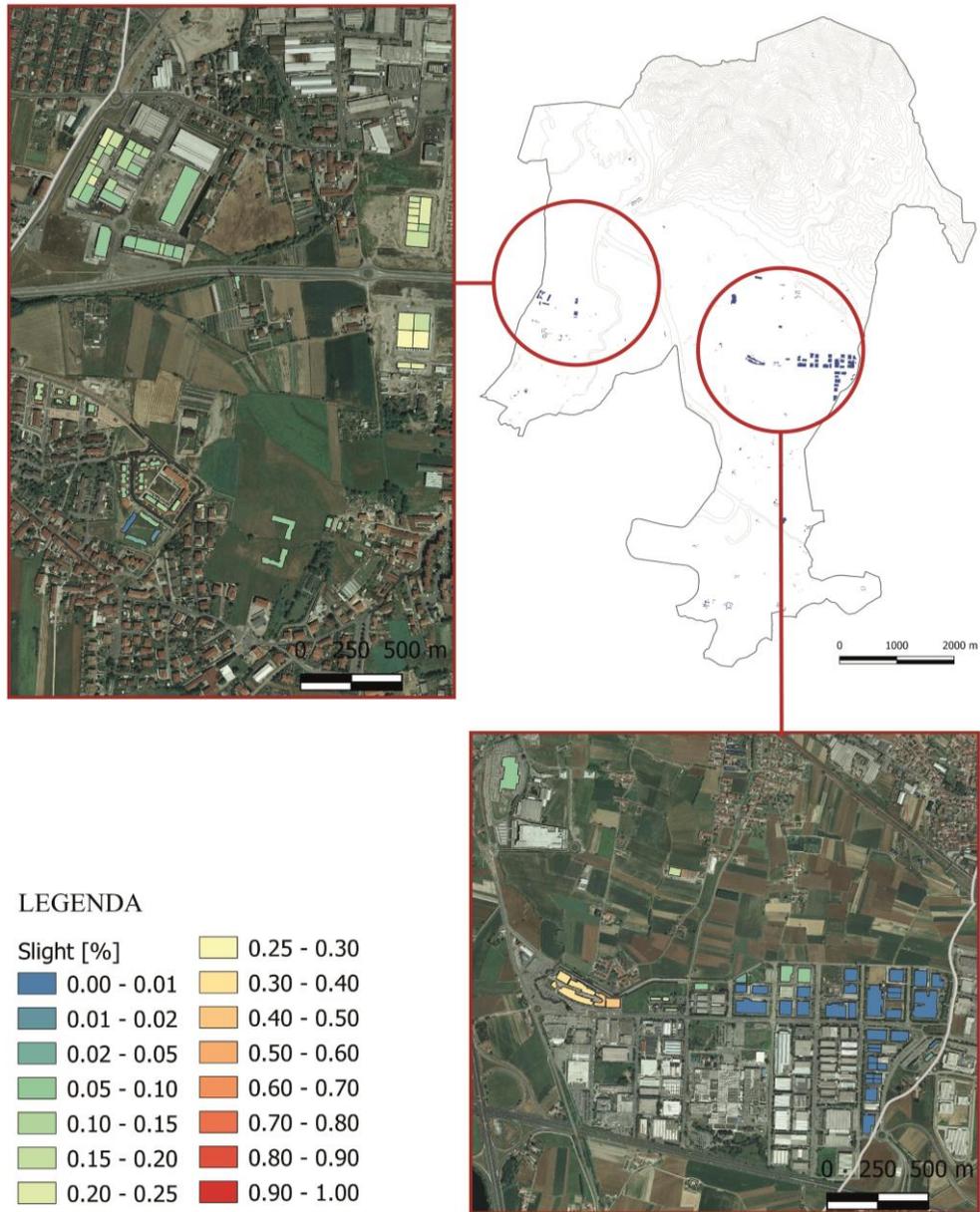


Figura 6-61 Distribuzione del danno in una zona del comune di Moncalieri con edifici in cemento armato, considerando il terremoto simulato di magnitudo 6 a Val Pellice ed un livello di danno lieve

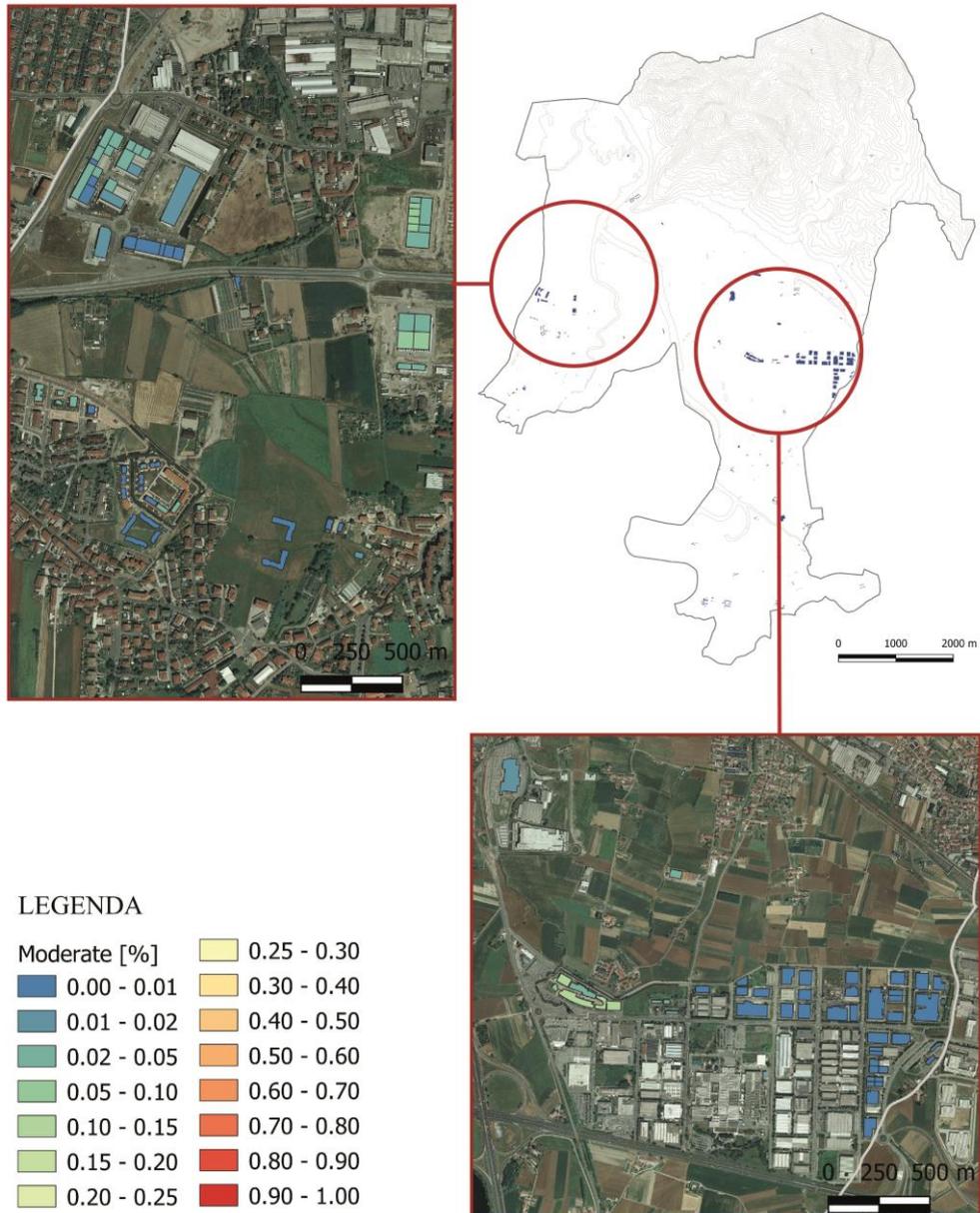


Figura 6-62 Distribuzione del danno in una zona del comune di Moncalieri con edifici in cemento armato, considerando il terremoto simulato di magnitudo 6 a Val Pellice ed un livello di danno moderato

Nel caso di danno moderato, le probabilità degli edifici di raggiungere tale livello di danno si presenta bassa (pochi edifici superano l'1%). Il danno relativo al raggiungimento del collasso non è stato mappato, in quanto la possibilità di raggiungerlo si presenta in tutti i casi nulla

Nel caso della seconda tassonomia, si assiste ad una condizione differente, dovuta al fatto che gli edifici sono definiti in maniera maggiormente precisa: essi risultano di forma rettangolare e nella maggior parte dei casi distanziati tra di loro, fatto che li porta ad una possibilità di non danneggiarsi compresa tra il 90% ed il 100%.

Tali risultati trovano riscontro nelle perdite economiche; perdite ridotte, dato quanto evidenziato dalla Figura 6-57 e dalla Figura 6-58: gli unici edifici in cemento armato soggetti a danno sono quelli che risultano avere più di un piano (probabilmente trattasi di centri commerciali o grandi centri di distribuzione e tale caratteristica verrà studiata e definita in maniera più specifica nel capitolo 7), mentre per la maggior parte, gli edifici sono soggetti a danni lievi o nulli, infatti la maggior parte degli edifici ha perdite comprese tra 0 e 5000 €. Nel caso di tale tipologia di edifici le perdite elevate sono relative ad una grande superficie calpestabile.

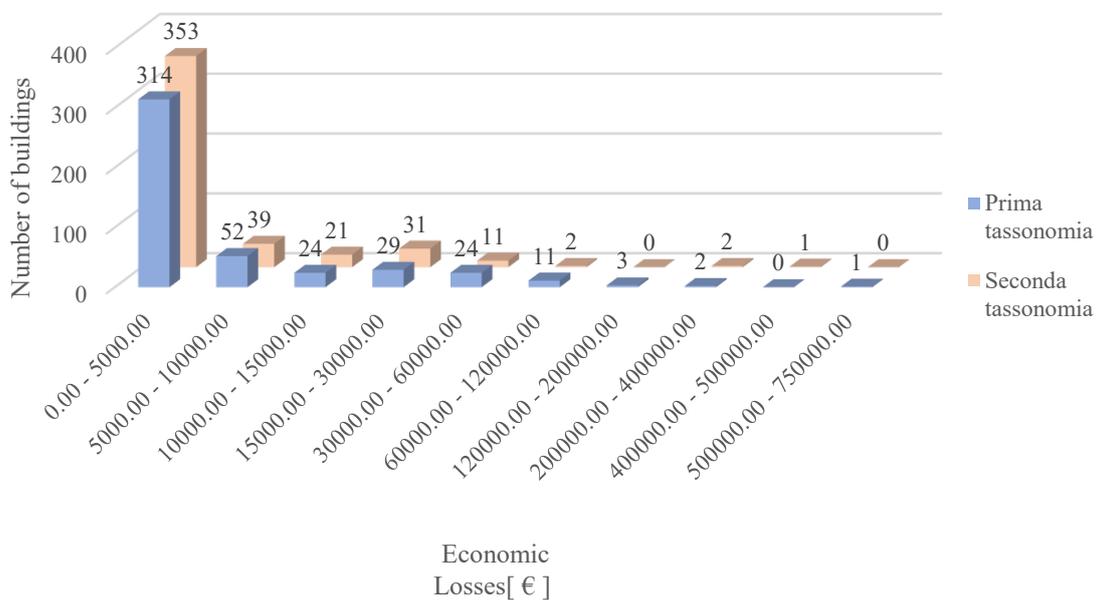


Figura 6-63 Distribuzione delle perdite economiche degli edifici in cemento armato considerando un totale di 460 edifici – prima tassonomia in rosa e seconda tassonomia in blu

CEMENTO ARMATO (CON TAMPONAMENTI IN MURATURA)

Nel caso di questa tipologia costruttiva si osserva lo stesso comportamento del cemento armato (fatto coerente con quanto atteso dato che sono state utilizzate le medesime curve di vulnerabilità e di fragilità) per quanto riguarda il terremoto storico di Imperia ed i terremoti simulati nello stesso luogo di magnitudo 4.5, 5, 5.5 e 6 e dunque le perdite economiche associate a tali terremoti sono nulle.

Successivamente si è analizzato il caso di terremoto in Val Pellice e a partire dal terremoto storico del 1808, si è proseguito con la simulazione dei terremoti caratterizzati rispettivamente da magnitudo 4.5, 5, 5.5 e 6. Nel caso del terremoto storico, si osserva quanto definito in precedenza, ovvero tutti gli edifici hanno una probabilità compresa tra i 90% ed il 100% di non subire nessun danno, motivo per il quale la loro rappresentazione risulta poco rilevante. Risultati analoghi, sono osservabili per scenari di terremoto a Val Pellice di magnitudo 4.5 e 5; il caso di magnitudo elevate, pari a 5.5 e 6, la probabilità inizia a crescere gradualmente nel caso di magnitudo 5.5 per la quale si osserva che alcuni edifici hanno una probabilità pari al 90% di non subire nessun danno e si concretizza con risultati di maggior interesse nel caso di magnitudo pari a 6, di cui sono rappresentati nella Figura 6-64, nella Figura 6-65 e nella Figura 6-66. Anche in questo caso si opererà per stralci, data l'impossibilità di mostrare un quadro completo, che in ogni caso risulterebbe comunque poco interessante, dato che tutti gli edifici non rappresentati hanno una probabilità nulla di danneggiarsi in modo lieve. Come evidenziato dalle figure, gli edifici che presentano una probabilità di danneggiarsi diversa da 0 sono molto irregolari e con un'area elevata.

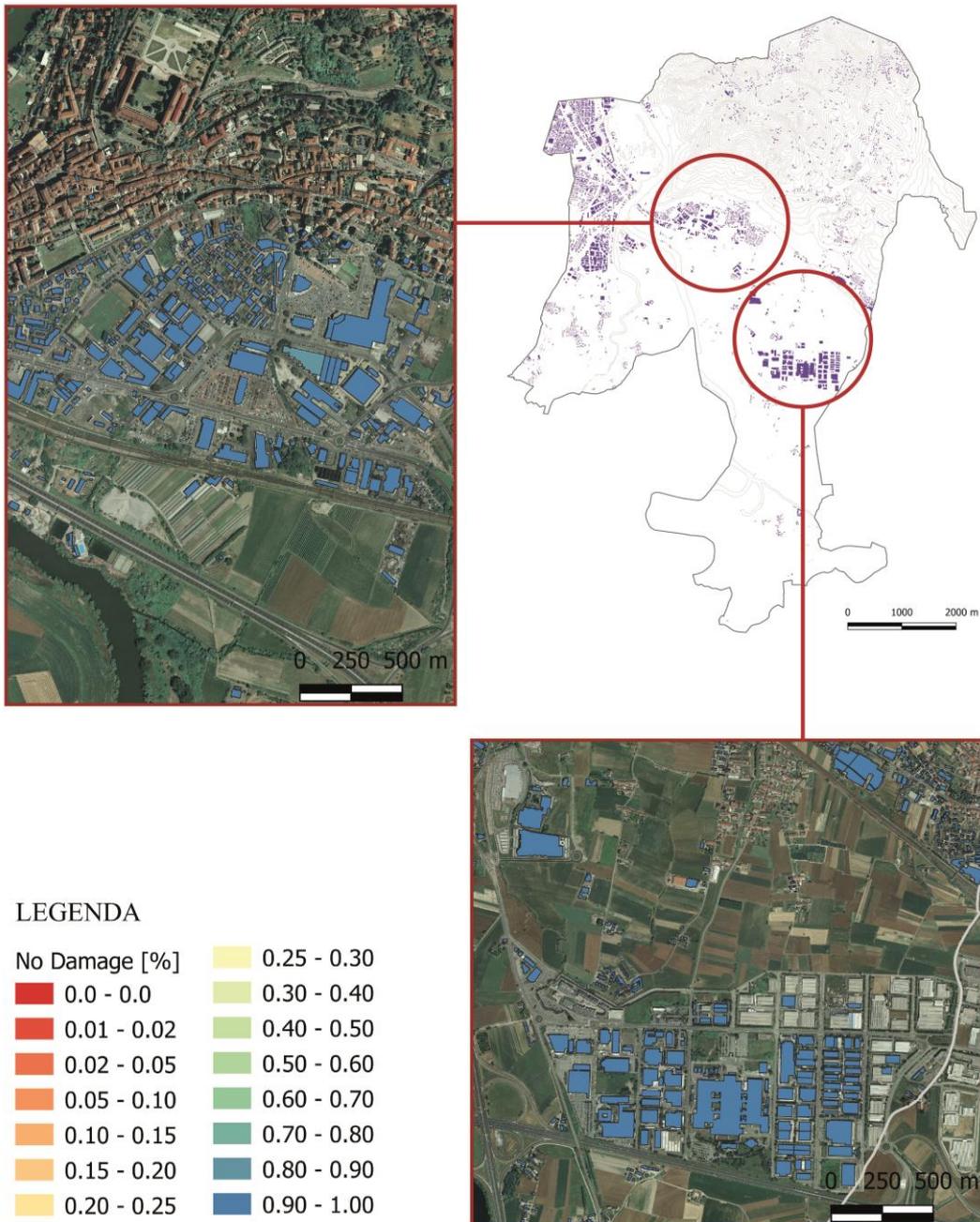


Figura 6-64 Distribuzione del danno in una zona del comune di Moncalieri con edifici in cemento armato e muratura, considerando il terremoto simulato di magnitudo 6 a Val Pellice

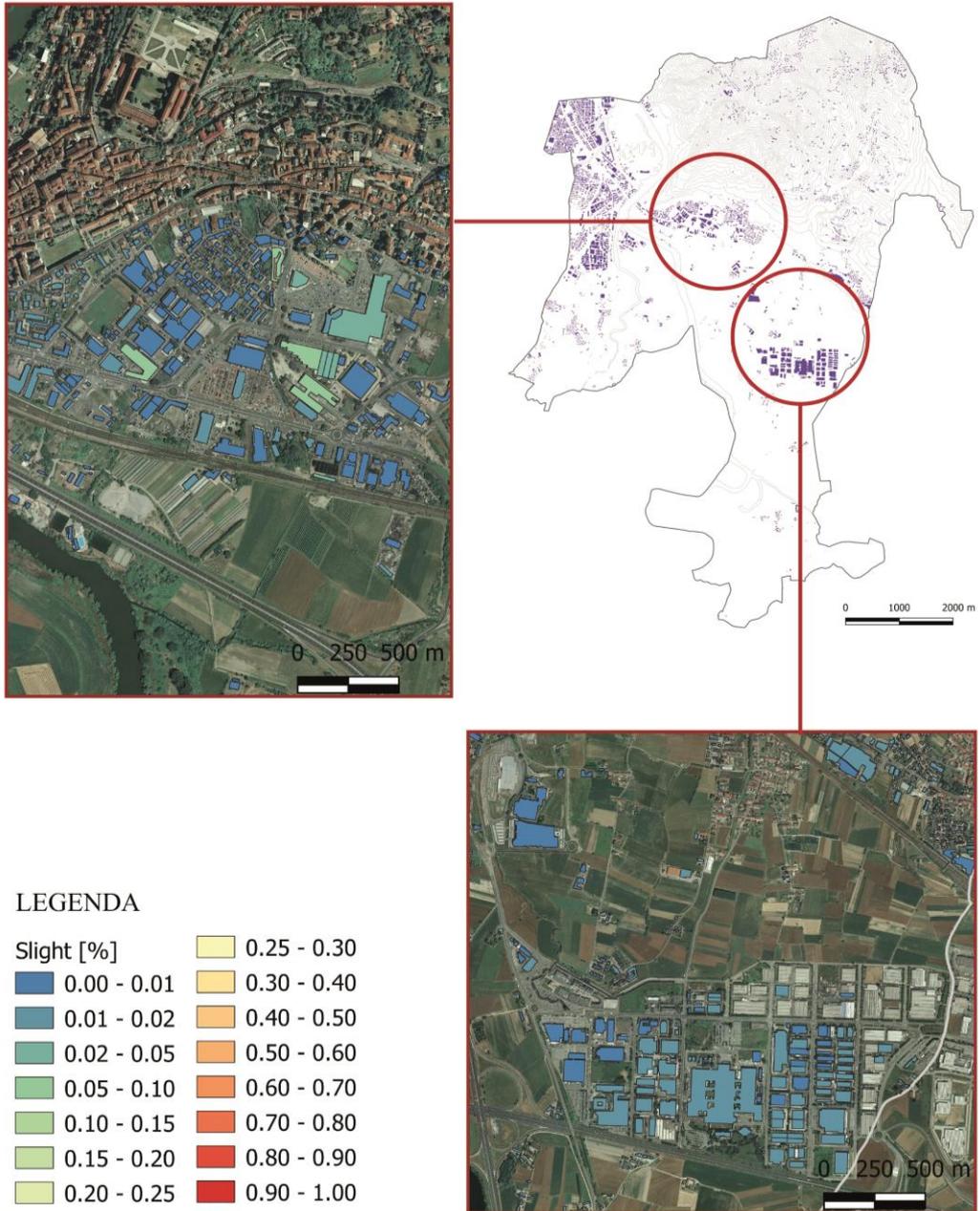


Figura 6-65 Distribuzione del danno in una zona del comune di Moncalieri con edifici in cemento armato e muratura, considerando il terremoto di magnitudo 6 a Val Pellice

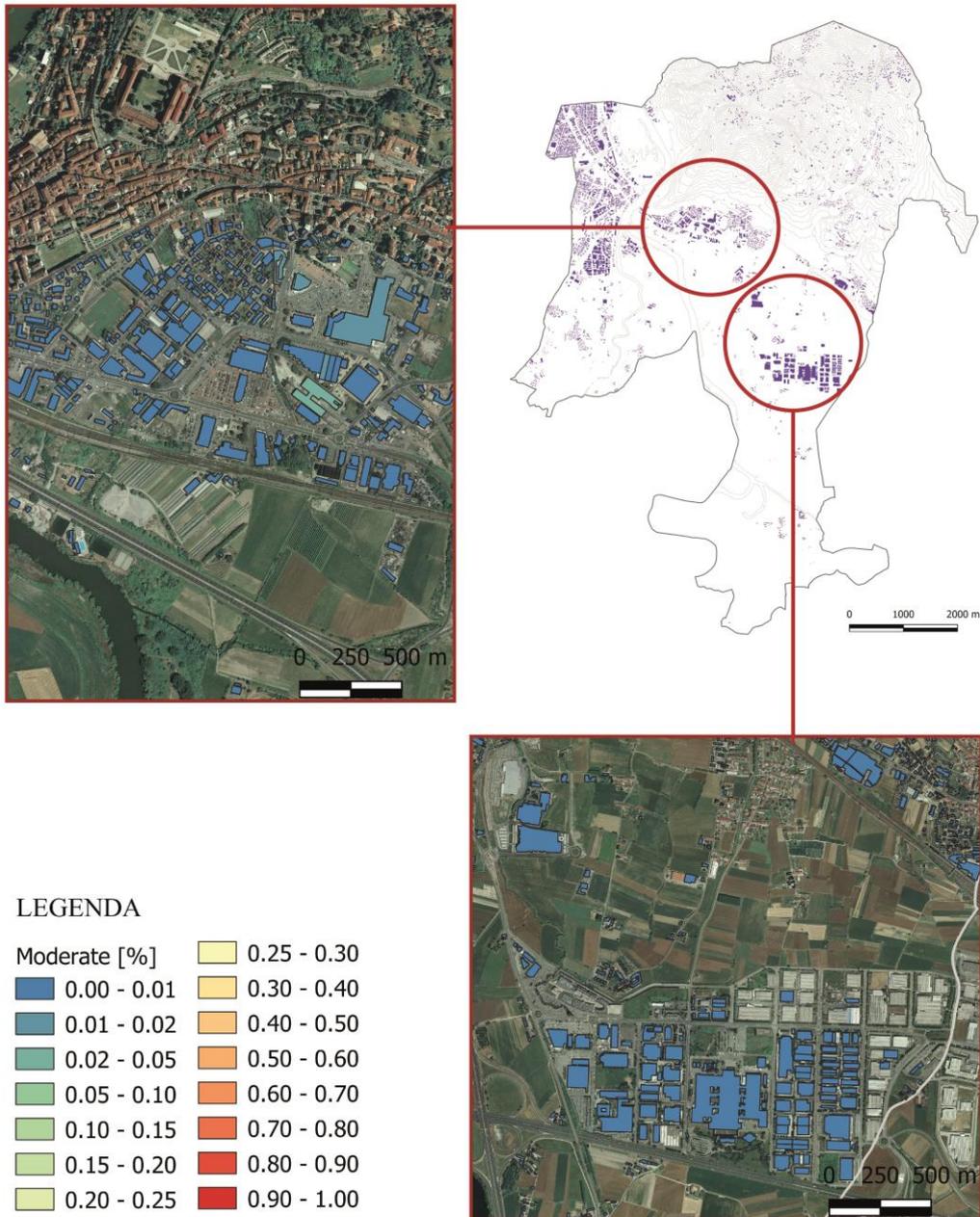


Figura 6-66 Distribuzione del danno in una zona del comune di Moncalieri con edifici in cemento armato e muratura, considerando il terremoto di magnitudo 6 a Val Pellice

Le perdite in questo caso appaiono dunque ridotte e si discostano solo leggermente nel caso della seconda tassonomia, probabilmente in relazione all'irregolarità degli edifici e alla distanza di separazione tra gli stessi, che causa una redistribuzione delle perdite ed il raggiungimento per una percentuale maggiore di edifici di perdite comprese tra i 5.000 ed i 1.000 €.

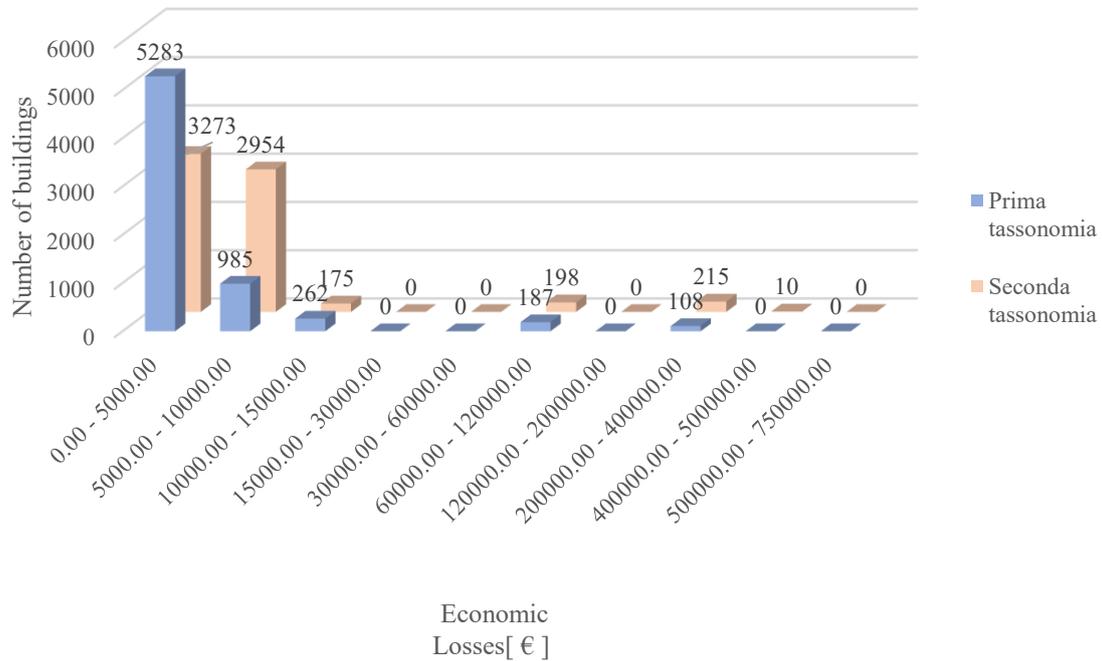


Figura 6-67 Distribuzione delle perdite economiche degli edifici in cemento armato e muratura considerando un totale di 6825 edifici (prima tassonomia in arancione e seconda in blu)

MURATURA

La maggior parte degli edifici in muratura sono localizzati nel centro storico di Moncalieri, in cui troviamo anche edifici più vulnerabili, quali le chiese. Per questo motivo ci si aspetta di riscontrare un danno localizzato negli edifici monumentali e delle perdite maggiori rispetto a quelle evidenziate nel caso degli altri edifici (legate comunque al differente prezzo al mq inserito nel modello di esposizione).

Si è proceduto seguendo l'ordine già descritto negli altri due casi, ovvero valutando prima il danno ed il rischio sismico in termini di perdita economica nel caso del Terremoto ad Imperia. Nel caso del terremoto storico, si ha che tutti gli edifici, ad eccezione delle chiese riportano una probabilità di non subire danni pari al 100%: questa condizione presuppone che nel caso dei terremoti simulati di magnitudo 4.5 e 5.0 nessuna costruzione avrà una probabilità di danneggiarsi maggiore. La simulazione di terremoti di magnitudo 5.5 e 6.0 ha avuto ha messo in luce la maggiore vulnerabilità degli edifici, ma tutti hanno comunque una probabilità di non danneggiarsi compresa tra il 90% ed il 100% ad eccezione delle chiese.

Differente è invece il caso del terremoto storico a Val Pellice e dei terremoti simulati: in questo caso si osservano probabilità differenti, le quali risultano crescenti al crescere dell'intensità

sismica: Dal momento che nel caso del terremoto storico e dei terremoti di simulati di magnitudo 4.5, 5, 5.5 e 6 nessuna struttura raggiunge mai il collasso, si è deciso di rappresentare il risultato che si presenta di maggior interesse. Dal momento che nel caso di terremoto simulato di magnitudo 6.0 gli effetti sono particolarmente sentiti dagli edifici, sono stati mappati tutti i livelli di danno: No Damage nella Figura 6-67, Slight, Moderate e Collapse nella Figura 6-68.

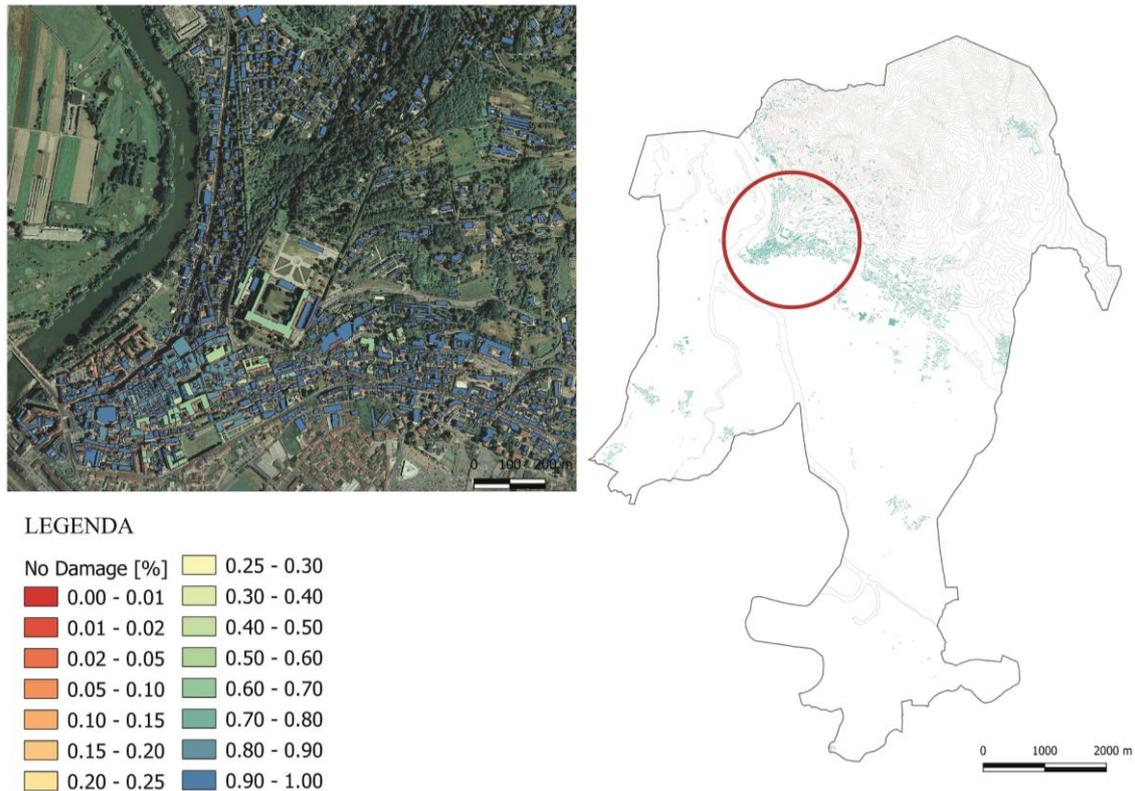


Figura 6-68 Distribuzione del danno nelle costruzioni in muratura del centro storico: confronto tra due scenari per il livello di danno considerando il terremoto simulato a Val Pellice di magnitudo 6.0- “No Damage”

La Figura 6-68 evidenzia che la maggioranza degli edifici ha una probabilità compresa tra l’80 ed il 90% di non essere danneggiata dall’evento sismico, ma mette in luce anche l’esistenza di alcuni edifici che hanno una probabilità minore di non subire danno, da non sottovalutare. Tali edifici, appartenenti al patrimonio culturale come evidenziato nel paragrafo 3.2.1, hanno un comportamento differente rispetto agli edifici ordinari.

