



Università Politecnica delle Marche

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

**ANALISI MULTIRISCHIO BEHAVIOURAL-BASED PER I CENTRI
STORICI: IL CASO STUDIO DI SENIGALLIA PER EVENTI SISMICI E
ALLUVIONALI**

**BEHAVIOURAL-BASED MULTI-RISK ANALYSIS FOR HISTORIC CENTRES: THE CASE
STUDY OF SENIGALLIA FOR SEISMIC AND FLOOD EVENTS**

Relatore:

Prof. E. Quagliarini

Correlatore:

Ing. G. Bernardini

PhD G. Romano

Tesi di Laurea di:

Giorgia Ferri

Anno Accademico 2023- 2024

Indice

Introduzione	6
Capitolo 1 – Stato dell’arte.....	10
1.1 Rischio ambiente urbano per sisma.....	11
1.2 Rischio ambiente urbano per alluvione.....	14
1.3 Metodi attualmente utilizzati.....	16
1.3.1 Metodo per rischio alluvione	17
1.3.1.1 Il parametro di pericolo H.....	18
1.3.1.2 Il parametro di vulnerabilità V.....	19
1.3.1.3 La matrice di rischio R.....	20
1.3.1.4 I fattori di rischio e il processo di gerarchia analitica AHP	21
1.3.2 Metodo per rischio sismico	23
1.3.2.1 Le matrici SRA e SRM.....	25
1.3.2.2 La matrice di danno M1	27
1.3.2.3 I valori di H: periodo di restituzione e PGA.....	29
1.3.2.4 I valori di V: le curve di vulnerabilità macrosismica	31
1.3.2.5 La matrice delle conseguenze M2.....	33
1.3.2.6 Le colonne della matrice delle conseguenze: gli scenari di danno.....	36
1.3.2.7 Valutazione dell'esposizione e della vulnerabilità degli utenti	36
Capitolo 2 – Fasi e materiali	41
2.1 Fase 1: Caratterizzazione dell’area di studio	43
2.1.1 Definizione della superficie di studio.....	43
2.1.2 La schematizzazione dell’ambiente costruito.....	44
2.2 Fase 2: Determinazione dei parametri di input	45
2.2.1 Determinazione della vulnerabilità FV per alluvione	45
2.2.2 Determinazione della vulnerabilità Ifv per sisma	48
2.2.2.1 Le ipotesi per la valutazione della vulnerabilità	48
2.2.2.2 I contributi al parametro di vulnerabilità	49
2.2.2.3 I coefficienti aggiuntivi	52
2.3 Fase 3: Definizione delle matrici	54
2.3.1 Alluvione: matrice di rischio R.....	54
2.3.2 Sisma: matrice di danno D	55
2.4 Fase 4: Interpretazione dei valori di output	59
2.4.1 Alluvione: valori di output della matrice di rischio R	59
2.4.2 Sisma: i valori di output della matrice di danno D.....	60
2.5 Fase 5: Modellazione e simulazione con MassMotion	63

2.5.1 Le caratteristiche principali del software	63
2.5.2 Principali oggetti della modellazione.....	65
2.5.3 Gli step principali di una modellazione in MassMotion.....	66
2.5.4 Criteri di selezione degli scenari	68
Capitolo 3 – Caso studio: la città di Senigallia	70
3.1 Descrizione della città	70
3.1.1 Storico sismico	71
3.1.1.1 La pericolosità sismica di Senigallia.....	75
3.1.2 Storico fenomeni alluvionali.....	75
3.2 Analisi del layout urbano	80
3.2.1 Documentazione cartografica	80
3.2.2 Definizione dell'area di studio	83
3.2.3 Schematizzazione dell'area di studio	83
Capitolo 4 - Risultati: valutazioni di rischio legate all'ambiente costruito	85
4.1 Definizione dei parametri di input	85
4.1.1 Le ipotesi per FV.....	86
4.1.1.1 Le assunzioni del contributo EC.....	86
4.1.1.2 Le ipotesi del contributo SC	89
4.1.2 La distribuzione del parametro FV	94
4.1.3 Le ipotesi per la vulnerabilità sismica I_{fv}	96
4.1.3.1 Le assunzioni per determinare i coefficienti.....	97
4.1.3.2 Le ipotesi dei coefficienti $C1$ e $C2$	102
4.1.4 La distribuzione del parametro I_{fv}	103
4.2 I dati di output dei metodi	105
4.2.1 I valori di output per rischio alluvione	105
4.2.2 I valori di output per rischio sismico.....	108
Capitolo 5 – Risultati: valutazioni di rischio legate al fattore umano	122
5.1 La modellazione e simulazione con MassMotion	122
5.1.1 La scelta degli scenari	122
5.1.2 La creazione del modello.....	124
5.1.3 Il popolamento degli scenari	127
5.1.4 Gli scenari evacuazione: sheltering e leaving.....	134
5.1.4.1 Scenario “Leaving” per alluvione e sisma	134
5.1.4.2 Scenario “Sheltering” per alluvione	137
5.1.4.3 Scenario di “Sheltering” per sisma.....	138
5.2 Gli scenari di evacuazione per alluvione	139

5.2.1 Scenario “Leaving” per alluvione	139
5.2.2 Scenario “Sheltering” per alluvione	144
5.3 Gli scenari di evacuazione per sisma	149
5.3.1 Scenario di evacuazione “Leaving” per sisma e affollamento LOSA	149
5.3.2 Scenario di evacuazione “Sheltering” per sisma e affollamento LOSA.....	153
5.3.3 Scenario di evacuazione “Leaving” per sisma e affollamento LOSE.....	163
5.3.4 Scenario di evacuazione “Sheltering” per sisma e affollamento LOSE.....	169
Capitolo 6 -Discussioni	177
Capitolo 7 - Conclusioni.....	181
APPENDICE A	187
Bibliografia	190

Introduzione

L'ambiente costruito si può definire una connessione di edifici, unità strutturali e spazi aperti che interagiscono tra loro, soprattutto quando sono colpiti da calamità o eventi eccezionali. Ciascun ambiente costruito è caratterizzato da un'intrinseca capacità di resilienza in funzione delle qualità e prestazioni delle singole unità strutturali.

Le scarse prestazioni di resilienza evidenziate dai recenti eventi di carattere eccezionale dipendono da fattori quali:

- Strategie di mitigazione del rischio per eventi di "emergenza" che considerano solo gli edifici, escludendo gli spazi aperti;
- Condizioni di rischio relative all'affollamento e tipologia di utenti non considerate;
- Strategie di mitigazione e prevenzione del rischio che considerano solamente il comportamento degli utenti;
- Effetti e conseguenze di situazioni multirischio non valutate.

L'esclusione di alcuni di questi aspetti rende gli ambienti costruiti meno sicuri e resistenti nell'affrontare fenomeni di carattere eccezionale, esponendo gli occupanti ad un elevato grado di rischio vita. Una mancata progettazione urbanistica, che considera anche questi aspetti, rende l'ambiente costruito più fragile ed esposto a danni maggiori.

Uno studio del comportamento degli aggregati urbani, in seguito ai recenti eventi eccezionali, ha evidenziato una difficoltà dell'ambiente costruito nell'affrontare fenomeni di emergenza quali eventi sismici, alluvionali e un grado di danno superiore e non compatibile con l'intensità della sollecitazione.

Tali fenomeni sono definiti eventi SUOD (SUdden- Onset Disaster), ovvero disastri di natura improvvisa, in quanto possono manifestarsi in tempi molto brevi con intensità elevate.

Inoltre, è necessario incrementare il livello di studio del comportamento dell'ambiente costruito indagando la prestazione dello stesso quando si verificano più eventi, anche se si manifestano in maniera indipendente. È necessario combinare tali risultati con uno studio dei fattori legati alla presenza degli utenti, perché questi possono comportare un aggravio

del rischio per singole emergenze, non solo in termini di presenza (esposizione) di vite umane, e di vulnerabilità degli individui, ma anche di comportamento umano. Infatti, le azioni e le scelte che un individuo compie per mettersi in sicurezza variano in base al rischio a cui sono esposti, portando a differenti effetti nel medesimo ambiente, a parità di esposizione e vulnerabilità individuale, se questo è sottoposto a condizioni emergenziali diversi.

OGGETTO E MOTIVAZIONI

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è valutare, attraverso l'applicazione di metodi innovativi, la resilienza e le prestazioni del centro storico della città di Senigallia rispetto a fenomeni di natura sismica ed alluvionale.

La decisione di concentrarsi su queste due tipologie di eventi emergenziali è sostenuta da uno storico di fenomeni, che hanno coinvolto la città, di considerevole intensità e caratterizzati da una costante periodicità. Inoltre, è stata eseguita una valutazione combinata al comportamento degli occupanti per poter individuare le eventuali criticità in termini di sicurezza e salvaguardia della vita dei cittadini durante la fase di evacuazione e soccorso degli occupanti. Infatti, queste due emergenze sono caratterizzate da effetti legati al fattore umano molto diversi. In caso di sisma, le persone tenderanno a muoversi verso spazi urbani limitrofi ampi, evitando gli edifici e le macerie, mentre in caso di alluvione le persone tenderanno a muoversi ai piani alti/in luoghi più elevati, o lontano dalle aree alluvionate, anche muovendosi vicino agli edifici per evitare interazioni critiche con l'acqua e trovare supporto nel movimento.

STRUTTURA DELLA TESI

La struttura metodologica del presente lavoro di tesi prevede la seguente struttura.

CAPITOLO 1- Stato dell'arte

In questo capitolo vengono descritti i metodi presenti in letteratura che permettono di ricavare le informazioni necessarie alla caratterizzazione del caso studio. I metodi si distinguono in funzione dell'evento emergenziale analizzato: per l'evento sismico lo scenario

è stato caratterizzato rispetto al metodo descritto nel documento *“Seismic risk of Open Spaces in Historic Built Environments: A matrix-based approach for emergency management and disaster response”* di L. Bernabei, G. Mochi, G. Bernardini, E. Quagliarini, mentre per la caratterizzazione del fenomeno alluvionale si è fatto riferimento alla pubblicazione *“Assessing the spatiotemporal impact of users’ exposure and vulnerability to flood risk in urban built environments”* di Gabriele Bernardini, Tiago Miguel Ferreira, Pilar Baquedano Juli, Rafael Ramírez Eudave, Enrico Quagliarini.

CAPITOLO 2- Fasi e materiali

Nel secondo capitolo sono descritte le fasi di lavoro, le ipotesi assunte e l’applicazione della metodologia descritta nel capitolo precedente, tarata rispetto alle condizioni specifiche del caso studio e ai dati disponibili. Come primo step si esegue una caratterizzazione della struttura del centro storico e una schematizzazione affinché si possa avere una visione semplificata degli oggetti principali, ovvero edifici, strade, vie e ostacoli. Successivamente si è eseguita una caratterizzazione degli edifici dell’area di interesse secondo i parametri descritti nei metodi e si ottengono informazioni relative al grado di danno o rischio attraverso un approccio matriciale. Tali informazioni sono elaborate e utilizzate per impostare degli scenari di modellazione che combinano il comportamento umano e le conseguenze subite dall’ambiente costruito al fine di simulare la fase di esodo. I risultati delle simulazioni restituiscono una visione generale dell’andamento della fase di evacuazione evidenziando eventuali criticità e problematiche.

CAPITOLO 3 – Caso studio: la città di Senigallia

In questo capitolo viene descritta la città oggetto di studio e l’applicazione dei metodi. È stato eseguito uno studio riguardo lo storico sismico e alluvionale che ha interessato la città. Successivamente è stato analizzato e schematizzato il layout urbano.

CAPITOLO 4 – Risultati: valutazioni di rischio legate all'ambiente costruito

Nel quarto capitolo sono riportati tutti i risultati ottenuti dall'elaborazione delle informazioni rese disponibili dalle matrici rispetto i gradi di rischio per esposizione e danno degli spazi aperti dell'ambiente costruito.

CAPITOLO 5 – Risultati: valutazioni di rischio legate al fattore umano

Nel quinto capitolo sono riassunti i risultati ottenuti dall'elaborazione delle informazioni ottenute dalla simulazione delle fasi di evacuazione per differenti livelli di affollamento per entrambi gli eventi.

CAPITOLO 6 - Discussioni

In questo capitolo sono riportati i punti principali dei risultati relativi alla vulnerabilità fisica e pericolosità degli edifici, per entrambe i fenomeni, e alle simulazioni di evacuazione.

CAPITOLO 7 - Conclusioni

Nell'ultimo capitolo si riassumono i risultati ottenuti con le limitazioni e le criticità relative. Si enunciano possibili spunti per sviluppi futuri, si propongono alcuni spunti di riflessione in merito alle criticità evidenziate dal lavoro di tesi e alcune soluzioni.

Capitolo 1 – Stato dell’arte

Negli ultimi decenni si è verificato un incremento considerevole di fenomeni di elevate entità e di diversa origine che hanno causato gravi perdite sia in termini di vite umane sia di patrimonio architettonico e culturale. Contemporaneamente al manifestarsi di tali fenomeni, si è riscontrato un aumento della fragilità dell’ambiente urbano e una riduzione della sua resilienza e capacità di garantire sicurezza ai suoi occupanti durante questi fenomeni.

Gli eventi oggetto di studio hanno diverse origini:

- Naturali, come sismi, alluvioni e ondate di calore;
- Antropiche, come atti terroristici e inquinamento;

e si possono distinguere per le modalità d’impatto che hanno sull’ambiente urbano. È possibile classificare gli eventi in Sudden-Onset Disaster (SUOD), ovvero di natura improvvisa, e Slow-Onset Disaster (SLOD), indotti da fattori antropici e con un’insorgenza più lenta.

Le normative, negli anni, hanno promosso delle misure preventive di mitigazione delle conseguenze che possono verificarsi a seguito di tali fenomeni, ma si necessita di un approccio alla gestione innovativo.

Il metodo utilizzato in questo elaborato, e descritto nei paragrafi successivi, si basa su una serie di “migliori pratiche” (best practices) da attuare e l’integrazione del comportamento umano nello studio delle criticità.

Alla base del progetto risiede una nuova concezione di rischio^[20] inteso come “la probabilità di perdita di vite umane, di lesioni o di distruzione e di danni derivanti da una catastrofe in un determinato periodo di tempo”.

Il rischio è descritto da una funzione, di seguito riportata:

$$R = R(H, V, E)$$

In cui:

- H, rappresenta la componente di rischio definito come “un processo, un fenomeno o un’attività umana che possono causare la perdita di vita, lesioni o causare impatto sulla salute, danno ai beni, perdita sociale o economica. I pericoli possono essere naturali, di origine antropica o socio-naturale”
- V, rappresenta la vulnerabilità definita come “le caratteristiche determinate da processo o fattori fisici, naturali, sociali, economici o ambientali che incrementano e suscettibilità di un individuo, una comunità o sistema a causa di un rischio”
- E, rappresenta l’esposizione ed è definita come “la condizione delle persone, infrastrutture, alloggi, capacità produttive e altre beni umani materiali situati in aree a rischio”

Di seguito sono illustrate le problematiche principali dei fenomeni sismici e alluvionali. Di seguito sono descritti i metodi utilizzati, per i rispettivi fenomeni, nel caso studio della città di Senigallia.

1.1 Rischio ambiente urbano per sisma

Il fenomeno sismico viene considerato un’azione d’emergenza che ha ricadute immediate sull’integrità dell’ambiente costruito. Le conseguenze di un sisma si possono stimare sia in funzione del danneggiamento delle strutture sia in termini di perdita di vite umane.

Le conseguenze che il sisma ha sull’ambiente costruito di un centro storico possono essere quantificate in funzione del patrimonio architettonico perso o non recuperabile a seguito dell’evento. Tale aspetto è influenzato dalla tipologia costruttiva che caratterizza gli edifici di un determinato aggregato urbano.

Gli edifici di carattere storico, rispetto a edifici di recente costruzione, possiedono una capacità di resistenza al sisma molto minore in quanto la tipologia costruttiva più ricorrente è la muratura non rinforzata. I danni di edifici in muratura rappresentano la maggioranza dei danni che un ambiente costruito può subire durante un sisma in quanto le carenze strutturali

che possiedono tali strutture possono generare fenomeni di instabilità e una maggior tendenza al collasso.

Le conseguenze che un evento sismico può avere in termini di perdita di vite umane sono dovute ad una concentrazione demografica elevata in corrispondenza di zone ad elevato rischio sismico, alle fragilità delle strutture ma anche all'incapacità di intervento delle squadre di soccorso subito dopo l'avvenimento del fenomeno sismico.

Queste problematiche pongono l'attenzione su un aspetto quasi totalmente trascurato nella valutazione di resilienza e resistenza a fenomeni sismici: l'interazione delle strutture e degli occupanti con gli spazi aperti.

Gli spazi aperti sono aree come piazze, zone verdi, isolati e lotti e hanno un'influenza elevata a livello mesoscala dell'ambiente costruito in quanto le loro caratteristiche specifiche, la forma e la modalità con cui si inseriscono nel contesto urbano influenzano la capacità degli edifici di resistere alle sollecitazioni, di preservare beni di rilevante importanza e di garantire l'intervento a seguito del fenomeno.