Per tale motivo tale scenario è stato oggetto di indagini ulteriori, verificando la probabilità che gli edifici possano raggiungere un livello di danno lieve, moderato o addirittura il collasso.

L'analisi del danno permette di asserire che le chiese hanno sempre una probabilità diversa da 0 di raggiungere un qualsiasi livello di danno, anche se la probabilità di raggiungere il collasso è comunque inferiore al 10%.

Un'evidente mancanza messa in luce dalle Figure 6-69 è quella legata ad una corretta interpretazione del danno sul Castello di Moncalieri: utilizzare la tabella attributi dello shape file fornita dal Geoportale del Comune, ha infatti compromesso una corretta lettura del comportamento dell'edificio, il quale viene identificato come residenziale. Nonostante ciò, l'epoca costruttiva e le caratteristiche inserite nella tassonomia permettono di evidenziare la probabilità diversa da zero di raggiungere i diversi livelli di danno.

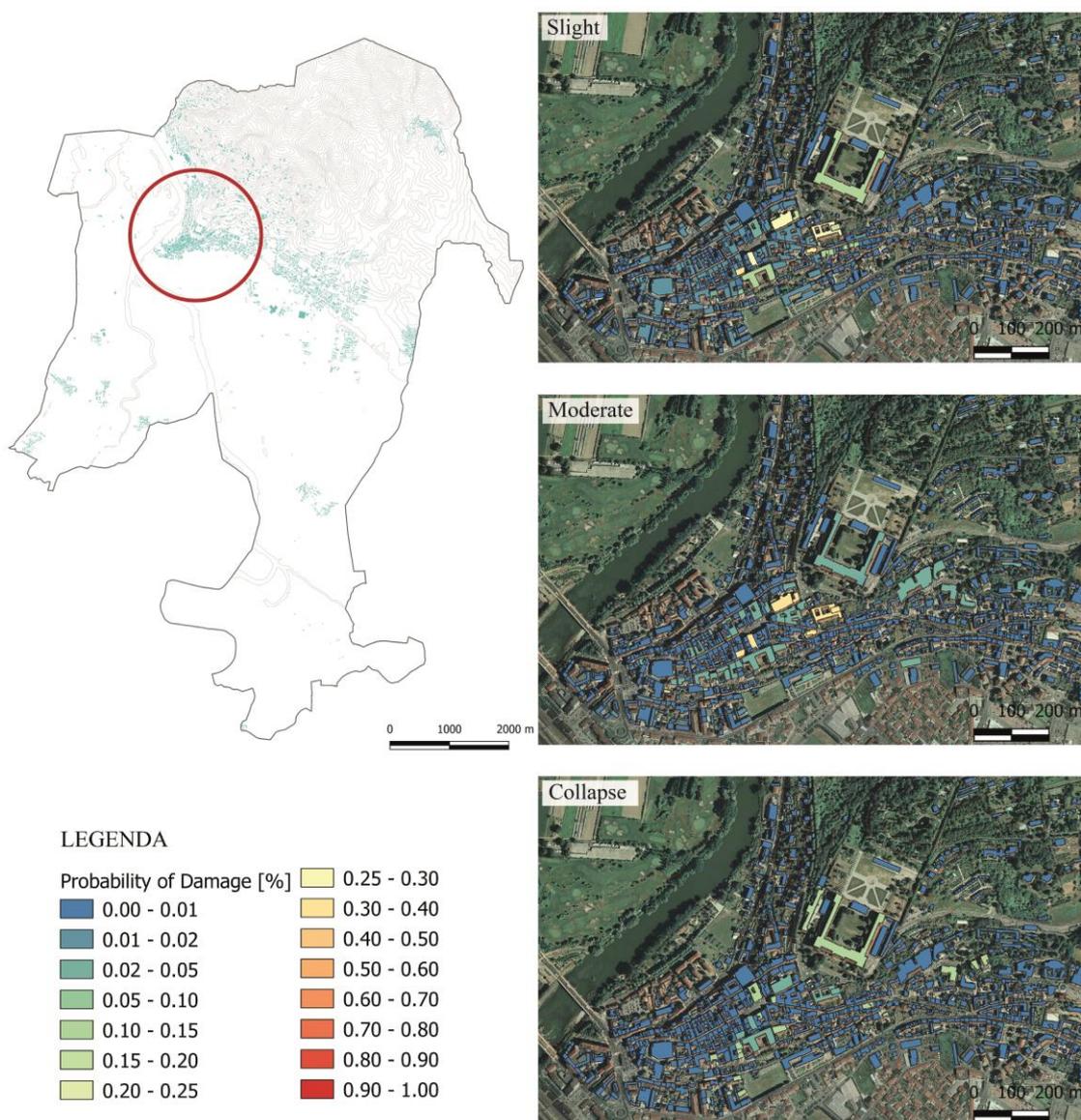


Figura 6-69 Distribuzione del danno nelle costruzioni in muratura del centro storico: confronto tra tre livelli di danno considerando il terremoto simulato a Val Pellice di magnitudo 6.0 "Slight" e "Moderate", "Collapse"

La Figura 6-69 permette di osservare che le chiese hanno una probabilità di raggiungere un livello di danno lieve (sinistra) e moderato (destra), diverso da 0, ma questo non supera in ogni caso il 30% e non esiste come sottolineato la probabilità che tali edifici giungano a collasso.

Anche in questo caso, i risultati relativi al rischio sismico espresso in termini di perdite economiche per le due tassonomie sono stati oggetto di confronto e si rimarca quanto già evidenziato (Figura 6-70): in questo caso le perdite sono distribuite in maniera differente, a causa delle considerazioni già effettuate circa il valore del patrimonio artistico e culturale presente nel centro storico di Moncalieri.

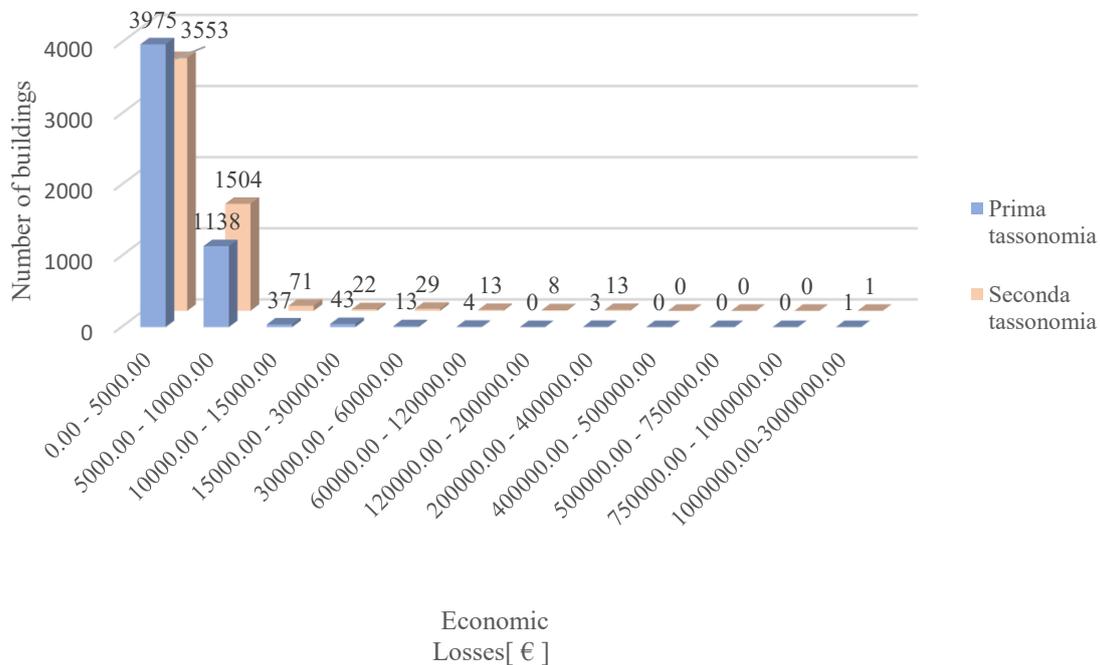


Figura 6-70 Distribuzione delle perdite economiche degli edifici muratura considerando un totale di 5214 edifici (prima tassonomia in blu e seconda in blu)

6.8 Considerazioni sui risultati

La valutazione della pericolosità sismica e del rischio sismico a scala territoriale, comporta l'utilizzo di una grande mole di dati e richiede un impegno importante, dovuto soprattutto allo studio e alla successiva scelta dei parametri più idonei per la loro valutazione e per il tempo richiesto dal processo di elaborazione dei dati. Analizzare una moltitudine tale di dati significa spesso cambiare modalità di analisi in corso d'opera e significa essere significativamente influenzati dalla tecnologia a disposizione: immagazzinare tali dati e renderli utilizzabili dal calcolatore vuol dire ragionare continuamente per trovare soluzioni che rendano il lavoro

possibile anche con strumenti limitati (in generale un computer portatile rende particolarmente complesse le elaborazioni sul software OpenQuake ed in particolare le analisi stocastiche possono richiedere qualche ora anche suddivise per tipologia costruttiva). Durante lo svolgimento si è infatti preventivamente condotta un'analisi creando un modello di esposizione per tutti gli edifici, con risultato nullo; successivamente i risultati spesso poco appaganti, hanno indirizzato il lavoro verso una trattazione differente, dividendo gli edifici per gruppi e costruendo delle mappe differenziate per ciascuna tipologia costruttiva: questo può portare a limitare la visione di insieme, ma d'altra parte il risultato permette certamente di ottenere informazioni circa una determinata classe di edifici senza trovarsi di fronte a delle mappe complesse e disordinate, derivanti da analisi massive. Quanto appena sottolineato, può sicuramente fornire uno spunto di riflessione per impostare l'analisi oggetto di studio nel capitolo 7: cosa significa lavorare con meno dati e qual è la precisione che si può ottenere? Quale può essere l'utilità di un lavoro svolto in questo modo e quella invece di un lavoro svolto con maggior precisione su meno elementi?

Giunti alla fine di questa prima fase di lavoro, sicuramente si può asserire che l'aggiunta di dati nella tassonomia e quindi una maggior precisione nella descrizione dell'edificio, costituisce un punto determinante nel lavoro: una conoscenza approfondita della vulnerabilità sismica dell'edificio e delle perdite economiche collegate ad un determinato scenario o calcolata su base stocastica, permette di pianificare in maniera opportuna gli interventi di retrofit/ristrutturazione e/o consolidamento pre-sisma e i piani di emergenza post-evento, i quali possono avere un ruolo fondamentale nella salvaguardia dei beni culturali e nella vita degli abitanti.

Affrontare questo tema a larga scala, significa avere un'idea complessiva del rischio sismico e fornire uno strumento molto importante alla Protezione Civile e a tutti coloro che si occupano di politiche legate alla protezione dei centri abitati e alla salvaguardia della vita dei suoi abitanti. La presente analisi ha infatti evidenziato che se si dovesse scegliere quali edifici risultino maggiormente a rischio si interverrebbe sugli edifici storici e sui beni culturali, i quali mostrano anche per terremoti di minore intensità di essere particolarmente vulnerabili e nel caso di eventi di intensità maggiore, palesano una probabilità diverse da 0 di raggiungere anche il collasso. Per gli edifici con struttura portante in cemento armato si osserva invece una probabilità nulla di collasso e comunque bassa di raggiungere un livello di danno diverso da quello lieve.

Quanto appena sottolineato risulta essere un elemento chiave per la seconda fase dell'analisi: per quanto concerne gli edifici in cemento armato essi presentano perdite economiche e danni simili dal momento che sono state utilizzate le medesime curve, ma gli edifici con chiusure verticali in muratura mostrano una maggiore vulnerabilità (come evidenziato dalla Figura 6.64). Questo differente comportamento risulta essere uno spunto per la successiva analisi che verrà svolta nel capitolo successivo, ovvero: se si differenziassero tali edifici tramite l'ausilio di curve ad hoc, i risultati sarebbero i medesimi?

Un altro spunto di riflessione potrebbe derivare dall'osservazione del grafico 6-58: se si confrontano le perdite economiche derivanti dai danni subiti dagli edifici in muratura e dagli edifici in cemento armato e muratura, i primi risultano crescere in maniera notevole all'aumentare del periodo di ritorno, i secondi no.

Sarebbe interessante verificare se questo comportamento non sia da attribuire alla scelta di stimare le perdite solo ed esclusivamente derivanti dal danno subito dalle strutture. Infatti, mentre per gli edifici in muratura, i quali presentano una destinazione d'uso prevalentemente residenziale, l'analisi può risultare sufficientemente significativa per gli edifici con destinazione d'uso industriale e commerciale, spesso questo tipo di analisi può essere parte integrante dello studio del rischio sismico, ma non può essere anche il punto di arrivo. Per quanto concerne infatti tali edifici, essi sono spesso caratterizzati da regolarità in pianta e sono stati costruiti in epoca recente, quindi sulla base di normative più solide e affidabili, dunque le perdite ad essi associati possono essere meno rilevanti rispetto a quelle associate al centro storico e quindi ai beni culturali, soprattutto nel caso di Moncalieri, territorio, come più volte sottolineato, caratterizzata da una pericolosità sismica ridotta e da rischio sismico basso, ma non per questo da sottovalutare. Nel caso delle costruzioni con destinazione d'uso industriale (a carattere prettamente produttivo) e/o commerciale ha enorme rilevanza l'analisi di perdite differenti: i costi di interruzione dell'attività, le perdite relative alla componente non strutturale e ai "contents", le perdite legate agli occupanti e quindi ai lavoratori che operano in tali settori. Tale osservazione permette di affermare che un'analisi di questo tipo risulti limitante e che quindi necessiti di maggiori approfondimenti. Questo presupposto introduce il prossimo capitolo, incentrato sull'argomento, nei quali saranno spiegate in maniera più precisa tale considerazioni.

7 Analisi sugli edifici industriali di Moncalieri

Una delle problematiche maggiori quando si parla di cambiamenti climatici e delle catastrofiche conseguenze causate dagli stessi è la grande distanza presente tra le richieste della popolazione e le azioni dei politici e degli enti governativi che si occupano di tali temi: spesso il messaggio trasmesso non è abbastanza forte o ancora più spesso gli interventi e la sensibilizzazione ai grandi temi avviene solo dopo l'avvenimento di eventi catastrofici. Le persone tendono a valutare il rischio come un qualcosa di lontano dalla realtà di cui fanno parte ed è invece proprio un'eventuale sensazione di allerta che porterebbe a prendere le dovute precauzioni, più di un qualsiasi calcolo probabilistico di costi benefici. La ricerca mette in luce che le persone percepiscono in maniera più concreta il rischio quando possono facilmente visualizzare un'immagine dell'evento (Phoon e Jensen 2019): questo è certamente un fatto importante quando si tratta di scegliere un'eventuale assicurazione. Se si pensa alle assicurazioni stipulate un anno dopo un evento catastrofico, si può sicuramente osservare un picco rispetto agli anni precedenti all'evento, ma l'effetto svanisce in maniera rapida; nel giro di circa tre anni si osserva infatti un'inversione della tendenza (Phoon e Jensen 2019). Fornire uno strumento di previsione dell'evento può quindi avere un impatto molto importante nell'economia di un paese e può sicuramente indurre coloro che gestiscono le attività a portare avanti delle azioni preventive nei confronti degli eventi catastrofici.

Il terremoto rappresenta uno dei fenomeni catastrofici che maggiormente influenza l'economia di una regione a causa dei tempi di ripresa spesso lunghi legati al danneggiamento dei macchinari utilizzate per lo svolgimento dell'attività, alla parziale o tale distruzione delle componenti strutturali e alle problematiche fisiche e psicologiche dei lavoratori nella fase post-evento (Zho, Chen e Wang 2019), o ancora, alla perdita di prodotti di pregio come avvenuto in Emilia Romagna nelle industrie alimentari (Penna, et al. 2014) (Bianchi e Labory 2014). La chiusura dell'attività per un periodo anche limitato di tempo, può portare a perdite economiche considerevoli, che possono risultare incidenti anche nel bilancio di una regione. È bene tener conto che quando un terremoto è particolarmente distruttivo l'impatto per la comunità non è limitato alle perdite economiche, ma anche alla mole di lavoro per i servizi di emergenza, legate alla presenza di un gran numero di occupanti presenti nelle attività produttive o commerciali in quanto lavoratori (o clienti); o ancora alla presenza all'interno dell'attività di sostanza pericolose per l'ambiente disperse a causa del terremoto (o al rischio intrinseco di sisma e incendio che coinvolge molte industrie). *“Il ripristino delle strutture che ospitano attività e la ricostruzione del sistema economico sono quindi azioni chiavi per implementare la resilienza delle città”* (Zho, Chen e Wang 2019).

Spesso gli studi si sono concentrati sul calcolo delle perdite strutturali e sui costi di riparazione ad essi associati, ma una stima di tipo economico è necessaria per identificare in maniera ottimale

le strategie di mitigazione e di retrofit per le costruzioni industriali situate in zone sismiche e per i processi produttivi i quali devono essere studiati per meglio rispondere all'occorrere di un evento sismico (Hofer, et al. 2017).

I recenti terremoti in Italia e nel mondo hanno messo in luce la vulnerabilità degli edifici industriali in cemento armato prefabbricato costruiti in accordo con le normative passate: le connessioni tra le travi e le colonne risultano nella maggioranza dei casi progettate solo per resistere ai carichi verticali (Buratti, et al. 2017).

Nel territorio nazionale, infatti, la maggior parte degli edifici industriali sia mono-piano che multipiano consiste in edifici in cemento armato prefabbricato, in quanto l'utilizzo di tale materiale offre molti vantaggi, tra i quali la facilità nell'assemblaggio degli stessi, costi dei materiali bassi e dei risparmi per quanto riguarda la progettazione degli elementi e la fase di progetto, oltre che una facilità nel controllo della qualità, una maggior sicurezza e sostenibilità (Belleri, et al. 2014). Nonostante i pregi dal punto di vista economico di tale metodo costruttivo, durante gli eventi sismici, questa tipologia di edifici ha spesso mostrato i difetti ad esso collegati: alcuni di questi esempi sono i terremoti di Northridge (USA) nel 1994, quello a Kobe (Japan) del 1995, l'evento del 1999 a Kocaeli (Turchia), in Wenchuan (Cina) nel 2008 e in Cile del 2010; in Italia nel recente periodo i terremoti più importanti, che hanno colpito le zone industriali con risultati catastrofici sono quello dell'Aquila nel 2009 e quello dell'Emilia Romagna nel 2012. Questi terremoti hanno evidenziato che le strutture industriali più antiche e pesanti, in particolare quelle con elementi più alti, hanno subito maggiori perdite rispetto a quelle costruite in epoca più recente; i costi associati all'interruzione del business sono invece consistenti in tutti i casi (Erdik e Uckan 2013).

Dopo aver analizzato tutti gli edifici di Moncalieri, si è scelto di intraprendere il lavoro di valutazione delle perdite strutturali, non strutturali, di quelle legate all'interruzione dell'attività e relative agli occupanti per gli edifici industriali presenti nella città oggetto di studio. I risultati ottenuti mirano a fornire uno strumento di analisi e pianificazione per le imprese al fine di spingere le stesse ad attività di prevenzione e di mitigazione del rischio. La metodologia utilizzata, seppur applicata al caso studio di Moncalieri, potrà in futuro essere utilizzata anche in altre regioni che presentano caratteristiche simili. Il presente lavoro si incentrerà sul capire quali siano le perdite maggiori in cui si incorre nel caso di un evento sismico nelle zone industriali e quali siano i parametri che maggiormente li influenzano. La necessità di affrontare questo tema nasce dagli effetti dei due eventi sismici che hanno colpito l'Emilia Romagna nel maggio 2012. L'area rappresenta uno dei poli economici italiani dal punto di vista industriali ed è stata oggetto di interventi di tipo sismico dal 2003. Dal punto di vista sismico l'area è soggetta ad una sismicità media, in cui gli studi registrano un valore di PGA compreso tra 0.125-0.15 g, con 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni.

Dopo l'evento del 2012, *“le comunità di ricerca hanno portato avanti e condotto molti studi, con diverse proposte, focalizzati sulle costruzioni italiane in cemento armato”* (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018).

La regolamentazione italiana in materia sismica richiede adeguata duttilità della strutturale e di “costruire in accordo con quanto definito nel “Capacity Design”, con una particolare attenzione per le connessioni tra gli elementi in cemento armato” (Buratti, et al. 2017).

7.1 Il terremoto del 2012 in Emilia Romagna e l’influenza sulla normativa specifica per gli edifici industriali

Il terremoto del 2012 che ha colpito l’Emilia Romagna, (oltre a Veneto e Lombardia) è stato caratterizzato da una serie di scosse di alta e media intensità, culminate nelle giornate del 20 e del 29 maggio con delle scosse di magnitudo momento rispettivamente pari a 6.1 e 6.0. Nonostante il terremoto abbia colpito una vastissima area del nord Italia, spesso ci si riferisce a tale evento come il terremoto in Emilia Romagna, in quanto le province più colpite furono Modena, Bologna, Ferrara, Reggio-Emilia, oltre a Mantova e Rovigo. La regione è una delle più produttive in Italia ed è caratterizzata, come il Piemonte, da imprese medio piccole, localizzate in varie municipalità. Nel territorio sono infatti presenti 370.259 imprese attive (Istat 2014). Oltre agli effetti catastrofici sulle abitazioni, sulle infrastrutture e sulle strade, si registrarono 27 perdite umane. Questo evento rappresenta un tassello fondamentale per la ricerca della vulnerabilità sismica degli edifici industriali, in quanto l’area industriale emiliana, seppur sede di imprese importantissime legate al settore biomedico, tessile e alimentare, era caratterizzata da edifici progettati in maniera estremamente semplice e pensati solo per resistere ai carichi verticali.

Le catastrofiche conseguenze dell’evento sismico del 2012 ebbero come conseguenza l’introduzione di importanti normative tecniche e l’utilizzo di nuovi documenti quali (Mezzi, Comodini e Rossi 2014):

- *Schede AeDES*: nonostante esse esistessero prima del terremoto in Emilia Romagna, il loro utilizzo fu fondamentale per capire gli effetti di tale evento sismico, infatti furono uno strumento chiave per la stima dei danni strutturali e non strutturali causati dall’evento sismico;
- *Ordinanza del Capo del Dipartimento della Protezione Civile, del 02 giugno 2012*: l’ordinanza è fondamentale per quanto riguarda le attività industriali, in quanto stabilì che i proprietari delle attività fossero ritenuti responsabili per la sicurezza dei lavoratori e quindi obbligati a ottenere la certificazione di conformità alla normativa in materia sismica prima di riaprire le attività;
- *Decreto Legge 74 del 6 giugno 2012*: il documento sancisce lo stato di emergenza fino al 13 maggio 2013 ed è un documento fondamentale per l’allocazione di fondi atti alla ricostruzione. L’articolo 3 del Decreto stabilisce inoltre che, nel caso non siano rispettate le buone norme costruttive in materia sismica, il proprietario dell’impresa deve assolutamente interrompere l’attività;

- *Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici*: si tratta di un documento non vincolante, ma che contiene delle regole pratiche per la gestione dell'emergenza per gli edifici suddetti.

Le autorità responsabili della ricostruzione post disastro ebbero il compito di confrontarsi con danni rilevanti negli edifici industriali, l'incertezza delle informazioni fornite dai sopravvissuti, la sicurezza pubblica e la necessità di agire per far ripartire le attività al fine di rendere l'impatto sulla vita economica e sociale della città il più lieve possibile (Braga, et al. 2014).

7.2 L'industria nel territorio piemontese

Storicamente l'industria Italiana è caratterizzata da piccole e medie imprese e tale dato è caratteristiche delle imprese italiane anche nel nostro secolo: l'Ufficio Studi della Confcommercio riporta, infatti, che il 99,9% delle imprese sono classificate come piccole e medie. Tale dato riguarda a scala ridotta anche le regioni, nelle quali tale caratteristica risulta ulteriormente marcata.

Il Piemonte è una delle regioni più industrializzate d'Italia, caratterizzate da stabilimenti di medie e grandi dimensioni. L'industria principale è quella meccanica, anche se di notevole importanza risultano anche le attività legate ai settori meccanico ed elettronico, le industrie che producono macchine agricole e utensili. A tali settori, seguono quello tessile (metà dei lanifici italiani si trova in Piemonte) ed i settori chimico, farmaceutico, degli alimentari (Istat 2014).

Il 9° Censimento generale dell'industria e dei servizi (2011) ha censito 336.338 imprese attive, che, nel complesso impiegano 1.3 milioni di addetti; la regione risulta al quinto posto (dopo Lombardia, Lazio, l'Emilia Romagna e il Veneto) sia per la quota di imprese a grandi dimensioni (250 addetti e più) sia per quelle di addetti impiegati (Istat 2014).

L'attenzione per i poli industriali è stata infatti sollevato recentemente grazie alla legge 1/2015, con la quale la regione intende implementare l'analisi sulle sue proprietà nel territorio.

Il recupero strutturale e funzionali di tali aree, obiettivo della Confindustria e della Finpiemonte SPA, necessita di step ben definiti quali (Cordera 2015):

- mappatura dell'esistente regionale;
- classificazione delle categorie;
- definizione di una politica di sostegno e per l'ammissibilità degli interventi;
- piani di marketing territoriale.

Attività di questo tipo possono avere un ruolo chiave nella valutazione del rischio sismico, soprattutto in una regione come il Piemonte, che, come evidenziato, ha un ruolo chiave nell'economia Italiana.

7.3 Cenni storici e attività industriali di rilevanza nel comune di Moncalieri

Moncalieri in tempi recenti, data la sua vicinanza a Torino è stata caratterizzata da uno sviluppo industriale importante: sono sorte vaste fabbriche, vasti quartieri di abitazioni, nuove strade. Soprattutto dagli anni cinquanta del novecento, si è registrato un forte addensamento sia abitativo che delle zone industriali. Le industrie che hanno avuto maggior sviluppo sono quelle che hanno avuto grande impatto anche nel capoluogo piemontese: quella meccanica, quella della prototipazione dell'auto e del design industriale; nonostante ciò vengono comunque conservate aziende dedite all'orticoltura e alla floricoltura, il cui segno è marcato da ampie zone collinari e da intere borgate che hanno mantenuto vive tali attività. Dalla fonte (Piano Comunale di Emergenza 2015) sono contenute informazioni rilevanti circa gli elementi ritenuti pericolosi per il rischio industriale, di cui si terrà conto nelle successive elaborazioni dei dati. Da considerare, cosa che verrà fatta tenendo conto della distanza tra gli edifici industriali e gli altri è anche l'effetto domino, ritenuto rilevante nel caso di forte connessione tra le attività industriali. Secondo quanto evidenziato dallo stesso documento, le aree industriali di Moncalieri possono essere così divise:

- area industriale a Nord della Tangenziale Sud di Torino;
- insediamenti produttivi a carattere lineare tra Borgata Palera e Trofarello;
- insediamenti produttivi a carattere lineare ad Est della Stazione Ferroviaria;
- area industriale ad Ovest S.S.20, tra Via Juglaris e Strada Carpice;
- insediamenti produttivi diffusi nella zona di Borgo Mercato;
- insediamenti produttivi diffusi nella zona a Nord del T.Sangone.

La localizzazione degli edifici è evidenziata in Figura 7-1.

Nel presente lavoro di tesi si è deciso di concentrare l'attenzione sull'area industriale di Sanda Vadò: la zona è collocata in una posizione strategica ed è servita da un'efficiente rete di infrastrutture: essa infatti è collocata nel punto di incontro tra l'autostrada A21 Torino- Piacenza e l'A6 Torino-Savona. Lo sviluppo dell'area risale agli anni 70 quando l'ingegnere Bruno Zoppoli individuò la potenzialità dell'area agricola nella zona Vadò e affidò ad alcuni professionisti la trasformazione urbana dell'area: all'epoca erano insediate circa 60 aziende con 4000 addetti, tra cui si distinguevano 1300 impiegati e 2400 operai. Negli anni '90 l'area fu ulteriormente ampliata, al fine di rispondere all'esigenza dei lavoratori dell'area: sorsero l'hotel "Rest Hotel Primeverè" e uno sportello dell'Istituto bancario San Paolo a Torino, un punto ristorazione e una stazione di rifornimento carburanti e di assistenza autoveicoli. Dal 1996 l'area fu ulteriormente oggetto di interventi: sulla base del Piano Regolatore Comunale della città di Moncalieri, investimenti privati e contributi della Regione Piemonte e della Comunità Europea portarono all'ampliamento dell'area industriale suddetta, con l'obiettivo di creare un'area industriale sempre più attrattiva per attività avanzate nel campo della ricerca, dello sviluppo, della produzione e del settore terziario. Gli investimenti ebbero come conseguenza un miglioramento complessivo di infrastrutture, viabilità, realizzazione di servizi aggiuntivi. Successivamente, nel 2015, il Consorzio ha decretato un ampliamento nel comune limitrofo di Trofarello. Attualmente il Consorzio Vadò amministra 180 imprese occupando circa 5000 lavoratori (Cordera 2015).

Il processo di miglioramento e di ampliamento dell'area ha inoltre permesso l'insediamento di due grandi realtà quali la Leroy Merlin ed il centro commerciale 45 Parallelo Nord, visibili entrambi nella Figura 7-1; l'inserimento nell'area di tali punti attrattivi, ha portato ad un interesse crescente per l'area, non più conosciuta solo da gli abitanti del comune. Il Comune di Moncalieri, in collaborazione con il Consorzio Vadò (nel quale sono iscritte 122 imprese tra quelle comprese nell'area suddetta), è stata oggetto di indagine al fine di stabilire la conoscenza del sistema produttivo locale; indagine culminata nella stesura del progetto "La zona produttiva di Vadò: prospettive dell'area e delle imprese insediate" atto ad identificare i sistemi di produzione locale, alla raccolta di dati quantitativi e qualitativi.

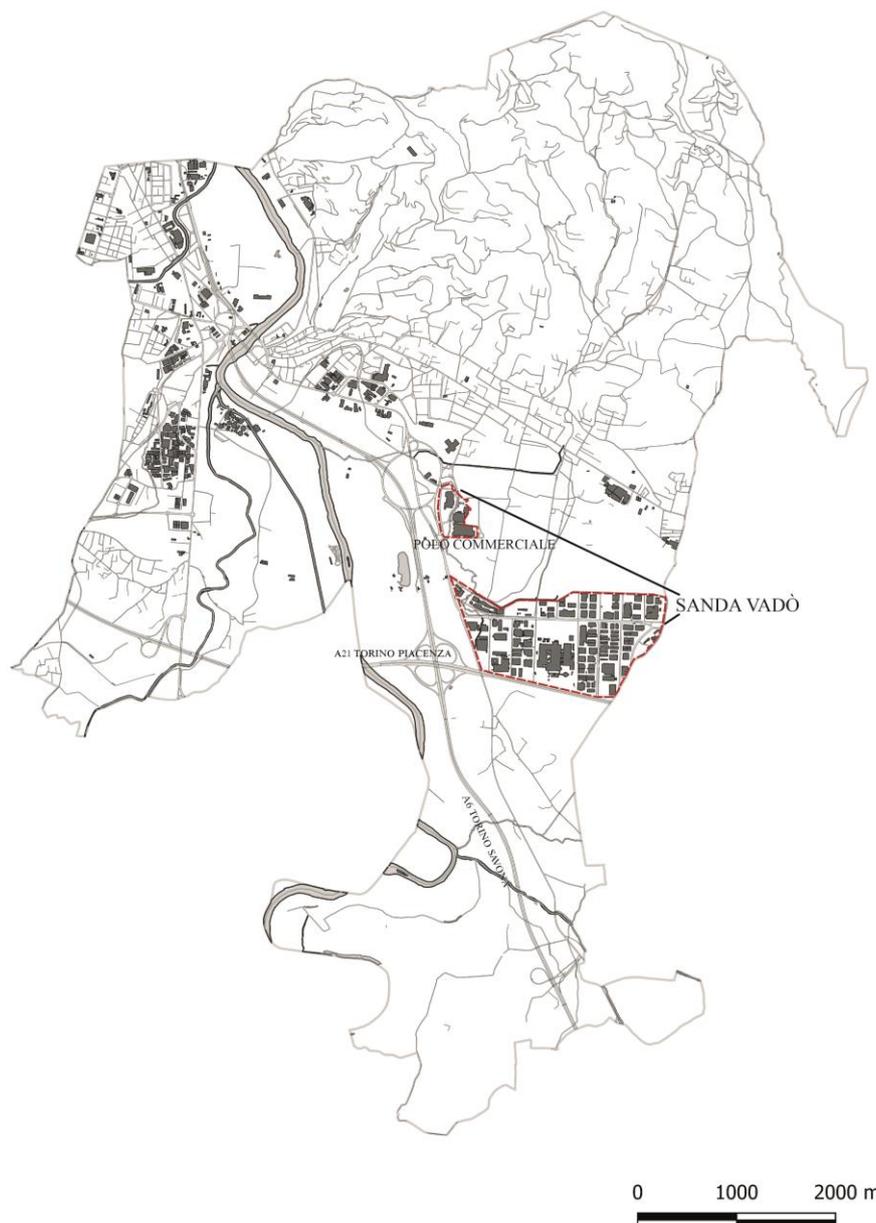


Figura 7-1 Individuazione degli edifici industriali nel comune di Moncalieri e dell'area oggetto di studio

7.4 Creazione del database e definizione della nuova tassonomia

I dati di partenza utilizzati sono quelli relativi al database per tutti gli edifici di Moncalieri, ma in questo caso gli edifici industriali sono stati approfonditi con maggior dettaglio, in quanto il fine era costruire una tassonomia più dettagliata. Al fine di fare ciò, è stato preventivamente creato un database con dei dati relativi a:

- classificazione specifica degli edifici in base alla tipologia costruttiva;
- individuazione di eventuali attività aventi luogo nella costruzione industriale;
- identificazione del numero di persone impiegate nell'attività;
- definizione di un nuovo costo parametrico per le strutture e per le componenti non strutturali (il cui significato verrà definito nel parametro 7.5.1);
- costo di interruzione dell'attività;
- costi relativi ai contenuti dell'attività (macchinari, computer, stampanti ecc).

In questa fase è stata creata una tassonomia più specifica per gli edifici in cemento armato, distinguendo preventivamente gli edifici in base a due categorie:

Tipologia 1: edifici in cemento armato “pre-code”;

Tipologia 2: edifici in cemento armato “low-code”.

Questa distinzione è stata effettuata sulla base delle informazioni relative all'analisi svolta sugli edifici in Toscana di (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018).

La suddivisione risulta importante in quanto in Italia molti edifici in cemento armato sono stati costruiti prima dell'introduzione della normativa sismica e dunque risultano essere costruiti solo ed esclusivamente per resistere ai carichi verticali; questo problema li rende inadeguati sismicamente. Il primo codice fu infatti introdotto nel 1974, dopo l'intensa attività costruttiva nel paese del 1960. In generale esistono quattro tipi di classi (High Code, Moderate-Code, Low-Code, Pre-Code) che esprimono la qualità della struttura in relazione alla performance sismica necessaria. A ciascuna area geografica, in relazione alla sismicità, viene assegnata una caratterizzazione seguendo come criterio generale quello per cui zone ad alta sismicità richiedono l'utilizzo di codici più avanzati (per esempio in California le strutture costruite dopo il 1973 sono considerate High-Code) e sulla base della data di costruzione dell'edificio. Come evidenziato da (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018) si sono considerate “Pre-code” le strutture costruite prima del 1990 e quelle costruite successivamente “Low-code” (prive di dettagli strutturali adeguati). Tale ipotesi risulta plausibile in quanto la maggioranza delle strutture in cemento armato presenti in Italia sono state costruite in aree che sono successivamente state definite come sismiche e la procedura di progettazione adottata soddisfa i requisiti per essere definita “non sismica”, con conseguenti problemi di duttilità e resistenza (Magliulo, et al. 2019); inoltre, da quanto riportato nella trattazione sull'evoluzione dell'area in esame la maggioranza delle strutture sono state in realtà costruite prima del 2000 (Cordera 2015).

Queste due tipologie vengono ulteriormente suddivise in base alle chiusure verticali:

- edifici in cemento armato con pannelli prefabbricati;
- edifici in cemento armato con tamponatura in muratura.

Si sono quindi definite 4 tipologie:

- RCP1: edifici di tipologia 1 in cemento armato con pannelli prefabbricati;
- RCP2: edifici di tipologia 2 in cemento armato con pannelli prefabbricati;
- RCM1: edifici di tipologia 1 in cemento armato con tamponatura in muratura;
- RCM2: edifici di tipologia 2 in cemento armato con tamponatura in muratura.

Successivamente al fine di identificare in maniera chiara le perdite relative ai “contents”, all’“occupancy” e al “business interruption” è necessario valutare le tipologie di attività che insistono nell’area.

In generale tali dati dovrebbero essere presenti nel catasto, che ha il ruolo di pubblico registro per le costruzioni esistenti e per le proprietà terriere, ma essi non sono reperibili per il territorio di Moncalieri, in quanto non è presente nell’archivio un censimento relativo agli edifici industriali, ma solo per gli edifici collocati nel centro storico.

Per quanto riguarda il settore secondario, si evidenzia la presenza di aziende dedite a:

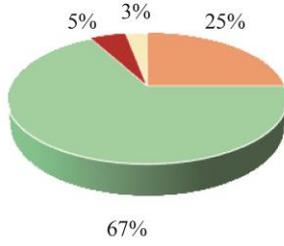
- industria chimica;
- grafica-editoria;
- produzione di elementi in legno;
- produzione di plastica;
- industria meccanica;
- industria tessile.

Per quanto concerne il terziario le attività si suddividono invece in:

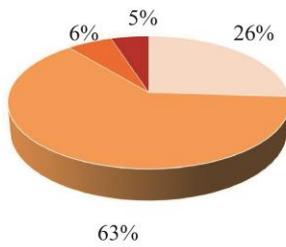
- commercio all’ingrosso (principalmente rivendita in grandi magazzini);
- commercio al dettaglio;
- uffici;
- alberghi e ristorazione.

Tali classificazioni sono state riportate su QGIS sulla base del lavoro svolto nella Tesi (Cordera 2015): nella Figura 7-2 si riportano i risultati ottenuti con l’utilizzo delle specificazione appena esplicitate.

Indicidenza percentuale delle tipologie strutturali sul totale



Indicidenza percentuale della tipologia di settore sul totale



Indicidenza percentuale della tipologia di attività percentuali sul totale

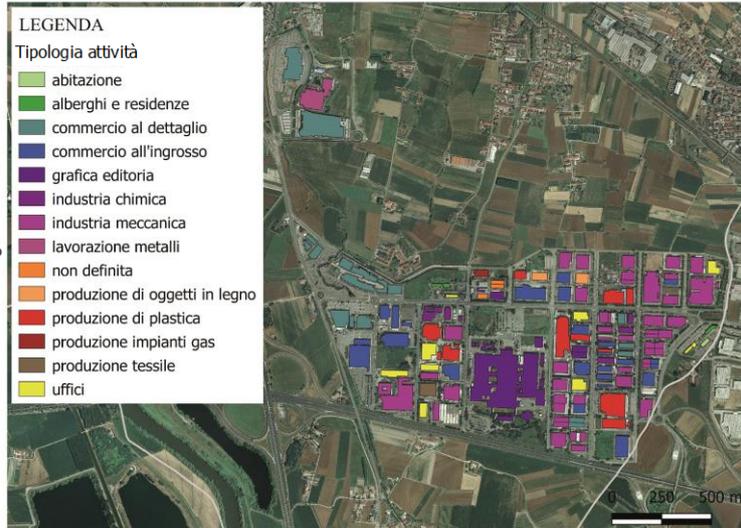
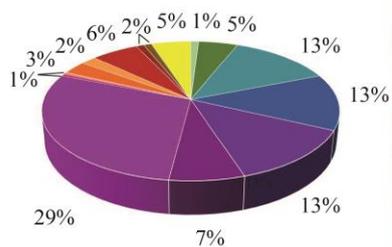


Figura 7-2 Definizione delle caratteristiche degli edifici industriali

I paragrafi 6.7.1 hanno mostrato l'incidenza di due parametri nei risultati ottenuti per gli edifici in cemento armato: essi sono fortemente influenzati dal numero di piani. Seppur nella maggioranza dei casi si tratta di analizzare edifici caratterizzati da un piano fuori terra (Figura 7-3), la presenza di piani aggiuntivi può fornire uno strumento utile per la lettura dell'analisi (visualizzare l'edificio in pianta può essere fuorviante dato che i calcoli sono basati sull'area dell'intero edificio).



Figura 7-3 Definizione del numero di piani per gli edifici industriali

È inoltre fondamentale sottolineare che, come evidenziato nel paragrafo 6.5.2 e dagli studi sull'influenza dei parametri effettuata da (Stone 2017), l'irregolarità in pianta può fornire un contributo rilevante nella valutazione del rischio sismico. Per tale motivo, i risultati sono mostrati in Figura 7-4. Si rimarca che la definizione dell'irregolarità è stata effettuata tramite metodo speditivo elaborando i dati tramite linguaggio di programmazione Python: questo, come evidenziato nella suddetta Figura ha portato a dei risultati soddisfacenti (quando gli edifici sembrano infatti rettangoli in pianta ma sono contrassegnati come irregolari- caso comunque raro- questo avviene solamente per il fatto che in realtà tali edifici presentano delle sporgenze non apprezzabili nella rappresentazione).

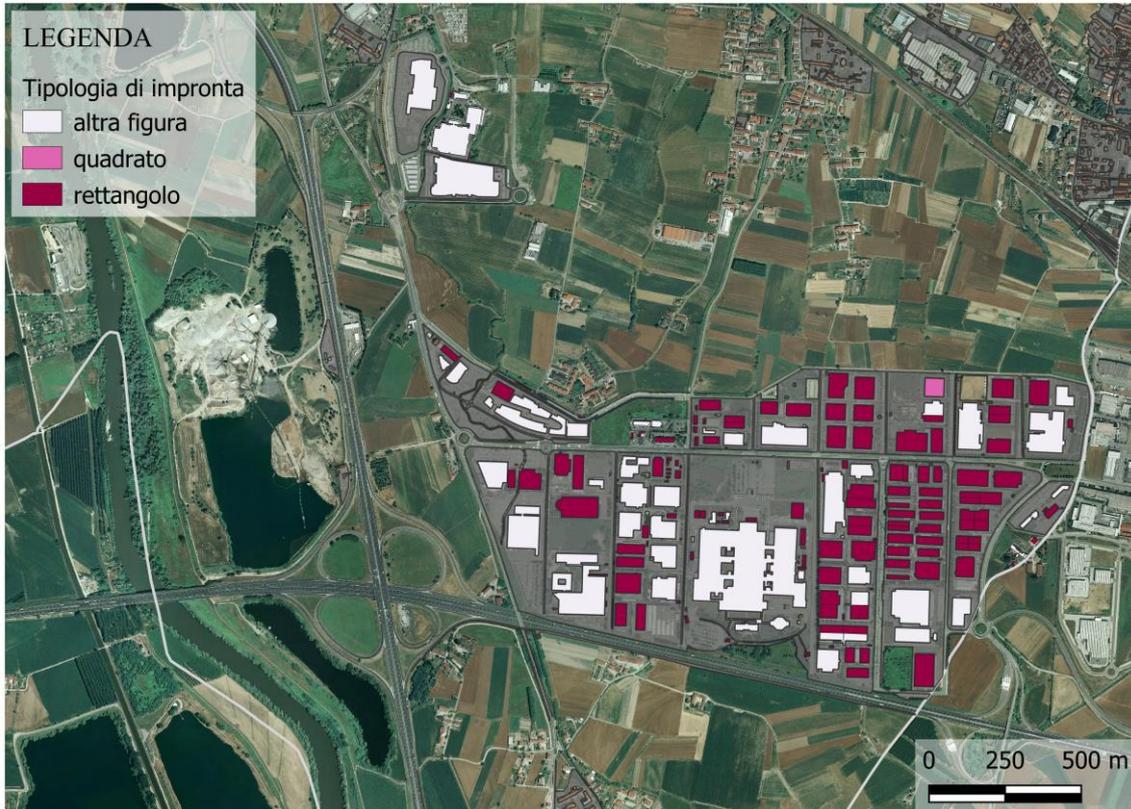


Figura 7-4 Caratterizzazione degli edifici secondo l'impronta in pianta, con riferimento al paragrafo 6.5.2

Importante, al fine di discorrere sulla possibilità di costruire in maniera efficace e rapida tale database, è sottolineare la difficoltà nella reperibilità di dati sugli edifici industriali nella zona oggetto di esame. Per quanto concerne la destinazione d'uso dell'edificio e la tipologia di attività svolta si è infatti fatto riferimento al lavoro di tesi (Cordera 2015), ma nel caso delle altre informazioni la ricerca delle stesse è stata spesso caratterizzata da risultati praticamente nulli; per tali motivi i materiali utilizzati per la costruzione dei capannoni (che in questa fase dell'analisi sono definiti con maggior dettaglio) stessi sono infatti stati reperiti da analisi visiva effettuata su Google Maps, con un dispendio di tempo elevato e con una precisione spesso ridotta, legata alla qualità delle immagini o all'aggiornamento spesso non presente delle stesse. Anche in questo caso, potrebbe risultare significativo avere a disposizione informazioni specifiche sugli edifici industriali, in quanto se il numero di edifici fosse stato maggiore il dispendio di tempo sarebbe potuto diventare insostenibile. La disponibilità di dati a disposizione ha infatti influenzato la scelta della zona da analizzare.

Considerazione aggiuntiva, merita la specificazione della classe d'uso attribuita agli edifici considerati, ai quali si è attribuita, indistintamente, la classe III, di cui si riporta la definizione: (Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti 2018):

“Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l’ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d’uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso”.

7.5 Preparazione dei file di input

La analisi che verranno condotte sono le medesime effettuate per l’intero comune di Moncalieri, dunque si presenta nuovamente la necessità di definire le caratteristiche di cui si è discusso in mood approfondito nel paragrafo 6.5. In questa sede, i file di input saranno definiti con maggior dettaglio, con particolare riferimento alle differenze che intercorrono tra la costruzione di un modello di questo tipo ed uno per la valutazione del rischio sismico a scala territoriale.

7.5.1 Stima del valore economico delle componenti strutturali e non strutturali

La creazione del modello di esposizione ha comportato la creazione di un file contenente 213 edifici, sulla base dei quali si evidenzia la presenza di edifici costruiti in cemento armato con tamponature eseguite con pannelli o in muratura come esplicitato nel paragrafo 7.4.

Costruito il database, si è reso necessario assegnare un valore economico alle componenti strutturali, non strutturali, alle componenti presenti nell’edificio e all’interruzione dell’attività (in termini di perdita effettiva giornaliera dovuta alla chiusura dell’attività). Al fine di definire tali prezzi, si è fatto riferimenti ai prezzi definiti dall’OMI, l’osservatorio del mercato immobiliare, e, sulla base di un costo dato per area di superficie, si è definito il costo totale della costruzione moltiplicando tale prezzo parametrico per l’area dell’edificio oggetto di analisi. Nel caso in esame, per il comune di Moncalieri con riferimento all’area oggetto di analisi, i costi parametrici più recenti per la zona di Sanda Vadò (codice zona D3) sono calcolati per il secondo semestre del 2018 per quanto riguarda le destinazioni d’uso commerciale, produttiva terziaria; nel caso degli edifici residenziali (nell’area insiste un numero ridotto di edifici residenziali) i costi parametrici non risultano disponibili e per tale motivo il costo parametrico è riferito agli edifici a destinazione d’uso residenziale situati nella zona “Strada Carpice, Carignano” (codice zona D2), assumendo che essi possano discostarsi moderatamente da quelli della zona industriale oggetto di studio; in questo caso si è seguito sempre quanto riportato per il secondo semestre del 2019. I dati sono riassunti nella Tabella 7-1 in relazione alla destinazione d’uso (OMI 2019):

Dati da osservatorio Omi per il Comune di Moncalieri espressi in €/mq riferito alla superficie lorda					
Settore	Tipo di costruzione	Stato conservativo	Valore di mercato [€/mq]		Superficie [L/N]
			Min	Max	
Commerciale	magazzini	Normale	510	800	Lorda
Produttivo	capannoni industriali	Normale	395	600	Lorda
	laboratori	Normale	530	830	Lorda
Residenziale	abitazioni civili	Normale	1150	170	Lorda
Terziario	capannoni industriali	Normale	910	1600	Lorda

Tabella 7-1 Costi parametrici in relazione al settore di interesse, (OMI 2019)

Questo costo è stato poi diviso in strutturale e non strutturale assumendo che il 25% sia relativo alle componenti strutturali e che invece il 75% copra i costi degli elementi non strutturali (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018). Nella Tabella 7-2 sono evidenziati i risultati:

Settore	Tipo di costruzione	Costo per le componenti strutturali [€/mq]	Costo relativo alle componenti non strutturali [€/mq]
Commerciale	magazzini	163,75	491,25
Produttivo	capannoni industriali	124,375	373,125
	laboratori	170	510
Residenziale	abitazioni civili	165	495
Terziario	capannoni industriali	313,75	941,25

Tabella 7-2 Definizione dei costi relativi alle componenti strutturali e non strutturali

Come evidenziato anche da (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018) esiste una difficoltà importante nello stimare il costo di interruzione dell'attività. In Italia infatti, non sono presenti dei data base relativi ai costi e alle componenti industriali per ogni attività, né le informazioni relative ai guadagni annuali. Al fine di ottenere analisi specifiche sarebbe quindi necessario rendere noti questi dati, che altrimenti risultano essere derivati da dati relativi agli stati uniti per le medesime attività, effettuando delle analisi estraendo delle informazioni dal manuale destinato all'utilizzo del software HAZUS (FEMA 2003) che saranno descritte nei paragrafi successivi.

In particolare, nel caso degli edifici industriali, la distinzione tra componente strutturale e non strutturale non è esaustiva per i motivi che verranno meglio illustrati nel paragrafo 7.5.2.

7.5.2 Stima delle perdite dovute alle componenti fisiche non strutturali e ai contenuti

È comune classificare le componenti non strutturali in tre principali gruppi: le componenti architettoniche, i componenti o le attrezzature di natura elettrica e meccanica e l'attrezzatura/macchinari (in generale i gli elementi contenuti all'interno dell'abitazione).

In accordo con *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) e con l'analisi effettuata da (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018) per la provincia di Arezzo, si considerano come costi non strutturali quelli relativi alle componenti architettoniche non strutturali, mentre i contenuti ("contents") rappresentano le altre due categorie.

Al fine di effettuare una stima relative a tali costi e di calcolare la percentuale di incidenza sul costo totale dell'edificio, si è ritenuto opportuno riferirsi a tali incidenze percentuali (Figura 7-5):

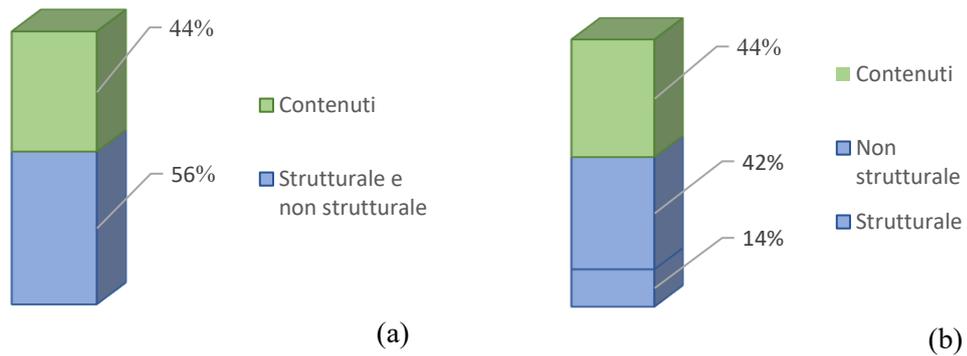


Figura 7-5 Incidenza percentuale sul costo totale

Come visibile nella Figura 7-5 (a) il costo totale deve essere ricalcolato considerando un costo complessivo pari al costo di costruzione dell'immobile ricavato dall'OMI incrementato dell'1.78% (incrementato quindi dalla componente relativo ai contenuti) e suddividendo successivamente tale costo nelle percentuali relative agli elementi strutturali, non strutturali e ai contenuti (Figura 7-5 (b)). Questo tipo di operazione risulta fondamentale per la stima di tutte le perdite economiche. Si ottengono i seguenti risultati:

[%]		178% Prezzo OMI	56% Prezzo totale	25% Strut,+ Non_Strut,	75% Strut,+Non Strut,	44% Prezzo totale
	Prezzo OMI [€/mq]	Prezzo totale [€/mq]	Strut + Non_Strut [€/mq]	Strut [€/mq]	Non strut, [€/mq]	Contenuti [€/mq]
Commerciale	655.00	1165,9	652,90	163,22	489,67	512,99
Produttivo	497,50	885,55	495,90	123,97	371,93	389,64
	680.00	1210,4	677,82	169,45	508,36	532,57
Residenziale	660.00	1174,8	657,88	164,47	493,41	516,91
Terziario	1255.00	2233,9	1250,98	312,74	938,23	982,91

Tabella 7-3 Definizione dei costi strutturali, non strutturali e relativi ai contenuti

Sulla base dei costi indicati nella Tabella 7-3 sono stati quindi calcolati i costi relativi ad ogni costruzione.

7.5.3 Definizione dell'occupazione

“L'accuratezza con cui viene studiata la popolazione esposta ad un determinato rischio è una componente chiave per stimare le perdite in termini di vite umane” (Wei, et al. 2017). Capire la popolazione esposta ad un determinato rischio risulta complesso per vari motivi, primo fra tutti la grande variabilità durante l'arco della giornata della distribuzione degli abitanti. È immediato capire la differenza tra distribuzione diurna (la popolazione si presenta per la maggior parte distribuita in uffici e costruzioni pubbliche) e quella notturna, in cui le persone sono per la maggior parte collocate all'interno di abitazioni di vario tipo; un esempio di tale distribuzione è quella fornita da (Spence, So e Scawthorn 1998) e riportata nella Tabella 7-4.

Occupancy	Total persons (%)						Total persons inside buildings (%)					
	Working day			Weekend			Working day			Weekend		
	D	C	N	D	C	N	D	C	N	D	C	N
House/hotels	22	35	96	40	40	87	21	33	90	38	38	82
Work	58	25	3	20	20	3	90	39	5	31	31	5
Open places	20	40	1	40	40	10						
Total	100	100	100	100	100	100						

Note: D = Day; C = Commuting; N = Night.

Tabella 7-4 Distribuzione percentuale degli occupanti in base alle fasi della giornata (Spence, So e Scawthorn 1998)

In Italia risulta particolarmente complesso avere accesso ai dati riguardanti i lavoratori di ogni singola impresa, in quanto nei vari siti delle imprese viene riportato un range di lavoratori nella descrizione, ma non è presente un documento pubblico che attesti quanti lavoratori siano impiegati in una data attività.

Al fine di ottenere dei risultati il quanto più possibile attendibili, invece di procedere tramite l'utilizzo di una proporzione tra l'area ed il numero di persone impiegate, si è scelto di riferirsi inizialmente ai dati forniti dal Manuale del Software Hazus, equivalente americano di OpenQuake, sviluppato dalla Federal Emergency Management Agency (FEMA), sulla base della Tabella 7-5, è stato definito lo spazio necessario per ogni individuo (o lavoratore nel caso di attività commerciale/industriale/agricola): la distribuzione permette di valutare la totalità degli occupanti tramite una semplice relazione tra la superficie totale e la superficie richiesta per persona.

Hazus Label	Occupancy Class	Superficie per persona [ft ²]
RESIDENTIAL		
RES1	Single Family Dwelling	3.00
RES2	Multy Family Dwelling-Duplex	3.00
RES4	Temporary Lodging	70.00
COMMERCIAL		
COM1	Retail Trade	110.00
COM2	Wholesale Trade	30.00
COM3	Personal and Repair Services	10.00
COM4	Business/Professional/Technical Services	80.00
COM5	Depository Institutions	4.10
COM6	Hospital	55.00
COM7	Medical Office/Clinic	7.00
COM8	Entertainment & Recreation	5.00
COM9	Theaters	12.00
COM10	Parking	145.00
INDUSTRIAL		
IND1	Heavy	30.00
IND2	Light	30.00
IND3	Food/Drugs/Chemicals	45.00
IND4	Metals/Minerals Processing	45.00
IND5	Hight Technology	45.00
IND6	Construction	30.00
AGRICULTURE		
AGR1	Agriculture	30.00

Tabella 7-5 Superficie necessaria per ogni occupante in base all'attività (FEMA 2003)

Dalla tabella si evince che le misure sono coerenti con le normative vigenti in materia di sicurezza sul lavoro (DLgs 81/08-Allegato IV), in quanto un lavoratore operante nel settore industriale necessita per legge di una superficie minima di 2 mq, intesa come superficie lorda.

I risultati di tale analisi risultano in conflitto con quanto registrato nell'area: si ottengono dei risultati relativi all'occupazione che determinano una grande sovrastima, soprattutto considerando l'area industriale facente parte di un comune di dimensioni modeste se confrontato con la realtà delle metropoli americane.

Per tale motivo la consultazione di documentazione alternativa ha portato all'utilizzo di un metodo semplificato, che categorizza in maniera meno dettagliata le attività, ma permette di arrivare a risultati più coerenti con quanto atteso. Sulla base di quanto riportato dagli studi di (Cousins, Spence, e So 2013) il numero di occupanti dipende dall'ora del giorno nella quale essi vengono conteggiati (divisione importante in quanto verrà effettuata anche dal software OpenQuake). Secondo quanto riportato le persone vengono distribuite negli edifici in base alla superficie disponibile al loro interno secondo quanto riportato dalla Tabella 7-6:

Building Use Category	Commercial	Industrial	Agricultural	Educational	Residential
Occupancy Rate (m ² /pers)	59	134	98	13	230

Tabella 7-6 Definizione della superficie necessaria per ogni persona in base all'attività, (Cousins, Spence, e So 2013)

Sulla base di questa distribuzione, si ottengono dei risultati decisamente più coerenti con la realtà: si è considerata un'occupazione per le ore diurne, al fine di stimare quali siano i lavoratori e le eventuali persone esterne presenti nell'area: il risultato è di 7700 persone totali di cui si è considerato preventivamente il 58% (categoria "work" della Tabella 7-4) e successivamente il 90% secondo la dicitura "total persons inside buildings" della Tabella 7-4 ottenendo un totale di circa 4000 persone impegnate nell'attività lavorativa, risultato ottenuto tramite preventiva osservazione di eventuali magazzini (a cui si è assegnata un'occupazione pari a zero) e presupponendo che durante la giornata gli edifici con destinazione d'uso residenziale abbiano un'occupazione nulla. Questo risultato è abbastanza coerente con quanto riportato dal sito del consorzio: si registrano circa 5000 persone impiegate nell'area. Seppur si tratti di una leggera sottostima, il risultato ottenuto è comunque plausibile, nonostante l'incertezza legata all'utilizzo di dati provenienti da realtà diverse da quella Piemontese. Sulla base di quanto appena affermato, nella Figura 7-6 è stato definito su mappa il numero di occupanti per ogni attività.

Si evidenzia che nel caso in esame, la componente che maggiormente influenza il numero dei lavoratori è la dimensione del fabbricato: la maggioranza degli edifici presenta infatti un numero di occupanti compreso tra 0 e 100 ad eccezione degli edificati di grandi dimensioni, che arrivano a contenere tra le 300 e le 400 persone.

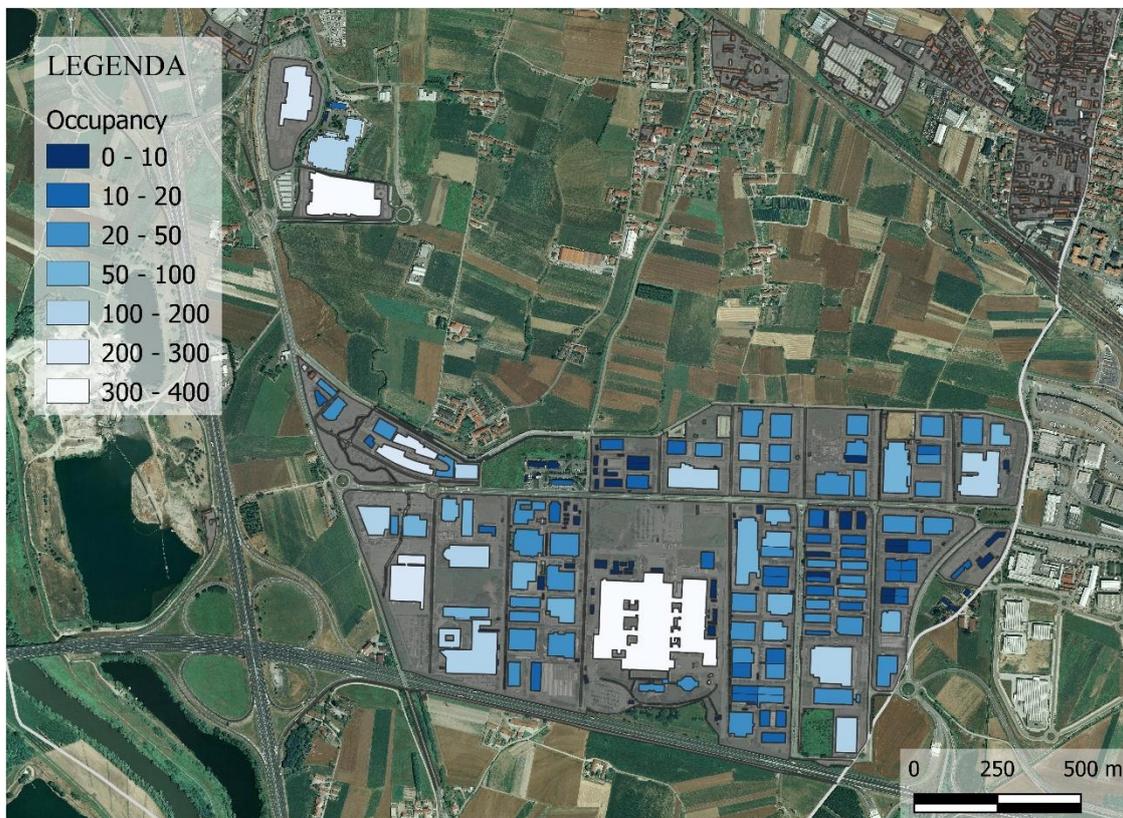


Figura 7-6 Numero di occupanti per ogni attività

7.5.4 Definizione dei costi di interruzione dell'attività

Dopo un evento catastrofico la ripresa della comunità è influenzata a larga scala dalle interruzioni delle attività, le quali rappresentano la maggior parte delle perdite totali economiche.

Gli studi inerenti all'interruzione dell'attività si sono sviluppati in maniera consistente negli Stati Uniti, nei quali le perdite economiche legate alle catastrofi naturali sono cresciute negli ultimi anni, congiuntamente alla crescita del benessere e della popolazione nello stato. Nonostante una grande parte delle perdite sia infatti legato per lo più ai danni fisici sulle costruzioni, l'incidenza dell'interruzione della attività risulta essere importante: un esempio importante è relativo all'uragano Katrina, per il quale una cifra compresa tra i 6 e i 9 miliardi su 25 miliardi di dollari si considera dovuto a tale problematica (Jain e Guin 2009).

La stima dei costi di interruzione dell'attività deve avere un ruolo fondamentale nella misurazione della vulnerabilità delle imprese e per il miglioramento delle prestazioni delle stesse. La conoscenza di tale informazione, risulta essere un requisito fondamentale per mitigare la vulnerabilità non solo dell'attività, ma della comunità stessa; *“la stima delle perdite legate all'interruzione del business è importante per promuovere comunità sostenibili”* (Rose e Lim 2002). A livello pratico, tale stima è fondamentale anche per l'imprenditore, in quanto gli permette di valutare eventuali piani assicurativi.

Nonostante la constatata utilità, la valutazione di tale perdita risulta molto difficile e spesso confusa a causa della difficoltà di reperire dati post-evento relativi a tale campo; ideale infatti sarebbe poter calcolare non solo i costi diretti dovuti all'evento, ma anche quelli indiretti relativi al rapporto con i clienti, alla gestione dell'emergenza, all'occupazione, ai clienti ecc.