Altro aspetto da considerare nello studio di resilienza di un aggregato è il layout urbano e la distribuzione della rete stradale. Questi elementi vengono valutati a livello di macroscale fino a raggiungere un livello di microscale, in quanto viene studiata l'interazione con gli edifici che compongono l'aggregato urbano.

La caratteristica peculiare di questo metodo è quella di valutare l'influenza dell'interazione tra singolo edificio e spazio aperto e come tale interazione permette agli occupanti di mettersi in salvo e raggiungere zone sicure.

Gli spazi aperti sono aree sulle quali si affacciano edifici che al loro interno ospitano attività differenti e si possono distinguere in funzione del ruolo che ricoprono in fase di emergenza e di evacuazione. Spazi aperti come strade o vie collegano gli ambienti costruiti e permettono lo svolgimento delle fasi di intervento, soccorso e gestione dell'emergenza. Le piazze rappresentano i luoghi cosiddetti sicuri, che le persone possono raggiungere per mettersi in salvo, ma per loro generica conformazione si considerano aree esterne parzialmente o completamente chiuse da edifici prospicienti.

La capacità degli spazi aperti di svolgere la loro funzione durante e dopo l'evento ed il rischio complessivo a cui sono esposte è strettamente dipendete da alcuni parametri^[17] come:

- caratteristiche morfologiche e costruttive di edifici prospicienti;
- la destinazione d'uso degli spazi interni a tali edifici;
- la presenza di occupanti sia in aree esterne che interne;
- l'impatto degli occupanti sulle condizioni di emergenza ed evacuazione, che dipende dal livello di danno negli spazi aperti.

Di conseguenza le criticità che si possono verificare negli spazi aperti a seguito di un evento^[17] sismico sono da imputare a:

- configurazioni particolari del tessuto urbano,
- la vulnerabilità degli ambienti costruiti storici, degli elementi che compongono piazze e vie e degli edifici prospicienti gli spazi esterni;
- una possibile concentrazione di beni architettonici e monumentali;
- la possibile e significativa esposizione in termini di vite umane.

La configurazione del tessuto urbano è fortemente condizionata dalla presenza di edifici appartenenti ad epoche storiche differenti, organizzati solitamente in aggregati edilizi e raramente in edifici singoli. Inoltre, ogni aggregato, individuabile in quanto delimitato da spazi aperti circostanti, può contenere al suo interno molteplici unità strutturali e funzionali. La caratterizzazione dell'ambiente costruito necessita di una approfondita conoscenza in quanto la risposta al sisma dell'intero aggregato dipende dalla risposta della singola unità strutturale.

Un altro aspetto sopra citato, che condiziona fortemente la risposta di un ambiente costruito, è la vulnerabilità degli elementi che lo compongono. Infatti, la vulnerabilità rappresenta un aspetto critico in quanto condiziona la sicurezza degli occupanti durante il sisma e durante il processo di evacuazione. Inoltre, in funzione della tipologia costruttiva dell'aggregato, il grado di vulnerabilità può assumere valori minimi o massimi con conseguenze anche distruttive sugli spazi aperti.

Questo fattore dipende strettamente anche dalla presenza di beni architettonici e dalla trasformazione storica che ha coinvolto la città in quanto possono essere presenti aggregati che presentano delle modalità realizzative obsolete che rendono fragili le strutture.

Tali fattori devono essere valutati e combinati con la presenza di persone e turisti. La variazione del flusso di persone si verifica sia durante la giornata sia durante l'anno e ciò rende l'esposizione al rischio variabile nel tempo richiedendo un adeguato sistema di procedure di emergenza ed evacuazione.

Nel capitolo successivo si descrive il metodo, applicato al caso studio, che permette di analizzare il rischio per un fenomeno sismico considerando tutte le criticità evidenziate precedentemente come l'esposizione degli occupanti, la vulnerabilità delle strutture e le fasi di gestione dell'emergenza.

1.2 Rischio ambiente urbano per alluvione

L'alluvione è classificata come un fenomeno d'emergenza^[21] di natura improvvisa in quanto può manifestarsi con elevate intensità in brevi periodi. Il fenomeno è fortemente condizionato dal grado di urbanizzazione che coinvolge una determinata porzione di territorio. Negli ultimi decenni si è registrato un aumento di fenomeni soprattutto in aree alluvionali, costiere soggette ad inondazioni e pianure causando delle perdite considerevoli in termini di vite umane e danni al patrimonio edilizio.

L'evento alluvionale, a differenza di quello sismico, è strettamente dipendente dalla gestione del territorio in quanto la morfologia dello stesso ambiente costruito varia in funzione delle esigenze dell'uomo.

L'indagine dell'ambiente costruito, per valutare il rischio a cui è esposto, fa riferimento alla presenza di un corso d'acqua, alla vulnerabilità del costruito, all'esposizione degli occupanti ed al layout urbano. Le informazioni devono essere indagate a livello mesoscalare affinché si possano individuare i lotti, gli isolati urbani, gli spazi aperti e connetterli con gli elementi

microscari come gli edifici, le loro caratteristiche e le relazioni che hanno con gli altri elementi urbani.

Il fenomeno alluvionale è dipendente dalla presenza di un corso d'acqua in prossimità dell'ambiente costruito e dal livello di inondazione che coinvolge le vie, dunque, devono essere valutate le caratteristiche di strade, vie, piazze, spazi aperti e infrastrutture per poi combinarle con le differenti modalità con cui l'acqua può occupare gli spazi aperti. I parametri appena citati devono essere indagati in funzione della direzione con la quale il flusso d'acqua può investire l'ambiente urbano.

I fattori^[5] che condizionano le inondazioni sono:

- la planimetria e l'elevazione altimetrica;
- la tipologia di superficie orizzontale;
- la densità di drenaggio;
- la connessione tra gli elementi dell'ambiente costruito;
- le caratteristiche degli ostacoli verticali.

Questi parametri permettono di valutare il pericolo e la vulnerabilità fisica degli edifici, mentre l'esposizione e la vulnerabilità degli utenti richiede uno studio temporale del numero di occupanti presenti nelle aree interne ed esterne. Il grado di affollamento è una variabile che condiziona fortemente il valore di rischio a cui sono esposti gli utenti per inondazioni urbane.

Nella valutazione del rischio svolge un ruolo importante la distribuzione delle persone e la loro posizione in relazione al fenomeno poiché una differente collocazione implica un maggior o minor numero di utenti coinvolti e potenziali vittime del fenomeno. Inoltre, è fondamentale avere indicazioni riguardo la condizione degli occupanti, in particolare l'età e il sesso, poiché condizionano la capacità dell'individuo di reagire al fenomeno in condizione di emergenza.

1.3 Metodi attualmente utilizzati

I metodi esistenti di valutazione del rischio, attualmente in uso, sulla quale si basano i piani di gestione delle emergenze si focalizzano su uno studio a livello microscala escludendo aspetti importanti quali:

- la presenza di persone;
- l'interazione dei singoli edifici con l'ambiente costruito circostante;
- gli spazi aperti circostanti;

che condizionano il rischio a cui sono esposti gli occupanti e l'aggregato urbano.

Tali metodi di indagine delle prestazioni del costruito sono utilizzati nella realizzazione dei Piani di gestione delle emergenze redatto dalla Protezione Civile comunale. Strutturano la valutazione su metodi analitici basati su una caratterizzazione locale o globale, escludendo una valutazione che caratterizza il costruito rispetto parametri peculiari e specifici. L'approccio dei metodi attuali si struttura secondo i seguenti principi ^[25]:

- La definizione delle risorse da introdurre è costituita dagli scenari di danno, ossia strumenti di previsione del possibile danneggiamento e del conseguente coinvolgimento della popolazione.
- Gli scenari sono definiti sulla scorta dei dati territoriali di esposizione e vulnerabilità e sulla base di eventi di riferimento.
- L'entità degli scenari si modella in funzione della probabilità di accadimento dell'evento in base all'intervallo temporale selezionato.

L'esclusione di un aspetto come l'interazione tra gli edifici e gli spazi aperti circostanti può causare una mancata valutazione delle conseguenze in termini di sicurezza come, ad esempio, strade non accessibili o agibili che ostacolano le procedure di intervento post emergenza.

Inoltre, la mancata considerazione del comportamento delle persone durante l'emergenza implica una stima non corretta del livello di sicurezza a cui le stesse sono esposte a causa di

comportamenti di evacuazione che aumentano il rischio, influenzando anche sulla resilienza dell'intera comunità.

Un altro aspetto di fondamentale importanza è la valutazione dello scenario in condizioni di affollamento, in quanto i rischi possono aumentare rispetto ad un'esposizione individuale dato che si possono generare fenomeni di panico di massa o di cooperazione tra individui. Tali aspetti sociali possono causare un'alterazione degli spostamenti di massa, con gravi conseguenze come ritardi nell'abbandono delle aree pericolose o fughe precipitose.

I metodi che si utilizzano in questo elaborato hanno l'obiettivo di includere tutti questi aspetti e giungere alla valutazione del rischio per fenomeni di sisma e alluvione.

1.3.1 Metodo per rischio alluvione

Nel campo di studio del rischio per alluvione le metodologie attualmente in uso rappresentano delle limitazioni in quanto si concentrano su una scala territoriale escludendo una visione a mesoscala. Tali valutazioni si basano su una discretizzazione dell'apparato urbano in analisi per poter sovrapporre i dati con i risultati di simulazione del fenomeno alluvionale. I metodi precedenti sfruttano anche il processo di gerarchia analitica, ovvero un metodo che consente di eseguire un'analisi multicriterio rispetto alla quale si pone una gerarchia tra i vari indicatori.

Con il metodo descritto in questo elaborato si vuole introdurre anche la componente umana e sociale per ottenere una più accurata determinazione del rischio di esposizione. Si introduce infatti una valutazione spazio-temporale che permette di combinare le valutazioni della pericolosità e di vulnerabilità fisica con l'analisi dell'esposizione degli occupanti. Lo studio viene eseguito ad un livello mesoscala con l'obiettivo di combinare le informazioni dei singoli edifici con quelle degli spazi urbani, che sono gli elementi principali attraverso i quali il fenomeno alluvionale si diffonde all'interno dell'ambiente urbano.

La vulnerabilità fisica delle strutture e il loro pericolo sono indagati attraverso l'utilizzo di coefficienti e hanno una natura statica in funzione di un determinato scenario del fenomeno,

mentre l'esposizione e la vulnerabilità degli utenti viene valutata dinamicamente in base alle variazioni spaziali e temporali.

Il metodo adotta due approcci distinti per definire il rischio e la vulnerabilità. I risultati di tali indagini vengono poi combinati all'interno della matrice di rischio come dimostrato nell'immagine seguente.

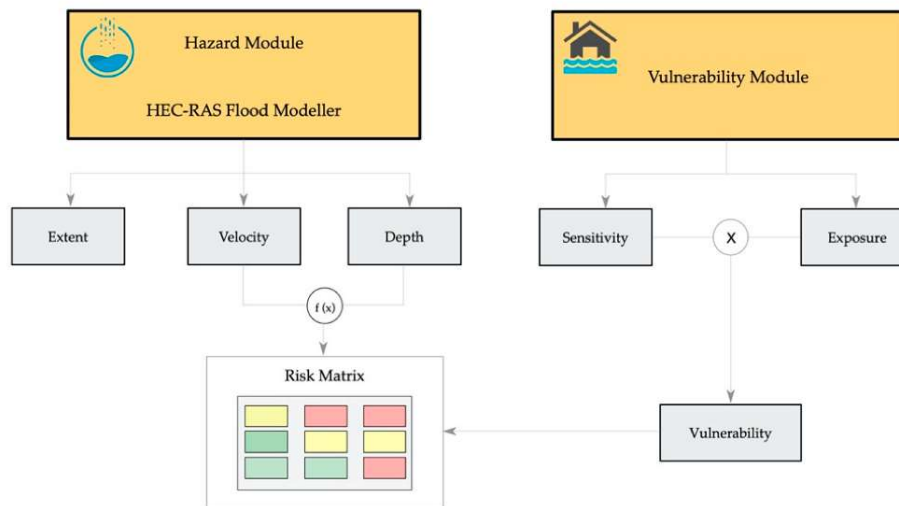


Figura 1: Schema delle fasi della valutazione per rischio alluvione

1.3.1.1 Il parametro di pericolo H

La determinazione del valore di pericolo relativo al fenomeno alluvione richiede la conoscenza delle caratteristiche del fenomeno stesso attraverso il metodo idrogeologico-idraulico. Gli aspetti caratterizzanti, necessari a descrivere un'alluvione, sono l'estensione dell'inondazione, la profondità e la velocità del fronte d'acqua.

I metodi che si possono utilizzare per raccogliere informazioni caratterizzanti il sito possono avere molteplici nature:

- Metodi empirici, basati su stime e banche dati;
- Metodi cinematici, basati su parametri quali intensità, durata e frequenza del fenomeno forniti da stazioni pluviometriche in prossimità del centro urbano in analisi;
- Metodi statistici, che utilizzano i valori di area del bacino interessato dal fenomeno e dati regionali.

I parametri geometrici, la stima del flusso di picco e la realizzazione dei modelli possono essere eseguiti tramite il software GIS. Solitamente i dati raccolti fanno riferimento ad un periodo di ritorno di cento anni, sono pre-elaborati utilizzando il software HEC-RAS 5.0.7 e RAS mapper.

1.3.1.2 Il parametro di vulnerabilità V

La vulnerabilità fisica delle strutture viene descritta con un metodo semplificato basato su degli indici e permette una valutazione sia su macroscale sia mesoscale, in funzione del grado di dettaglio dell'analisi.

Il metodo si propone di descrivere il parametro attraverso due componenti:

- Esposizione (EC);
- Sensibilità (SC);

con l'obiettivo di considerare sia le caratteristiche strutturali dell'edificio sia l'interazione che esso può avere con il flusso d'acqua.

La componente di esposizione EC è rappresentata da un unico parametro che considera l'orientamento della facciata dell'edificio rispetto al flusso d'acqua alluvionale e come tale aspetto possa condizionarne la vulnerabilità. La componente considera anche l'influenza delle aperture presenti sulla facciata dell'edificio, in termini di estensione e posizione, in quanto sono un elemento di debolezza rispetto al fenomeno alluvionale.

La componente di sensibilità SC racchiude tutte le caratteristiche fisiche dell'edificio, valutando:

- le proprietà dei materiali;
- lo stato di conservazione;
- il numero di piani;
- l'età;
- l'appartenenza a beni culturali.

Ognuno di questi aspetti concorre a definire il parametro di sensibilità che verrà utilizzato per definire il valore di vulnerabilità V dell'edificio.

I valori di esposizione e vulnerabilità sono utilizzati nella seguente formula per determinare il parametro di vulnerabilità all'alluvione FV della singola unità strutturale.

$$FV = EC \times SC.$$

Il metodo richiede che i valori ottenuti da tale funzione siano normalizzati al fine di avere coefficienti tra loro confrontabili e relazionabili allo spazio aperto su cui si affacciano. I valori devono essere mediati, moltiplicando il valore di vulnerabilità ottenuto per l'area del rispettivo edificio e dividendolo per la somma delle aree degli edifici che insistono sullo stesso spazio aperto. Questo ultimo passaggio rappresenta l'innovazione portata da tale metodo in quanto permette di definire la vulnerabilità dello spazio aperto in funzione di quella degli edifici presenti in esso.

1.3.1.3 La matrice di rischio R

In seguito alla determinazione dei parametri di rischio H e vulnerabilità V, il metodo si propone di determinare il rischio alluvione PVH tramite un approccio matriciale che relaziona la vulnerabilità del singolo edificio con il rischio a cui è esposto come riportato nell'immagine seguente.

Rischio di alluvione		Azzardo		
		Basso	Moderato	Alto
Vulnerabilità	Alto	Rischio medio	Alto rischio	Alto rischio
	Moderato	Basso rischio	Rischio medio	Alto rischio
	Basso	Basso rischio	Basso rischio	Rischio medio

Figura 2: Schema della matrice di rischio per fenomeno alluvionale

I valori di vulnerabilità occupano le righe della matrice e sono suddivisi in tre classi:

- Basso, per valori inferiori a 20;
- Moderato, per valori compresi tra 20 e 40;
- Alto, per valori superiori a 40;

Nelle colonne è riportato il valore di rischio, relativo al flusso alluvionale, rappresentato dalle seguenti funzioni^[4]:

- Pericolo basso: $V < 2 \text{ m/s} \vee a \times v < 3 \text{ m}^2/\text{s}$
- Pericolo moderato: $V > 2 \text{ m/s} \wedge 3 \text{ m}^2/\text{s} < Y \times V < 7 \text{ m}^2/\text{s}$
- Pericolo alto: $V > 2 \text{ m/s} \wedge a \times v > 7 \text{ m}^2/\text{s}$

Questa distinzione è stata proposta da Clausen, basandosi su dati empirici. Un significato fisico è stato dimostrato da Kean e Spence con la seguente formula^[4]:

$$\text{momentum} = \text{mass} \times v = p_w \times \text{volume} \times v = p_w \times \text{area di inondazione orizzontale} \times y \times v$$

e considerando costante p_w , si può ritenere costante anche l'area di inondazione e ottenere come variabili solamente y e v , ovvero la profondità e la velocità dell'acqua.

Tale formula permette di suddividere le condizioni di rischio in base a caratteristiche specifiche del flusso d'acqua alluvionale, come la velocità e la profondità del fronte d'acqua.