Per meglio comprendere il significato di interruzione del business, è determinante capire una distinzione comune a livello economico: quella tra “stocks” (scorte) and “flows” (flussi): quando si parla di stocks (banalmente scorta o merce) si parla di una determinata quantità in un determinato istante di tempo, mentre flows (flusso o attività) è riferito ai servizi o alla produzione nel tempo. Chiarito questo concetto *“il danno legato alla proprietà fisica rappresenta una diminuzione del valore delle scorte e comporta un decremento nel flusso di servizi o nel flusso produttivo: l'interruzione dell'attività è quindi sicuramente una misura del flusso”* (Rose e Lim 2002). La letteratura riguardante le perdite legate ai danni sugli edifici è numerosa, ma nel caso delle industrie l'interruzione delle attività è causa di perdite maggiori. Per prima cosa, l'interruzione dell'attività può non essere dovuta al danno, ma può verificarsi anche in sua mancanza: banalmente strutturalmente possono non essere rilevati danni in un'industria, ma per un'interruzione della linea elettrica può essere necessaria la sua chiusura; in secondo luogo la conoscenza dei costi di interruzione dell'attività permette di stimare in maniera più efficace le perdite indirette. Quando si parla di perdite dirette e indirette una distinzione semplificata sembrerebbe semplice: si potrebbero definire dirette le perdite legate ai danni fisici e indirette quelle legate all'interruzione dell'attività; tale distinzione è però riduttiva e fuorviante in quanto in entrambe le voci sono presenti sia perdite economiche dirette che indirette. Si può pensare alle perdite dirette come a quelle provocati dal terremoto stesso quali deterioramento delle merci,

distruzione dei macchinari, danni strutturali, mentre ci riferisce a perdite indirette o secondarie quando si fa riferimento all'interruzione dell'attività e alle conseguenze sulla produzione (o sulla vendita nel caso di esercizi commerciali).

Il "Downtime" ha significato diverso in vari campi, ma può essere definito nel campo dell'ingegneria sismica come il periodo di tempo entro il quale la costruzione interessata da una determinata attività riprende al 100% la sua operatività o come quel tempo per il quale l'attività ottiene nuovamente il profitto pre-evento. Uno dei metodi più semplici e speditivi per definire questo periodo è quello di considerare il significato dato dalle agenzie assicurative.

Storicamente le imprese Italiane non sono coperte da assicurazioni capaci di coprire i danni economici provocati da eventi catastrofici, nonostante si tratti per la maggior parte di piccole e medie imprese. In media questo avviene perché in relazione ai vari livelli di danno, l'evento catastrofico causa un totale di giorni di chiusura pari a:

Occupancy—industry	Damage states			
	Moderate	Extensive	Near collapse	Collapse
Food/drugs/chemicals/metals/mineral Processing	90	240	240	360

Tabella 7-7 Tempo (espresso in giorni) necessario per la ricostruzione delle componenti strutturali degli edifici industriali, (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018)

Nonostante le difficoltà citate, anche in questo caso la metodologia HAZUS fornisce una soluzione per la stima del valore di interruzione giornaliero del business, determinando che in relazione all'unità di misura americana "square foot", la perdita possa essere stimata come pari a 0.95 USD. Attualmente (22 ottobre 2019) il valore di conversione indica che 0.95 USD sono pari a 0.85 euro e tale valore sarà utilizzato per stimare le perdite associate all'interruzione dell'attività. Viene dichiarato sin da subito che tale valore porta sicuramente ad una stima viziata da incertezze importanti dato che tali dati sono stati concepiti per uno stato ed un'economia totalmente diverse da quelle Italiane; tale problematica può però essere utile nel sottolineare l'urgenza nella creazione di stime simili per il nostro Stato. *"In una situazione ideale, sarebbe ottimale avere a disposizione i costi relativi all'attrezzatura di ogni capannone industriale ed il bilancio di ogni impresa considerato, in modo da eliminare la necessità di far riferimento a dati americani"* (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018).

Nonostante le dovute considerazioni appena fatte, i capannoni industriali, i laboratori ed i magazzini presenti a Moncalieri hanno dimensioni spesso ridotte e la loro importanza è spesso limitata ai confini regionali, dunque l'errore può essere considerato meno importante.

7.5.5 Vulnerability model

La costruzione del modello di vulnerabilità è ottenuta tramite metodo empirico. Le curve di fragilità sono uno strumento necessario per la prevenzione del rischio sismico: esse relazionano la probabilità di eccedenza di un determinato livello di danno con l'intensità di scuotimento del suolo. Queste curve possono essere ottenute usando differenti approcci, in particolar modo da analisi statistiche effettuata su livelli di danno osservati o su modelli numerici (Buratti, et al. 2017). Per ogni tipologia costruttiva, considerando il materiale ed il numero di piani, si sono infatti ottenute le curve illustrate nel paragrafo 6.5.3. Anche nel caso in esame è stata utilizzata una distribuzione lognormale.

Nel caso del cemento armato, i livelli di danno sono descritti nella Tabella 7-8.

Damage grade	Type of damage		Definition
	Non-structural	Structural	
D_0 (no damage)	–	–	No damage
D_1 (slight damage)	Slight	–	Local or distributed damage to up to 20% of horizontal and/or vertical partitions without collapses
D_2 (moderate damage)	Moderate	Slight	Local or distributed damage to more than 20% of horizontal and/or vertical partitions without collapses
D_3 (severe damage)	Heavy	Moderate	Severe damage to up to 15% of horizontal and/or vertical covering surfaces with collapses or at least one column with permanent drift larger than 2%
D_4 (heavy damage)	Very heavy	Heavy	Severe damage to up to 30% of horizontal and/or vertical covering surfaces with collapses or to up to 20% of columns, with permanent drift larger than 2%, or plastic hinge at the base section
D_5 (collapse)	Total or partial collapse		Collapses of more than 30% of horizontal and/or vertical covering surfaces or damage to more than 20% of columns

Tabella 7-8 Livelli di danno nel caso di edifici in cemento armato, (Buratti, et al. 2017)

Nonostante fossero presenti delle curve per il cemento armato precedentemente utilizzate per il capitolo precedente, le curve di vulnerabilità sono definite in maniera più precisa per ogni tipologia costruttiva, obiettivo che si era già prefissato nel paragrafo

È bene sottolineare che i dati relativi a terremoti passati che si riferiscano in maniera distinta alle perdite strutturali, non strutturali ed ai contenuti e di tempo di inattività. Al fine di tener conto dell'incertezza legata a tale studio, viene inserito il valore del coefficiente di variazione, utilizzato dal calcolare di OpenQuake.

Per la costruzione delle curve di vulnerabilità vengono si fa riferimento al paragrafo 6.4, distinguendo quindi le curve di vulnerabilità per le quattro tipologie di edifici in cemento armato e separate in relazione alla componente alla quale fanno riferimento: parte strutturale, parte non strutturale, contenuti e costi di interruzione dell'attività.

Sulla base del lavoro di (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018) sono state definite tali curve, riportate in Figura 7-7, 7-8, 7-9, 7-10.

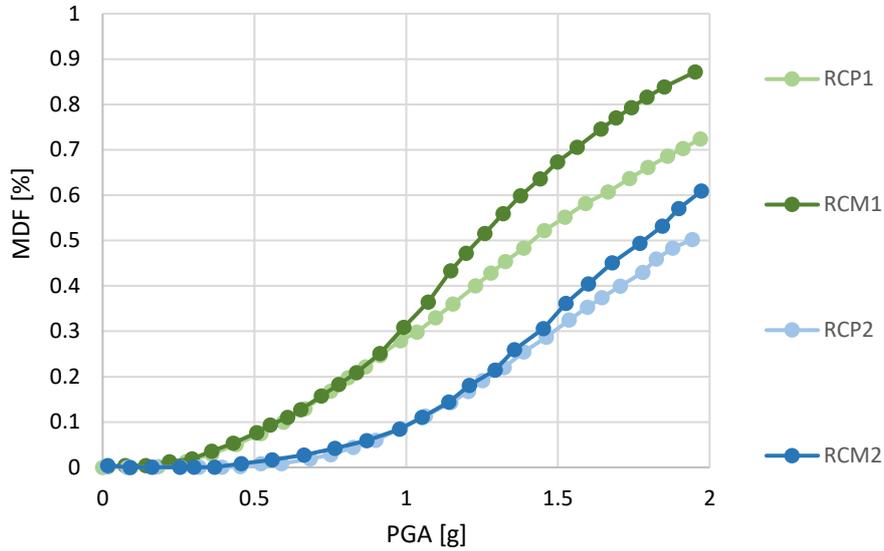


Figura 7-7 Curve di vulnerabilità riferite alle componenti strutturali di edifici industriali in cemento armato, riferiti alle quattro categorie

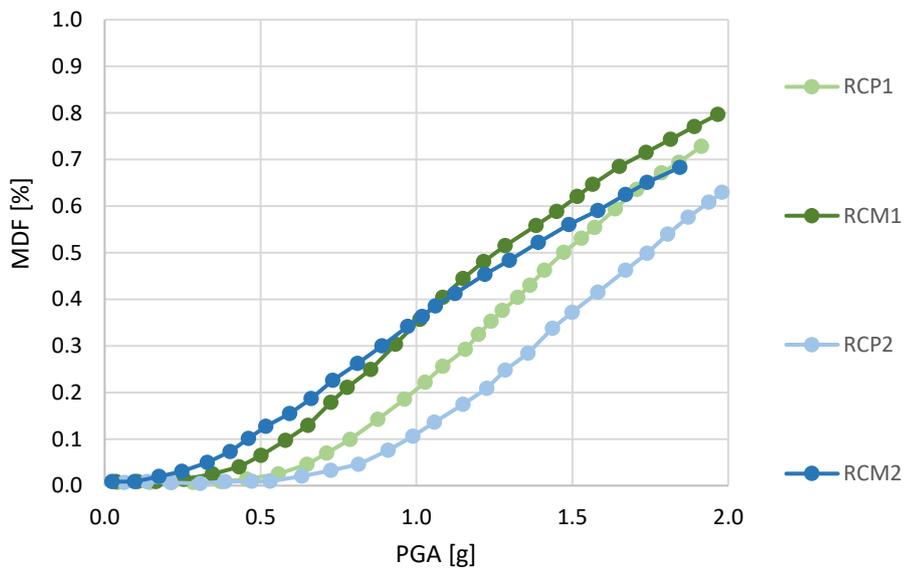


Figura 7-8 Curve di vulnerabilità riferite alle componenti non strutturali di edifici industriali in cemento armato, riferiti alle quattro categorie

Come evidenziato nelle Figure 7-7 e 7-8 esiste una diversa vulnerabilità differente nel caso di edifici di diversa tipologia; risultato che invece non riguarda la vulnerabilità relativa ai contenuti, che risulta visibilmente più marcata nel caso della tipologia RCM1.

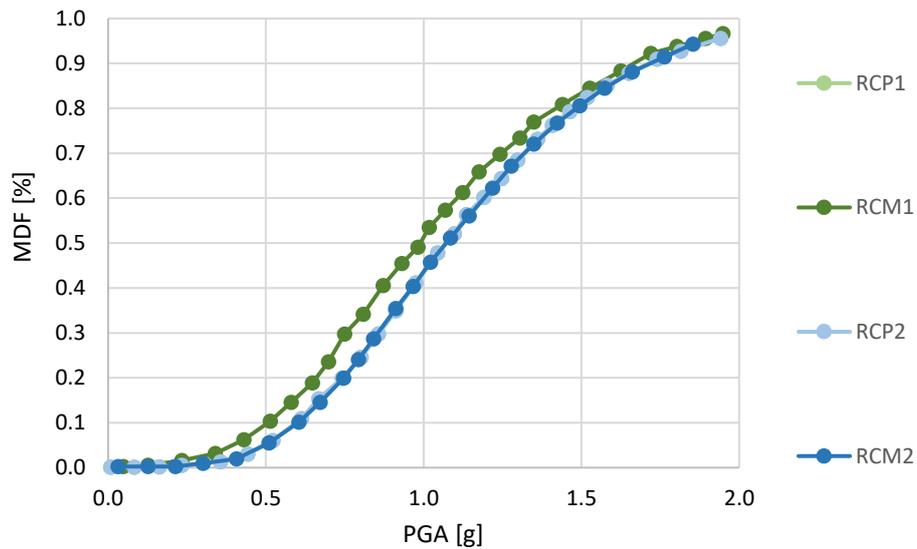


Figura 7-9 Curve di vulnerabilità riferiti ai “contenuti” di edifici industriali in cemento armato, riferiti alle quattro categorie

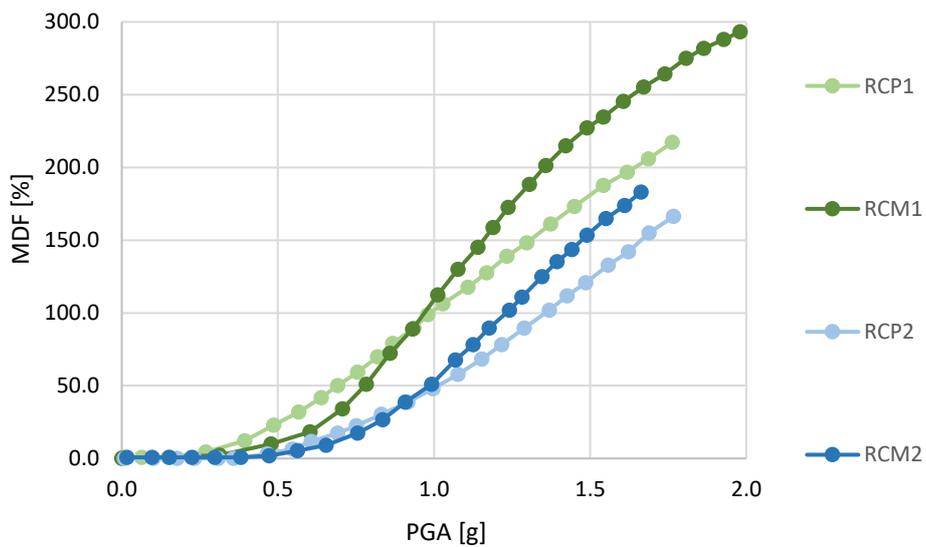


Figura 7-10 Curve di vulnerabilità riferiti all'interruzione dell'attività di edifici industriali in cemento armato, riferiti alle quattro categorie

Il modello di vulnerabilità per gli occupanti risulta un discorso più complesso, in quanto in Italia non sono facilmente reperibili delle curve che mettano in relazione il tasso di mortalità con l'intensità macrosismica, ma è invece abbastanza comune trovare delle curve di vulnerabilità che facciano riferimento alle strutture e alle infrastrutture regionali e statali.

In Cina si verifica l'esatto opposto: la stima della vulnerabilità di strutture e infrastrutture richiede spesso la conoscenza di dati non presenti nei database cinesi e questo è un problema che si presenta in proporzioni maggiori tanto più risulta sottosviluppata la regione di interesse. Queste problematiche hanno portato a uno sviluppo di modelli empirici atti a stimare il tasso di mortalità come una funzione del movimento del terreno (Wu, Jin e Pan 2015). I dati sono stati successivamente validati sulla base di dati provenienti da recenti terremoti avvenuti in Cina e in particolare nella zona Ovest del paese: come noto si tratta di uno Stato spesso interessato da eventi catastrofici di carattere sismico e tali eventi hanno reso la Cina lo stato in cui sono avvenute la metà delle morti mondiali causate da catastrofi naturali. La stima delle morti dovute ai terremoti rappresenta quindi, non solo per la Cina un argomento chiave per valutare il rischio sismico. I dati sono reperiti sulla base di 157 terremoti che hanno scosso la Cina dal 1989 al 2004, mentre i dati relativi alle morti causate da tali eventi sono reperiti da siti riportanti le cause (in termini di morti casuali) degli eventi.

Tra le curve proposte si è scelto di utilizzare quella media relativa all'intero stato cinese, in quanto la curva relativa all'intera nazione fornisce risultati migliori applicata ad un maggior numero di eventi, mentre quella relativa alla zona ovest dello stato è particolarmente utile nel caso di vogliano stimare le perdite nella zona suddetta. Per quanto riguarda le curve presenti nella Figura 7-11 si è scelto di utilizzare la "Logistic Curve", "in quanto risulta essere quella che maggiormente trova riscontro negli eventi attuali" (Wu, Jin e Pan 2015).

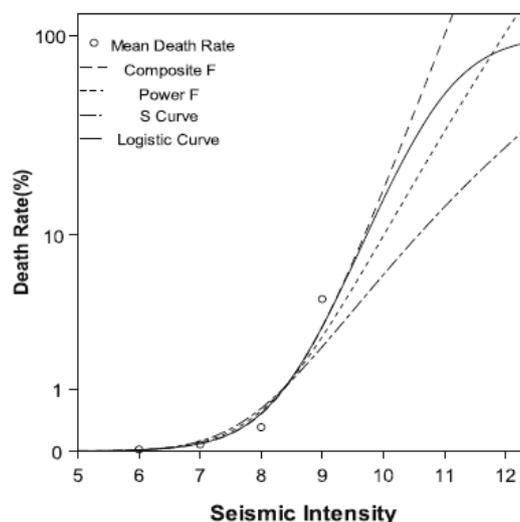


Figura 7-11 Curve di vulnerabilità medie per la Cina, in termini di tasso di mortalità, (Wu, Jin e Pan 2015)

La Figura mostra una relazione tra l'intensità macrosismica ed il tasso di mortalità, dunque come evidenziato nel paragrafo 6.5.3 nel caso della curva di fragilità relativa alla chiesa, viene effettuata una trasformazione per convertire l'intensità macrosismica il PGA, con cui si ottiene la curva riportata in Figura 7-12.

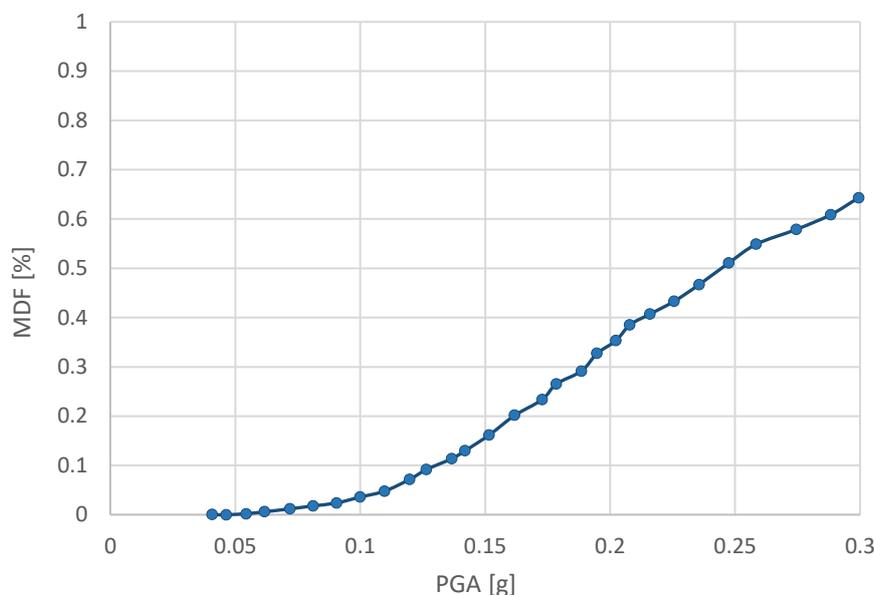


Figura 7-12 Curva di vulnerabilità per l'occupazione

7.6 Analisi effettuate su gli edifici industriali di Moncalieri ed elaborazione dei file di input

Le analisi effettuate sono le stesse indicate nel paragrafo 6.3: *Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Risk Analysis* output e *Scenario Damage Assessment* e *Scenario Risk Assessment analysis* input.

Per quanto concerne i file di input per la prima tipologia di analisi, l'elaborazione dei dati a scala territoriale forniscono già indicazioni precise sulle informazioni relative alla pericolosità sismica che quindi verrà in questa parte esclusa dalle considerazioni, in quanto i risultati sono stati rappresentati per tutta l'area oggetto di studio. In questa fase il file di input conterrà lo stesso set di dati utilizzati ed illustrati nel paragrafo 6.3 per quanto riguarda il sito e le caratteristiche del terreno; per quanto riguarda il calcolo del rischio sismo nella zona industriale, in questo caso sono stati utilizzati diversi modelli di vulnerabilità, in relazione al tipo di informazioni circa le perdite economiche.

L'analisi del danno e del rischio sismico con il calcolatore Scenario, vengono effettuate sulla base di quanto appreso nel paragrafo 6.7.2, ovvero che i terremoti rispettivamente storico e simulati in Liguria (vicino ad Imperia) non danneggiano gli edifici in cemento armato per quanto riguarda la componente strutturale e quindi hanno come conseguenza delle perdite economiche nulle. Per tale motivo, si procederà simulando il terremoto storico ad Imperia (magnitudo 6.3) avvenuto nel 1887 (i cui dati principali relativi al terremoto storico sono riportati in Tabella 7-9) e verificando che le il discorso effettuato per le componenti strutturali sia valido anche per le altre perdite e successivamente si procederà con la simulazione di due terremoti di magnitudo 6.0 e 6.5 in Val Pellice (i cui dati del terremoto storico sono visionabili in Tabella 7-10), che invece mostrava come effetto delle perdite significative.

Dati Terremoto Imperia (Liguria)	
Coordinate epicentro	Latitudine: 43.89
	Longitudine: 7.99
Data Evento	23 febbraio 1887
Profondità dell'ipocentro	15 km
Distanza da Moncalieri	126 km
Magnitudo	6.5

Tabella 7-9 Tabella contenente i dati principali del terremoto con epicentro vicino ad Imperia (1887)

Dati Terremoto Val Pellice (Piemonte)	
Coordinate epicentro	Latitudine: 44.84
	Longitudine: 7.25
Data Evento	2 aprile 1808
Profondità	25 km
Distanza dall'epicentro	55 km
Magnitudo	5.7

Tabella 7-10 Tabella contenente i dati principali del terremoto storico con epicentro in Val Pellice (1807)

7.7 Elaborazione dei file di output

Il procedimento risulta essere il medesimo del paragrafo 6.7, ovvero i risultati ottenuti sono stati introdotti nel software QGIS al fine di visualizzare i risultati, di poter geo-referenziare i dati ottenuti e di visualizzare in maniera ottimale gli edifici più esposti e vulnerabili.

Nel caso in esame, le perdite sono state calcolate in quanto medie, al fine di facilitare i confronti tra le componenti delle perdite. In Figura 7-13, 7-14, 7-15, 7-16, sono riportate le mappe del rischio sismico in termini di perdite economiche relative all'analisi stocastica effettuata impostando un periodo di indagine pari a 100 anni; la Figura 7-17 fornisce invece informazioni circa la stima del numero di morti stimati sulla base dell'analisi stocastica.

Come anticipato nel paragrafo 7.6, per quanto riguarda il calcolatore Scenario, si è proceduto per step, verificando in primo luogo che il terremoto storico in Liguria (vicino ad Imperia) avesse lo stesso effetto osservato nel caso di strutture in cemento armato analizzato nel caso di analisi territoriale.

Dal momento che la totalità degli edifici aveva una probabilità di non subire danno compresa tra il 90 ed il 100% e che la probabilità di subire un danno lieve non supera il 2% si è proceduto con la simulazione del terremoto storico in Val Pellice.

Le Figure 7-24 e 7-23 costituiscono l'output in termini di danno del calcolatore Scenario Damage rispettivamente per il danno strutturale, non strutturale, relativo ai contenuti e all'interruzione del business per il terremoto storico di Val Pellice; in questo caso, data la diversa valuta, si è ritenuto superfluo riferirsi alle perdite. Successivamente sono stati valutati il danno ed il rischio sismico per il terremoto simulato a Val Pellice di magnitudo 4.0, 5.0, 5.5 e 6.0. Il caso di terremoto di magnitudo 4.5 ha messo in luce che le perdite ad esso collegate sono nulle e quindi di poco interesse. Si è proseguito quindi con la simulazione del terremoto di magnitudo 5.0 i cui risultati in termini di danno sono riportati nella Figura 7-25 e nella Figura 7-26 e le perdite economiche nelle Figure 7-28, 7-29, 7-30. Il caso di terremoto di magnitudo 5.5 e 6.0, ritenuti maggiormente interessanti per i risultati ottenuti, sono riportati rispettivamente in Figura 7-31 e 7-32 (magnitudo 5.0 output relativi al danno e Figure 7-33, 7-34, 7-35, 7-36 e 7-37 (per quanto concerne il rischio in termini di perdite economiche) e, nelle Figure 7-38, 7-39 (in termini di danno) e 7-40, 7-41, 7-42, 7-43, 7-44 e 7-45 per le perdite economiche.

7.7.1 Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Risk Analysis output

Come evidenziato nel paragrafo 7.6.5 sono stati creati diversi modelli di vulnerabilità in relazione a due parametri fondamentali: la categoria dell'edificio ed il tipo di perdita oggetto di analisi; per tale motivo le mappe rappresentanti le perdite verranno suddivise in base al tipo di perdita analizzata ed, infine verranno presentati dei confronti per ogni categoria di edificio, al fine di poter meglio comprendere quali siano gli obiettivi di tali analisi e che cosa la differenza da un'analisi tipica in cui vengono considerate solo ed esclusivamente le perdite strutturali. I risultati di tale tipologia di analisi, forniscono infatti la possibilità di pianificare a lungo termine gli interventi da apportare ad una data categoria di edifici (in questo caso quelli industriali) e permettono la valutazione, da parte di coloro che gestiscono le attività di stipulare eventuali coperture assicurativi, utili a preservare, nel caso di poli economici di rilevanza nazionale, l'economia del territorio nazionale.

Loss maps

Structural loss map

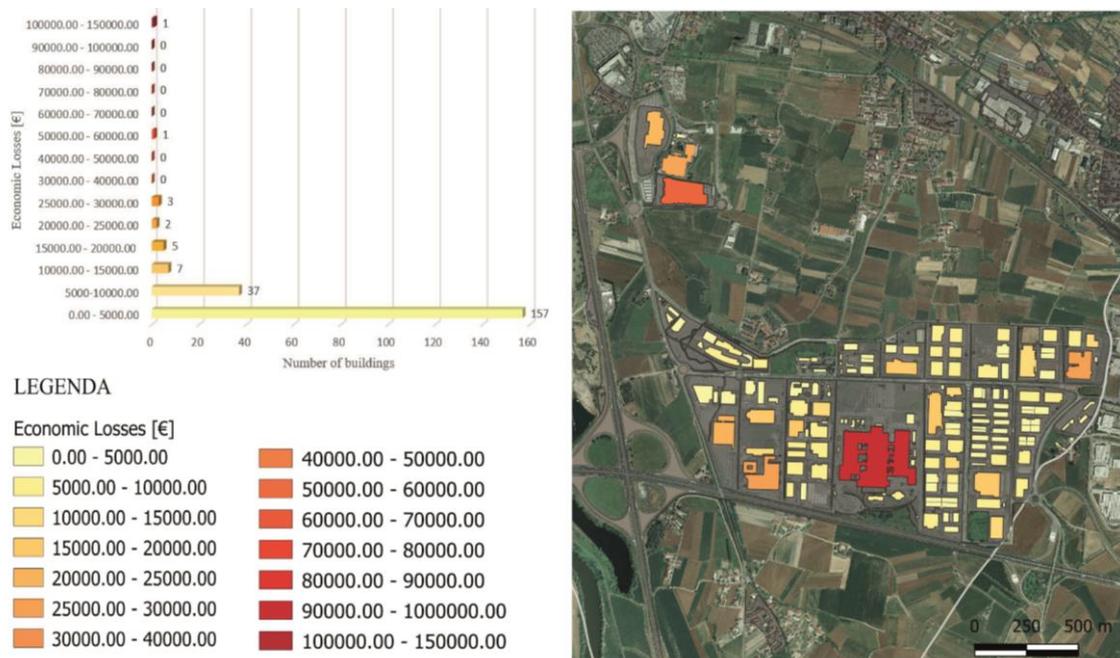


Figura 7-13 Perdite economiche medie relative alla componente strutturale considerando un periodo di indagine

Non structural loss map

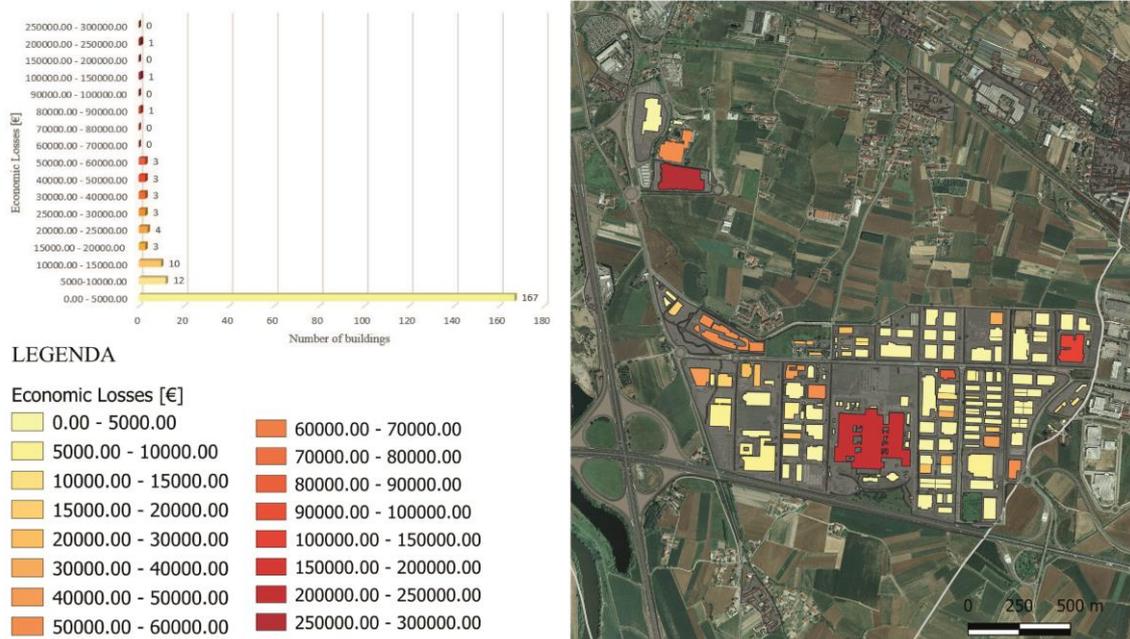


Figura 7-14 Perdite economiche medie relative alla componente non strutturale considerando un periodo di indagine di 100 anni

Contents loss map



Figura 7-15 Perdite economiche medie relative ai contenuti considerando un periodo di indagine di 100 anni

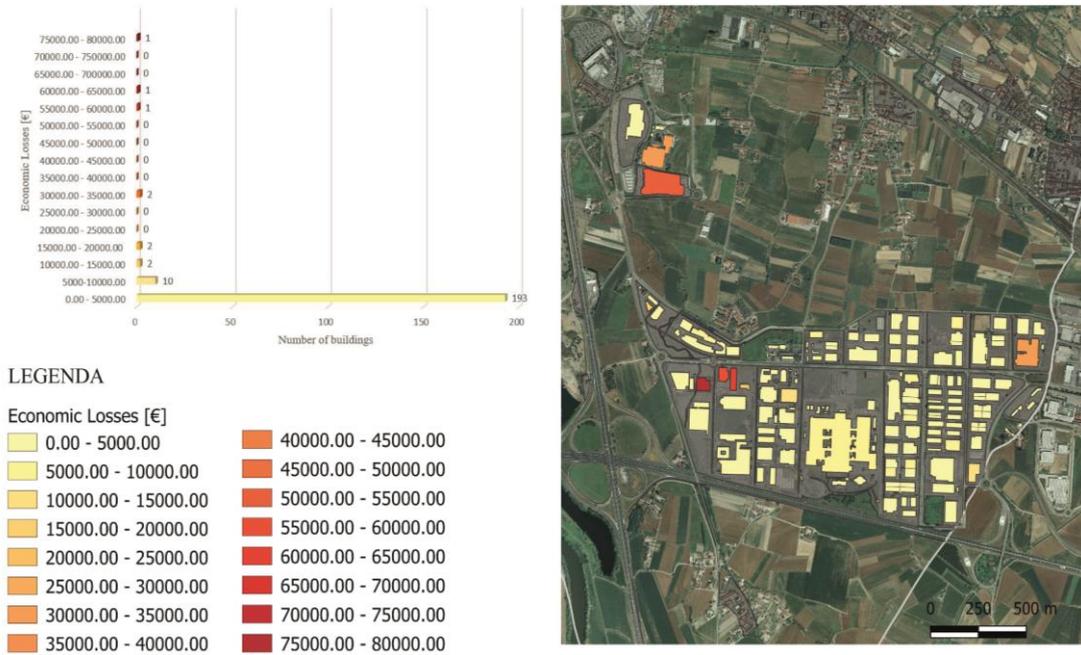
Business Interruption Loss Map

Figura 7-16 Perdite economiche medie relative all'interruzione dell'attività considerando un periodo di indagine di 100 anni

I risultati ottenuti sono coerenti con quanto atteso: dalla Figura 7-13 si evince infatti che le perdite strutturali hanno un valore minore se confrontate con quelle calcolate per gli edifici in cemento armato nel caso di analisi a scala territoriale; questo deriva dal fatto che il prezzo della costruzione è stato scomposto in tre parti e la parte relativa alla componente strutturale ha la percentuale di incidenza più bassa sul totale. Risulta interessante osservare invece i risultati rappresentati in Figura 7-13 e 7-14 in quanto gli edifici sono soggetti a perdite maggiori nel caso del calcolo del rischio sismico per la componente non strutturale.

Un confronto molto interessante, che può offrire uno spunto di riflessione importante, risulta essere quello tra i risultati rappresentati in Figura 7-14 e 7-15: dalla distribuzione del costo al mq, è risultato che il prezzo da assegnare ai “contenuti” è maggiore rispetto a quello relativo alla componente non strutturale; per tale motivo senza osservare le curve di vulnerabilità verrebbe spontaneo pensare che questa tipologia di calcolo debba portare a delle perdite maggiori. Se si osservano però in modo attento le curve di vulnerabilità, si nota che per valori di accelerazione compresi tra 0 e 0.5 g, il *mean damage factor* assume dei valori praticamente prossimi allo zero, ragion per cui per un periodo di indagine di 100 anni le perdite ottenute risultano coerenti con quanto atteso. Nel lungo periodo e quindi considerando periodi di osservazione più lunghi, la componente relativa ai contenuti assume invece un peso maggiore, risultato mostrato nella Figura 7-17.

La Figura 7-16 è invece coerente con quanto atteso: trattandosi di una zona caratterizzata da bassa sismicità, l'impatto sulle attività è limitato, comportando una distribuzione delle perdite compresa per la maggior parte degli edifici tra i 0 e i 5000 euro (200/213 edifici); il problema è sicuramente sentito soprattutto negli edifici in cemento armato con pannelli, in quanto si può osservare in Figura 7-8 che mostrano, anche per valori di accelerazione non elevati, un valore del *mean damage factor* diverso da 0.

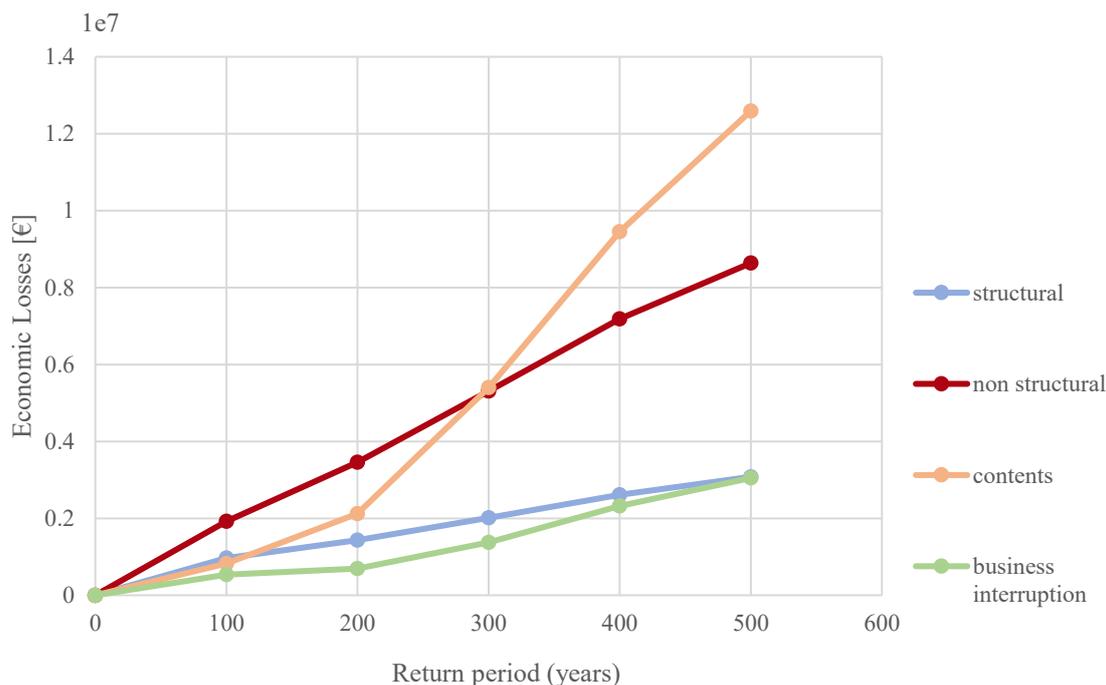


Figura 7-17 Curva di perdita media per gli edifici del complesso industriale Sanda Vadò

Le perdite totali hanno un valore di 27.356.171,86 € per un periodo di ritorno di 500 anni. Una prima considerazione può essere fatta facendo riferimento a alle stesse curve determinate per gli edifici industriali considerando solo ed esclusivamente la componente strutturale: la cifra ottenuta in questo caso risulta molto maggiore, in quanto non si sta tenendo conto solo della componente strutturale ma di tutte le altre componenti; questo è un risultato molto importante perché nel caso di 460 edifici si sono ottenute delle perdite nell'ordine dei 25.020,400 €, mentre in questo caso, con poco più della metà si raggiunge una cifra totale notevolmente maggiore. Il confronto delle due analisi è visibile nella Figura 7-15 e, sulla base della conoscenza del numero di edifici considerati nel caso di analisi su tutto il territorio di Moncalieri e solo sugli edifici industriali, risulta immediatamente comprensibile l'importanza di una tale analisi. Un altro fatto che si evince dalla Figura 7-17 è l'andamento non lineare della retta delle perdite economiche, particolarmente marcato nel caso dei "contents": come noto, il tempo di ritorno è influenzato dalla vita utile dell'elemento considerato (tale attributo è infatti solitamente definito per la vita utile degli edifici)

o in questo caso della tipologia di elemento considerato e, è chiaro che, la vita utile di un componente meccanico, elettrico risulta essere molto minore rispetto a quella delle strutture. I risultati quindi, mostrano coerenza con quanto atteso.

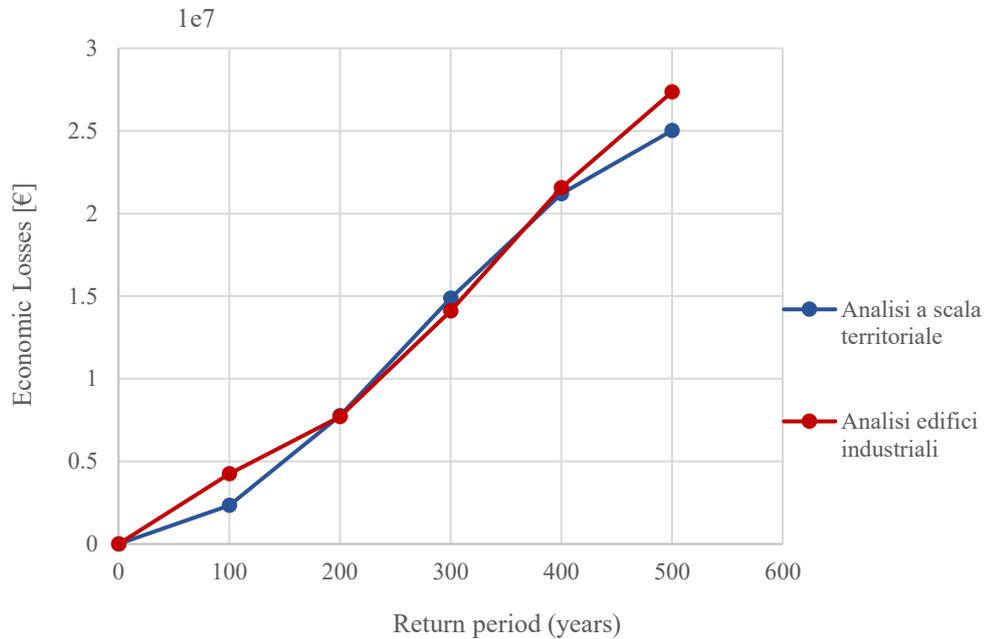


Figura 7-18 Confronto tra le perdite ottenute con l'analisi a scala territoriale (460 edifici) in termini di danni alle strutture e le perdite totali ottenute con l'analisi degli edifici industriali (213)

In definitiva, nella Tabelle 7-11 e 7-12 sono mostrati i risultati ottenuti per ogni categoria riferiti ad un anno di indagine.

	Average annual losses (€/mq)
Structural	9643.04
Non structural	19214.56
Contents	8273.99

Tabella 7-11 perdite medie annuali per le componenti strutturali, non strutturali e per i contenuti

	Average annual losses (€/day)
Business Interruption	5316.51

Tabella 7-12 Perdite medie giornaliere per l'interruzione dell'attività

Al fine di valutare per ogni categoria quali siano le perdite con maggiore incidenza, si sono calcolate le percentuali di incidenza di ogni perdita per ogni tipologia di edificio industriale, i cui risultati sono mostrati in Figura 7-19.

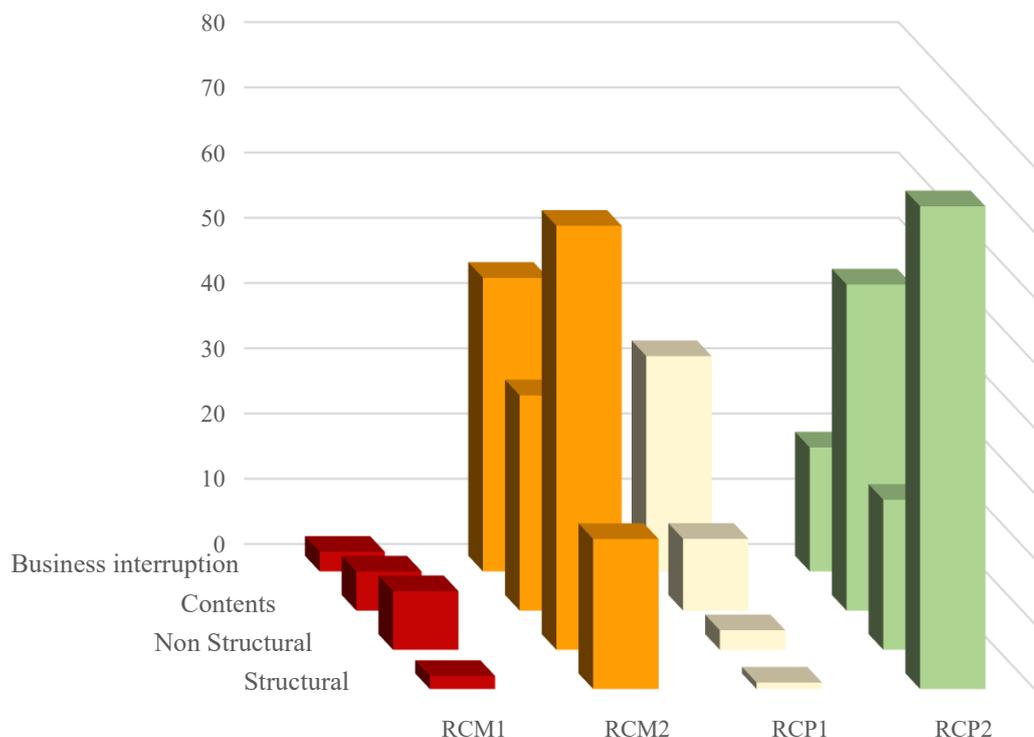


Figura 7-19 Distribuzione delle perdite in base alla tipologia costruttiva

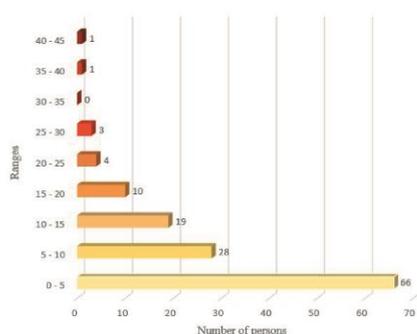
Dalla Figura 7-19 si evince che la tipologia maggiormente compromessa dipende dalla perdita analizzata: tenendo presente che la tipologia maggiormente presente è la RCP2 (67% del totale), si evince che le perdite strutturali maggiormente incidenti sono quelle relative a questa tipologia, probabilmente dovuto alle grandi superfici considerate; soffermandosi sulle tipologie maggiormente presenti, se ci si fosse fermati a considerare solo ed esclusivamente le perdite strutturali, si sarebbe potuto erroneamente giungere alle conclusioni che il rischio relativo a tali due tipologie sia quasi nullo. Se si osserva però la componente non strutturale per la tipologia RCM1 e quella relativa all'interruzione dell'attività per la tipologia RCP1, ci si accorge di come in realtà un'analisi di questo tipo metta in luce la vulnerabilità di tali edifici.

Discorso analogo è valido anche per la categoria RCM2, la quale non presenta perdite strutturali importanti, ma compensa tale caratteristica mostrando invece delle ingenti perdite legate alle componenti non strutturale e all'interruzione dell'attività; tale comportamento mette in evidenza quanto in realtà le costruzioni in cemento armato e chiusure verticali realizzate in muratura, siano in realtà maggiormente vulnerabili sotto questi aspetti rispetto a alla tipologia realizzata con pannelli.

Se le strategie di mitigazione del rischio si focalizzassero solo sulla componente strutturale si focalizzerebbe sugli edifici di tipologia RCP2 (questo dovuto probabilmente all'alto valore di esposizione, dovuto sia alla presenza di tanti edifici e alle grandi aree da cui questi sono caratterizzati), mentre se dovesse focalizzarsi sulla componente Non strutturale RCM1 e RCM2 avrebbero la priorità (nonostante le strutture RCM1 rappresentino una minoranza- con solo il 5% di edifici di tale categoria- la presenza della muratura e la mancanza di progettazione antisismica rende le perdite importanti). Il discorso può essere fatto osservando le incidenze per ogni categoria e nel caso delle costruzioni costruite senza normativa sismica e realizzate con cemento armato e pannelli, le perdite più ingenti sono relative all'interruzione dell'attività (evidenziato anche dalla curva di vulnerabilità), dunque questo potrebbe senza dubbio portare i proprietari di tali attività a stipulare una polizza assicurativa.

Occupancy Loss Maps

Un discorso differente viene affrontato nel caso di stima delle perdite umane. In questo caso la stima non porta ad una valutazione economica della perdita, ma permette di capire quale sia la percentuale di occupanti soggetti a rischio sismico durante la giornata lavorativa (il numero di occupanti è stato fornito per l'arco diurno). I dati, i cui risultati risultano essere per lo più concentrati nel primo range del grafico (66/213 edifici) sono mostrati nella Figura 7-21.



LEGENDA

Number of human casualties

0 - 5

5 - 10

10 - 15

15 - 20

20 - 25

25 - 30

30 - 35

35 - 40

40 - 45



Figura 7-20 Perdite umane calcolate per un periodo di indagine di 100 anni

Come esplicitato in precedenza nel paragrafo 7.5.3 la stima del numero di occupanti è stato effettuato utilizzando un metodo semplificato, basato sulle Tabelle 7.4 e 7.6, sulla base delle

quali si è ottenuta una sottostima dell'occupazione totale (nel sito del Consorzio si fa riferimento alla presenza di circa 5000 lavoratori, ma tale dato non è comunque supportato da documenti ufficiali).

Nel caso suddetto inoltre, dal momento che tali dati sono stati pensati per il loro utilizzo in Cina per la quale è stata costruita la curva di vulnerabilità in Figura 7.11 (stato caratterizzato da una densità di popolazione elevata), i risultati possono sicuramente risultare alterati o affetti da errori, in quanto si tratta di due luoghi completamente diversi. L'ideale sarebbe stimare in relazione a range di popolazione o di densità abitativa tali dati e costruire delle curve idonee, al fine di capire con maggiore precisione quali siano i luoghi maggiormente a rischio per quanto riguarda le perdite umane.

In ogni caso si è deciso di mostrare comunque i risultati e i passaggi utilizzati per questo calcolo, in quanto può sicuramente fornire informazioni importanti se utilizzato con dati più precisi.

Nel caso in esame si è deciso di relazione le perdite umane al settore esaminato, al fine di definire quale settore sia maggiormente a rischio.

I dati che presentano maggior rilevanza quando si calcolano tali perdite sono, tramite confronto con le Figure 7-2, 7-3 e 7-4 l'irregolarità in pianta, la dimensione dell'edificio e la tipologia di attività.

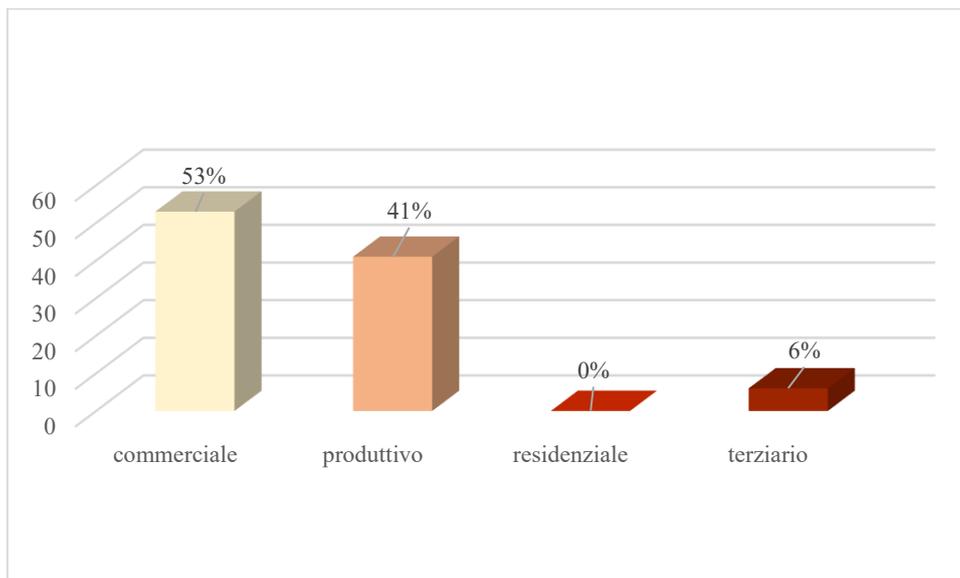


Figura 7-21 distribuzione delle perdite umane per i vari settori

Dalla Figura 7-21 risulta che il settore commerciale sarebbe il più a rischio in termini di vite umane, in quanto, come atteso, si tratta del settore più densamente occupato e, nel caso dell'edificio che presenta un numero elevato di feriti (o vittime), si tratta di un edificio a 4 piani, con una pianta di dimensioni importanti.

Come evidenziato nel paragrafo 6.5.2 il parametro relativo all'altezza non è stato inserito, in quanto negli edifici residenziali si ritiene che esso abbia una bassa influenza e che, il numero di piani, invece, influenzi in maniera importante le analisi. Nel paragrafo 7.4, si è fatto riferimento

ai dati utilizzati per la migliore definizione del database (e della successiva tassonomia) utilizzata per gli edifici industriali e si è sottolineato che i dati di partenza risultavano quelli utilizzati per l'analisi a scala territoriale su tutti gli edifici di Moncalieri.

Nel caso di edifici industriali però, può risultare interessante valutare l'influenza dell'altezza nella stima del rischio sismico, ed in particolare della vulnerabilità degli edifici, dunque, per tale motivo, si è deciso di testare il peso di tale attributo su un gruppo di edifici industriali ad un piano, ma che presentano altezze differenti. Si è quindi proceduto con la valutazione delle perdite economiche relative alle strutture, i cui esiti sono riportati nella Figura 7.22.



Figura 7-22 Confronto tra i risultati ottenuti da analisi a) con tassonomia senza altezza e b) tassonomia senza altezza

Quanto atteso non trova riscontro in quanto riportato dalla Figura 7-22, infatti, sulla stessa zona (caratterizzata comunque da altezze differenti ed edifici monopiano) la variabilità massima riscontrata è di 9.500 € e si verifica per l'edificio che presenta le maggiori perdite (presenta un'altezza di 6 m e un'area di dimensioni elevate rispetto alle altre). Si rimarca che i risultati attesi sarebbero stati differenti, dunque si suppone che, se tale analisi (con la considerazione delle altezze) fosse effettuata in una zona caratterizzata da sismicità maggiore, i risultati sarebbero stati differenti.

Nelle conclusioni relative agli sviluppi futuri, si è infatti fortemente spinto per una verifica di questo tipo.

7.7.2 Scenario Damage assessment e Scenario Risk assessment output

Come evidenziato nel paragrafo 6.7.2, si sono considerati, per le analisi sul singolo scenario, i due terremoti storici di Imperia (1887) e Val Pellice (1808), i cui dati sono stati riportati nelle Tabelle 7-9 e 7-10. Il terremoto ad Imperia, ha un epicentro molto distante da Moncalieri e, nonostante l'intensità (6.5), non causa danni sugli edifici industriali oggetto di analisi. Per tale motivo, la trattazione si concentra sugli effetti del terremoto in Val Pellice, del quale l'epicentro è situato ad una distanza minore.

Val Pellice, terremoto storico del 1808

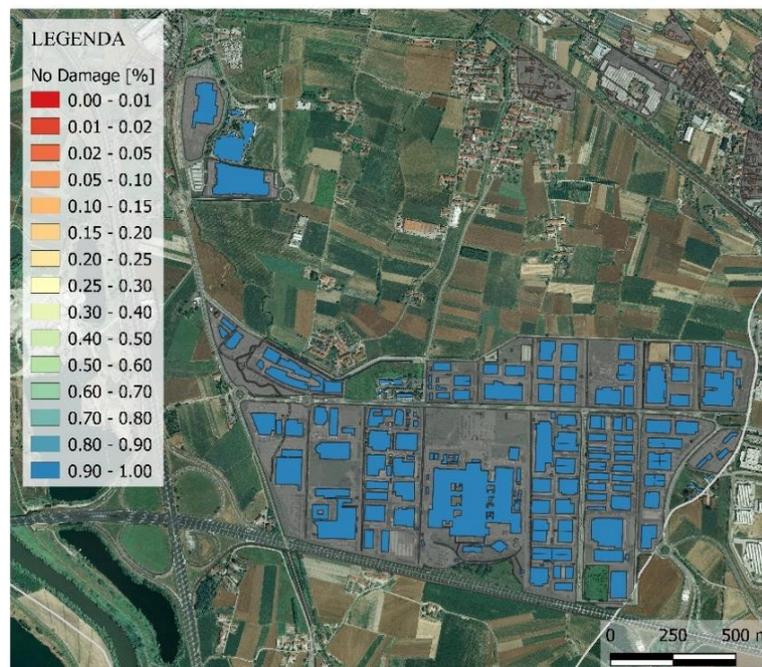


Figura 7-23 Distribuzione del danno nella zona industriale di Sanda Vadò, considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro a Val Pellice- No damage

Con una certa variabilità la Figura 7-23 risulta rappresentativa del danno per tutte le componenti di perdita.

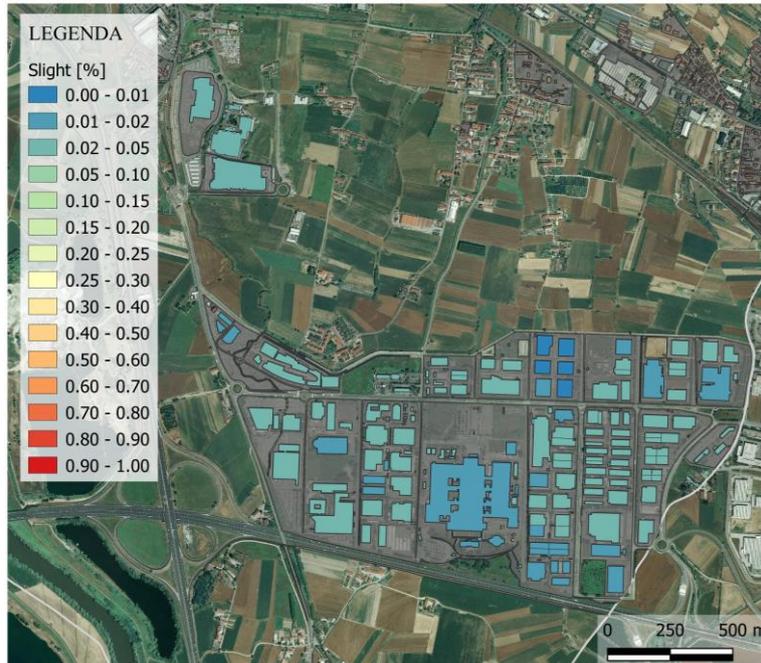


Figura 7-24 Distribuzione del danno nella zona industriale di Sanda Vadò, considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro a Val Pellice- Slight

La Figura 7-24 evidenzia che la probabilità di raggiungere un livello di danno lieve è inferiore al 10% per tutti gli edifici e quindi, come atteso, in nessun caso esiste la possibilità di raggiungere un danno moderato. I parametri che influiscono maggiormente sono, oltre all'irregolarità e alla dimensione dell'edificio, legati anche alla vicinanza reciproca: se si osserva infatti la zona a destra della mamma, molti tra gli edifici che presentano una probabilità di danneggiarsi (nonostante si presentino come regolari) sono adiacenti.

Come evidenziato in precedenza nel paragrafo 7.7 in questo caso non sono state elaborate le mappe rappresentanti il rischio sismico in termini di perdite economiche, in quanto non solo la zona risulta essere di recente costruzione, ma la valuta in uso alla data dell'evento sismico era differente da quella utilizzata attualmente.

Val Pellice, Terremoto simulato di magnitudo 4.5

Nel caso di terremoto di tale intensità si rileva una probabilità di avere nessun danno pari al 100% per tutti gli edifici industriali e possibilità nulla di danno lieve (il risultato sarebbe lo stesso in Figura 7-23 ed in Figura 7-24). L'unico dato rilevante, risulta essere quello legato alle perdite: esse risultano uguali a zero nel caso di componente strutturale e non strutturale, mentre si hanno delle perdite diverse da zero nel caso di interruzione dell'attività e dei contenuti. Si tratta comunque di casi isolati e di cifre che non superano i 1000 €, dunque l'analisi risulta dare risultati poco rilevanti.

Val Pellice, Terremoto simulato di magnitudo 5.0

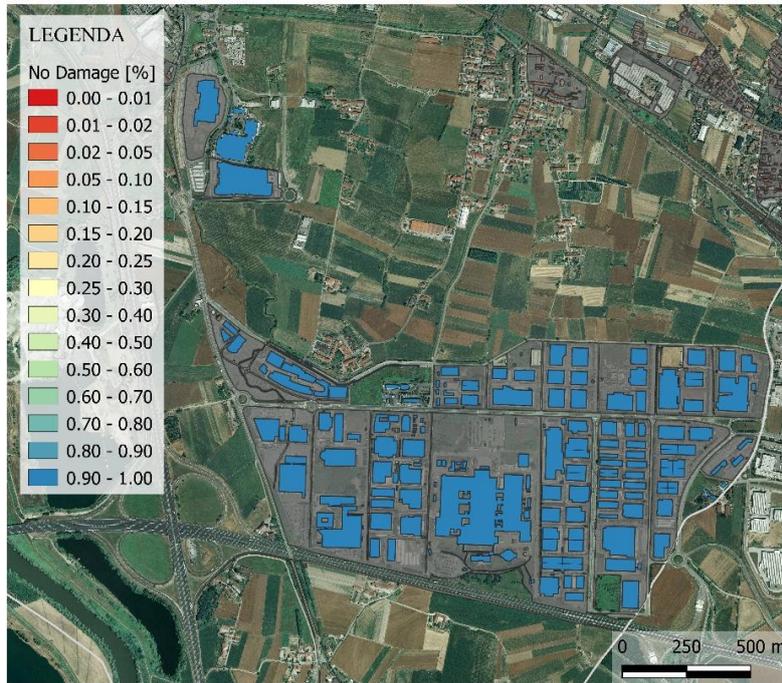


Figura 7-25 Distribuzione del danno nella zona industriale di Sanda Vadò, considerando il terremoto simulato di magnitudo 5.0 con epicentro a Val Pellice- No Damage

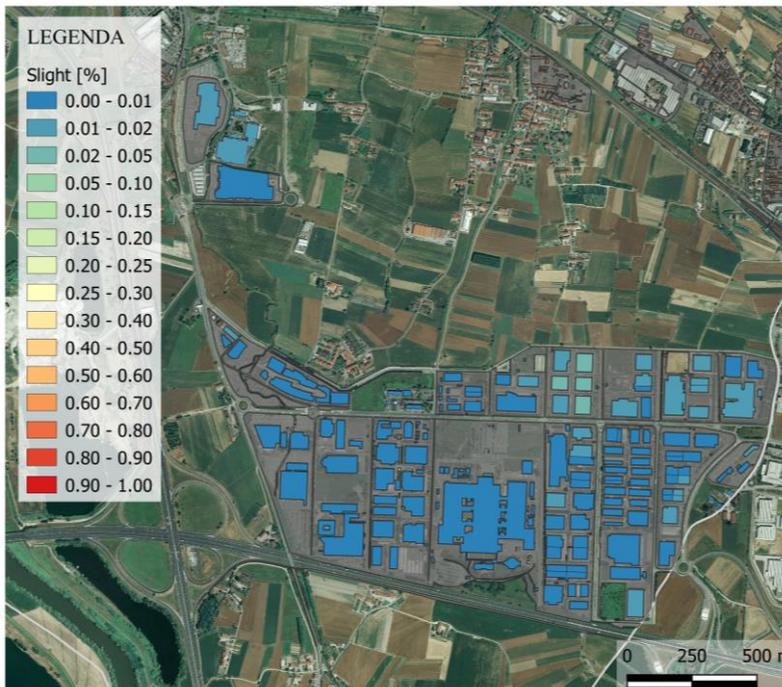


Figura 7-26 Distribuzione del danno nella zona industriale di Sanda Vadò, considerando il terremoto di magnitudo 5.0 con epicentro a Val Pellice- Slight

Dal momento che la probabilità di raggiungere un livello di danno lieve si presentava diversa da 0 in qualche caso, si è proceduto col verificare che la probabilità di raggiungere un livello di danno moderato fosse nulla: in questo caso, considerando quindi un terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 5.0, la probabilità di danno moderato è nulla e quindi risulta nulla anche la possibilità di collasso per tutti gli edifici industriali della zona di Sanda Vadò. Mentre il danno risulta avere le stesse caratteristiche per tutte le tipologie di perdite, il rischio sismico in termine di perdite economiche per ogni singolo scenario risulta avere delle differenze per i casi in esame. Nelle figure seguenti sono rappresentate le mappe di rischio sismico in termini di perdita economica relative alla componente strutturale (Figura 7-27), non strutturale (Figura 7-28), all'interruzione dell'attività (7-29) e ai contenuti (7-30). Per quanto concerne le perdite umane, nel caso di terremoti di tali intensità esse sono nulle, per tale motivo non sono state mostrate su mappa.