1.3.1.4 I fattori di rischio e il processo di gerarchia analitica AHP

Il metodo di gerarchia analitica permette di confrontare il contributo di ciascun criterio o fattore rispetto al valore finale di rischio. I pesi associati a ciascun parametro sono ricavati da un'indagine sottoposta a più figure competenti con l'obiettivo di individuare il peso da attribuire a ciascun fattore ottenuto grazie da un confronto a coppie tra essi. In questa analisi viene sfruttato tale metodo per individuare il parametro di vulnerabilità degli utenti.

Il valore PVH si ottiene dalla matrice di rischio, come risultato della combinazione di vulnerabilità fisica e la pericolosità, e rappresenta il livello di rischio per un fenomeno

alluvionale. Inoltre, la combinazione dei parametri V e H mostra gli effetti combinati del pericolo nello scenario in analisi.

Il coefficiente PVH è descritto da tre livelli di rischio:

- Basso: $0 < PVH < 0,33$
- Medio: $0,33 < PVH < 0,67$
- Alto: $0,67 < PVH < 1$

I risultati necessitano di essere combinati con il valore di esposizione E affinché si possa integrare la componente umana nello studio dello scenario. Il valore di esposizione è calcolato come il rapporto tra la densità degli utenti dell'edificio in analisi e la densità massima accettabile di utenti, pari a $4 \text{ pp}/\text{m}^2$. Il valore viene successivamente normalizzato rispetto all'area di interesse di ciascun edificio e rispetto alla somma delle aree degli edifici prospicienti un determinato spazio aperto.

La vulnerabilità degli utenti è rappresentata da tre fattori:

- UVp, la quantità di utenti esposti alle inondazioni rispetto alla popolazione presente nell'area. Si calcola sommando il numero di utenti negli spazi aperti e al piano terra di ciascun edificio, dividendo per il numero di utenti esposti. Permette di valutare gli effetti sulle persone effettivamente esposte e che dovrebbero evacuare in caso di alluvione;
- Uva, il numero di utenti vulnerabili a causa dell'età ed esposti a causa della vulnerabilità individuale;
- UVf, il rapporto tra il numero di utenti che hanno poca familiarità con l'ambiente costruito, la struttura della rete viaria ed i suoi pericoli e il numero totale di persone esposte.

I valori di ciascun parametro sono normalizzati nell'intervallo 0-1 al fine di rendere i parametri tra loro confrontabili nello scenario in analisi. La normalizzazione permette di comparare i parametri anche tra differenti scenari poiché le condizioni di rischio massimo e minimo sono uniche e definite. Ciò permette di eseguire una valutazione dipendente dal

tempo e dallo spazio in quanto i fattori variano secondo la stessa scala nello stesso intervallo di tempo, garantendo la confrontabilità del rischio in fasce orarie differenti.

Il sistema AHP Excel^[5] (<https://bpmsg.com/new-ahp-excel-template-with-multiple-inputs/>) utilizza una scala lineare da 1 a 9, indicando con 1 una pari importanza tra i fattori e 9 l'estrema superiorità di importanza di un fattore rispetto all'altro. I gradi di priorità sono calcolati utilizzando il metodo della media geometrica delle righe e sono stati associati ai contributi UVp, Uva, UVf, E e PVH per definire numericamente il valore di rischio R.

È stato adottato un unico livello di confronto che ha permesso di ottenere la seguente funzione che descrive il rischio:

$$R = w_{PVH} \times PVH + w_E \times E + w_{UVp} \times UVp + w_{Uva} \times Uva + w_{UVf} \times UVf$$

L'ultima fase richiede che i valori di R siano normalizzati con lo stesso range del valore PVH affinché l'analisi si possa basare sullo stesso grado di classificazione e i risultati siano tra loro coerenti e confrontabili.

1.3.2 Metodo per rischio sismico

I comuni metodi di valutazione del rischio sismico si basano su valutazioni microscala, come singoli edifici, oppure macroscala come il territorio urbano e non includono nello studio una valutazione a livello di mesoscala.

Le soluzioni di mitigazione del rischio fornite da questi metodi e le capacità di applicazione di tali soluzioni si basano solamente sulla possibilità di realizzare interventi volti a migliorare le prestazioni del singolo edificio e poi, su scala più ampia, di tutto il territorio. Questi metodi non considerano però che l'efficacia di tali soluzioni dipende esclusivamente dal livello di dettaglio, dallo scopo e dalla scala di applicazione che sono stati utilizzati, migliorando le prestazioni del singolo elemento e non di tutto il complesso urbano.

Inoltre, i comuni approcci trascurano anche le conseguenze che i danni degli edifici hanno sull'ambiente costruito e sulla sicurezza dei suoi utenti nei momenti post evento.

Le strategie di mitigazione del rischio sismico sono strettamente dipendenti dalle modalità con la quale si valuta il rischio e dal grado di dettaglio con la quale si studia il tessuto urbano. A seguito dei recenti eventi sismici si è notata l'esigenza di una correlazione sistemica tra i metodi di valutazione (Seismic Risk Assessment-SRA) e le conseguenti strategie di mitigazione (Seismic risk management- SRM) al fine di comprendere le azioni da attuare nelle varie fasi di gestione dell'emergenza.

I nuovi metodi presenti in letteratura hanno introdotto una modalità di approccio all'evento sismico che si basa sulla differenziazione delle esigenze in funzione della fase dell'emergenza che si sta affrontando. Pertanto, tali metodi devono essere implementati con un approccio olistico che permettano una miglior programmazione delle misure preventive e di intervento, con l'obiettivo di ottenere risultati che migliorino le condizioni di sicurezza in tutte le fasi di emergenza.

La capacità di gestione del fenomeno e di mitigazione del rischio ha una natura multidisciplinare e differente nelle varie fasi temporali. Le principali fasi temporali sono:

- fase pre-evento;
- fase di emergenza immediata, che include il processo di evacuazione;
- fase post-evento

e ciascuna richiede determinate e specifiche modalità di gestione.

In accordo con l'esigenza del caso studio è stata utilizzata una metodologia integrata per SRA e SRM a livello mesoscala che considera anche il contributo degli spazi aperti nell'ambiente costruito storico. Tale metodo si basa su un approccio matriciale per combinare gli elementi fisici di un sistema e la loro esposizione, considerando anche la sicurezza in termini di vite umane. I parametri necessari per l'applicazione del metodo possono essere determinati attraverso approcci rapidi che si basano su dati di letteratura o documentazioni ufficiali permettendone una veloce applicazione.

Le matrici principali utilizzate nelle varie fasi sono la matrice dei danni D e la matrice delle conseguenze M2. La matrice dei danni permette di classificare i livelli di danno degli spazi aperti in funzione del pericolo del sito e della vulnerabilità degli edifici. I risultati di questa prima valutazione sono la base della matrice delle conseguenze: i livelli di danno sono combinati con l'esposizione degli utenti per ottenere informazioni relative conseguenze alla quale sono esposti gli occupanti e al relativo processo di evacuazione.

I risultati non hanno una valenza numerica ma rappresentano un grado di informazione, relativamente alla gravità del rischio, utile ai decisori per attuare delle azioni di mitigazione e riduzione del rischio come:

- gestire il rischio;
- pianificare le emergenze,
- informare la comunità con delle attività di formazione riguardo le migliori azioni durante le fasi di evacuazione;
- intervenire sull'ambiente costruito;

L'efficacia di queste azioni consiste in una riduzione degli sforzi post evento sismico e maggior resilienza del costruito.

1.3.2.1 Le matrici SRA e SRM

L'approccio matriciale per valutare il rischio sismico si basa su alcune ipotesi relative alla individuazione delle componenti del rischio, dei livelli di danno, la correlazione dei gradi di danno con lo spazio aperto su cui si affacciano determinati edifici e l'inserimento della componente umana attraverso il parametro di esposizione. Il livello di indagine a si pone in una scala meso.

Le componenti del rischio sismico sono:

- il parametro di pericolosità H (Hazard) che fa riferimento alla gravità del terremoto in funzione del periodo di ritorno. Il parametro può essere ricavato dalle mappe nazionali di pericolosità sismica;

- la vulnerabilità V (Vulnerability) che rappresenta la propensione a danneggiarsi degli edifici;
- l'esposizione E (Exposure) e viene identificata con il numero di vite umane presenti nell'ambiente costruito prima che si verifichi il fenomeno.

I parametri H e V permettono di individuare il livello di danno degli edifici prospicienti un determinato spazio aperto in funzione della loro combinazione nella matrice di danno D.

Le informazioni che si ricavano da questa prima fase sono utilizzate nella matrice delle conseguenze e permettono di individuare il livello di sicurezza degli occupanti nella fase di evacuazione, valutando la correlazione tra danno, output della matrice D, ed esposizione degli occupanti.

L'adozione di un livello di indagine mesoscala permette di applicare metodologie rapide ma affidabili per la valutazione del danno, utilizzabili anche da personale poco qualificato. A sostegno di ciò le matrici per SRA e SRM esprimono il livello di rischio con tre componenti che rappresentano entità crescenti.

Le matrici consentono di individuare le azioni ottimali di mitigazione del rischio in riferimento a differenti zone d'intervento come:

- incremento di robustezza degli edifici;
- aumento della preparazione con una miglior gestione degli spazi aperti e dei piani di emergenza;
- aumento di consapevolezza e della conoscenza degli occupanti delle buone azioni da compiere.

L'immagine di seguito racchiude tutti gli aspetti principali e le fasi che caratterizzano il metodo.

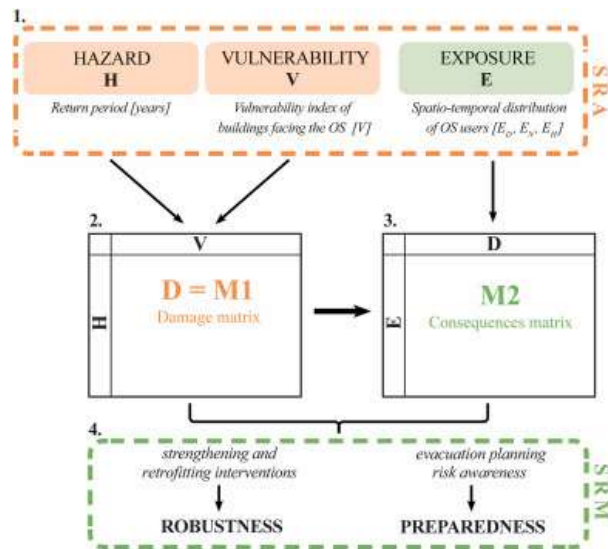


Figura 3: Schema delle fasi del metodo di valutazione per fenomeno sismico

1.3.2.2 La matrice di danno M1

La matrice di danno D descrive l'interazione tra gli occupanti e l'ambiente costruito post-terremoto. La valutazione degli effetti del sisma si concentra sull'individuazione di probabili scenari di danno per comprendere le possibili interazioni tra utenti e detriti presenti al suolo a seguito dell'evento.

La valutazione di H e V consente di individuare il livello di danno alla quale possono essere soggetti gli edifici e risulta fondamentale per studiare come le macerie possano ostruire le vie di fuga o di accesso dei soccorsi. Ciò permette di poter programmare anche la fase di intervento successiva all'evacuazione.

Il parametro H descrive il rischio a cui è esposto un determinato aggregato urbano. In relazione alla normativa italiana tale parametro è descritto dall'accelerazione attesa al suolo (PGA) e dalle mappe di pericolosità sismica nazionale. Le mappe restituiscono una distribuzione spaziale del valore di PGA per tutto il territorio nazionale, suddividendolo attraverso una maglia di 5km x 5km. A ciascuna area è associato un determinato valore di PGA attesa in funzione di differenti tempi di ritorno per un determinato periodo di riferimento.

Il parametro V descrive la vulnerabilità degli edifici, ovvero la propensione della struttura a subire danni a seguito dell'evento sismico. Il parametro V si determina attraverso metodi empirici che si basano su dati di letteratura o in relazione ad eventi sismici precedenti. I principali metodi utilizzati sono quelli semeiotici, che permettono un'applicazione su mesoscala, oppure metodi empirici, che restituiscono il livello di danno se correlato con il rischio H.

Le funzioni applicate nei metodi possono essere di due tipologie:

- Curve di vulnerabilità: si basano sulla determinazione del valore di danno medio μd ottenuto con il metodo macrosismico;
- Funzioni di fragilità: descrivono la probabilità di una struttura di subire un determinato livello di danno in funzione delle diverse entità di PGA.

Di seguito viene riportato uno schema che descrive la struttura della matrice di danno ed i dati di input necessari.

Il periodo di ritorno viene organizzato nelle righe della matrice mentre nelle colonne viene riportato il valore di vulnerabilità organizzato secondo tre intervalli di valore: low, medium e high.^[16]

		Severity of damage grade →		
		VULNERABILITY - V		
		LOW (< 0.55)	MEDIUM ($0.55 - 0.75$)	HIGH (> 0.75)
RETURN PERIOD	975	D2+ D3 D4-	D3+ D4 D5-	D4+ D5
	475	D1+ D2 D3-	D2+ D3 D4-	D3+ D4 D5-
	101	D0 D1 D2-	D1+ D2 D3-	D2+ D3 D4-
	50	D0 D1-	D0 D1 D2-	D1+ D2 D3-

Figura 4: Schema della matrice di danno M1

L'output che si ottiene dalla matrice, a seguito della combinazione dei valori H e V permettono di individuare i livelli di danno che ogni edificio può subire al variare del tempo di ritorno. I gradi di danno^[17] sono definiti in funzione della scala EMS-98:

- D5, Distruzione (danno strutturale molto pesante): collasso totale o quasi totale.
- D4, Danni molto gravi (danni strutturali gravi, danni non strutturali molto gravi): cedimento grave delle pareti; cedimento strutturale parziale di tetti e solai.
- D3, Danni da sostanziali a gravi (danni strutturali moderati, danni non strutturali gravi): crepe grandi ed estese nella maggior parte delle pareti. Le tegole del tetto si staccano. I camini si rompono sulla linea del tetto; guasto di singoli elementi non strutturali (tramezzi, pareti a timpano).
- D2, Danno moderato (lieve danno strutturale, moderato danno strutturale): crepe in molte pareti. Caduta di pezzi di intonaco abbastanza grandi. Collasso parziale dei camini.
- D1, Danni da trascurabili a lievi (nessun danno strutturale, danni lievi non strutturali): Crepe sottili in pochissime pareti. Caduta solo di piccoli pezzi di intonaco. Caduta di pietre sciolte dalle parti superiori degli edifici in pochissimi casi.
- D0, nessun danno.

1.3.2.3 I valori di H: periodo di restituzione e PGA

Il metodo si basa sulla correlazione tra i tempi di restituzione e i gradi di danno, riferiti alle descrizioni degli scenari di danno proposti dalla scala EMS-98 e gli stati limite adottati dal Codice delle Costruzioni.

I periodi di restituzione^[17] sono correlati agli Stati limite di danno espressi in normativa secondo quanto segue:

- Stato limite di danno-DLS (periodo di restituzione di 50 anni): gli elementi strutturali e non strutturali sono interessati da danni trascurabili o lievi che non pregiudicano la sicurezza degli utenti e la resistenza dell'edificio.

- Stato limite di danno -DLS (periodo di restituzione di 101 anni): leggere crepe in pochissimi muri e caduta sia di piccoli pezzi di intonaco che di pietre sciolte dalla parte superiore degli edifici.
- Life Safety Limit State-LLS (periodo di ritorno di 475 anni): crepe moderate e caduta parziale di nessun elemento strutturale; danni sostanziali agli elementi strutturali e mancanza di rigidità alle forze orizzontali; buone prestazioni alle forze verticali; performance della critica prossima al collasso.
- Collapse Limit State-CLS (periodo di ritorno di 975 anni): grave danneggiamento dell'assenza di elementi strutturali; danni molto pesanti agli elementi strutturali; collasso totale o quasi totale.

Nell'immagine riportata di seguito viene schematizzato quanto descritto precedentemente:

Limit states	DLS		DLS		LLS		CLS	
Return Periods	50-years		101-years		475-years		975-years	
Damage grades	D0	D1	D1	D2	D2	D3	D4	D5

Figura 5: Descrizione della correlazione tra stati limite, periodi di ritorno e gradi di danno

In accordo con le mappe di pericolosità sismica, il valore di PGA varia su scala comunale e in funzione del periodo di restituzione. Di conseguenza nella figura 6 sono riportati anche gli estremi inferiori e superiori in ogni casella per superare l'incertezza legata al valore di PGA che condiziona la classe di danno attesa. I limiti sono stati introdotti per ciascun periodo di ritorno per ciascun livello di danno come riportato nell'immagine seguente.