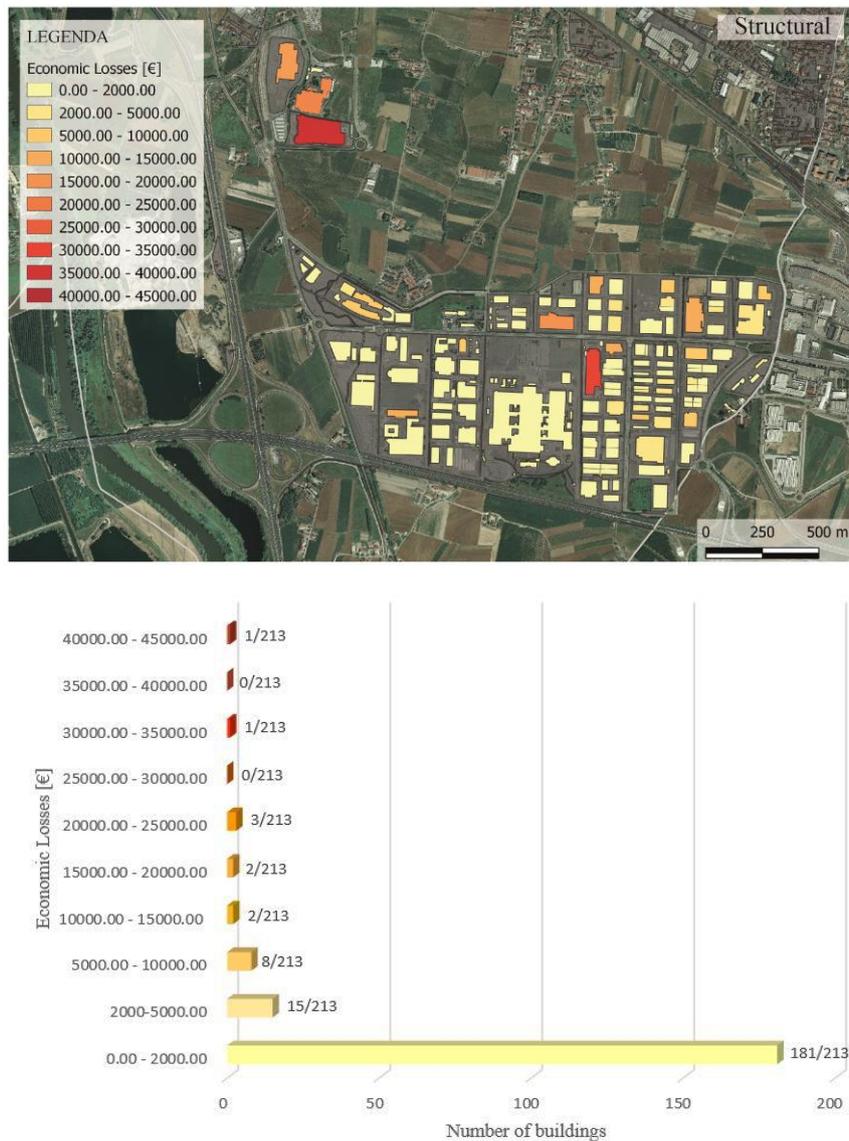


Figura 7-27 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 5.0 – structural losses

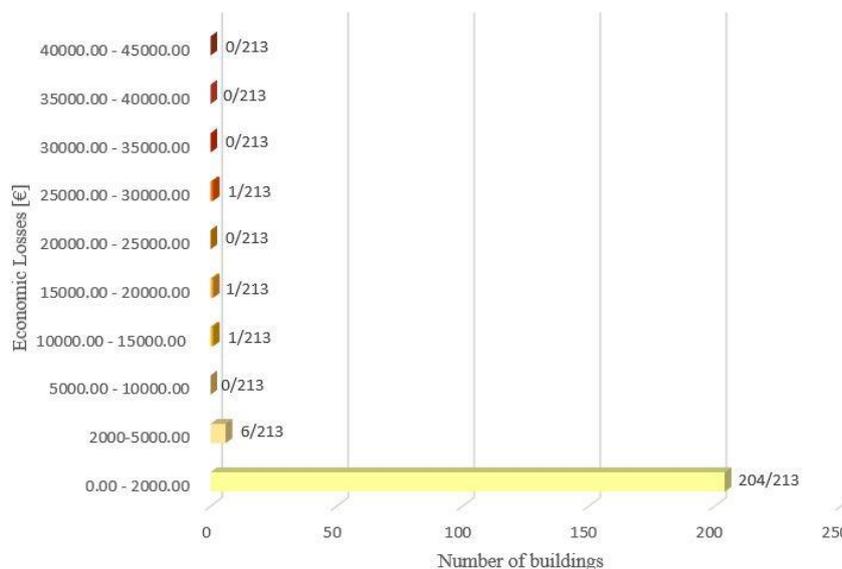
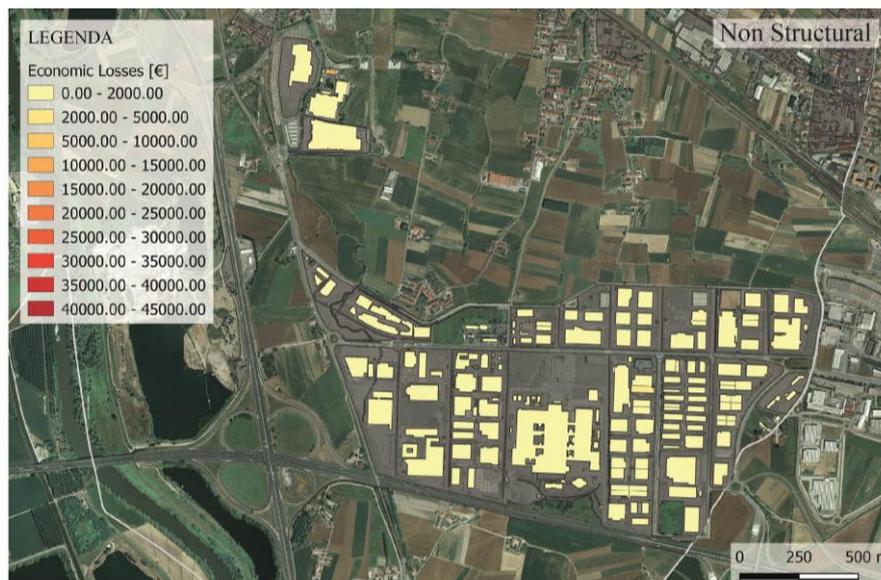


Figura 7-28 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 5.0 – non structural losses

Un primo confronto tra la Figura 7-27 e la Figura 7-28 mostra che le perdite strutturali associate ad un terremoto di magnitudo 5.0 simulato a Val Pellice, risultano maggiori di quelle non strutturali, per le quali si ha invece che la maggior parte degli edifici ha, considerando sempre la valutazione in termini di perdite economiche, un rischio sismico ridotto. Dal momento che il danno massimo raggiunto da alcune strutture è quello classificato nel paragrafo 5.1 come D1, la Figura 7-27 e 7-28 sembrerebbero non congrue con quanto atteso (ci si aspetterebbe un danno minore nelle strutture rispetto a quello nella parte non strutturale); ma questo non si verifica invece per terremoti di intensità maggiore. Probabilmente il risultato è infatti legato al fatto che, il terremoto ha un effetto estremamente limitato, che intacca in maniera lieve solo le strutture.

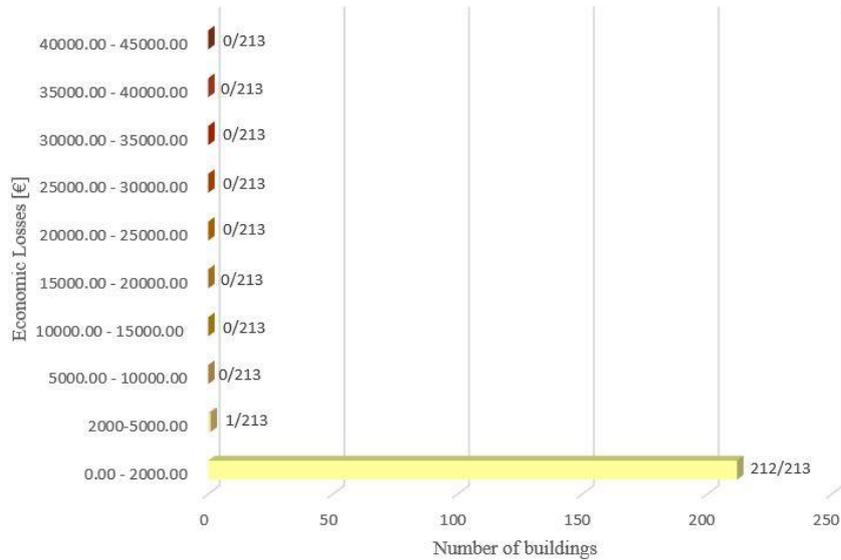
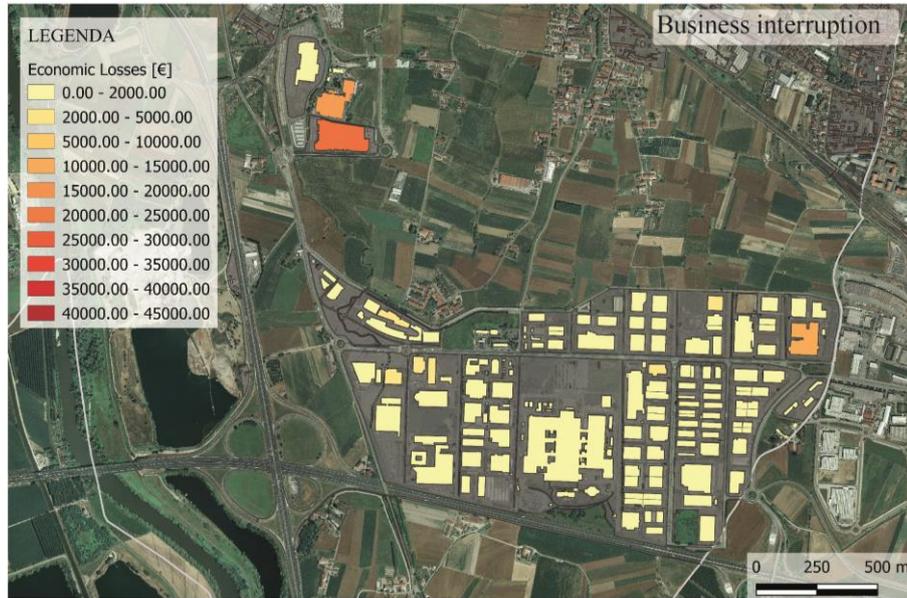


Figura 7-29 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 5.0 – business interruption

La tendenza di cui si è discusso in occasione del confronto tra le Figura 7-27 e la Figura 7-26 trova riscontro nella Figura 7-29: il terremoto simulato ha un'intensità tale da provocare danni lievi sugli edifici, ed essi si presentano di una natura per cui le attività non subiscono delle interruzioni importanti con il conseguente valore di rischio che appare dunque ridotto.

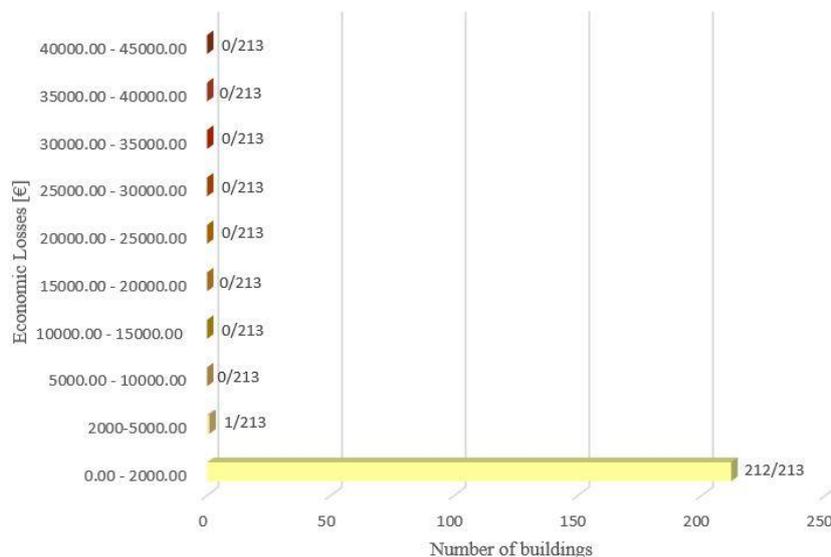
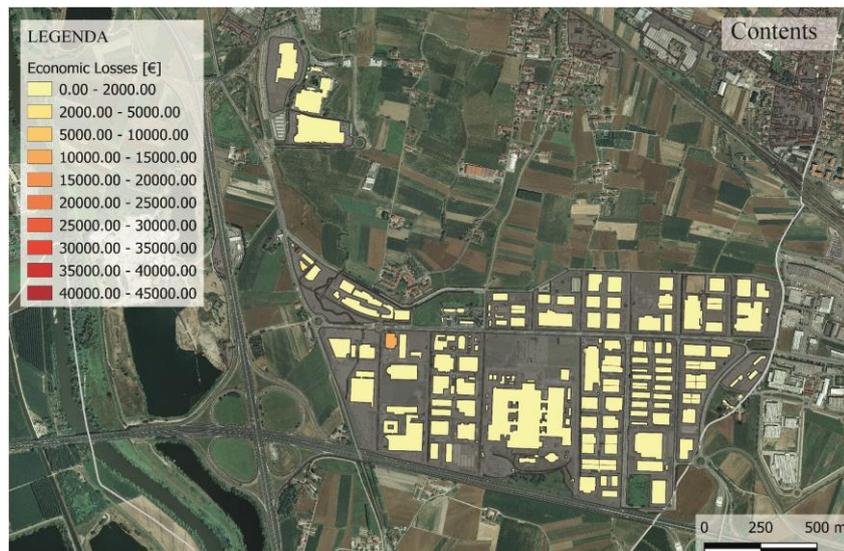


Figura 7-30 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 5.0 – contents

Le ipotesi effettuate per il caso dei danni relativi alla componente strutturale, non strutturale e dell'interruzione del business trovano riscontro ulteriore nei dati riportati nella Figura 7-29: come atteso dalle mappe che esprimono a probabilità di raggiungere un determinato livello di danno, un terremoto di magnitudo 5.0 ha un effetto lieve sulla costruzione, la quale si presenta colpita in maniera lieve o nulla con conseguenti danni praticamente nulli per tutte le componenti considerate. L'effetto sullo stock (macchinari, attrezzatura, prodotti), in termine di perdite economiche, risulta molto blando, con un numero di edifici con perdite inferiori a 2.000 € praticamente uguale al totale degli edifici.

Val Pellice, Terremoto simulato di magnitudo 5.5

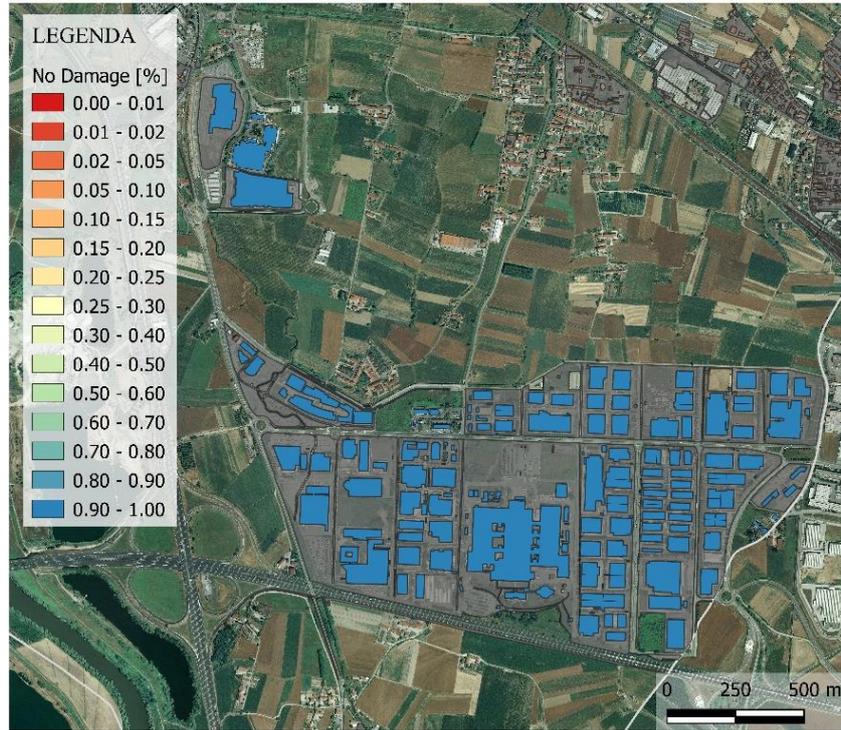


Figura 7-31 Distribuzione del danno nella zona industriale di Santa Vadò, considerando il terremoto simulato di magnitudo 5.5 con epicentro a Val Pellice- No Damage

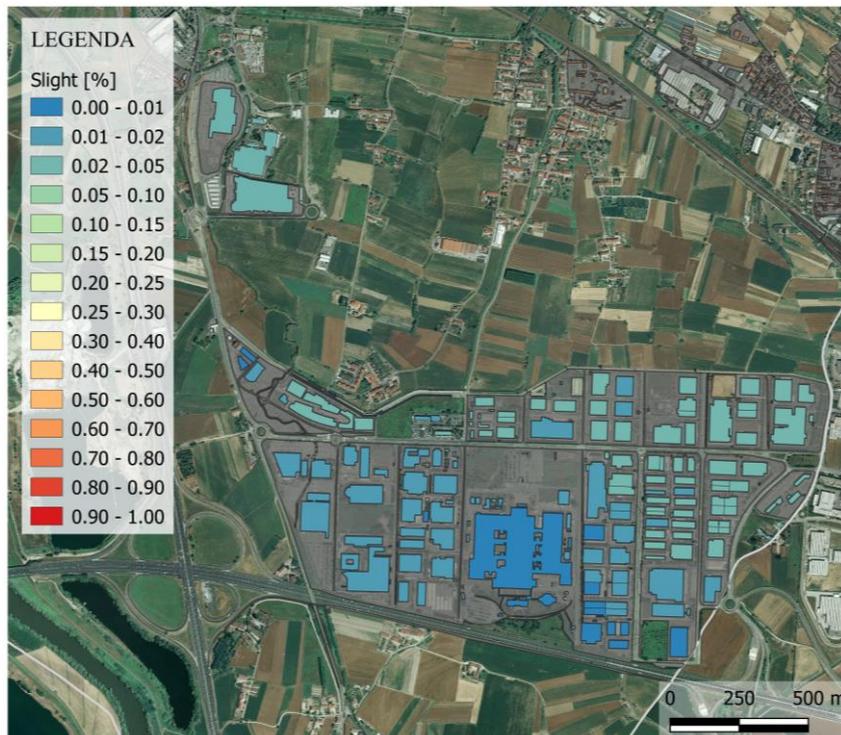


Figura 7-32 Distribuzione del danno nella zona industriale di Santa Vadò, considerando il terremoto simulato di magnitudo 5.5 con epicentro a Val Pellice- Slight

All'aumentare dell'intensità del sisma, gli edifici che hanno una probabilità di raggiungere un livello di danno lieve aumenta come mostrato in Figura 7-32, ma non si osserva, per nessun edificio, una probabilità diversa da 0 di raggiungere un danno moderato. In questo caso, il danno risulta maggiormente distribuito su tutti gli edifici.

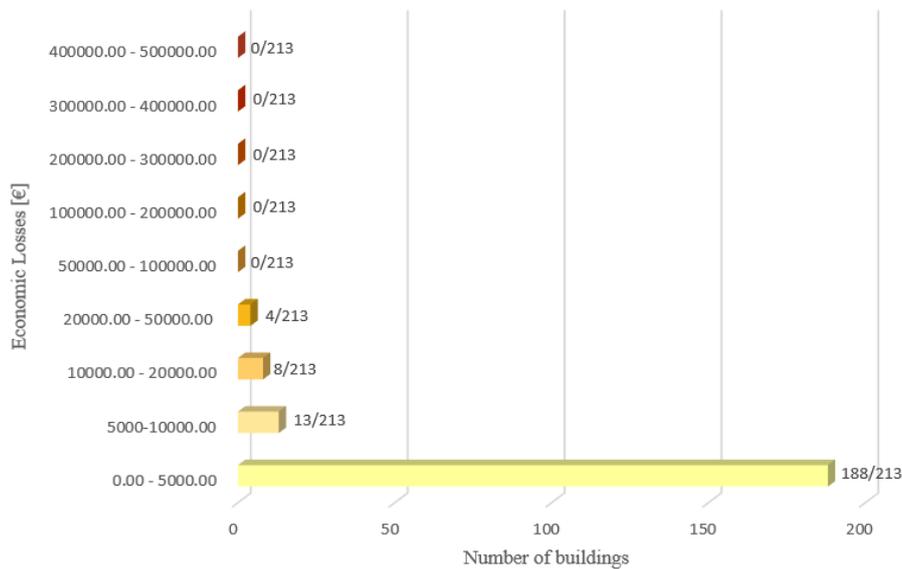
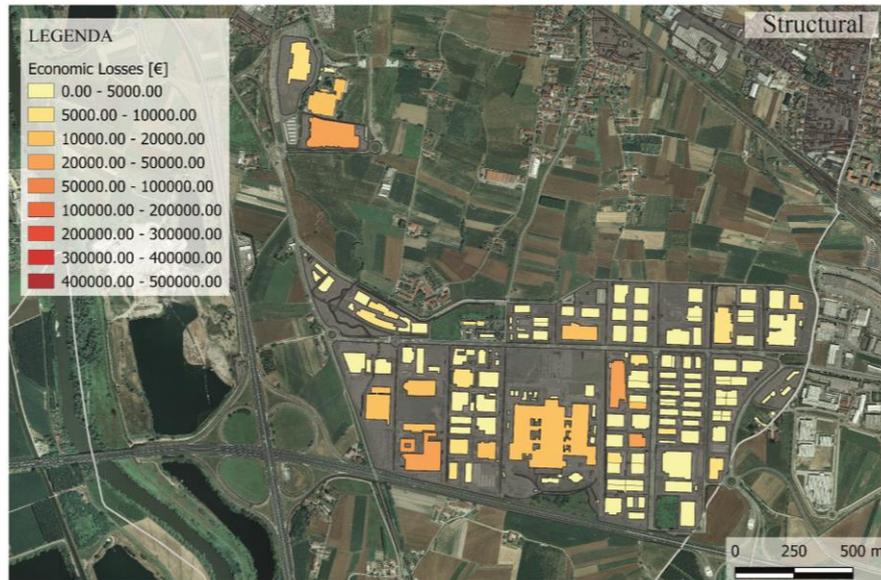


Figura 7-33 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 5.5 – Structural

Nel caso di terremoto di magnitudo 5.5 si osserva che le perdite relative alle strutture sono tutte inferiori a 50.000 € (per ogni struttura) e, risultano sensibilmente influenzate dalla dimensione dell'edificio e da un altro parametro: la tipologia costruttiva, infatti, con riferimento alla Figura

7-2, gli edifici che sono maggiormente a rischio sono quelli con tipologia costruttiva (quando non incide ovviamente l'area di impronta dell'edificio).

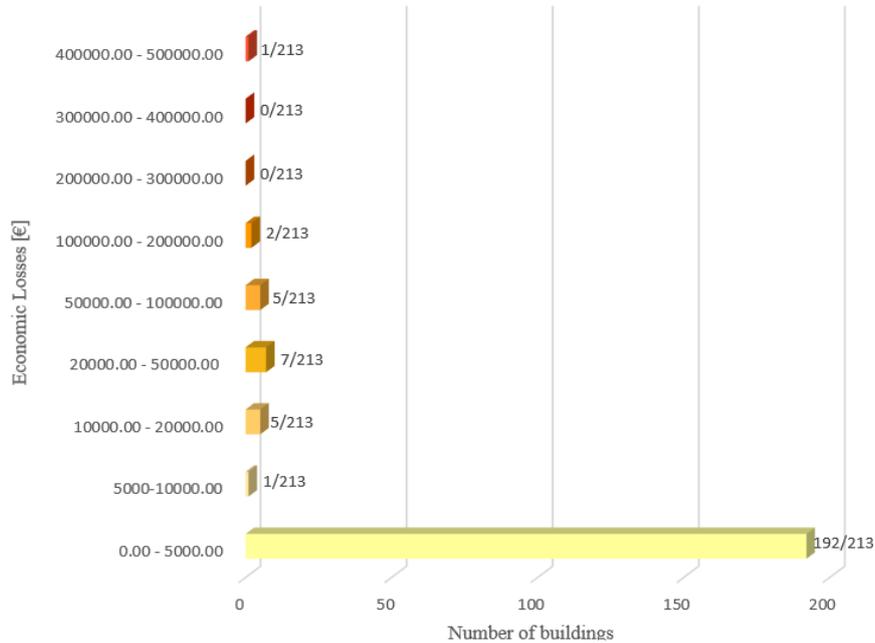
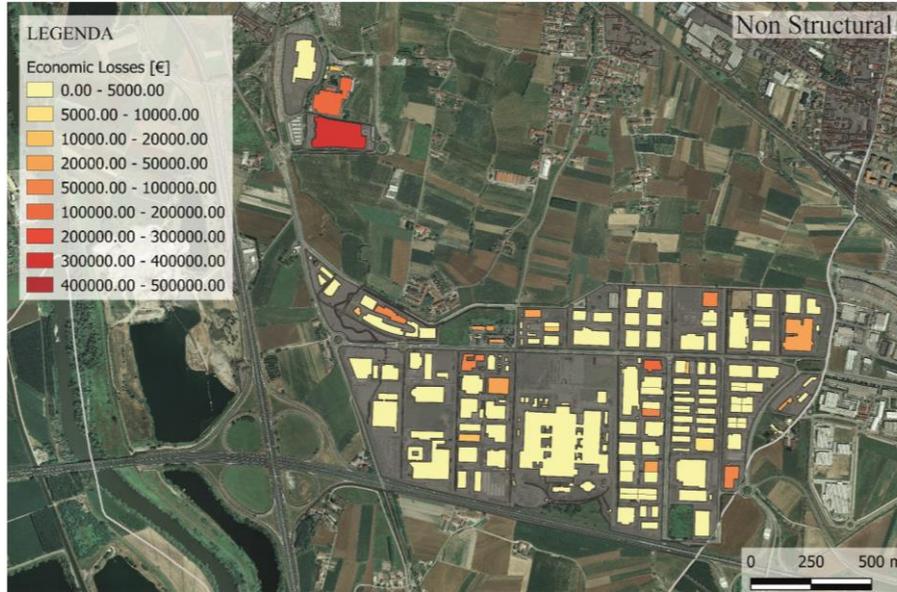


Figura 7-34 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 5.5 – Non Structural

Quanto evidenziato nel caso di terremoto di magnitudo 5.0 risulta non essere valido, infatti, aumentando l'intensità del terremoto si verifica quanto atteso: il rischio sismico, valutato in termini di perdite economiche, è maggiore (in totale) per la parte non strutturale. In particolare modo, sempre con riferimento alla Figura 7-2, gli edifici maggiormente a rischio in questo caso

sono quelli che presentano chiusure verticali in muratura (di entrambe le tipologie): quanto detto risulta particolarmente veritiero se si osservano i tre edifici in alto a sinistra: gli edifici che presentano perdite economiche maggiori, sono infatti della categoria RCM2, mentre l'edificio più in alto, per il quale si osservano perdite notevolmente inferiori, è relativo alla categoria RCP2. Un'altra caratteristica da valutare, nel caso in esame è il numero di piani, infatti, le uniche strutture a presentare delle perdite consistenti hanno un numero di piani diversi da 1 (rispettivamente pari a 2 e 4).

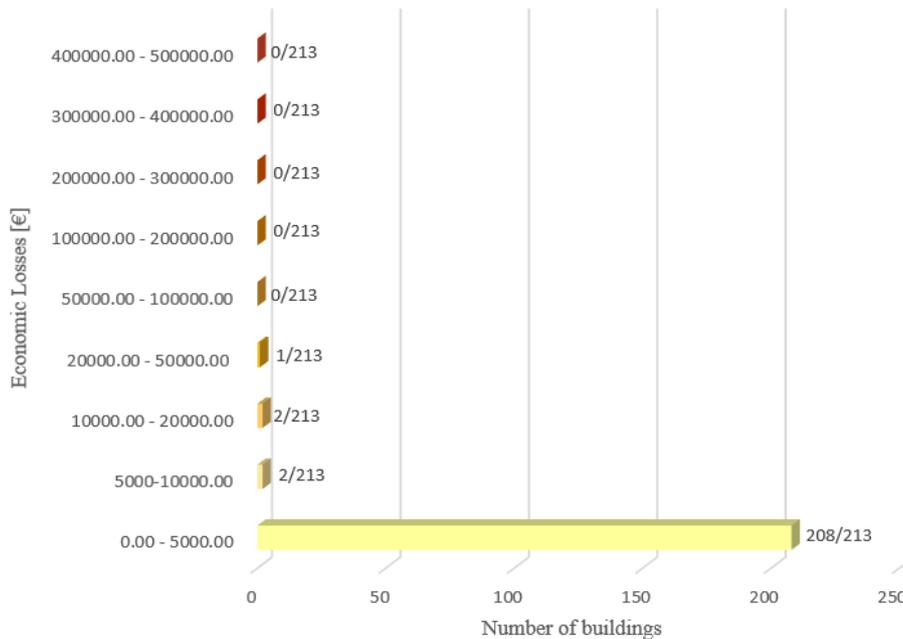
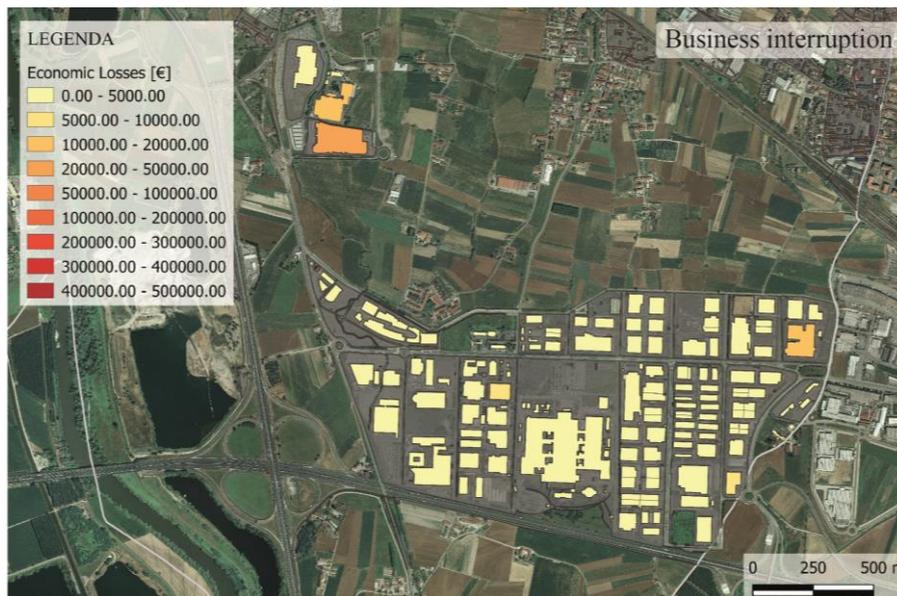


Figura 7-35 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 5.5 – business interruption

La Figura 7-35 conferma che i danni provocati da tale terremoto simulato, non sono nulli, ma sono comunque molto limitati e, quando essi superano i 5.000 €, questo avviene negli edifici che risultano particolarmente a rischio per quanto concerne le perdite non strutturali e, inoltre, si tratta sempre di edifici che presentano un numero di piani superiore ad 1. Un rapido confronto con la Figura 7-3 chiarisce quanto appena sottolineato.

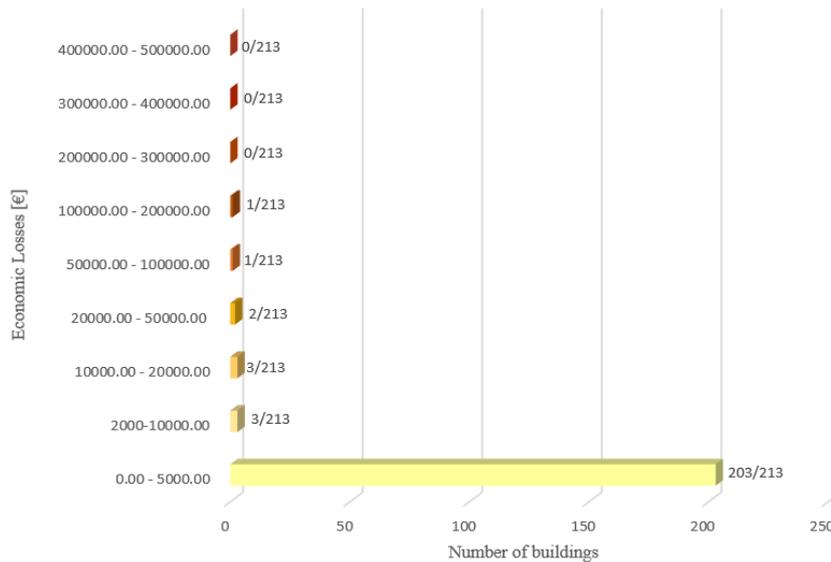
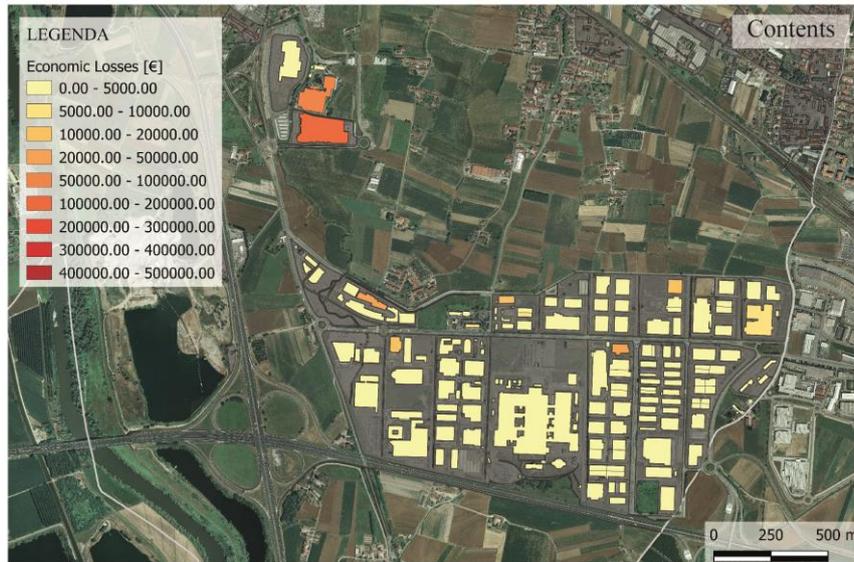


Figura 7-36 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 5.5 –contents

Per quanto riguarda i “contents” (i cui risultati sono rappresentati in Figura 7-36) il discorso ricalca quanto già detto nel caso dell’interruzione dell’attività per la Figura 7-35, anche se, in questo caso, quando le perdite del singolo edificio sono maggiori di 5.000 €, risultano maggiori

rispetto a quanto osservato per il precedente caso. Questo significa che, rispetto ad un tale terremoto simulato, lo stock risulta essere più vulnerabile.

Nel caso di terremoto di Terremoto vicino a Val Pellice, si registra anche la possibilità che i lavoratori rimangano feriti o vittime del terremoto, secondo quanto evidenziato dalla Figura 7-37.

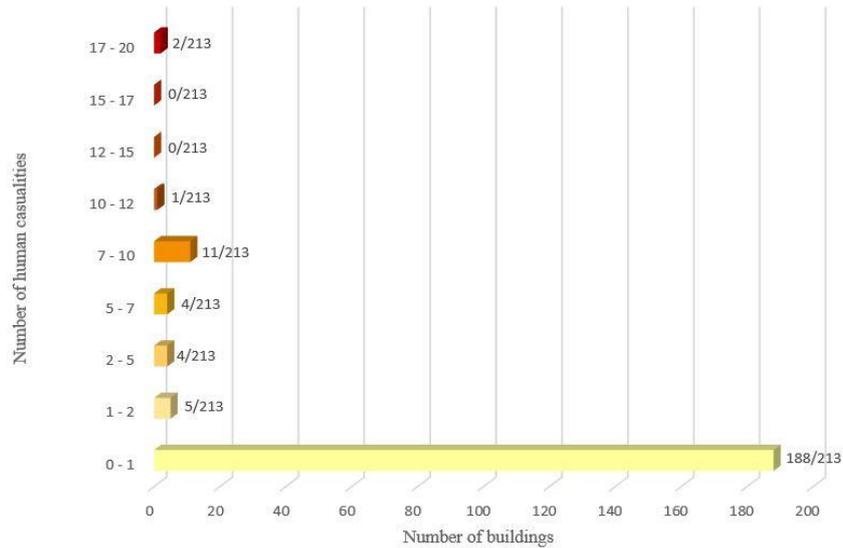
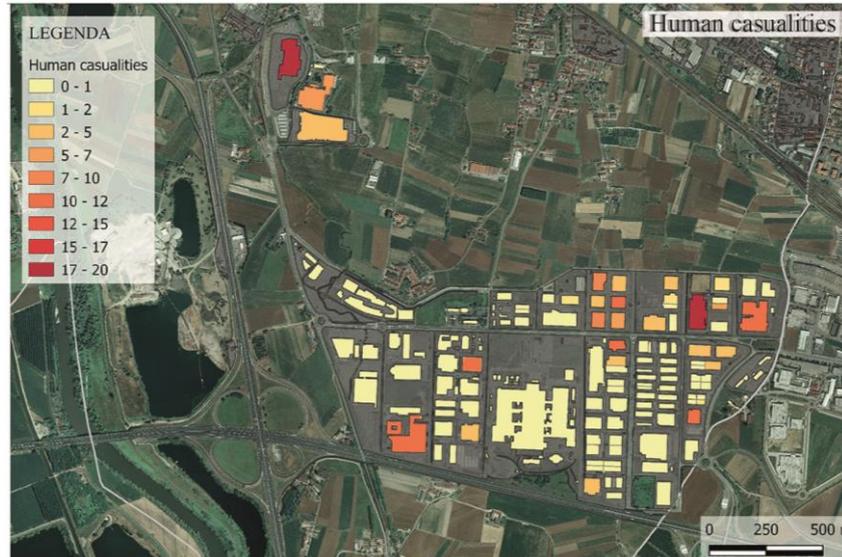


Figura 7-37 Feriti relativi alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 5.5 – Human casualties

In questa fase si è indagata la possibilità che i lavori rimanessero feriti gravemente a causa dell'evento sismico ed in questo caso, sempre grazie al confronto con la Figura 7-2, si evidenzia che, gli edifici maggiormente colpiti nel caso esaminato, sono quelli nei quali si svolgono attività produttive, per lo più di natura meccanica, le quali sono state classificate come industrie pesanti. La lettura in questo caso risulta maggiormente complessa, in quanto è frutto di diversi fattori di cui l'influenza non appare particolarmente evidente. Con riferimento alla Figura 7-32, gli edifici più a rischio in questi termini, sono quelli che hanno la probabilità maggiore di avere un danno lieve.

Val Pellice, Terremoto simulato di magnitudo 6.0

Il terremoto oggetto di analisi è stato applicato per verificare che gli effetti riscontrati negli altri casi e la bassa probabilità di riscontrare un danno diverso da quello lieve fossero rispettati. In particolar modo, questo, essendo il terremoto simulato di intensità maggiore e con epicentro più vicino alla zona di interesse.

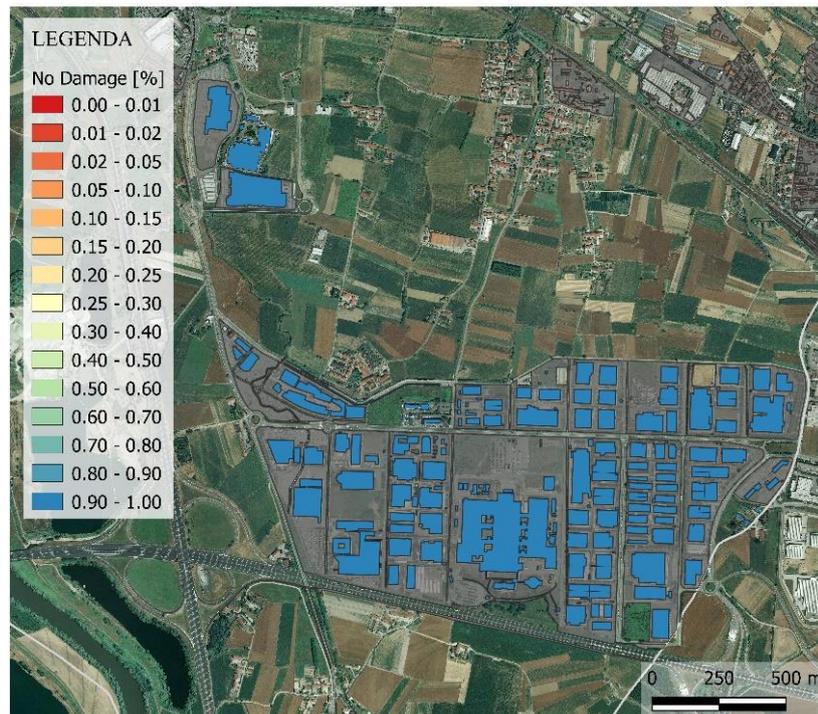


Figura 7-38 Distribuzione del danno nella zona industriale di Sanda Vadò, considerando il terremoto simulato di magnitudo 6.0 con epicentro a Val Pellice- No Damage

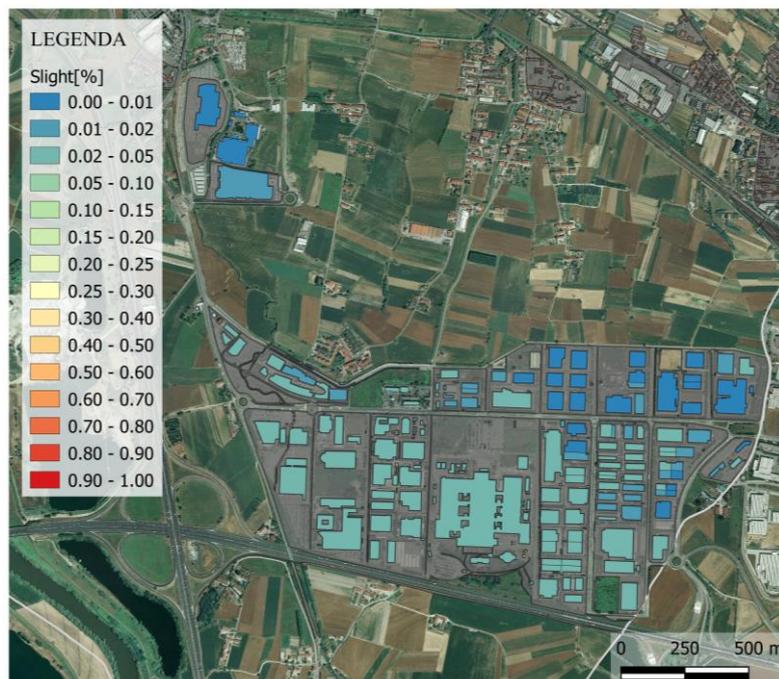


Figura 7-39 Distribuzione del danno nella zona industriale di Sanda Vadò, considerando il terremoto simulato di magnitudo 6.0 con epicentro a Val Pellice-Slight

Nonostante si sia simulato un terremoto di intensità elevata e si sia comunque osservato che un numero sempre maggiore di edifici ha una probabilità, seppur bassa, di raggiungere un livello di danno lieve (Figura 7-39), la probabilità di non subire danno risulta in ogni caso compresa tra il 90% ed il 100%. Pur avendo indagato la possibilità che gli edifici subissero un danno maggiore, nessun edificio ha la probabilità di raggiungere un livello di danno moderato.

Al fine di verificare che questa condizione sia valida anche per fenomeni di intensità maggiore, si è simulato un terremoto a Val Pellice di magnitudo 6.5: anche in questo caso non si raggiunge un livello di danno moderato. Il caso in esame risulta ovviamente quello che maggiormente influenza le perdite economiche ed umane, come evidenziato anche nel caso di analisi di edifici in cemento armato a scala territoriale. I risultati relativi alle strutture (Figura 7-40), alle componenti non strutturali (Figura 7-41), all'interruzione dell'attività (7-42) e ai contenuti (7-43) sono riportate di seguito. Le perdite di tipo umano (7-44) vengono invece rappresentate separatamente e commentate separatamente.

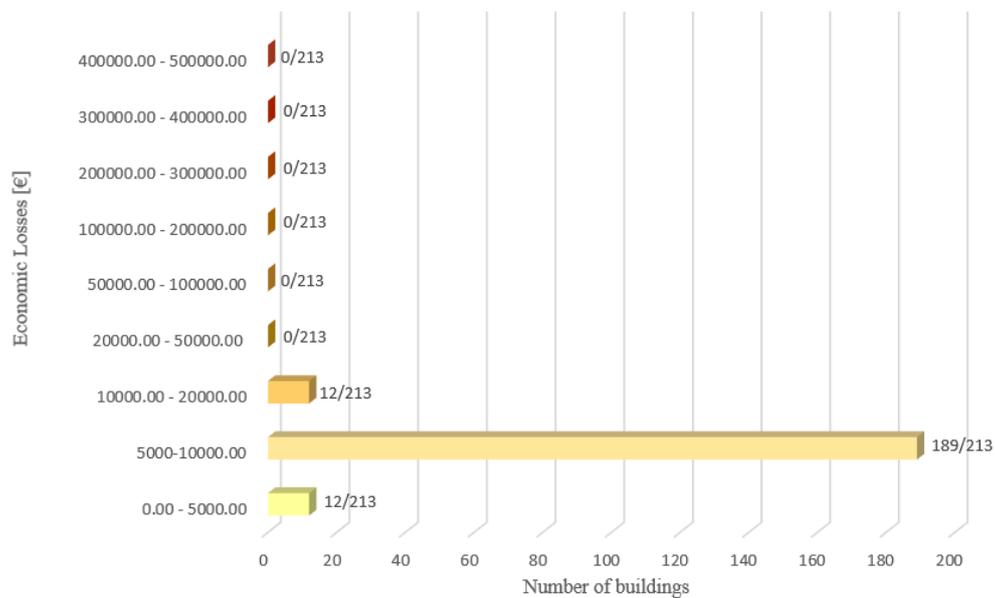
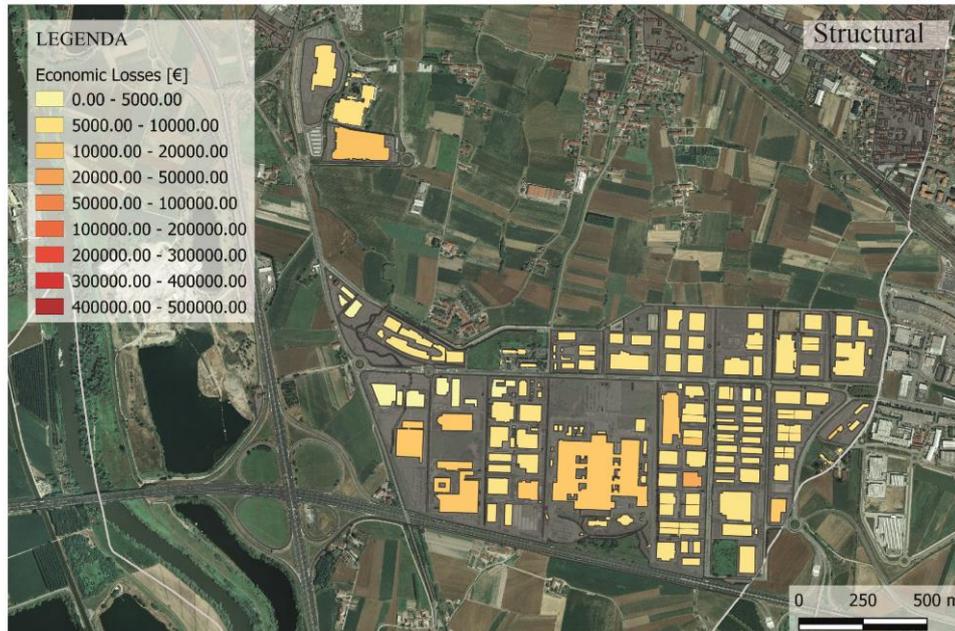


Figura 7-40 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 6.0

Nel caso del seguente scenario si osserva che le perdite relative alle strutture (Figura 7-40) sono limitate a valori inferiori ai 20.000 € (totali) nonostante l'intensità del terremoto considerata; tendenza che risulta invece essere invertita per tutti gli altri casi, i cui risultati sono riportati nelle Figure seguenti (non strutturali nella Figura 7-41, per l'interruzione dell'attività nella Figura 7-42 e per i contenuti nella Figura 7-43); in particolar modo, l'aumento dell'intensità del sisma ha conseguenze sempre più gravi e accentuate sulle perdite umane, come evidenziato dalla Figura 7-44.

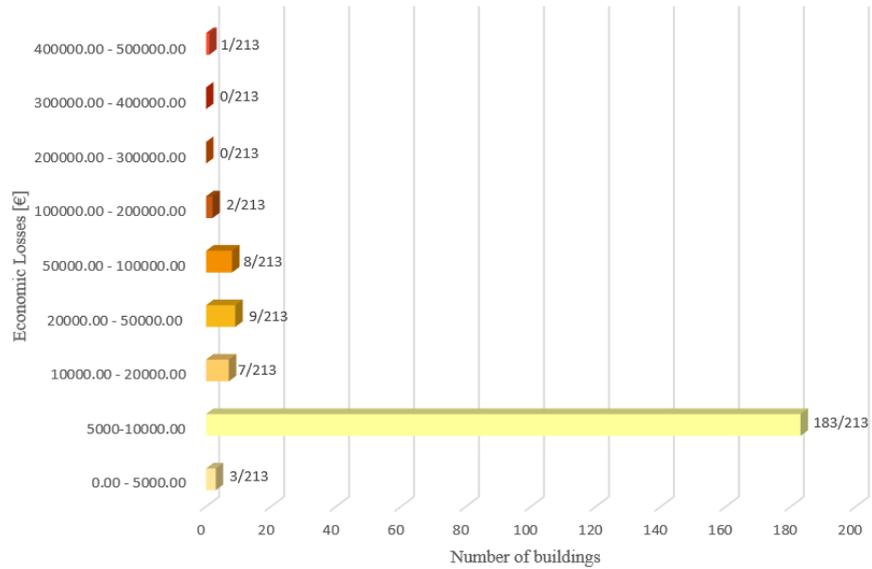
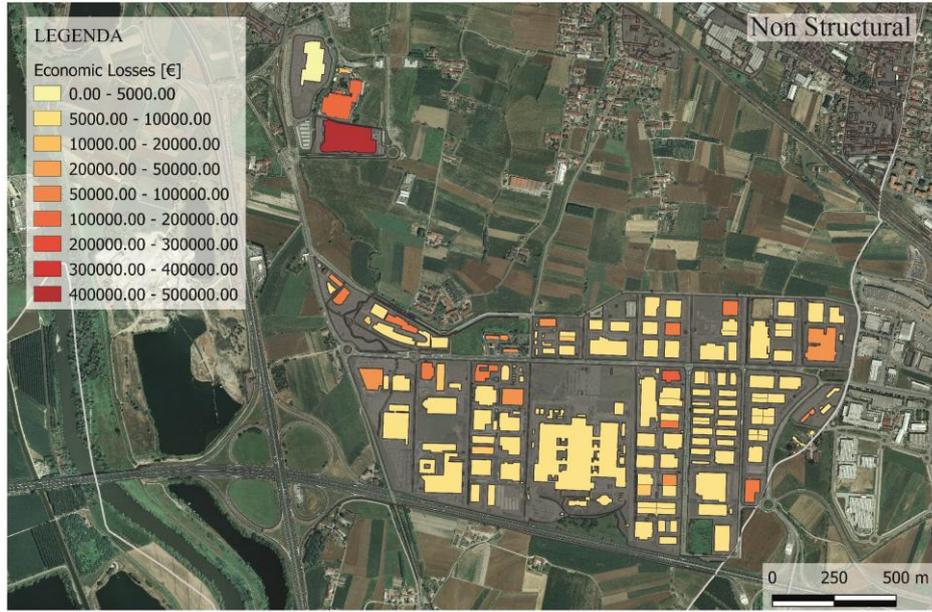


Figura 7-41 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 6.0-Non structural

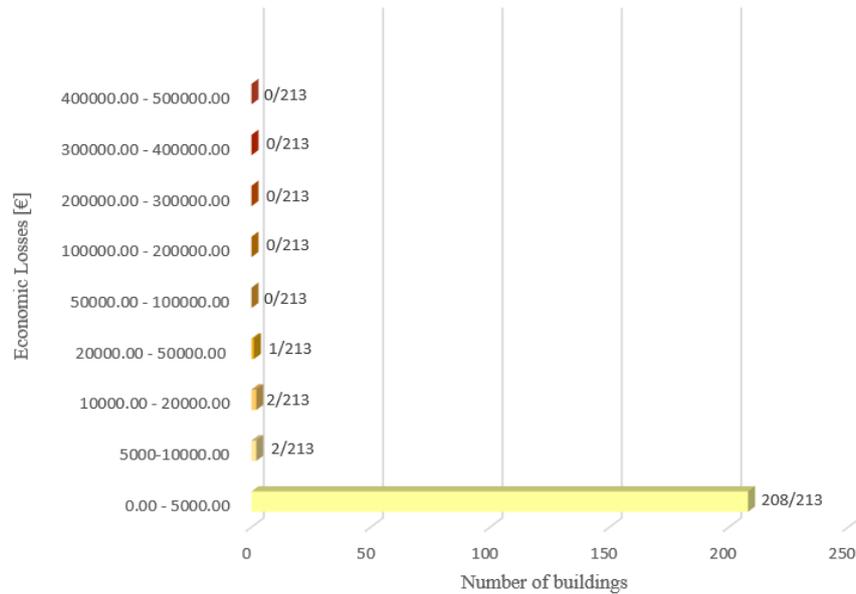
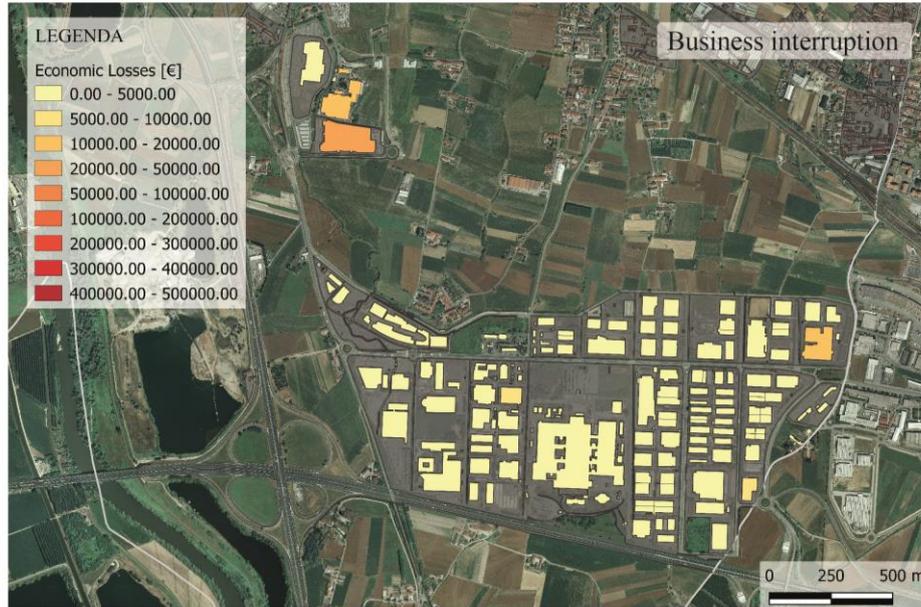


Figura 7-42 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 6.0-Business interruption

Come evidenziato durante tutto lo studio dedicato agli effetti di un determinato evento, probabilmente, a causa della bassa sismicità della zona, le perdite derivanti dall'interruzione dell'attività risultano avere un peso irrilevante rispetto alle perdite strutturali e non strutturali e, in particolar modo, alle perdite non strutturali. In generale la chiusura di un'attività avviene quando vengono registrati danni importanti nell'edificio e in praticamente tutti i casi si osserva invece una probabilità di subire danni lievi molto bassa.

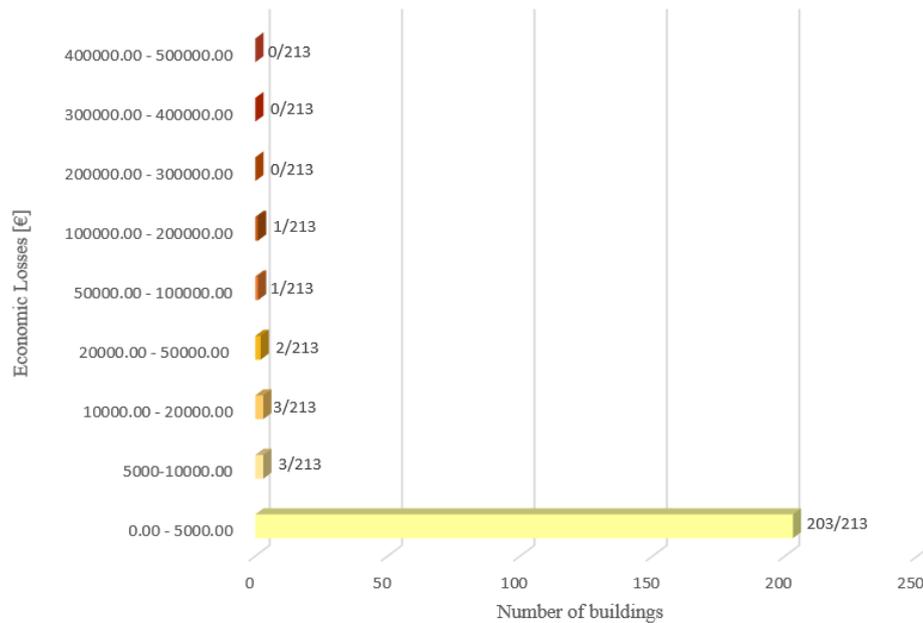
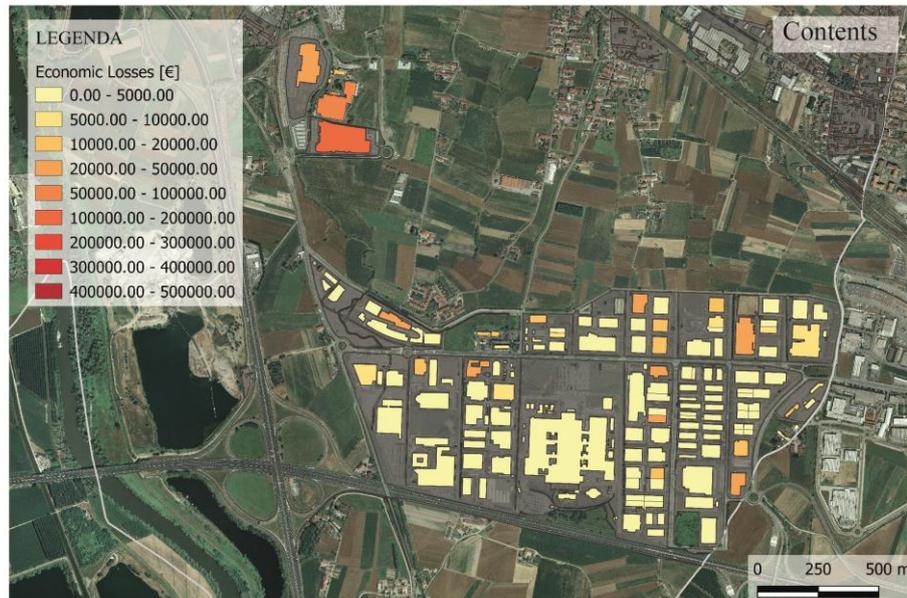


Figura 7-43 Perdite economiche relative alla zona industriale di Santa Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 6.0-Contents

La Figura 7-43 mette in luce come anticipato che all'aumentare dell'intensità del terremoto aumentano anche le perdite economiche relative ai contenuti. In generale però, in questo particolare caso, non si hanno dei risultati sufficientemente marcati rispetto a quanto atteso, sia per l'interruzione dell'attività che per i contenuti. Si auspica, dato che alla base c'è stato un continuo controllo della costruzione dei modelli, che tale risultato possa invece risultare tanto più marcato al crescere della sismicità della zona.

Le analisi effettuate nel paragrafo 6.7.2 in realtà, sono congrue con quanto ottenuto e, caratterizzando in maniera più opportuna gli edifici, si ha maggiormente certezza che i danni siano limitati.

Questa poca mobilità dei risultati, influenza anche quanto riportato nella Figura 7-43, dove si osserva una maggior distribuzione dei dati nei ranges definiti, ma la differenza rispetto al caso precedente è minima.

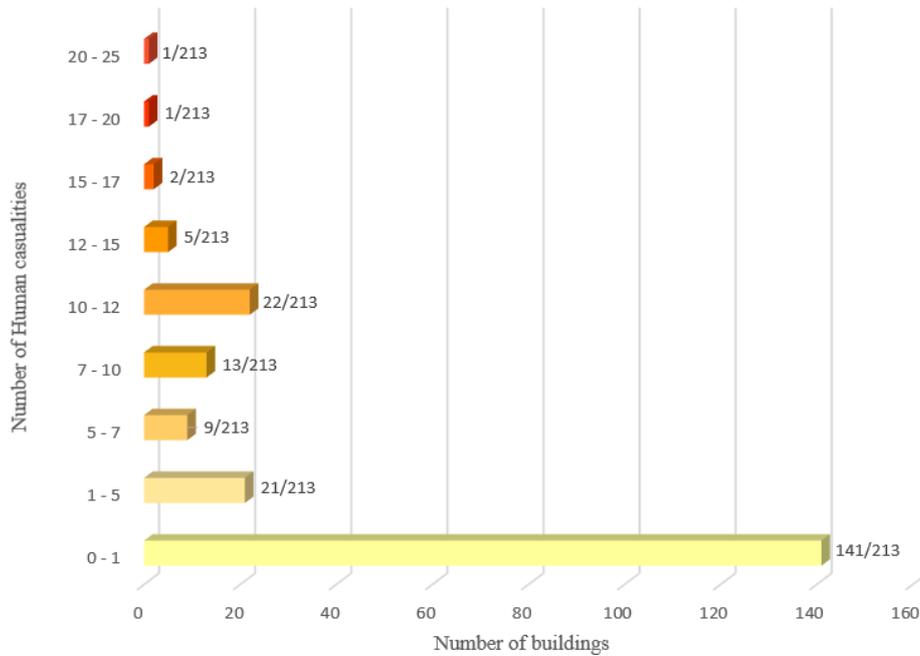
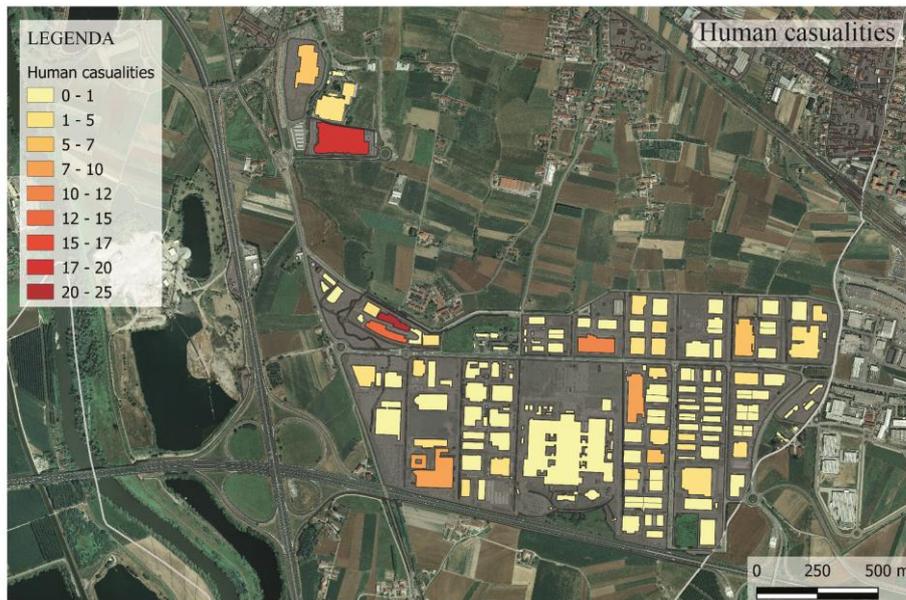


Figura 7-44 Perdite economiche relative alla zona industriale di Sanda Vadò considerando il terremoto con epicentro a Val Pellice e magnitudo 6.0-Human casualties

7.8 Considerazioni sui risultati relativi agli edifici industriali

In questa tipologia di analisi gli edifici industriali sono stati trattati con maggior precisione, affrontando una tipologia di analisi che è ancora in stato di sviluppo in Italia; infatti molti sono stati gli studi effettuati per la stima delle perdite associate alle componenti strutturali, ma ancora pochi si sono dedicati a definire le perdite legate alle altre componenti (Rodrigues, Crowley e Silvia 2018). Il poter definire in maniera puntuale le caratteristiche di un edificio, come richiesto da tale analisi, richiede delle solide basi provenienti dalla letteratura oggi presente sull'argomento (in questo caso le fonti pregresse ed i dati raccolti hanno un ruolo fondamentale, dato che la maggior parte delle informazioni sono reperite da documentazione esistente e non da siti nazionali dedicati) ed un dispendio di tempo elevato nella definizione delle caratteristiche dell'edificio dovuto al fatto che spesso i database sono da costruire, visto che i dati non sempre sono disponibili.

Questa trattazione ha però particolare importanza quando si tratta di definire le strategie di riduzione del rischio al fine di ridurre le perdite legate all'attività; in modo particolare, può essere un punto di inizio per le attività per preservare i propri guadagni e la propria attività, decidendo di rivolgersi a società assicurative al fine di prevenire eventuali perdite economiche ed umane. Il separare in maniera opportuna la tipologia di perdite e renderle il più dettagliate possibile, permette di valutare meglio quali tipologie di edifici necessitino di interventi di retrofit o di maggior attenzione durante eventi catastrofici. Concentrarsi solo sulle perdite legate alla componente strutturale porterebbe ad errori importanti di valutazione, in quanto questa, rappresenta solo una percentuale delle perdite.

Come evidenziato dalle analisi effettuate, l'intensità di un terremoto, espressa in termini di PGA o di intensità macrosismica, causa l'aumento di perdite di natura diversa da quella strutturale, la quale diversamente da quanto osservato nel caso di edifici storici vincolati o dotati di pregio rilevante, aveva invece carattere predominante.