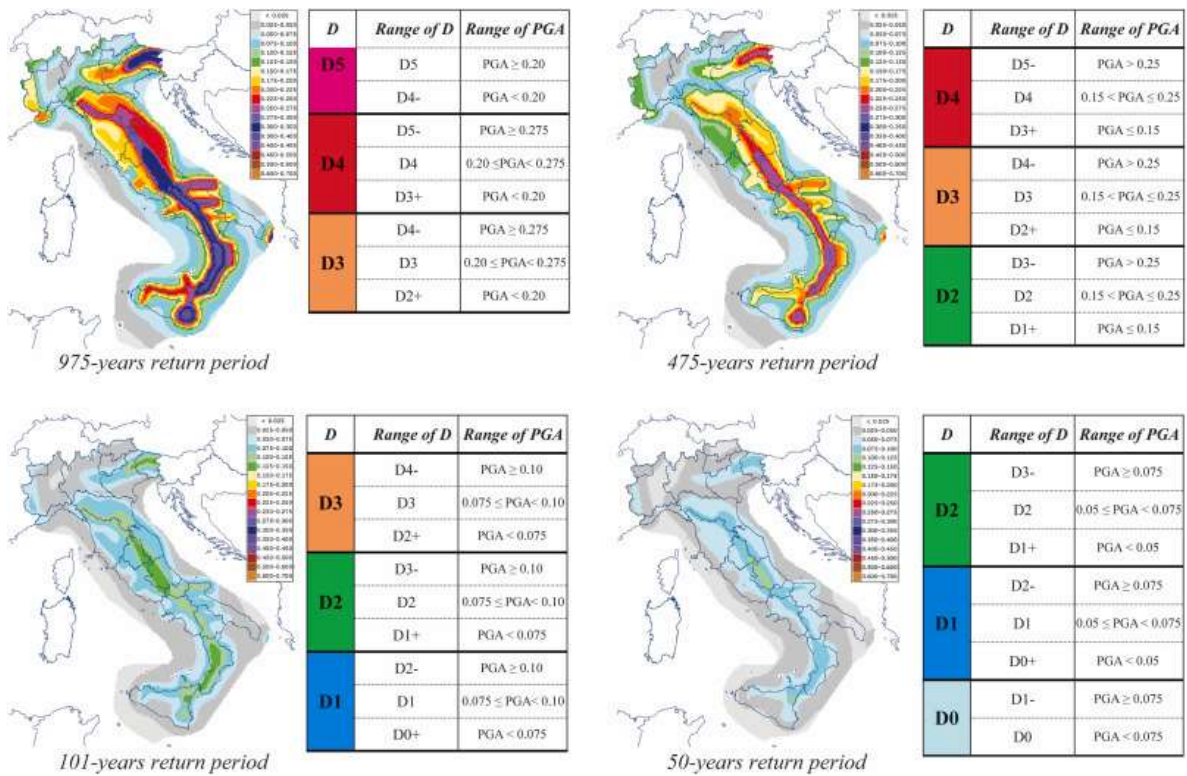


Figura 6: Rappresentazione della correlazione tra valori di PGA e gradi di danno per differenti tempi di ritorno

1.3.2.4 I valori di V: le curve di vulnerabilità macrosismica

Nel processo di determinazione dei livelli di danno, il parametro di vulnerabilità è descritto attraverso il metodo Formisano perché permette di:

- correlare il livello di danno, e dunque gli scenari, in funzione della PGA e dei periodi di ritorno;
- calibrare e validare per mezzo di osservazione diretta dei danni;
- individuare le condizioni critiche nella matrice dei danni.

La previsione del danno è espressa dal coefficiente μ_D secondo la seguente formula:

$$\mu_D = 2,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I+6,25 \times V-13,1}{Q} \right) \right]$$

I componenti di questa formula sono:

- I, l'intensità macrosismica
- V, l'indice di vulnerabilità normalizzato
- Q, il fattore di duttilità (pari a 2,3 per gli edifici ordinari in muratura non armata)

Il termine I è il contributo che permette di correlare il valore di previsione del danno con la PGA in quanto la sua formula è strettamente dipendente da tale valore come riportato di seguito:

$$I = \frac{\ln(PGA) + 7,073}{0,602}$$

La correlazione che si ha tra μ_d e PGA è riportata nel seguente grafico:

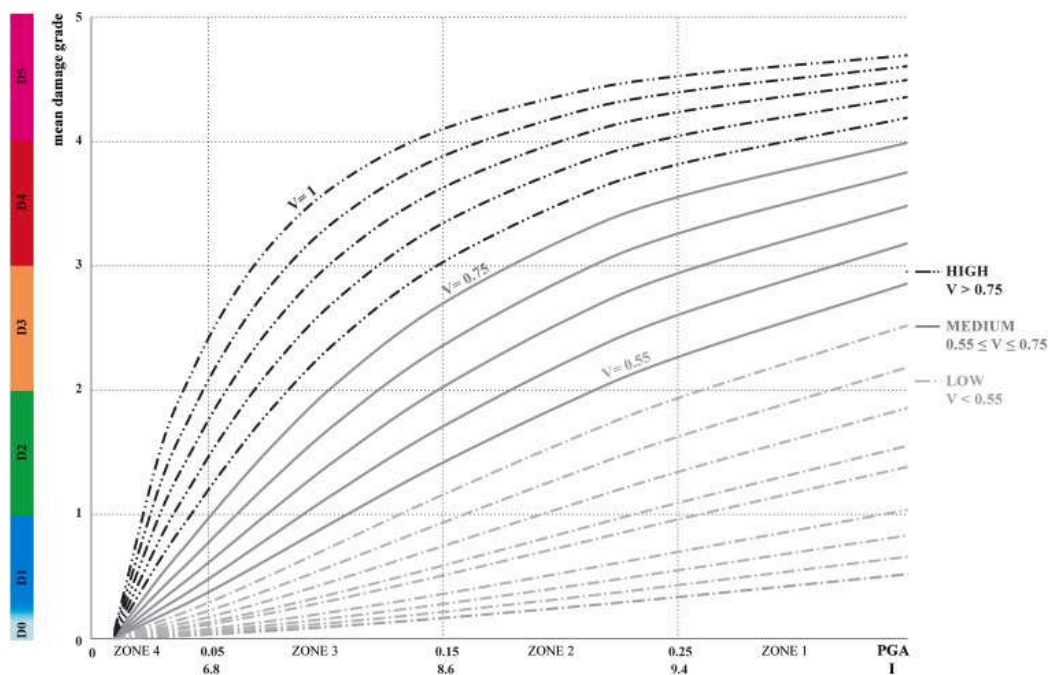


Figura 7: Grafico che rappresenta la correlazione tra il grado di danno e PGA in funzione di differenti intervalli di vulnerabilità

Si può evincere che i valori di previsione del danno μ_d non sono sottostimati per accelerazioni di grande entità, non sono sovrastimati per i valori di PGA nelle zone sismiche di terza categoria mentre può causare una sovrastima per valori di PGA in zona 4. Ciò permette di mantenere un approccio conservativo nelle zone 1 e 2, ovvero quelle con più alto rischio sismico.

1.3.2.5 La matrice delle conseguenze M2

Attraverso la matrice delle conseguenze il metodo considera la componente comportamentale umana e come essa può condizionare il livello di esposizione al rischio degli occupanti. I parametri utilizzati nella matrice sono il livello di esposizione E, che dipende dalla presenza di occupanti, e gli scenari di danno D.

Il parametro E di esposizione rappresenta il numero di utenti negli spazi aperti, considerati nell'area di studio, e nelle aree interne delle strutture che possono comunicare con gli spazi aperti. Un aspetto importante è la variazione nel tempo del valore di utenti all'interno degli spazi aperti e chiusi. L'oscillazione del valore di esposizione ha una cadenza giornaliera ma anche stagionale.

La variazione in periodi a breve termine è dovuta alle differenti fasce orarie giornaliere e alle conseguenti attività svolte dalle persone, come ad esempio il flusso di lavoratori, di turisti o il fenomeno di assembramenti di massa in corrispondenza di eventi. Le variazioni a lungo termine sono dovute, invece, a fenomeni che coinvolgono un numero di persone maggiore e seguono, molto spesso, una cadenza ciclica in funzione delle stagioni.

L'oscillazione di tale fattore implica una variabilità del numero di vite umane che sono esposte potenzialmente al rischio. Un altro aspetto da considerare riguarda la tipologia di edificio, la sua destinazione d'uso e le attività che sono svolte al suo interno poiché tali fattori influiscono sul numero di persone che possono potenzialmente subire danni.

Si è notato che la tipologia di edificio influisce notevolmente sulla esposizione dell'individuo: gli occupanti di edifici non residenziali sono più esposti a possibili conseguenze rispetto a occupanti di edifici residenziali poiché la familiarità con la struttura permette un movimento più agevole della persona durante la fase di evacuazione. Una ulteriore distinzione deve essere fatta per tutti gli edifici di carattere pubblico che possono ospitare, al momento dell'evento sismico, più persone nelle ore diurne in concordanza con gli orari di apertura.

La quantificazione delle persone presenti nell'ambiente costruito può essere eseguita a livello di microscala, attraverso gli indici di affollamento e di destinazione d'uso delle strutture, ma anche a livello macroscala attraverso banche dati.

In funzione del grado di dettaglio dell'indagine si possono scegliere differenti modalità di determinazione del parametro di esposizione.

La valutazione dell'occupazione dell'edificio si ottiene moltiplicando l'indice di affollamento per l'area edificata che ospita una determinata attività. Il grado di occupazione può essere valutato rispetto ad una differente condizione di utilizzo dell'ambiente: si possono distinguere condizioni di utilizzo ordinario della struttura e dello spazio aperto e condizioni di utilizzo straordinarie in corrispondenza di eventi, raduni o festival che causano una concentrazione di persone a m^2 superiore agli indici proposti dalla normativa.

Il quadro normativo italiano propone dei coefficienti di affollamento con la linea guida UNI10339:1995 nella quale sono riportati gli indici di affollamento di edifici di riferimento progettuali ma sono assenti coefficienti di dati reali.

Per completare la caratterizzazione degli occupanti deve essere eseguita anche una distinzione in termini di età così da poter eseguire una distinzione comportamentale legata alla capacità di movimento e alla vulnerabilità specifica individuale.

			Severity of consequences				
			DAMAGE SCENARIO - D				
			D1	D2	D3	D4	D5
E_H - Exposure of holiday	HIGH	(31.14 - 46.37)	II	III	IV	V	V
	MEDIUM	(15.87 - 31.13)	I	II	III	IV	V
	LOW	(0.61 - 15.86)	I	II	II	III	IV
E_N - Exposure of night	HIGH	(26.85 - 54.98)	II	III	IV	V	V
	MEDIUM	(18.70 - 36.84)	I	II	III	IV	V
	LOW	(0.54 - 18.69)	I	II	II	III	IV
E_D - Exposure of day	HIGH	(18.70 - 27.90)	II	III	IV	V	V
	MEDIUM	(9.47 - 18.69)	I	II	III	IV	V
	LOW	(0.24 - 9.46)	I	II	II	III	IV

Figura 8: Schema della matrice delle conseguenze M2

La matrice ha la seguente struttura:

- righe: sono riportati i valori di esposizione che dipendono dalle caratteristiche degli utenti interni al sistema studiato. Si devono distinguere i valori in funzione della fascia oraria;
- colonne: sono riportati gli scenari di danno espressi secondo i gradi della matrice di danno D;

mentre come output restituisce il livello di sicurezza degli utenti per differenti scenari di danno nella fase di emergenza ed evacuazione.

I livelli di sicurezza sono classificati in 5 livelli, in funzione della loro severità dovuta alla possibile interazione dell'utente con l'ambiente costruito nella fase post sisma, come riportato di seguito:

- V- CATASTROFICO: il livello di sicurezza è quasi nullo in quanto i detriti sono diffusi e gli spazi aperti sono totalmente inutilizzabili per la fase di evacuazione;
- IV- SERIO: il livello di sicurezza è grave in quanto un'alta percentuale degli spazi aperti è occupata dai detriti e alcune vie di fuga sono interamente bloccate;
- III- MODERATO: il livello di sicurezza è gestibile in quanto l'emergenza è limitata ad alcuni crolli di strutture o di elementi non strutturali. In questo livello gli utenti possono seguire le procedure di evacuazione autonomamente;
- II- INFERIORE: il livello di sicurezza è adeguato e l'emergenza può essere adeguatamente gestita perché gli spazi aperti si possono ritenere liberi e sicuri;
- I- TRASCURABILE: il livello di sicurezza è sufficiente e gli spazi aperti sono completamente agibili e non ci sono danni agli edifici.

Nella seguente immagine sono riportati i valori numerici dei parametri che compongono la matrice.

		DAMAGE SCENARIO - D				
		1	2	3	4	5
EXPOSURE - E	5	5	10	15	20	25
	4	4	8	12	16	20
	3	3	6	9	12	15

Rating	Level of severity	Descriptor	Scenario descriptions
20 - 25	V	CATASTROPHIC	Negligible safety conditions: debris are widespread, and the OS is totally unavailable to evacuation purposes.
15 - 16	IV	SERIOUS	Serious safety conditions: high percentage of OS area is occupied by debris, and some routes may be entirely blocked.
10 - 12	III	MODERATE	Tolerable safety conditions: the emergency is controlled due to the presence of few debris falling from some buildings or non-structural elements of some buildings. The autonomous evacuation process can be still performed.
5 - 9	II	MINOR	Adequate safety conditions: the emergency is carefully managed because the outdoor areas are free and safe.
3 - 4	I	NEGLIGIBLE	Satisfactory safety conditions: the entire OS is efficient and there is no danger from the surrounding HBE.

Figura 9: Schema di correlazione tra i punteggi della matrice M2 e le descrizioni degli scenari

Si deve precisare che tali numeri non hanno alcun significato fisico ma permettono di classificare i livelli di gravità delle possibili conseguenze per gli occupanti delle aree in analisi.

1.3.2.6 Le colonne della matrice delle conseguenze: gli scenari di danno

Le colonne della matrice descrivono l'entità del danno e dell'impatto che l'evento sismico può avere sull'aggregato urbano. Tale gravità non è rappresentata dai gradi di danno ma dalla percentuale di detriti al suolo che ostruiscono le vie di fuga o di intervento dei mezzi di soccorso. Rispetto ai gradi di danno, la massima area di detriti si verifica in concomitanza di D5, D4 in quanto tali scenari implicano, rispettivamente, un crollo totale o parziale delle facciate degli edifici ostruendo le vie di fuga. Lo scenario D3 invece considera dei crolli ma limitati solo ad elementi non strutturali. È necessaria, dunque, una valutazione degli scenari 4 e 5, dato che le condizioni di sicurezza urbana sono compromesse, per individuare come la quantità di macerie al suolo possa condizionare le scelte ed i comportamenti degli occupanti durante la fase di evacuazione.

1.3.2.7 Valutazione dell'esposizione e della vulnerabilità degli utenti

La variazione temporale dell'esposizione e la vulnerabilità degli utenti sono valutate con metodologie rapide a livello mesoscala. Il metodo si basa sulla caratterizzazione degli spazi grazie a informazioni presenti nei dati GIS, relativi alla geometria, e all'uso previsto delle aree

interne ed esterne^[5]. Successivamente queste informazioni sono combinate con i carichi degli occupanti [pp/m²] e in funzione degli orari di utilizzo degli spazi durante gli orari di apertura e chiusura delle attività svolte. I livelli di affollamento, espressi in pp/mq, dipendono dalla tipologia di attività e la tipologia di utenti che sono coinvolti. La successiva tabella viene utilizzata per definire il livello di affollamento in funzione delle principali regole per le temporalità, che si riferiscono alle aree aperte o chiuse al pubblico. Quindi, le tipologie di utenti per ciascuna area sono definite in base alla posizione degli utenti all'interno dell'ambiente costruito. Le categorie di utenti si caratterizzano in funzione della posizione in:

- Utenti interni residenti;
- Utenti interni non residenti;
- Utenti esterni solo passanti;
- Utenti esterni prevalenti, ovvero le persone che frequentano i dehor di bar e ristoranti

Ulteriori fattori che caratterizzano gli occupanti sono la familiarità con l'ambiente costruito, la conoscenza della sua disposizione urbana e i suoi pericoli. Tale aspetto ha permesso di affermare che solo i residenti possono essere classificati come pienamente familiari con il loro spazio di riferimento.

Altri aspetti che devono essere considerati nella caratterizzazione degli utenti è l'età, in quanto è strettamente correlata all'autonomia nel movimento, distinguendo tra bambini piccoli (da 0 a 4 anni), bambini assistiti dai genitori (da 5 a 14 anni), giovani utenti (da 15 a 19 anni), adulti (da 20 a 69 anni) e anziani (70+ anni). Ognuna di queste classificazioni sulle tipologie degli utenti fornisce temporalità aggiuntive nell'uso dell'ambiente costruito. In particolare, i dati sull'età degli utenti, raccolti in base alle statistiche a livello comunale, permettono di ritenere che:

- i bambini piccoli e gli anziani sono sempre presenti in casa;
- i bambini assistiti dai genitori e i giovani utenti non sono considerati a casa dagli 8 ai 13 anni perché sono a scuola;

- Gli adulti non sono considerati a casa dagli 8 ai 18 anni, poiché si trovano sul posto di lavoro/università, ad eccezione degli adulti disoccupati che sono sempre a casa.

Infine, la vulnerabilità degli utenti viene valutata anche in termini di posizione verticale nell'ambiente costruito, calcolando il numero di utenti al piano terra di ciascun edificio.

Destinazione d'uso	Carico occupante [pp/m ²]		Temporalità generali per l'applicazione del carico degli occupanti "aperta al pubblico"	Principali tipologie di utenti
	quando aperto al pubblico	quando vicino al pubblico		
<i>AREE INTERNE</i>				
residenziale	0.05	NA	0-24	Residenti
uffici, compresi gli edifici istituzionali	0.4	0.1	a seconda degli orari di apertura	Non residenti
scuola	0.7	0.1	a seconda degli orari di apertura	Non residenti
ospedale	0.1	0.1	0-24	Non residenti
commerciale	0.7	0.1	a seconda degli orari di apertura	Non residenti
Religioso	0.7	0	a seconda dell'orario per le funzioni religiose	Non residenti
museo	0.7	0.1	a seconda degli orari di apertura	Non residenti
teatro	1.2	0.1	a seconda degli orari di apertura	Non residenti
albergo	0.4	NA	0-24	Non residenti
bar e ristoranti	0.7	0.1	a seconda degli orari di apertura	Non residenti
sport	0.4	0.1	a seconda degli orari di apertura	Non residenti
<i>AREE ESTERNE</i>				
Dehors	0.4	0	a seconda degli orari di apertura	utenti outdoor prevalenti
aree di assembramento di massa	2	NA	a seconda dell'evento	utenti outdoor prevalenti
area pedonale	0.1	0	7-24	solo utenti esterni
carreggiate e aree di sosta	0	0	0-24	NA

Figura 10: Destinazione d'uso delle aree interne ed esterne nell'ambiente costruito: carico di occupante correlato, temporalità generali e tipologie di utenti ^[5]

Le informazioni ottenute da tali indagini permettono di ricavare il valore di rischio R: la vulnerabilità fisica è combinata con la pericolosità affinché si possa ottenere un fattore di rischio combinato unico su Vulnerabilità Fisica e Pericolo *PVH* descritto da tre livelli di rischio (basso, medio e alto). In questo modo, i fattori relativi all'evento e all'ambiente costruito sono descritti nel loro insieme per mostrare gli effetti combinati del pericolo nello scenario specifico.

I tre livelli uniformi di categoria descrittiva sono associati all'intervallo numerico da 0 a 1:

- $0 \leq \text{rischio basso} < 0,33$;
- $0,33 \leq \text{rischio moderato} < 0,67$;
- $0,67 \leq \text{rischio alto} \leq 1$.

L'esposizione E è calcolata come il rapporto tra la densità degli utenti dell'elemento della mesoscala valutato e la densità massima accettabile degli utenti, considerata pari a $4\text{pp}/\text{m}^2$. In particolare, la densità degli utenti è stata calcolata rispetto alla superficie interna lorda più l'area.

Vengono infine definiti tre fattori di rischio per descrivere la vulnerabilità degli utenti, ovvero:

- La quantità di utenti esposti rispetto alla popolazione nell'area UVp [-]. L' UVp viene quindi calcolato sommando il numero di utenti all'aperto e al piano terra di ciascun edificio dell'area e dividendo questa somma per il numero totale di utenti esposti. In questo modo, il fattore considera gli effetti diretti sugli utenti che dovrebbero evacuare.
- Il rapporto UVa [-] tra il numero di utenti che possono essere classificati come vulnerabili all'età (ad esempio, bambini piccoli, bambini assistiti dai genitori, anziani) e il numero totale di utenti esposti, in modo da considerare la vulnerabilità individuale nella reazione e nel movimento.
- Il rapporto UVf [-] tra il numero di utenti che sono considerati poco familiari o non familiari con l'ambiente costruito, il suo layout urbano e i suoi pericoli e il numero totale di utenti esposti.

Quando tutti gli utenti sono associati alle specifiche condizioni di vulnerabilità, i fattori di vulnerabilità degli utenti sono considerati continui tra 0 e 1, sottolineando così gli scenari di massima vulnerabilità per l'area data.

Come descritto precedentemente, ciascuno di questi fattori di rischio è definito numericamente per variare tra 0 e 1, rendendoli comparabili per l'intero compito di valutazione del rischio. Questa scelta garantisce che PVH , E , UVa , UVp , UVf e R possano essere comparabili anche in diversi scenari poiché le condizioni dei fattori di rischio massimo

e minimo sono uniche e ben definite. Di conseguenza, la valutazione tempo-dipendente e spazio-dipendente del caso di studio può essere completamente eseguita perché i fattori di rischio variano nello stesso intervallo.

Capitolo 2 – Fasi e materiali

La valutazione della vulnerabilità di un centro storico e il rischio alla quale sono esposti i suoi occupanti sono due fattori fondamentali per definire delle strategie di intervento durante le fasi dell'emergenza e le buone pratiche da attuare in fase di non emergenza, per aumentare la resilienza dell'ambiente costruito. L'obiettivo di questo lavoro di tesi è indagare la resilienza degli edifici che compongono il centro storico della città di Senigallia e i gradi di rischio a cui sono esposti i suoi occupanti per eventi come terremoti e alluvioni. L'obiettivo non risiede solamente nell'applicazione dei metodi precedentemente descritti, ma si vuole includere anche la componente umana attraverso la realizzazione di una simulazione del comportamento degli occupanti nell'ambiente costruito in determinati scenari. Al termine della caratterizzazione del centro storico, i suoi spazi aperti e gli edifici, è stata eseguita una simulazione con il software MassMotion 11.8 ([Oasys | MassMotion](#)), che combina il comportamento umano con quello degli edifici.

In questo capitolo sono riportate le fasi necessarie ad ottenere tutti i dati di input che permettono di realizzare gli scenari di rischio relativi ai due fenomeni indagati. Inoltre, un paragrafo è dedicato alla descrizione dell'utilizzo del programma di simulazione.

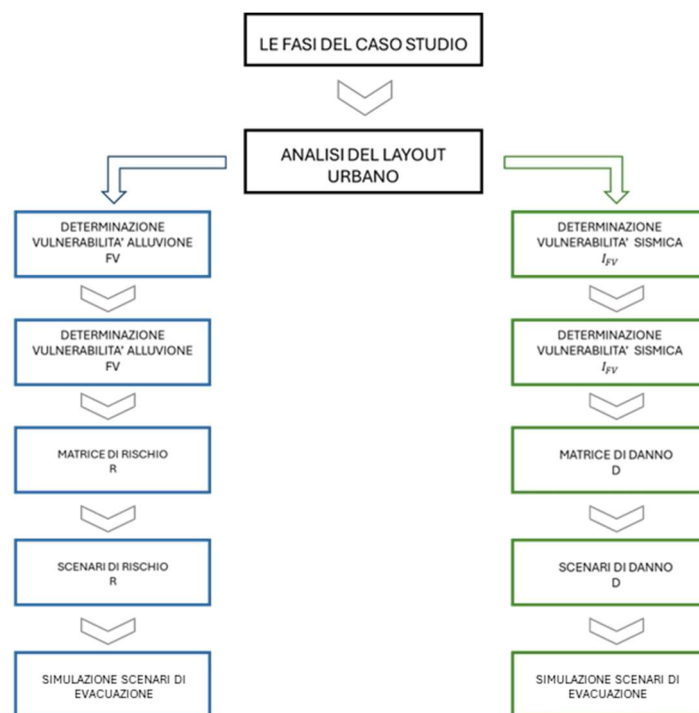


Figura 11: Schema delle fasi di lavoro

Di seguito sono elencati tutti gli step che permettono di ottenere i dati di input, output e la modellazione finale:

- Fase 1: Caratterizzazione dell'area oggetto di analisi e studio del layout urbano (sez. 2.1);
- Fase 2: Determinazione dei parametri di input. Tali valori sono la vulnerabilità degli edifici per fenomeno sismico e alluvionale. Nello specifico sono stati descritti tutti i contributi che possono condizionare il grado di vulnerabilità della struttura. La sezione di riferimento è 2.2.
- Fase 3: Descrizione delle matrici di danno D e rischio R. In questa fase sono stati descritti i passaggi di sistemazione dei dati di input all'interno delle matrici grazie ai quali si sono ricavati i valori di output. In questa sezione i dati sono relativi ai singoli edifici con un livello di indagine microscala. La sezione di riferimento è 2.3.
- Fase 4: Interpretazione dei valori di output delle matrici. In questo step sono stati definiti gli scenari di danno per il sisma e di rischio per l'alluvione attraverso l'elaborazione dei dati di output. Per incrementare il livello di dettaglio degli scenari per evento sismico, in questa sezione è stata indagata l'impronta delle macerie al suolo. In questo step il valore di danno, per sisma, o rischio, per alluvione, è stato associato a ciascun ambiente aperto con un livello di indagine mesoscala. La sezione di riferimento è 2.4.
- Fase 5: Simulazione degli scenari di evacuazione. In questa ultima fase si descrive il software Massmotion e le modalità di utilizzo. Sono descritte le caratteristiche principali dello strumento, i principali oggetti che si possono utilizzare, i criteri di selezione degli scenari e gli step di modellazione di uno scenario. La sezione di riferimento è 2.5.

2.1 Fase 1: Caratterizzazione dell'area di studio

In questo paragrafo si descrive la modalità generale con cui si giunge a definire una superficie di studio. I procedimenti descritti sono adattati al caso studio e discussi nel capitolo 3 ai paragrafi 3.2.2 e 3.2.3.

2.1.1 Definizione della superficie di studio

La definizione dell'area di studio consiste nel determinare i confini dell'ambiente costruito che sarà oggetto di analisi.

La scelta dell'area deve essere fatta in modo accurato, coinvolgendo tutti o i principali edifici di rilevanza storica, architettonica e culturale. Inoltre, devono essere compresi anche edifici strategici e le sedi dei principali enti della città, fondamentali nella fase di gestione delle emergenze. La superficie scelta deve rappresentare al meglio la composizione dell'intero centro abitato, rappresentando tutte le tipologie costruttive presenti. Inoltre, devono essere coinvolte tutte le possibili unità funzionali, cosicché siano rappresentate differenti tipologie di utenti e si possa avere una popolazione di occupanti più eterogenea possibile.

Il coinvolgimento di strutture strategiche o di rappresentanza nell'area di studio, come la sede del comune, della protezione civile e le strutture sanitarie, è necessario perché, in quanto edifici strategici, devono garantire la loro agibilità e rappresentare un luogo sicuro per la comunità a seguito delle calamità.

La presenza di edifici di carattere storico, culturale e architettonico all'interno dell'ambiente costruito indagato, lo studio delle loro vulnerabilità e del rischio alla quale sono esposti permette di quantificare le possibili perdite di beni culturali nel bilancio che si esegue a fine emergenza.

2.1.2 La schematizzazione dell'ambiente costruito

A seguito della scelta dell'area di studio, è necessario eseguire una schematizzazione della struttura urbana, attuando una distinzione dei principali elementi che lo compongono.

La schematizzazione viene eseguita scomponendo l'area in oggetti, ciascuno con una funzionalità specifica durante le diverse fasi dell'emergenza.

I principali componenti sono:

- gli edifici: devono essere individuate singole unità strutturali all'interno degli aggregati edilizi. Questa fase richiede uno studio della composizione urbana attraverso documentazioni ufficiali comunali. L'aggregato urbano è composto da singole unità strutturali a contatto, interconnesse o contigue e la loro individuazione non è scontata in quanto all'esterno si ha restituzione omogenea dell'intero complesso. L'unità strutturale US^[8] viene definita, all'interno della normativa italiana NTC 2018, come quella parte di edificio aggregato che ha una continuità strutturale dalle fondazioni alla copertura per quanto riguarda il flusso dei carichi verticali, è delimitata da spazi aperti, giunti strutturali o edifici contigui strutturalmente e tipologicamente diversi. Ogni singola unità strutturale può avere più destinazioni d'uso in funzione della varietà di attività che ospita. In caso di evento sismico, l'edificio rappresenta una fonte di pericolo per gli occupanti, mentre in caso di alluvione può essere inteso come un luogo sicuro;
- la rete urbana: le vie e le strade svolgono un ruolo fondamentale durante la fase d'emergenza in quanto rappresentano il percorso da intraprendere per raggiungere le zone sicure. Nella schematizzazione le strade sono indicate con il termine inglese "link", ovvero collegamento, in quanto connettono due incroci del layout stradale. Inoltre, rappresentano i percorsi preferenziali che l'acqua può seguire durante il fenomeno di alluvione ^[5];
- gli incroci: l'intersezione tra due strade viene indicata con un "node", ovvero nodo, perché rappresenta per l'utente un punto decisionale rispetto al percorso da intraprendere per raggiungere la zona sicura ^[5].

Tale schematizzazione restituisce una visione più pulita della struttura del centro abitato e permette di individuare le possibili zone sicure.

2.2 Fase 2: Determinazione dei parametri di input

In questa fase si caratterizzano gli edifici rispetto ai parametri di vulnerabilità per alluvione e per sisma. I metodi adottati per alluvione e sisma fanno rispettivamente riferimento al metodo descritto nella pubblicazione *“Assessing the spatiotemporal impact of users’ exposure and vulnerability to flood risk in urban built environments”* descritto al paragrafo 1.3.1 e al metodo descritto nella pubblicazione *“Seismic risk of Open Spaces in Historic Built Environments: A matrix-based approach for emergency management and disaster response”* al paragrafo 1.3.2.

2.2.1 Determinazione della vulnerabilità FV per alluvione

Come precedentemente descritto la vulnerabilità degli edifici rispetto ad un fenomeno alluvionale FV si determina attraverso la seguente formula ^[4]:

$$FV = EC \times SC$$

in cui EC (Exposure Component) rappresenta il contributo dell’orientamento della facciata dell’edificio, rivolta verso lo spazio di riferimento, rispetto al flusso dell’acqua, mentre SC (Sensitivity Component) considera il contributo delle caratteristiche intrinseche della struttura.

Il parametro EC dipende dalla valutazione di un solo parametro, mentre SC dipende dalla valutazione di cinque parametri. Ciascun parametro viene suddiviso in 4 classi di vulnerabilità secondo le lettere A, B, C, D alle quali viene associato rispettivamente il punteggio di 10, 40, 70, 100. Il punteggio 100 rappresenta la condizione peggiore mentre 10 rappresenta la condizione migliore per ciascun parametro. I pesi, così descritti, sono applicabili sia per valutare i contributi di EC sia di SC.

Il coefficiente EC intende riunire molteplici aspetti come l'ubicazione dell'edificio, l'orientamento della sua facciata principale e l'esistenza di aperture, sapendo che gli edifici situati in aree basse sono teoricamente più suscettibili alle inondazioni dovute al deflusso.

Le possibili configurazioni sono:

- A, parzialmente esposta al flusso con nessuna apertura;
- B, parzialmente esposta al flusso con presenza di aperture;
- C, completamente esposta al flusso senza aperture;
- D, completamente esposte al flusso con presenza di aperture;

La tabella successiva schematizza le possibili classi con i valori di riferimento. La condizione peggiore è rappresentata dalla classe D poiché la facciata si classifica come totalmente esposta al flusso in quanto ha direzione ortogonale alle aperture presenti. La configurazione migliore è rappresentata dalla classe A perché il flusso ha direzione parallela alla facciata che non presenta aperture.

ESPOSIZIONE AL FLUSSO		
A	parzialmente esposta al flusso con nessuna apertura	10
B	parzialmente esposta al flusso con presenza di aperture	40
C	completamente esposta al flusso senza aperture	70
D	completamente esposte al flusso con presenza di aperture	100

Tabella 1: Schematizzazione dei pesi del parametro EC

Il coefficiente rientra in un range di valori da 10 a 100.

Il parametro SC racchiude le informazioni sulle caratteristiche fisiche dell'edificio valutando:

- i materiali;
- la condizione;
- il numero di piani;
- l'età;

- lo stato di patrimonio.

Di seguito sono riportate le tabelle che schematizzano le condizioni di ciascuna caratteristica fisica e il relativo peso.

SENSITIVITY COMPONENT			SENSITIVITY COMPONENT			SENSITIVITY COMPONENT		
MATERIALE			CONDIZIONE			NUMERO DI PIANI		
A	Struttura in cemento armato/strutture in acciaio	10	A	No danno/ fessurazione	10	A	1 piano	10
B	Strutture in muratura	40	B	Leggera fessurazione con umidità	40	B	2 piani	40
C	Strutture in legno	70	C	Fessurazione generale, deformazioni	70	C	3 piani	70
D	Strutture in terra	100	D	Consistenti fessure e severo decadimento del materiale	100	D	4 o più piani	100

SENSITIVITY COMPONENT			SENSITIVITY COMPONENT		
ETA'			STATO DEL PATRIMONIO		
A	21° secolo	10	A	Strutture non classificate	10
B	Dal 20° al 21° secolo	40	B	In fase di classificazione	40
C	Dal 15° al 20° secolo	70	C	Di interesse nazionale	70
D	Fino al 14° secolo	100	D	Di interesse internazionale	100

Tabella 2: Schematizzazione dei pesi per i contributi SC

Il valore di SC si ottiene sommando il contributo di ciascuno dei cinque parametri ed è compreso nel range di 50-500. Successivamente si moltiplica per il valore di EC e si ricava il valore di FV, che può variare generalmente in un range tra 500 e 50.000. Questi estremi sono i riferimenti generali indicati nel metodo e sono stati utilizzati per normalizzare i valori ottenuti dallo studio attribuendo 0 a 50 e 100 a 500 per SC, mentre per FV 0 è stato attribuito a 500 e 100 a 50.00. Con questo passaggio i valori sono stati riportati allo stesso intervallo ed è stato possibile confrontare i due scenari alluvione possibili. Dunque, più basso è il valore normalizzato dell'indice, minore è il livello di esposizione, sensibilità o vulnerabilità dell'edificio.