L'analisi effettuata ha permesso di mettere in luce un'altra componente fondamentale quando si parla di perdite: le perdite umane. Nonostante il forte grado di approssimazione introdotto dall'utilizzo di curve di vulnerabilità realizzate ad hoc per la nazione cinese (le quali sono risultate le uniche disponibili dopo un'attenta ricerca), la stima di tale perdita rappresenta uno strumento fondamentale per l'interpretazione di un evento. Il collegamento più rapido che avviene nella nostra mente quando si parla di eventi catastrofici è quello tra l'evento stesso ed il numero di vittime, che spesso, rappresenta un parametro con il quale emotivamente si stima la gravosità di un evento. La morte dovuta ad eventi catastrofici ha infatti un impatto fortissimo nella comunità e per gli enti governativi responsabili della mitigazione del rischio e delle politiche necessarie alla loro gestione. Conoscere un luogo particolarmente vulnerabile in questo senso, come per esempio una grande impresa produttrice in cui il numero di lavoratori è elevato o un centro commerciale in cui il traffico umano è rilevante è uno strumento fondamentale nella gestione delle emergenze.

Un'altra considerazione che vale la pena di mettere nero su bianco è legata anche alla tipologia di analisi: nel caso della zona suddetta, si è più volte sottolineato come la bassa sismicità della zona potesse influenzare i risultati, che spesso risultano di difficile lettura o si discostano da

quanto atteso a causa dei danni limitati nelle strutture. Se si confrontano le due tipologie di analisi effettuate, sulla base delle considerazioni appena esplicitate, l'analisi stocastica fornisce, a mio avviso un risultato più interessante e di più semplice lettura. I risultati attesi trovano conferma negli output dell'analisi e le informazioni ricavate da tale tipologia di analisi forniscono uno strumento per la pianificazione a lungo termine.

8 Conclusioni e sviluppi futuri

Le analisi effettuate in questo lavoro di tesi forniscono degli strumenti per ragionare sul rischio sismico, sulla sua mitigazione e gestione. I temi affrontati permettono di avere una panoramica sui dati ad oggi presenti per affrontare tali analisi e su quanto lavoro debbano ancora fare i comuni, le province, le regioni e lo Stato Italiano per agevolare la diffusione di dati rilevanti e fondamentali per lo svolgimento di tali indagini.

Al fine di chiarire in modo esaustivo le tematiche affrontate e gli sviluppi che potrebbe avere ogni tematica affrontata, è doveroso ripercorrere il lavoro fin qui svolto.

In primo luogo si è voluto procedere con una validazione del metodo, al fine di poter garantire, al netto di un certo grado di incertezza, che tali analisi portino a dei risultati concreti: in questo caso lo strumento di confronto utilizzato sono state le schede AeDES, strumento fondamentale nella raccolta dei dati post-terremoto, i cui dati sono stati confrontati con gli output “Scenario Damage” calcolati tramite l’ausilio del software OpenQuake. Il confronto tra i due metodi utilizzati per la stima del danno permettono di capire quale contributo possa dare l’utilizzo di software per la predizione dei danni e del rischio associato ad un determinato evento: infatti, nel caso in esame, si è evidenziato che la definizione degli edifici soggetti a collasso ha un alto grado di affidabilità, così come la stima di quegli edifici che non subiscono danni (o li subiscono, ma di lieve entità) e che quindi risultano agibili, ha un alto grado di affidabilità. La definizione di quegli edifici caratterizzati da danni riparabili in breve tempo e da non agibilità temporanea ha invece condotto a risultati diversi da quelli attesi. Come evidenziato nel paragrafo 4.5, sarebbe interessante indagare il perché di tale fatto tramite la ricerca di dati aggiuntivi circa le costruzioni caratterizzate da tale comportamento e la successiva ridefinizione, effettuata stavolta con una precisione maggiore, di una tassonomia differente. La simulazione di terremoti, soprattutto nelle zone caratterizzate da alta sismicità (e non solo), può avere un ruolo fondamentale nella mitigazione del rischio di disastro. In sintesi, questa prima parte del presente lavoro potrebbe essere implementata:

- ricercando informazioni precise sugli edifici di cui le schede AeDES riportano la dicitura di “parzialmente agibile” e capire come riportare tali dati in una tassonomia maggiormente precisa per verificare se, tramite caratterizzazione più precisa si raggiunge una correlazione migliore;
- effettuare tali analisi in un’altra città di cui sono noti (o sono stati pubblicati articoli) i risultati delle schede AeDES, al fine di validare il metodo;
- confrontare i dati ottenuti con il software OpenQuake con lo strumento di previsione utilizzato dalla Protezione Civile, per verificare punti in comune e differenze.

Appurato che il supporto offerto dal software per la valutazione del rischio sismico, risulta valido per il suo utilizzo a scala territoriale, si è introdotto il caso studio di Moncalieri, analizzando preventivamente tutti gli edifici della Municipalità. Al fine di valutare l’influenza dei parametri sulle stime effettuate, si sono preventivamente utilizzati i dati forniti dal Geoportale della regione

Piemonte e si è condotta un'analisi ultra speditiva, considerando solo ed esclusivamente la componente strutturale dell'edificio. Gli edifici sono stati poi caratterizzati in modo più specifico al fine di valutare l'influenza di alcuni parametri sulle analisi effettuate: si sono aggiunte le caratteristiche relative alla forma dell'edificio, alla posizione (adiacenza o non adiacenza ad un altro edificio) e al sistema resistente, le quali hanno fornito un contributo importante. I risultati di questa prima fase hanno messo in luce che questa tipologia di analisi risulta molto utile e particolarmente esaustiva nel caso di edifici in muratura, in quanto una maggior caratterizzazione permette una lettura migliore delle strutture che contribuiscono maggiormente alle perdite totali e ottenere, a lungo termine, informazioni più precise circa le perdite economiche totali. Per le costruzioni in cemento armato, la differenza tra le perdite attese per i due casi si è presentata invece minore (nel caso delle chiusure in muratura si notava una maggior differenziazione, ma probabilmente dovuta alla presenza, nel campione, di edifici a destinazione d'uso residenziale), motivo per cui, si è deciso di indagare quali potessero essere, nel caso di edifici industriali, i parametri che influenzassero, in modo più consistente, tale analisi.

Soffermarsi su una determinata zona e confrontarsi con un campione decisamente ridotto rispetto al precedente, ha permesso di reperire maggiori informazioni rispetto al caso di studio a scala territoriale di tutti gli edifici del comune e di capire che, nel caso degli edifici industriali, come ipotizzato, la perdita economica relativa alle strutture è solo una percentuale sul totale e non può determinare un punto di arrivo per la valutazione del rischio sismico di tali edifici. Le considerazioni principali sono state svolte alla fine del capitolo dedicato a tale tema, ma si ritiene importante rimarcare che nel caso di tali edifici risulta fondamentale definire informazioni quali: il settore, l'attività, il numero di occupanti, la tipologia degli elementi non strutturali, la regolarità, la posizione dell'edificio ed il numero di piani. Di queste informazioni solo una è stata reperita dai dati forniti dal Geoportale Piemonte (il numero di piani), mentre gli altri sono frutto di ricerche effettuate su internet, negli articoli di settore, nella biblioteca della facoltà (con le approssimazioni e il grado di incertezza che seguono) e di successive definizioni avvenute in corso d'opera (talvolta tramite strumenti di Geoprocessing o di codici).

Il confronto tra quanto ottenuto (in termini di perdite economiche) nel caso delle due analisi stocastiche fornisce inoltre la possibilità di rimarcare che, seppur l'analisi a scala territoriale abbia fornito un valido strumento di valutazione del rischio sismico e l'ordine di grandezza delle perdite risulti il medesimo, l'aver considerato le altre componenti ha incrementato in maniera importante le perdite.

In conclusione le analisi effettuate possono ritenersi utili per gli enti comunali, regionali e statali, oltre che, nel caso di edifici industriali per i proprietari o i gestori delle attività, per stimare la pericolosità e il rischio sismico al fine di creare un sistema più resiliente e capace di rispondere in modo sempre migliore alle catastrofi, che, con sempre maggior frequenza, caratterizzano la nostra quotidianità.

Infine, al netto delle analisi effettuate, è d'obbligo rimarcare la necessità di sviluppare alcuni punti:

- sulla base di quanto evidenziato nel capitolo dedicato allo studio su gli edifici industriali, sarebbe interessante utilizzare le curve per questa tipologia di edifici specifica nell'analisi a scala territoriale e confrontare nuovamente i risultati;
- interesse fondamentale, riveste lo studio delle perdite umane, che, sulla base delle analisi effettuate nel caso degli edifici industriali, potrebbe essere effettuato per tutta la municipalità di Moncalieri, distinguendo il caso di occupazione diurna, in transito e notturna;
- verificare l'effettiva influenza del parametro "altezze", in quanto si rimarca che la poca influenza evidenziata in questa analisi potrebbe essere dovuta al fatto che la zona presenti una sismicità bassa;
- stimare, non solo per gli edifici industriali, ma soprattutto per gli edifici monumentali, le perdite relative alla componente non strutturale ed ai contenuti;
- sviluppare l'analisi su edifici industriali situati in zone ad alta sismicità, in quanto, come sottolineato, l'analisi stocastica ha dei risultati congrui con quanto atteso, mentre l'analisi sul singolo scenario ha condotto verso risultati non sempre soddisfacenti;
- utilizzare il calcolatore "retrofit cost-benefit analysis" per verificare e valutare eventuali interventi da eseguire per ridimensionare le perdite derivanti da un'analisi a scala territoriale.

9 Bibliografia

- Aitsi-Selmi, A., S. Egawa, H. Sasaki, C. Wannous, e V. Murray. «The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction: Renewing the Global Commitment to People's Resilience, Health, and Well-being.» *International Journal of Disaster Risk Science*, 2015: 164–176.
- Arena, A. «I GIS per l'implementazione e la gestione dei dati nei Piani Urbanistici Comunali.» *ASITA*, 2017.
- Babic, A., e M. Dolsek. «Seismic fragility functions of industrial precast building classes.» *Engineering Structures (Volume 118)*, 2016: 357-370.
- Beilic, D., C. Casotto, R. Nascimbene, D. Cicola, e D. Rodrigues. «Seismic fragility curves of single storey RC precast structures by comparing different Italian codes.» *Earthquakes and Structures*, 2017.
- Belleri, A., E. Brunesi, R. Nascimbene, M. Pagani, e P. Riva. «Seismic Performance of Precast Industrial Facilities Following Major Earthquakes in the Italian Territory.» *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2014.
- Beltman, S., e C. F. Mansfield. «Resilience in Education: An Introduction.» *Resilience in Education*, 2018: 3-9.
- Bianchi, P., e S. Labory. «The role of governance and government in the resilience of regions: the case of the 2012 earthquake in the Emilia-Romagna region in Italy.» *HAL (archives-ouvertes)*, 2014.
- Borri, A., R. Sisti, A. Prota, M. Di Ludovico, e S. Costantini. «Analysis of the damage of ordinary buildings in the historic centre of Norcia struck by the 2016 Italian earthquake.» *Atti del XVII Convegno ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia : Pistoia, 17-21 settembre 2017*, 2017.
- Borzi, B., H. Crowley, e R. Pinho. «Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (SP-BELA) Method for Masonry Buildings.» *International Journal of Architectural Heritage*, 2008b: 353-376.
- Borzi, B., H. Crowley, e R. Pinho. «Simplified pushover-based vulnerability analysis for large-scale assessment of RC buildings.» *Engineering Structures*, 2008a: 804-820.
- Borzi, B., M. Faravelli, Polli, e D.A. «Central Italy sequence: simulated damage scenario for the main 2016 shocks.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018: 5559–5581.
- Braga, F., et al. «Speedup of post earthquake community recovery: the case of precast industrial buildings after the Emilia 2012 earthquake.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2014: 2405-2418.
- Bramerini, F., A. Lucantoni, e F. Sabetta. «Una scala di emergenza sismica per il sistema di allertamento della protezione civile.» *Conference: 12° Congresso Nazionale l'Ingegneria Sismica in Italia*, 2007.
- Brand, D., e H. Nicholson. «Public space and recovery: learning from post-earthquake Christchurch.» *Journal of Urban Design*, 2016: 159-176.

- Brunetta, G., R. Ceravolo, C. A. Barbieri, e S. Salata. «Territorial Resilience: Toward a Proactive Meaning for Spatial Planning.» *Sustainability*, 2019.
- Buratti, N., F. Minghini, E. Ottonello, M. Savoia, e N. Tullini. «Empirical seismic fragility for the precast RC industrial buildings damaged by the 2012 Emilia (Italy) earthquakes.» *EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS*, 2017.
- Burton, H. V., S.B. Miles, e H. Kang. «Integrating Performance-Based Engineering and Urban Simulation to Model Post-Earthquake Housing Recovery.» *Earthquake Spectra*, 2006.
- Calderon, A., e V. Silva. «Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018: 1257–1284.
- Campagnoni, M., et al. «Danni al patrimonio monumentale ed effetti di amplificazione sismica per cause topografiche.» 2007.
- Campedel, M., V. Cozzani, A. Garcia-Agreda, e E. Salzano. «Extending the Quantitative Assessment of Industrial Risks to Earthquake Effects.» *Risk Analysis Volume 28*, 2008.
- Casotto, C., V. Silva, H. Crowley, R. Nascimbene, e R. Pinho. «Seismic Fragility of Italian RC Precast Industrial Structures.» *Engineering Structures*, 2015: 122-136.
- Cattari, S., S. Lagomarsino, e D. Ottonelli. «Fragility curves for masonry buildings from empirical and analytical model.» *Second European conference on earthquake engineering and seismology*, 2014.
- Cavallaro, F.: «Un progetto di luce per il centro storico di Moncalieri.» *Politecnico di Torino, Corso di laurea specialistica in Architettura*, 2012, 2012.
- Cescatti, E.: Salzano, P., F. Ceroni, e F. Prota, A. da Porto. «Damages to masonry churches after 2016–2017 Central Italy seismic sequence and definition of fragility curves.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019: 1–33.
- Chaulagain, H., H. Rodrigues, V. Silva, E. Spacone, e H. Varum. «Earthquake loss estimation for the Kathmandu Valley.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2015: 59–88.
- Chen, Y., Q. Chen, e L. Chen. «Vulnerability Analysis in Earthquake Loss Estimate.» *Natural Hazards*, 2001: 349–364.
- Climate&Weather. «<https://www.aon.com/global-weather-catastrophe-natural-disasters-costs-climate-change-annual-report/index.html>.» *AON. Annual Report 2018*. (consultato il giorno Settembre 13, 2019).
- Comune di Perugia. «Relazione geologica e studio di microzonazione sismica.» 2017.
- Contreras, D., T. Blaschke, e M.E. Hodgson. «Lack of spatial resilience in a recovery process: Case L'Aquila, Italy.» *Technological Forecasting & Social Change*, 2017: 76-88.
- Cordella, R. «Le chiese crollate, "così Norcia perde suo passato".» *Ansa*. 2016 Ottobre 2016. http://www.ansa.it/sito/notizie/politica/2016/10/30/le-chiese-crollate-cosi-norcia-perde-suo-passato_bb90b957-fe05-4623-b549-6cb12c70428f.html (consultato il giorno Settembre 17, 2019).
- Cordera, C. «Aree industriali in crisi : censimento e valutazioni nel Comune di Moncalieri.» 2015.

- Cousins, J., Spence, R., e E. So. «Estimated casualties in New Zealand earthquakes.» 2013.
- Crowley, H., D. Rodrigues, e V. Silva. «Towards a uniform earthquake risk model for Europe.» *16th european conference on earthquake thessaloniki engineering*, 2018.
- Cruz, A.M., e N. Okada. «Consideration of natural hazards in the design and risk management of industrial facilities.» *Natural Hazards*, 2008: 213-227.
- Cutler, H., M. Shields, D. Tavani, e S. Zahran. «Integrating engineering outputs from natural disaster models into a dynamic spatial computable general equilibrium model of Centerville.» *Sustainable Resilient Infrastructure*, 2016: 169-187.
- D.P.R. «Misure per il ripristino con miglioramento sismico e la ricostruzione di immobili ad uso abitativo gravemente danneggiati o distrutti dagli eventi sismici verificatisi a far data dal 24 agosto 2016.» 7 aprile 2017.
- Dari, A. *Ingenio*. 20 Aprile 2018. <https://www.ingenio-web.it/19740-ricostruzione-post-sisma-basilica-di-san-benedetto-di-norcia-nella-commissione-nessun-ingegnere> (consultato il giorno Settembre 3, 2019).
- De Masi, F., e D. Porrini. «Vulnerability to Natural Disasters and Insurance: Insights from the Italian Case.» *International Journal of Financial Studies*, 2018.
- De Matteis, G., G. Brando, V. Corlito, E. Criber, e M. Guadagnuolo. «Seismic vulnerability assessment of churches at regional scale after the 2009 L'Aquila earthquake.» *International Journal of Masonry Research and Innovation*, 2019: 174 - 196.
- De Natale, G., et al. «Seismic risk mitigation at Ischia island (Naples, Southern Italy): An innovative approach to mitigate catastrophic scenarios.» *Engineering Geology*, 2019.
- Del Gaudio, C., M. Di Domenico, e P. Ricci. «Preliminary prediction of damage to residential buildings following the 21st August 2017 Ischia earthquake.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018: 4607–4637.
- Dogan, M., e A. Gunaydin. «Pounding of adjacent RC buildings during Seismic Loads.» 2009.
- Dolce, M., e D. Di Bucci. «National Civil Protection Organization and technical activities in the 2012 Emilia earthquakes.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2014: 2231–2253.
- Dolce, M., e D. Di Bucci. «Probabilità e Protezione Civile.» *Ambiente Rischio Comunicazione*, 2012.
- Drummon, W. J., e S. P. French. «The Future of GIS in Planning: Converging Technologies and Diverging Interests.» *Journal of the American Planning Association*, 2008: 161-174.
- Earle, S., et al. «Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER): A System for Rapidly Determining the Impact of Earthquakes Worldwide.» *U.S. Department of the Interior*, 2009.
- Erdik, M., e E. Uckan. «Earthquake Damage and Fragilities of Industrial Facilities.» In *Seismic Design of Industrial Facilities*, di S. Klinkel, C. Butenweg, G. Lin e B. Holtschoppen, 3-13. Istanbul, 2013.
- Faravelli, M., B. Borzi, H. Wenzel, M. Herrmann, e J. Zechar. «Guidelines for implementing real-time risk assessment during earthquake emergencies.» 2013.

- FEMA. *Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake model, HAZUS*. Washington DC: Federal Emergency Management Agency and National Institute of Buildings Sciences, 2003.
- Figueiredo, R., e M. Martina. «Using open building data in the development of exposure data sets for catastrophe risk modelling.» *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016: 417-429.
- Filiatrault, A., e T. Sullivan. «Performance-based seismic design of nonstructural building components: The next frontier of earthquake engineering.» *Earthquake engineering and engineering vibration*, 2014: 17-46.
- Fischinger, M., B. Zoubek, e T. Isakovic. «Seismic Response of Precast Industrial Buildings.» *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology*, 2014: 131-177.
- Fleischhauer, M. «The role of spatial planning in strengthening urban resilience.» *Resilience of Cities to Terrorist and other Threats*, 2008: 273-298.
- Francini, M, Artese, S., S. Gaudio, A. Palermo, e M.F. Viapiana. «To support urban emergency planning: A GIS instrument for the choice of optimal routes based on seismic hazards.» *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018: 121-134.
- Galadini, F., et al. *Marsica 1915 - L'Aquila 2009: Un secolo di ricostruzioni*. Roma: Gangemi, 2016.
- GEM. *The OpenQuake-engine User Manual*. 2019.
- Giardini, D., J. Wossner, e L. Danciu. «Mapping Europe's Seismic Hazard.» *EOS*, 2014: 261–262.
- Gigliozzi, M. T. «Norcia in the historical seismic sources (14th-19th centuries): a reassessment of the reconstruction and post-seismic management.» *Il capitale culturale: Studies on the Value of Cultural Heritage*, 2019.
- Giovinazzi, S. «The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis.» 2005.
- Godschalk, D. R. «Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities.» *Natural Hazards review*, 2003: 136-143.
- Graser, A., e V. Olaya. *Processing: A Python Framework for Seamless Integration of Geoprocessing Tools in QGIS*. Vienna, Austria: Wolfgang Kainz, 2015.
- Grüntal, G. «European Macroseismic Scale 1998 EMS-98.» *Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 1998.
- Hiete, M., e M. Merz. «An Indicator Framework to Assess the Vulnerability of Industrial Sectors against Indirect Disaster Losses.» *Proceedings of the 6th International ISCRAM Conference*, 2009.
- Hofer, L., Zanini M. A., Falaneschinie F., e e Pellegrino C. «Profitability Analysis for Assessing the Optimal Seismic Retrofit Strategy of Industrial Productive Processes with Business- Interruption Consequences.» *Journal of Structural Engineering*, 2017.
- Istat. «9° Censimento dell'industria e dei servizi e Censimento delle istituzioni non profit: Principali risultati e processo di rilevazione.» 2014.

- Isteita, M., e K. Porter. «Safe distance between adjacent buildings to avoid pounding in earthquakes.» *16th World Conference on Earthquake*, 2017.
- Jain, V. K., e J. Guin. «Modeling Business Interruption Losses for Insurance Portfolios.» *11th Americas Conference on Wind Engineering-San Juan, Porto Rico*, 2009.
- Jayaram, N., e J. Baker. «Correlation model for spatially distributed ground-motion intensities.» *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2009: 1687-1708.
- Jeng-Hsiang, L., e W Cheng-Chiang. «Probability analysis of seismic pounding of adjacent buildings.» *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2001: 1557.
- Kull, D., H. Gitay, S. Bettencourt, R. Reid, A. Simpson, e K. McCall. «Building Resilience: World Bank Group Experience in Climate and Disaster Resilient Development.» *Climate Change Adaptation Strategies – An Upstream-downstream Perspective*, 2016: 255-270.
- Lagomarsino, S. «On the vulnerability assessment of monumental buildings.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2006: 445–463.
- Lagomarsino, S., e S. Cattari. «Seismic Vulnerability of Existing Buildings: Observational and Mechanical Approaches for Application in Urban Areas.» In *Seismic vulnerability of structures*, di P. Gueguen, 1-62. London (UK)-Hoboken (USA): ISTE L.t.d. (UK) - John Wiley & Sons, Inc. (USA), 2013.
- Lagomarsino, S., e S. Giovinazzi. «Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2006: 415–443.
- Lagomarsino, S., e S. Podestà. «Seismic Vulnerability of Ancient Churches: I. Damage Assessment and Emergency Planning.» *Earthquake Spectra*, 2004.
- Lagomarsino, S., e S. Podestà. «Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis.» *Earthquake Spectra*, Volume 20, 2004: 395-412.
- Leitner, H., E. Sheppard, S. Webber, e E Colven. «Globalizing urban resilience.» *Urban Geography*, 2018: 1276-1284 .
- Lenticchia, E., e E. Coisson. «The use of GIS for the application of the phenomenological approach to the seismic risk analysis: the case study of the italian fortified architecture.» *GEOMATICS & RESTORATION – Conservation of Cultural Heritage in the Digital Era*, 2017.
- Magliulo, G., D. Bellotti, C. Di Salvatore, e C. Francesco. «RiNTC-E PROJECT: Towards the seismic risk of low and pre-code single-story RC precast buildings in Italy.» *7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* , 2019.
- Margiotta, F., e G. Puglisi. «Caratterizzazione del parco edilizio nazionale: Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio.» *Ministero dello Sviluppo Economico*, 2009.
- Masi, A., C. Samela, G. Santarsiero, e M. Vona. «Scenari di danno sismico per l'esercitazione nazionale di Protezione civile “Terremoto Val d’Agri 2006” .» 2007.

- McKinney, W. «Statistics, pandas: a Foundational Python Library for Data Analysis and.» 2011.
- Meerow, S., e J.P Newell. «Urban resilience for whom, what, when, where, and why?» *Urban Geography: Geographic Perspectives on Urban Sustainability*, 2016.
- Menoni, S., M. P. Boni, e F. Pergalani. «Lo strumento della microzonazione sismica a supporto della pianificazione urbanistica.» 2018.
- Mezzi, M., F. Comodini, e L. Rossi. «Precast Industrial Buildings in Italy Current Building Code and New Provisions Since the 2012 Earthquake.» In *Seismic Design of Industrial Facilities*, di S. Klinkel, C. Butenweg, G. Lin e B. Holtschoppen, 75-84. Aachen, 2014.
- Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti. «Aggiornamento delle <<Norme tecniche delle costruzioni>>.» *Decreto 17 gennaio 2018*. Roma, 20 Febbraio 2018.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. «Normative tecniche per la costruzione.» *Decreto ministeriale 3 dicembre 1987*. Roma, 3 Dicembre 1987.
- Montanari, Tommaso. *Il fatto quotidiano*. 6 Settembre 2014.
<https://www.ilfattoquotidiano.it/2014/09/06/terremoto-laquila-eni-restaura-collemaggio-esiste-una-questione-morale/1112620/> (consultato il giorno Settembre 4, 2019).
- Mouroux, P., e : RISK-UE team. «The european risk-ue project: an advanced approach to earthquake risk.» *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004*, 2004.
- Muratore, A., V. Nastasi, e C. Di Gerolamo. «La valutazione del rischio sismico nei luoghi di lavoro.» 2015.
- OMI. «Banca dati delle quotazioni immobiliari.» *Ministero dell'Economia e delle Finanze, Agenzia delle entrate*. 21 Ottobre 2019.
<https://www.agenziaentrate.gov.it/servizi/Consultazione/ricerca.php>.
- Pagani, M., D. Monelli, e G. Weatherill. «OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model.» 2014.
- Pagani, M., D. Monelli, G. Weatherill, V. Silva, e H. Crowley. «The hazard component of OpenQuake: The calculation engine of the Global Earthquake Model.» *15 WCEE, Lisboa 2012*, 2012.
- Penna, A., P. Morandi, M. Rota, C.F. Manzini, F. da Porto, e G. Magenes. «Performance of masonry buildings during the Emilia 2012 earthquake.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2014: 2255-2273.
- Phoon, K., e O. Jensen. «If people aren't responding to climate warnings, we need to change the message.» *Lloyd's Register Foundation Institute for the Public Understanding of Risk, National University of Singapore*, 2019.
- Piano Comunale di Emergenza, . «Comune di Moncalieri,» *Analisi dei rischi potenziali e scenari di evento*. Moncalieri, Novembre 2015.
- Pinho, R. «GEM: a Participatory Framework for Open, State-of-the-Art Models and Tools for Earthquake Risk Assessment.» 2012.

- Polese, M., G. M. Verderame, C. Mariniello, I. Iervolino, e G. Manfredi. «Vulnerability Analysis for Gravity Load Designed RC Buildings in Naples.» *Journal of Earthquake Engineering*, 2008: 234-245.
- Polese, M., M. Di Ludovico, A. Prota, e G. Manfredi. «Damage-dependent vulnerability curves for existing buildings.» *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013.
- Polese, M., M. Di Ludovico, M. Marcolini, A. Prota, e G. Manfredi. «Assessing reparability: simple tools for estimation of costs and performance loss of earthquake damaged reinforced concrete buildings.» *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2015: 1539-1557.
- Porter, K., I. Cho, e K. Farakhnia. «Cracking an open safe: uncertainty in HAZUS-based seismic vulnerability functions.» *Earthquake Spectra*, 2010.
- Protezione Civile. «Esercitazione Nazionale di Protezione Civile Rischio Sismico "Basilicata 2012".» *Documento di impianto generale "Bozza"*, 2012.
- . <http://www.protezionecivile.gov.it/attivita-rischi/rischio-sismico/emergenze/irpinia-1980>. 1 Agosto 2016. <http://www.protezionecivile.gov.it/attivita-rischi/rischio-sismico/emergenze/irpinia-1980> (consultato il giorno Agosto 2019, 23).
- . «Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030.» *Protezione Civile*. 31 Ottobre 2018. http://www.protezionecivile.gov.it/media-comunicazione/dossier/dettaglio/-/asset_publisher/default/content/una-strategia-comune-per-la-riduzione-del-rischio-disastri (consultato il giorno 11 5, 2019).
- Redweik, P., P. Teves-Costa, I. Vilas-Bovas, e T. Santos. «3D City Models as a Visual Support Tool for the Analysis of Buildings Seismic Vulnerability: The Case of Lisbon.» *International Journal of Disaster Risk*, 2017: 308–325.
- Rodrigues, D., H. Crowley, e V. Silvia. «Earthquake loss assessment of precast RC industrial.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018: 203-228.
- Romano, F., M. Zucconi, e B. Ferracuti. «Comparative analysis of seismic vulnerability assessment methodologies for RC buildings at territorial scale.» *16th European conference of Earthquake Engineering*, 2018.
- Rose, A., e D. Lim. «Business interruption losses from natural hazards: conceptual and methodological issues in the case of the Northridge earthquake.» *Environmental Hazards* 4, 2002: 1-14.
- Rossetto, T., e A. Elnashai. «Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data.» *Engineering Structures*, 2003: 1241-1263.
- Rosti, A., M. Rota, e A. Penna. «Damage classification and derivation of damage probability matrices from L'Aquila (2009) post-earthquake survey data.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018: 3687–3720.
- Rus, K., V. Kilar, e D. Koren. «Resilience assessment of complex urban systems to natural disasters: A new literature review.» *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018: 311-330.
- Sanchez, A., X. J. Van der Heijden, e P. Osmond. «The city politics of an urban age: urban resilience conceptualisations and policies.» *Palgrave communications*, 2018: 25.

- Scherbaum, F., E. Delavaud, e C. Riggelsen. «Model selection in seismic hazard analysis: an information-theoretic perspective.» *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009: 3234–3247.
- Schiller, A., A. De Sherbinin, e A. Pulsipher. «The vulnerability of global cities to climate hazards.» *Environment and Urbanization*, 2007.
- Schneider, P.J., e B.A. Schauer. «HAZUS—Its Development and Its Future.» *Natural Hazards Review*, 2006: 7-2.
- Silva, V., et al. «Current Challenges and Future Trends in Analytical Fragility and Vulnerability Modelling.» *Earthquake Spectra*, 2019.
- Silva, V., H. Crowley, C. Yepes, e R. Pinho. «Presentation of the OpenQuake-engine, an open source software for seismic hazard and risk assessment.» *10th US National Conference on Earthquake Engineering*, 2014.
- Silva, V., M. Pagani, D. Monelli, e R. Pinho. «Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment.» *Natural Hazard* (Springer Science), 2013: 1409–1427.
- Sisti, R., M Di Ludovico, e A. Prota. «Analisi di correlazione tra contributi statali di ricostruzione e adeguamento a seguito del terremoto del 1979 e danneggiamento post sisma 2016 degli edifici del centro storico di Norcia.» *XVIII Convegno Anidis*, 2019.
- Sisti, R., M. Di Ludovico, A. Borri, e A. Prota. «Damage assessment and the effectiveness of prevention: the response of ordinary unreinforced masonry buildings in Norcia during the Central Italy 2016–2017 seismic sequence.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018: 5609–5629.
- Spence, R., Emily. So, e C. Scawthorn. «Estimating human casualties in earthquakes: The case of Wellingtonin.» *Seismic design practice into the next century*, 1998: 277-286.
- Stone, H. «Exposure and vulnerability for seismic risk evaluations.» 2017.
- Stucchi, M., R. Fuchs, e C. Meletti. «Dopo i terremoti del 2016: alcuni interrogativi sulla riduzione del rischio sismico.» 2017.
- TPINews*. 28 Dicembre 2018. (consultato il giorno Agosto 26, 2019).
- Tran, P., R. Shaw, G. Chantry, e Norton J. «GIS and local knowledge in disaster management: a case study of flood risk mapping in Vietnam.» *Blackwell Publishing*, 2009: 152-169.
- Tyagunov, S., G. Grunthal, R. Wahlstrom, L. Stempniewski, J. Zschau, e “. «Seismic risk mapping for Germany.» *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2006: 573–586.
- Wei, B., N. Gaozhong, S. Guiwu, B. Xianfu, e Q. Wenhui. «Risk assessment of people trapped in earthquake based on km grid: a case study of the 2014 Ludian earthquake, China.» *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2017: 1-17.
- Wisner, B., P. Blaikie, T. Cannon, e I. Davis. *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disaster*. Abington: Routledge, 2003.
- Woessener, J., et al. «The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2015: 3553–3596.

Wu, S., J. Jin, e T. Pan. «Empirical seismic vulnerability curve for mortality: case study of China.» *Natural Hazards*, 2015: 645-662.

Zho, D., A. Chen, e J. Wang. «Impact of Disaster Risks on Regional Economic Resilience in China: A Case Study of Wenchuan Earthquake.» *Social Sciences*, 2019: 245-254.