Di seguito è riportata un'immagine che riassume i parametri che caratterizzano ciascun componente.

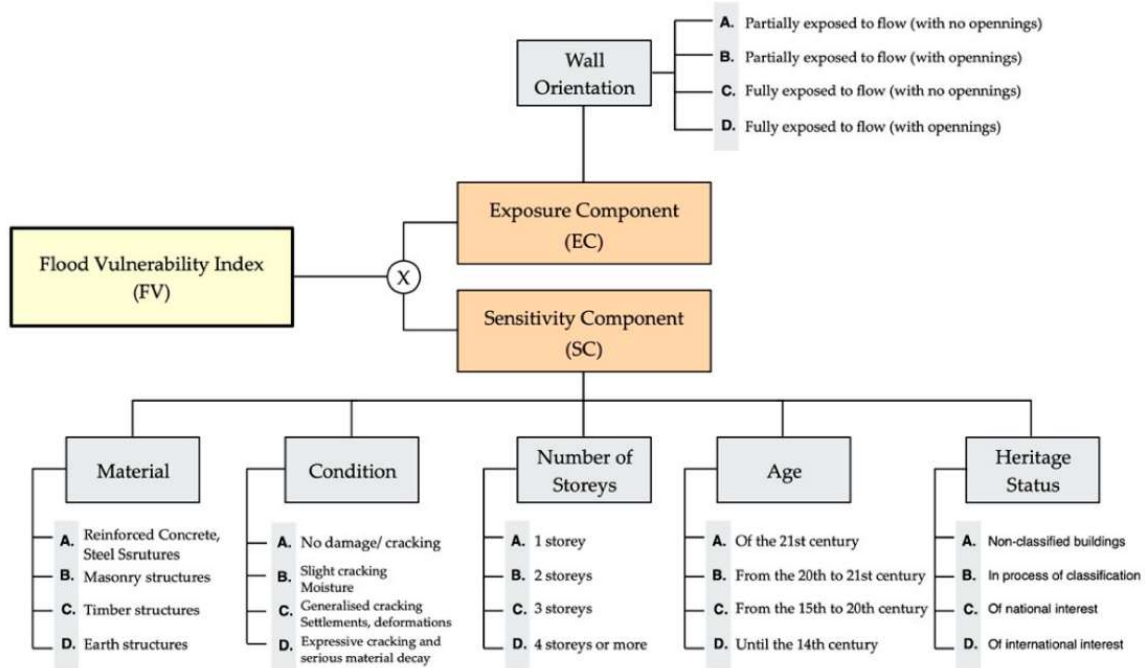


Figura 12: Riassunto dei parametri che compongono l'indice di vulnerabilità per alluvione

2.2.2 Determinazione della vulnerabilità I_{fv} per sisma

Il metodo ^[2][19] utilizzato per definire la vulnerabilità sismica degli edifici è stato elaborato definendo alcune ipotesi teoriche iniziali relative alla geometria e alla modalità realizzativa degli edifici. Ai parametri sono stati associati dei pesi e dei coefficienti per bilanciare il loro contributo.

Tale metodo è applicabile a qualsiasi caso studio in quanto fa riferimento ad aspetti generici e riscontrabili in ogni valutazione specifica.

2.2.2.1 Le ipotesi per la valutazione della vulnerabilità

L'obiettivo di questo metodo ^[2] è fornire una modalità rapida di valutazione degli edifici rifacendosi alle indicazioni presenti nella normativa italiana. Per la valutazione degli edifici in muratura sono state eseguite le seguenti ipotesi:

- le connessioni tra le pareti ortogonali sono trascurabili;
- le connessioni con i solai orizzontali sono trascurabili;

rendendo possibile il verificarsi di meccanismi di collasso locale fuori dal piano della parete di facciata, come il ribaltamento.

Questa tipologia di meccanismo di collasso può coinvolgere tutta la facciata o porzioni di essa e si verifica nelle situazioni in cui la muratura si può definire elemento rigido. La muratura si comporta come un elemento rigido durante un meccanismo di collasso nel momento in cui, grazie alla modalità realizzativa, i blocchi che la compongono rimangono uniti tra loro evitando fenomeni di sgretolamento.

2.2.2.2 I contributi al parametro di vulnerabilità

Il valore di vulnerabilità sismica si può determinare attraverso la definizione di cinque coefficienti che condizionano la formazione della catena cinematica che attiva il meccanismo di ribaltamento.

A ciascuno dei cinque parametri viene assegnato un peso W_i e un relativo coefficiente c_j , che dipende dalla classe di appartenenza dell'edificio, che varia da A a D, rispetto a quella specifica caratteristica. La definizione dei valori di W_i e c_j è stata effettuata usando analisi parametriche.

Come prima cosa sono state definite le proprietà di un edificio in muratura standard:

- tre piani
- 3,2 metri di altezza d'interpiano;
- peso specifico della muratura di 18kN/mm^3 ;
- lunghezza della facciata di 7m;
- solaio in legno con travi principali ortogonali alla facciata;
- spessore delle pareti di 60 cm;
- snellezza della facciata di 11,5;
- tetto leggermente spingente;
- 15% di aperture rispetto la superficie totale della facciata;

successivamente si è definito il moltiplicatore dei carichi orizzontali rispetto alla condizione migliore e peggiore rispetto le quattro classi di un parametro mentre gli altri rimangono fissi. Si valuta la variazione percentuale del moltiplicatore per le classi A, B, C rispetto alla classe D, alla quale viene associato il valore 1 e si determina il valore del coefficiente c_j in base a tale variazione.

Invece, il peso del parametro W_i è stato determinato osservando la differenza percentuale del moltiplicatore tra il valore più basso, quindi la classe migliore, e quello più alto della classe peggiore D per poi essere normalizzati nel range 1-100.

Le caratteristiche di un edificio in muratura standard riportate precedentemente sono state utilizzate come valori di riferimento per quegli edifici di cui non è stato possibile reperire informazioni tramite documenti ufficiali e strumenti come Google Maps.

L'indice di vulnerabilità IV_f è determinato con la sommatoria dei pesi dei parametri moltiplicati per i relativi coefficienti di classe secondo la seguente formula:

$$IV_f = \sum W_i \times c_j$$

I cinque parametri studiati possono essere facilmente determinati attraverso indagini esterne in situ oppure tramite strumenti come Google Maps e Google Earth ([Google Maps](https://www.google.com/maps), earth.google.com/static/multi-threaded/versions/10.66.0.0/index.html?); in caso di indisponibilità di informazioni si possono attribuire i valori dell'edificio standard descritto precedentemente.

I parametri sono:

- W_1 : numero di piani. È il parametro che ha maggior peso in quanto condiziona fortemente la risposta di una facciata alla sollecitazione per sisma perché all'aumentare del numero di piani si verifica una riduzione del valore del moltiplicatore dei carichi orizzontali. Inoltre, considerando i piani semplicemente appoggiati alla facciata essa non ha capacità di contrastare l'azione di spinta dei solai, causando il ribaltamento.

- W_2 : peso specifico. È il coefficiente che ha meno peso in termini di contributo e all'aumentare del peso aumenta il valore del moltiplicatore α . In assenza di dati specifici il metodo consente di utilizzare i valori proposti dalla normativa riassunti nella tabella "Tabella C8.5.1" nelle NTC del 1028.
- W_3 : snellezza, intesa come rapporto tra l'altezza totale della facciata e il suo spessore. È possibile fare riferimento al valore medio o minimo in base alla scelta eseguire una valutazione più o meno sfavorevole. Tale parametro ha un forte influenza nella valutazione della vulnerabilità.
- W_4 : tipologia di copertura. Viene eseguita una distinzione tra copertura spingente o piana. Questo parametro indaga l'effetto della spinta trasferita in sommità della facciata, che si manifesta per coperture spingenti. In questa configurazione l'azione spingente e la componente sismica verticale della copertura si sommano all'azione sismica orizzontale, amplificandone l'effetto negativo sulla facciata.
- W_5 : aperture. Questo parametro valuta la percentuale di aperture rispetto alla superficie totale della facciata in quanto l'attivazione del meccanismo di ribaltamento è accentuata in presenza di un elevato numero di bucatore che causa una disomogeneità di sezione del macro-elemento. La percentuale è valutata come il rapporto tra la superficie totale della facciata e quello dell'apertura. La sua influenza è minore della tipologia di copertura, della snellezza, del numero di piani ma maggiore del peso specifico.

Nella seguente tabella sono riassunti i valori dei pesi W_i e dei coefficienti di ciascuna classe c_j .

Parameters P_i		Class c_j				Weight W_i
P1	Floors number	<i>1 floor</i>	<i>2 floors</i>	<i>3 floors</i>	<i>4 or more floors</i>	29.69
		0.25	0.36	0.52	1	
P2	Specific weight [kN/m ³]	<i>greater than 23</i>	<i>from 20 to 22</i>	<i>from 17 to 19</i>	<i>from 11 to 16</i>	8.59
		0.76	0.80	0.83	1	
P3	Slenderness	<i>less than 9</i>	<i>from 10 to 12</i>	<i>from 13 to 17</i>	<i>greater than 18</i>	30.08
		0.23	0.30	0.49	1	
P4	Roof type	<i>flat roof</i>	<i>non-pushing roof</i>	<i>slightly-pushing roof</i>	<i>pushing roof</i>	22.66
		0	0.42	0.59	1	
P5	Openings	<i>less than 4%</i>	<i>from 5% to 10%</i>	<i>from 11% to 18%</i>	<i>greater than 18%</i>	8.98
		0.54	0.77	0.88	1	

Figura 13: Schematizzazione dei valori dei pesi e dei coefficienti dei contributi per l'indice di vulnerabilità sismica

2.2.2.3 I coefficienti aggiuntivi

Il metodo propone l'utilizzo di due coefficienti aggiuntivi che considerano ulteriori aspetti che condizionano il fenomeno di ribaltamento di piano, garantendo un valore di vulnerabilità più accurato.

La formula proposta precedentemente diventa dunque:

$$IV_f = \left(\sum W_i \times c_j \right) \times C1 \times C2$$

I coefficienti C1 e C2 consentono di valutare rispettivamente:

- C1, lo stato di conservazione. Aumenta l'indice di vulnerabilità in funzione di un crescente stato di danneggiamento, che deve essere giudicato rispetto al suo grado di severità.
- C2, i dispositivi antisismici. Il coefficiente riduce la vulnerabilità in base all'efficienza con cui sono posizionati i dispositivi per la prevenzione di fenomeni di ribaltamento della facciata. Tale coefficiente, dunque, considera due possibili

situazioni: quella in cui i dispositivi non siano efficaci (caso 1) e quella in cui i dispositivi siano posizionati in modo efficace a contrastare il ribaltamento (caso 2).

Per ciascuna delle due condizioni il coefficiente può assumere valori differenti. Di seguito è riportata la tabella riassuntiva per i valori di C1 e C2.

Additional qualitative coefficients			
C1	State of conservation	absence of any cracks	1
		few OOP cracks	1.05
		several OOP cracks	1.10
C2	Anti-seismic devices case 1	present on all storeys	0.55
		present on the top and $n-1$ storeys	0.65
		present on the top or $n-1,2$ storeys	0.85
C2	Anti-seismic devices case2	present on all storeys	0.26
		present on the top and $n-1$ storeys	0.31
		present on the top or $n-1,2$ storeys	0.43

Figura 14: Schematizzazione dei valori delle classi dei coefficienti aggiuntivi C1 e C2

Individuati i valori di vulnerabilità di tutti gli edifici interni all'area di studio, il metodo richiede che i valori numerici siano normalizzati affinché possano rientrare in un range tra 0 e 1. L'obiettivo di tale normalizzazione è rendere confrontabili i valori di vulnerabilità tra differenti condizioni e scenari.

2.3 Fase 3: Definizione delle matrici

Come step successivo si devono inserire i valori ricavati nelle matrici di danno, in caso di evento sismico, e di rischio, in caso di alluvione nelle rispettive matrici al fine di ricavare informazioni relative al rischio associato agli spazi aperti dell'area oggetto di studio. Le matrici sono composte con i valori degli indici dei singoli edifici, in quanto in questo passaggio il livello di indagine è ancora a microscala.

2.3.1 Alluvione: matrice di rischio R

Il metodo di valutazione del rischio per alluvione richiede che, successivamente alla determinazione dei valori di vulnerabilità delle strutture descritto al capitolo 2.2.1, si organizzino i dati ottenuti nelle righe della matrice con andamento decrescente. Il livello di dettaglio della matrice è microscala e permette di indagare il livello di rischio del singolo edificio.

Nelle colonne della matrice sono riportati tre valori di pericolo come descritto nel paragrafo 1.3.2.4, anch'essi ordinati secondo un valore crescente di pericolosità. Nell'immagine seguente è riportato lo schema della matrice di rischio.

RISCHIO ALLUVIONE		RISCHIO		
		BASSO	MODERATO	ALTO
		$V < 2 \text{ m/s} \vee a \times v < 3 \text{ m}^2/\text{s}$	$V > 2 \text{ m/s} \wedge 3 \text{ m}^2/\text{s} < Y \times V < 7 \text{ m}^2/\text{s}$	$V > 2 \text{ m/s} \wedge a \times v > 7 \text{ m}^2/\text{s}$
VULNERABILITA'	ALTO $V > 40$	RISCHIO MEDIO	RISCHIO ALTO	RISCHIO ALTO
	MODERATO $20 < V < 40$	RISCHIO BASSO	RISCHIO MEDIO	RISCHIO ALTO
	BASSO $V < 20$	RISCHIO BASSO	RISCHIO BASSO	RISCHIO MEDIO

Figura 15: Matrice di rischio per fenomeno alluvionale

Intersecando la riga di riferimento con le colonne di pericolosità si ottiene un valore crescente di esposizione al rischio per quel determinato edificio in analisi. Si può notare che ad una vulnerabilità di valore "basso" corrisponde come massima gravità di rischio un valore

“medio” mentre per una vulnerabilità “alta” è più frequente che l’edificio ricada in un rischio “alto”.

Nel caso studio, la matrice è stata utilizzata con un approccio parametrico in cui sono stati stimati i tre livelli di pericolosità per entrambe le direzioni del flusso d’acqua. Questo approccio ha permesso di definire il grado di esposizione in funzione dei coefficienti di vulnerabilità per ciascuna condizione di rischio (basso, moderato e alto) , esclusa la colonna di rischio alto e moderato in quanto il valore di velocità è troppo elevato e non permetterebbe il movimento delle persone.

2.3.2 Sisma: matrice di danno D

Anche per l’evento sismico il valore di vulnerabilità, determinato con il metodo descritto nel capitolo 2.2.2, insieme alla pericolosità, rappresentata dalla PGA, sono i parametri di input necessari alla matrice di danno D. Come per l’alluvione, il livello di dettaglio della matrice è microscala e permette di indagare il livello di rischio del singolo edificio.

La struttura della matrice è rappresentata dall’immagine seguente:

Severity of damage grade →

		VULNERABILITY - V		
		LOW (< 0.55)	MEDIUM ($0.55 - 0.75$)	HIGH (> 0.75)
RETURN PERIOD	975	D2+ D3 D4-	D3+ D4 D5-	D4+ D5
	475	D1+ D2 D3-	D2+ D3 D4-	D3+ D4 D5-
	101	D0 D1 D2-	D1+ D2 D3-	D2+ D3 D4-
	50	D0 D1-	D0 D1 D2-	D1+ D2 D3-

Figura 16: Matrice di danno M1

I valori di vulnerabilità, calcolati secondo quanto detto nella sezione 2.2.2, sono organizzati secondo un ordine crescente e poi suddivisi in tre categorie:

- Basso (low), per valori inferiori a 0,55;
- Medio (medium), per valori compresi tra 0,55 e 0,75;
- Alto (high), per valori superiori a 0,75;

Le classi di pericolo sono rappresentate dai tempi di ritorno, ai quali è associato un corrispondente valore di PGA.

La matrice può essere utilizzata in funzione di due differenti ipotesi con diversi scopi nelle fasi di valutazione e gestione del rischio.

La prima ipotesi utilizza la matrice per prevedere il danno a cui è sottoposto un determinato edificio. In questo caso il valore di PGA attesa si ricava dalle mappe di pericolosità sismica, che restituiscono valori di accelerazione attesa al suolo in funzione della posizione del sito in analisi. Il primo step consiste nell'individuare la classe di vulnerabilità a cui appartiene l'edificio, successivamente si sceglie la riga di riferimento in funzione dell'orizzonte temporale valutato e dall'intersezione di questi due parametri si individua il valore di danno atteso. Lo stato di danno può essere assunto come variabile tra l'estremo inferiore e superiore della casella, oppure si può definire in modo ancor più preciso se si è a conoscenza della zona sismica in cui ricade il sito in analisi. All'interno di ciascuna casella il grado di danno è suddiviso in tre valori: il primo è riferito a edifici localizzati in zona sismica 3, il valore centrale a zona sismica 2 e il terzo alla zona sismica 1. L'attribuzione della zona sismica avviene in funzione del valore di PGA, come mostrato nella seguente tabella.

SEISMIC ZONES <i>(475-years return period-LLS)</i>	ZONE 4	ZONE 3	ZONE 2	ZONE 1
PGA [g]	≤ 0.05	$0.05 < g \leq 0.15$	$0.15 < g \leq 0.25$	> 0.25

Tabella 3: Correlazione tra gli intervalli di PGA attesa e le zone sismiche

Nell'immagine successiva viene schematizzato l'utilizzo della matrice secondo l'ipotesi appena descritta.

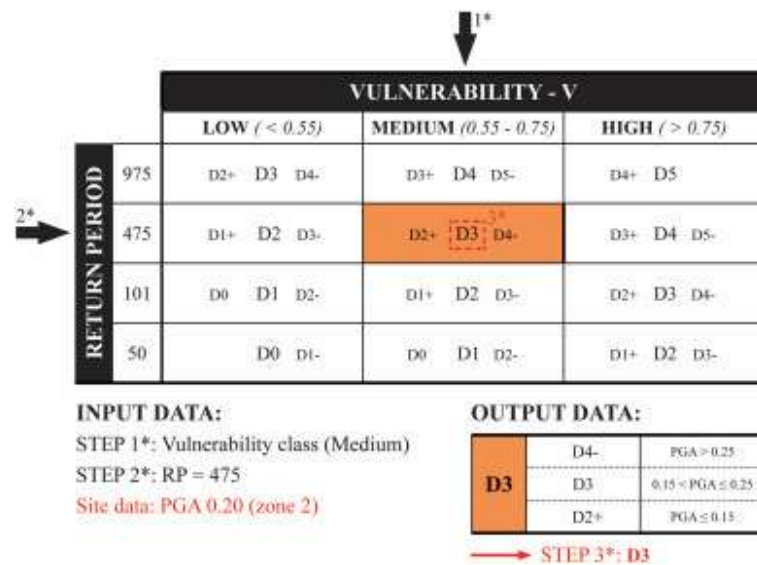


Figura 17: Esempio di utilizzo della matrice di danno per definire il livello di danno del singolo edificio

Un ulteriore utilizzo della matrice di danno permette di confrontare il rischio di un determinato edificio in diverse condizioni di PGA. Secondo questa ipotesi, scelta la classe di vulnerabilità e il periodo di ritorno, la cella di intersezione mostra i possibili stati di danno secondo gli intervalli di PGA. L'immagine riportata riassume l'utilizzo della matrice secondo questa ipotesi di utilizzo.

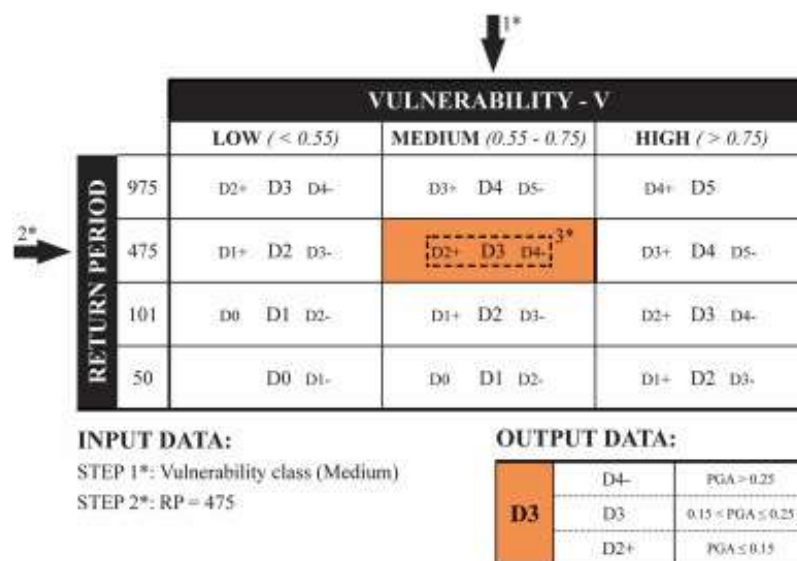


Figura 18: Utilizzo della matrice di danno permette di confrontare il rischio di un determinato edificio in diverse condizioni di PGA

La matrice di danno D restituisce in output i valori di danno di ciascuna unità strutturale. L'esigenza di questo lavoro di tesi è di ottenere i gradi di danno delle strutture e costruire gli scenari per ciascun tempo di ritorno; dunque, la matrice è stata utilizzata secondo la prima ipotesi.

La classificazione degli stati di danno, a cui fa riferimento il metodo, è stata definita per descrivere il danneggiamento limitatamente alla facciata, ovvero, considerando esclusivamente lesioni tipiche derivanti da cinematismi di ribaltamento fuori piano. La scala rispetta la divisione in sei gradi di danno della EMS-98, includendo il D0, e mantiene una correlazione con gli stati limite della normativa italiana (NTC2018). I gradi di danno più critici sono C e NC, rispettivamente collapse (collasso) e near collapse (prossimo al crollo), in quanto le facciate degli edifici sono ipotizzate coinvolte da un crollo parziale o totale che bloccano gli spazi aperti di riferimento.






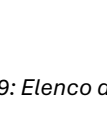
	ND	Assenza di lesioni
	LD	Assenza di lesioni dovute a meccanismi di I modo
	MD	Presenza di lesioni lievi legate a meccanismi di I modo; distacco e caduta di porzioni di intonaco
	SD	Gravi lesioni verticali da meccanismi di I modo in entrambi i lati della facciata; caduta di elementi decorativi e non strutturali
	NC	Crollo di almeno il 25% della facciata; distacco e dislocazione di macroelementi.
	C	Crollo di almeno il 75% della facciata

Figura 19: Elenco dei gradi di danno secondo le indicazioni EMS-98

2.4 Fase 4: Interpretazione dei valori di output

In questa fase sono stati elaborati e interpretati i valori e le informazioni forniti dalle matrici utilizzate in fase 3. L'elaborazione dei dati ha permesso di ottenere il grado di danno, in caso di sisma, e il grado di esposizione al rischio, per alluvione, degli spazi aperti tramite un processo di normalizzazione dei gradi dei singoli edifici. L'elaborazione dei dati consiste, invece, nell'individuazione e lo studio degli scenari di danno per entrambe le tipologie di fenomeno. Nelle successive sezioni viene specificato il procedimento per ciascun caso. L'esito delle valutazioni è quindi alla mesoscala, ovvero quella del singolo spazio aperto (strada o piazza). Solo per la produzione di macerie in caso di sisma (seconda parte di Sezione 2.4.2), il dato viene comunque analizzato alla microscala, ovvero relativamente alla singola unità strutturale, data l'origine dei crolli.

2.4.1 Alluvione: valori di output della matrice di rischio R

La struttura della matrice permette di parametrizzare il valore di rischio in funzione del contributo di vulnerabilità e pericolo. In questo passaggio è necessario passare dalle indicazioni relative alle singole unità strutturali al valore per lo spazio aperto di riferimento.

Il metodo proposto richiede, come ulteriore passaggio, che i valori di rischio di ciascun edificio siano correlati allo spazio aperto di riferimento. Per ciascuno spazio aperto sono state sommate le aree, in pianta, degli edifici che presentano lo stesso valore di esposizione. Successivamente si è ricavata la percentuale di ciascuna classe di esposizione facendo una proporzione con l'area totale degli edifici prospicienti lo stesso spazio aperto, e si è individuato come grado di esposizione dello spazio aperto quello con la percentuale maggiore.

Questo passaggio restituisce come output il valore di rischio PVH di ciascun spazio aperto in relazione al fenomeno alluvionale, dipendente dalle prestazioni delle strutture che vi si affacciano. La schematizzazione di questo valore permette di ottenere una mappa di rischio per esposizione all'alluvione.

2.4.2 Sisma: i valori di output della matrice di danno D

Come detto nel capitolo 2.3.2, la matrice restituisce i gradi di danno di ciascuna unità strutturale, ma l'esigenza del lavoro di tesi è ottenere informazioni relative agli spazi aperti. Quindi, come per l'alluvione, è stato necessario correlare i valori di danno dei singoli edifici allo spazio aperto attraverso la normalizzazione rispetto all'area in pianta della singola unità strutturale.

Per ogni spazio aperto si è ottenuto il valore di danno sommando le aree in pianta di tutti gli edifici con lo stesso grado di danno, convertendola nella relativa percentuale rispetto alla somma di tutte le aree degli edifici prospicienti quello spazio aperto e scegliendo il grado di danno con percentuale maggiore. Di seguito è riportato un esempio esemplificativo del procedimento descritto.

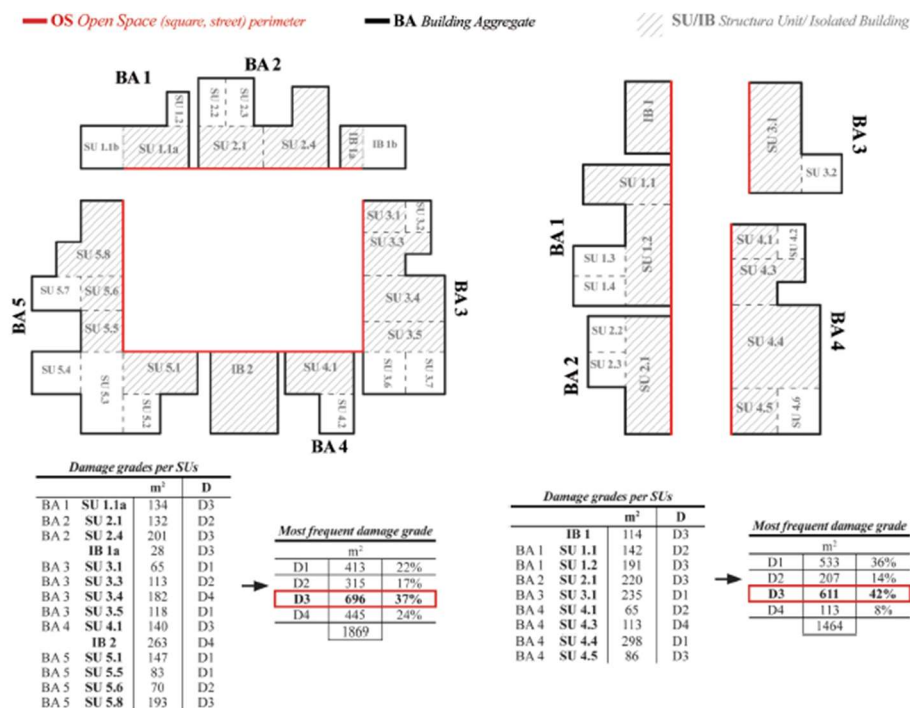


Figura 20: Esempio di normalizzazione dei gradi di danno dei singoli edifici per ottenere quello dello spazio aperto di riferimento

Tale procedimento è stato iterato per ogni tempo di ritorno per ottenere le mappe degli scenari di danno in funzione della PGA attesa.

I gradi di danno più critici sono C e NC, rispettivamente Collapse (collasso) e Near Collapse (prossimo al crollo), in quanto le facciate degli edifici sono ipotizzate coinvolte da crolli parziali o totali che bloccano gli spazi aperti di riferimento.

Infine, per l'evento sismico, è necessario definire l'ingombro delle macerie al suolo [3]. Questo dato è fondamentale per individuare le vie di esodo bloccate in fase di evacuazione e realizzare una simulazione del fenomeno più dettagliata. L'individuazione della porzione coinvolta dal meccanismo di ribaltamento è stata stabilita per i gradi di danno NC e C e si distingue per ciascuna tipologia edilizia.

L'entità di macerie si può definire in funzione dell'area d'ingombro al suolo degli spazi aperti, permettendo di individuare le vie o piazze ostruite o libere. Il parametro di riferimento è la profondità del cumulo di detriti w_D . Il metodo che permette di definire w_D è di tipo speditivo e geometrico perché, per definire la profondità del cumulo è stata studiata la sua geometria. L'ipotesi che sostiene la formulazione matematica è quella di considerare il volume della porzione di facciata ribaltabile V_D come un prisma a pianta rettangolare di sezione triangolare, come rappresentato nell'immagine seguente.

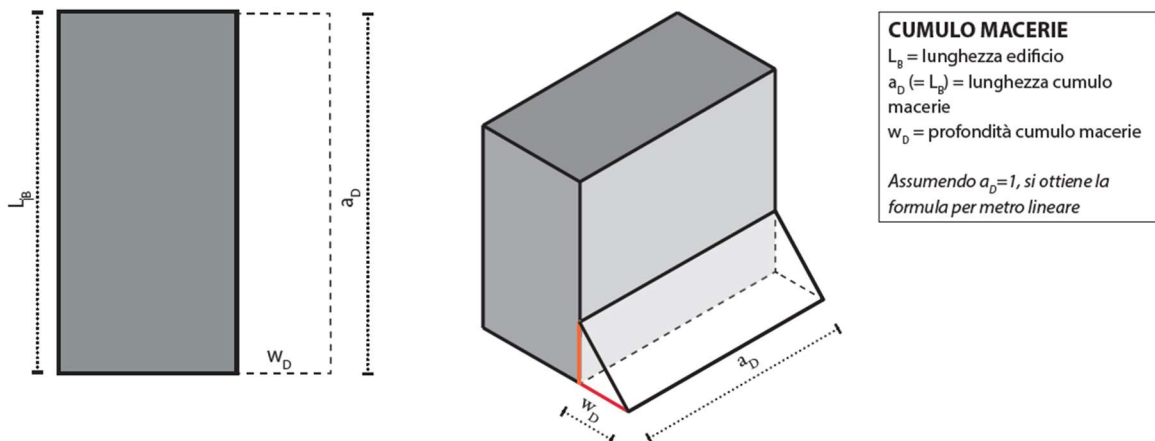


Figura 21: Rappresentazione del cumulo di macerie idela

Il volume V_D [3] è calcolato come prodotto dell'altezza della porzione ribaltabile, correlata al numero di piani e allo stato di danno C e NC, per lo spessore murario per metro lineare, poi, moltiplicato per un coefficiente (1,3) che tiene conto del maggiore volume dei materiali di demolizione.

La porzione della parete ribaltabile si determina grazie ad una correlazione tra il numero di piani e l'altezza della facciata in funzione della tipologia edilizia in analisi, come riportato nella seguente tabella.

H parete ribaltabile		
	NC	C
Edilizia seriale/Palazzi		
2 piani	$H_{tot}/2$	H_{tot}
3 piani	$H_{tot}/3$	H_{tot}
4 piani	$H_{tot}/2$	H_{tot}
5 piani	H_{2piani}	H_{tot}
6 piani	H_{2piani}	H_{tot}
Chiesa		
Facciata lato corto	H timpano	1/3 H
Facciata lato lungo	1/4 H	1/2 H

Tabella 4: Correlazione tra numero di piani e tipologia edilizia per determinare la porzione di facciata ribaltabile

Uguagliando il volume della porzione ribaltabile e del solido ideale (prisma), si ottiene la seguente formula:

$$V_D = w_D^2 \left(\frac{\tan \beta}{2n \cdot m} \right)$$

Da cui si può ricavare il valore di w_D :

$$w_D = \sqrt{\frac{V_D}{\left(\frac{\tan \beta}{2n \cdot m} \right)}}$$

I coefficienti presenti nella formula sono:

- β , l'angolo di attrito nella muratura. Il valore di β può ipotizzare fisso a 30° , inteso come valore medio tra l'angolo fornito da una ghiaia e sabbia sciolta;
- n , numero di piani dell'edificio;
- m , è un coefficiente sperimentale e adimensionale che considera il peso specifico della tipologia muraria. È un valore fisso pari a 1,25;

Tale formulazione è stata sperimentata su un set limitato di scenari di danno, studiati a seguito degli eventi sismici del Centro Italia nel 2016 e dell'Emilia-Romagna nel 2012. L'utilizzo di questa metodologia è applicabile solamente a edifici con danno NC o C perché è stato possibile studiare lo stato fessurativo e il grado di danneggiamento di edifici che hanno presentato crolli, totali o parziali, mentre non è stato possibile studiarli per edifici con danni minori. Invece, il coefficiente m è descritto da un unico valore in quanto le tipologie murarie studiate in questi due eventi sismici non rappresentano la varietà di tipologie murarie presenti su tutto il territorio italiano, dunque non è stato possibile attribuirgli un range di variabilità.

La combinazione dei valori di danno degli spazi aperti con l'ingombro delle macerie al suolo restituisce gli scenari di danno del centro storico di Senigallia in caso di sisma.

2.5 Fase 5: Modellazione e simulazione con MassMotion

In questa fase è stata eseguita una modellazione e poi una simulazione degli scenari definiti nelle fasi precedenti. L'obiettivo di questo step è studiare in modo interattivo l'esposizione al rischio degli utenti in ogni scenario, sia per eventi sismici sia per alluvioni.

La modellazione è stata eseguita utilizzando il software MassMotion^[12] che permette di integrare la componente comportamentale umana.

2.5.1 Le caratteristiche principali del software

MassMotion è un software di simulazione del comportamento degli occupanti, sviluppato per modellare il movimento delle persone all'interno di spazi complessi come edifici,

stazioni, aeroporti, centri commerciali, centri abitati e all'interno di manifestazioni che radunano un numero rilevante di persone. È utilizzato per migliorare la pianificazione degli spazi urbani e incrementarne la loro sicurezza e permette di analizzare come i pedoni si muovono attraverso spazi fisici, migliorando la progettazione degli ambienti e la gestione del flusso di persone.

Le principali caratteristiche del software sono:

- simulazione del movimento pedonale;
- analisi del flusso pedonale;
- modellazione in 3D interattiva;
- simulazione di scenari multipli;
- supporto per la pianificazione di eventi;

e garantiscono una visione completa dello scenario in analisi.

La peculiarità risiede nella possibilità di modellare un numero considerevole di persone e indagare come si interfacciano con l'ambiente urbano, individuando i percorsi più probabili che i pedoni seguiranno. Un ulteriore aspetto fondamentale è la possibilità di modellare le caratteristiche dei pedoni e il loro comportamento variando parametri come la velocità, le interazioni con altri pedoni e le loro preferenze di percorso.

Inoltre, fornisce dettagli riguardo il flusso di persone attraverso valori di densità, tempo di permanenza in determinate aree, e la formazione ingorghi, in punti precisi della via di fuga. Questo permette agli utenti di identificare potenziali problemi di sovraffollamento e inefficienze nel design. È particolarmente utile per verificare la sicurezza delle evacuazioni in caso di emergenza, simulando scenari di esodo rapido per valutare tempi e percorsi di uscita.

MassMotion è dotato di un motore 3D che consente di creare modelli realistici degli spazi da simulare e permette una visualizzazione dettagliata del movimento delle persone all'interno degli ambienti, aiutando a migliorare il design dello spazio o a risolvere problemi legati alla capienza.

In più, le visualizzazioni in tempo reale consentono di osservare il movimento pedonale da diverse angolazioni e di analizzare scenari complessi.

La caratteristica principale del software è quella di consentire l'esecuzione di simulazioni con scenari multipli e confrontarli tra loro. È possibile esaminare diversi progetti di layout o situazioni di emergenza per trovare la soluzione ottimale in termini di efficienza e sicurezza.

Infatti, la scelta di utilizzarlo in questo caso studio è proprio per valutare le condizioni di emergenza per sisma e alluvione ed eseguire un confronto dei risultati, in termini di sicurezza degli occupanti.

2.5.2 Principali oggetti della modellazione

Massmotion, come già anticipato, è un software che permette di modellare aspetti dell'ambiente in cui si muovono i pedoni e alcune caratteristiche dei pedoni in funzione dell'obiettivo dell'analisi. Dunque, è bene individuare i principali oggetti utilizzati nelle modellazioni e le loro funzionalità.

L'ambiente rappresenta lo spazio 3D in cui avviene la simulazione ed è una schematizzazione di quello reale. L'ambiente può essere costruito grazie agli strumenti di disegno nell'interfaccia del software oppure può essere importato utilizzando modelli architettonici realizzati con altri programmi dato che è possibile importare file .dwg o .ifc. L'ambiente può includere superfici pedonali, barriere, scale, ascensori e tutte le altre componenti possibili presenti in un ambiente generico.

Gli agenti, o pedoni, sono gli individui simulati all'interno dello spazio in analisi. Gli occupanti possono essere modellati in funzione della velocità di movimento, larghezza corporea e le destinazioni del loro spostamento. La modellazione delle qualità fisiche e comportamentali degli utenti permette di poter considerare differenti profili di occupanti, in accordo con le principali qualità che sono considerate nella determinazione dei valori di esposizione nei metodi descritti nei capitoli precedenti.

Le zone di transito, dette *floor* (piano), sono gli spazi nei quali i pedoni si muovono. Sono definite dall'utente e comprendono le aree pedonali come vie, strade ma anche piazze che delimitano la superficie su cui si può riversare il flusso di persone durante l'evacuazione.

I percorsi sono le possibili vie di fuga che i pedoni possono seguire durante l'esodo mentre le destinazioni sono l'obiettivo del loro movimento e spesso rappresentano le zone sicure durante le emergenze.

Durante il percorso i pedoni possono imbattersi in ostacoli, modellati come barriere, che non possono essere attraversati e nemmeno superati, condizionando sia il comportamento dei pedoni e sia le scelte dei percorsi di fuga.

2.5.3 Gli step principali di una modellazione in MassMotion

L'utilizzo del software prevede una serie di fasi definite che permettono di creare il modello e ricavare i risultati della simulazione pedonale. Le principali fasi sono:

- Creazione del modello 3D: realizzazione del modello dello spazio da analizzare. Il modello può essere realizzato nel software stesso oppure importato in formato CAD o BIM in quanto supporta file DWG, IFC o FBX. In questa fase si definisce l'architettura dello spazio calpestabile, includendo barriere, scale e ostacoli.
- Definizione delle aree e dei punti di accesso: in questa fase è necessario associare alle geometrie importate la loro funzionalità. Si deve selezionare l'oggetto e con tasto destro scegliere quale funzione associargli.

Le principali funzioni sono *floor*, ovvero il piano su cui si possono muovere i pedoni, *link*, elementi che collegano più *floor* adiacenti per garantire il passaggio dei pedoni da un *floor* all'altro, *barrier*, elementi che ostacolano e modificano il percorso dei pedoni, ed elementi che generano gli occupanti detti *portal*. I *floor* sono degli oggetti di modellazione che rappresentano le aree calpestabili sulle quali si possono muovere gli agenti, mentre i *portal* sono degli elementi di modellazione che permettono di generare gli agenti. Dunque, l'obiettivo è identificare le superfici pedonali, gli ingressi e le uscite a disposizione degli occupanti;

- Configurazione degli agenti: ovvero caratterizzare i pedoni. Si definiscono i profili dei pedoni con l'obiettivo di rappresentare tutte le tipologie di pedoni studiate durante l'applicazione del metodo per definire il valore di esposizione E. I principali parametri sono la velocità di camminata, la dimensione corporea e il comportamento;
- Definizione delle destinazioni e dei possibili percorsi: in questa fase si impostano i percorsi delle persone e le eventuali destinazioni. È possibile condizionare il movimento, i percorsi e le scelte degli occupanti per simulare scelte realistiche oppure randomiche;
- Esecuzione della simulazione: al termine della configurazione dell'ambiente e degli occupanti si procede alla simulazione. Il software calcola il movimento degli agenti all'interno dello spazio in base a una serie di parametri, come la densità pedonale, le interazioni tra agenti e gli ostacoli presenti. È possibile osservare la simulazione in tempo reale o in modalità accelerata. L'obiettivo di questa fase è simulare i movimenti pedonali, valutando l'interazione con lo spazio e tra di loro.
- Analisi dei risultati: dopo la simulazione, MassMotion fornisce una serie di strumenti per analizzare i risultati. Nello specifico caso studio indagato in questo elaborato, i principali indicatori ^[10] utilizzati per indagare le simulazioni in caso di alluvione sono:
 - Tempo di evacuazione normalizzato $T_{e,M}$, per cui maggiore è il valore maggiore è il tempo in cui un pedone è esposto al rischio;
 - Percentuale di pedoni non arrivati $N_{a,M}$, più il valore è alto più il rischio a cui sono esposti è elevato;

Inoltre, possono essere valutati degli indicatori che rappresentano i valori massimi, affinché si possa avere un approccio conservativo nella valutazione delle simulazioni in quanto gli scenari sono condizionati dalle condizioni esterne. Tali indicatori ^[10] sono:

- il tempo massimo di evacuazione $t_{max,evacuazione}$ [s], cioè quello dell'ultimo pedone che arriva in un'area di raccolta;
- il percorso di evacuazione più lungo d_{Max} [m];
- il numero di pedoni che non riescono ad arrivare in un'area di aggregazione n_{un} [pp].

Un ulteriore strumento per valutare i risultati delle simulazioni sono le curve di evacuazione in quanto permettono di indagare il livello di occupanti presenti nell'ambiente costruito in funzione del tempo e l'andamento generale del processo di esodo. I grafici sono stati utilizzati per interpretare i risultati sia degli scenari per evento sismico sia per l'alluvione.

Gli indicatori specifici utilizzati solamente per studiare i risultati delle simulazioni per evento sismico ^[18] [7] sono:

- il flusso di evacuazione complessivo nell'area di raccolta F (pp), inteso come valore percentuale rispetto all'intera popolazione simulata J (%);
- il tasso di occupazione assoluta O_r dell'area di raccolta, calcolato come il rapporto tra l'area critica per persona che porta a contatti fisici tra gli sfollati e la divisione tra l'area di assemblaggio libera da detriti per F . Questo indice è limitato a 1 e in tal caso possono verificarsi episodi di sovraffollamento;

L'obiettivo di questa fase è interpretare i dati per migliorare l'efficienza dello spazio e la sicurezza dei pedoni, analizzando i report dettagliati su flussi pedonali, tempi di attesa, congestione, e simulazioni di scenari alternativi forniti dal programma.

Infine, grazie alla possibilità di iterazione delle simulazioni, il software consente di testare e perfezionare varie configurazioni di progetto, con lo scopo di creare ambienti sicuri, efficienti e ben progettati.

2.5.4 Criteri di selezione degli scenari

Nello specifico caso studio sono stati seguiti dei criteri per selezionare gli scenari da riportare all'interno dello strumento di simulazione. L'obiettivo è individuare lo scenario che garantisce un livello di rischio di esposizione E degli occupanti accettabile, ovvero che permette ancora il movimento degli utenti, combinato con una vulnerabilità dell'ambiente costruito che permette l'avvenimento delle fasi di esodo. Oltre ad un'attenta indagine degli indicatori relativi all'esposizione E e al rischio PVH, gli scenari sono stati combinati con differenti livelli

di affollamento per simulare molteplici condizioni durante il periodo annuale, distinguendo tra stagione invernale ed estiva in presenza o meno di grandi assembramenti di persone.

Nella sezione 3.5.1 sono riportate tutte le assunzioni svolte per lo specifico caso studio.

Capitolo 3 – Caso studio: la città di Senigallia

In questo capitolo viene introdotto il caso studio della città di Senigallia con dei riferimenti storici rispetto a fenomeni sismici e alluvionali che hanno colpito la città. Successivamente sono descritte le fasi preliminari di caratterizzazione del layout urbano e degli elementi che compongono l'ambiente costruito dell'area di interesse.

3.1 Descrizione della città

La città di Senigallia ^[24]si trova sulla costa adriatica in provincia di Ancona. Il comune conta circa 45.000 abitanti distribuiti su una superficie 117 km. La città sorge in corrispondenza del fiume Misa in una conformazione territoriale prevalentemente pianeggiante, circondata da colline. Il centro storico ha una configurazione tipica dell'impianto urbanistico romano caratterizzata dall'intersezione ortogonale tra le vie principali e secondarie.

È una delle prime città delle Marche per numero di turisti, anche internazionali, presenti sul territorio comunale durante tutto l'anno.

La scelta della città di Senigallia come oggetto di studio è dovuta alle criticità che la stessa presenta. La città è fortemente caratterizzata da flussi turistici che causano una variazione considerevole del numero di persone potenzialmente esposte al rischio alluvione e sisma. Inoltre, la città, nel corso dei secoli, è stata coinvolta da un considerevole numero di eventi sismici, che hanno causato ingenti danni e perdite per la città. La zona del comune, infatti, è classificata con un rischio sismico medio, dunque potenzialmente soggetta a fenomeni di magnitudo elevata.

La presenza del fiume Misa, che attraversa il centro storico, e la configurazione totalmente pianeggiante espongono la città ad un elevato rischio idrogeologico e fenomeni alluvionali sempre più intensi e frequenti, come è possibili riscontrare in questi ultimi decenni.

Per queste motivazioni il centro storico della città di Senigallia è il modello adatto per l'applicazione dei metodi precedentemente descritti.

3.1.1 Storico sismico

Il territorio italiano è caratterizzato da un'elevata sismicità dovuta ad un'attività tettonica intensa e alla presenza di faglie attive prevalentemente nell'Italia Nord-Orientale, nell'Appennino Settentrionale, Centrale e Meridionale ^[25].

La sismicità nella regione Marche si manifesta più frequentemente e in modo rilevante nelle zone appenniniche e nella costa centro- settentrionale, dal promontorio del Conero fino al comune di Pesaro ^[11]. Inoltre, l'area settentrionale delle Marche risente fortemente anche dei fenomeni sismici che si verificano nella area romagnola del comune di Rimini. Inoltre, la fascia collinare, che divide gli Appennini dall'Adriatico, presenta una sismicità meno frequente e mediamente meno forte, con eventi isolati come quelli del 24 aprile 1741, nel fabrianese e del 3 ottobre 1943, nelle Marche meridionali. La costa meridionale, dal Conero al confine abruzzese, è sede di sismicità più occasionale e relativamente lieve: l'ultimo evento significativo è quello di Porto San Giorgio del 3 luglio 1987 con magnitudo Mw 5.1.

Il comune di Senigallia, avendo una posizione centrale lungo la costa adriatica, da sempre risente dei fenomeni sismici di rilevata importanza per la loro intensità e frequenza che si verificano nelle zone limitrofe. Oltre a fenomeni limitrofi, la città è stata colpita da eventi sismici di elevata intensità rilevante come quello del 1930. tale evento sismico è ricordato come il "terremoto di Senigallia", in quanto fù proprio a Senigallia che causò gli effetti più distruttivi, valutati tra i gradi VIII e IX della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS) da Molin e Mucci (1992) e al IX MCS da Guidoboni et al. (2018) ^[11]. Fra gli edifici che furono dichiarati inagibili rientrarono il Duomo, la porta Lambertini e l'ospedale cittadino e si verificò il crollo della chiesa di San Martino, causando vittime.

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, che gestisce le reti di monitoraggio degli eventi sismici, si occupa dello studio dei fenomeni sismici sul territorio nazionale. L'istituto fornisce una lista dei principali eventi sismici rilevati nel comune di Senigallia tra il 1300 e il 2020, che variano in un range di intensità tra 3 e 11 rispetto alla scala MCS e dei danni causati ^[23].

Senigallia

PlaceID	IT_51516
Coordinates (lat, lon)	43.714, 13.223
Municipality (ISTAT 2015)	Senigallia
Province	Ancona
Region	Marche
No. of reported earthquakes	80

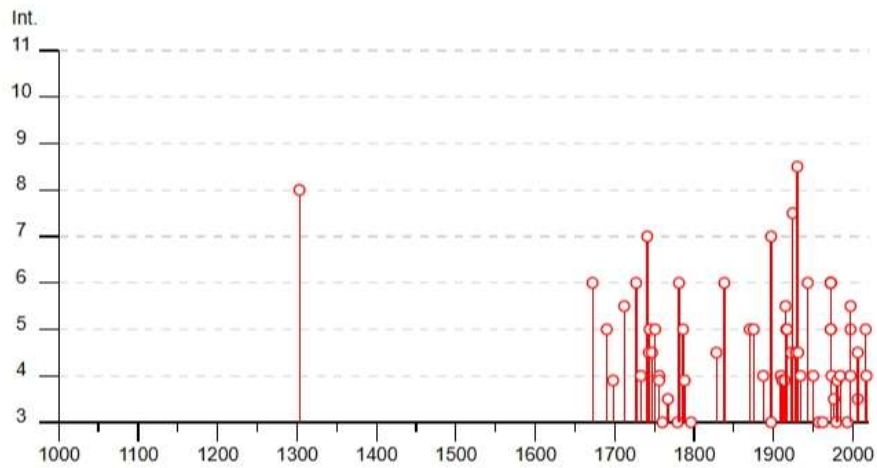


Figura 22: Grafico dei principali eventi sismici registrati nel comune di Senigallia dall'anno 1000 ad oggi

Di seguito è riportata la lista dei terremoti che hanno coinvolto il territorio del comune.

Effects	Reported earthquakes									
Int.	Year	Mo	Da	Ho	Mi	Se	Epicentral area	NMDP	Io	Mw
8	1303	08					Adriatico centrale	4		
6	1672	04	14	15	45		Riminese	92	8	5.59
5	1690	12	23	00	20		Costa anconetana	16	8	5.58
F	1698	12					Anconetano	2	6	4.63
5-6	1712	03	28				Appennino umbro-marchigiano	3	6-7	4.86
6	1727	12	14	19	45		Valle del Metauro	32	7	5.24
4	1733	10	19	03	30		Anconetano	4	4-5	3.93
7	1741	04	24	09	20		Fabrianese	135	9	6.17
4-5	1743	02	20				Ionio settentrionale	84	9	6.68
5	1744	05	25				Costa pesarese	5	5	4.59
4-5	1747	04	17				Appennino umbro-marchigiano	63	9	6.05
5	1751	07	27	01			Appennino umbro-marchigiano	66	10	6.38
4	1756	10	06	20			Costa pesarese	7	4-5	3.93
F	1756	10	22				Golfo di Manfredonia	4	5-6	4.40
3	1760	01	12				Valnerina	6	5-6	4.40
3-4	1767	06	05	01	30		Valle Umbra	10	7-8	5.45
3	1779	11	23	18	30		Bolognese	14	5	4.70
6	1781	06	03				Cagliese	157	10	6.51
NF	1785	05	03	02	30		Appennino umbro-marchigiano	11	7	5.10
5	1786	12	25	01			Riminese	90	8	5.66
F	1788	04	18				Costa pesarese	2	5-6	4.40
3	1796	10	22	04			Emilia orientale	27	7	5.45
4-5	1828	04	11	22	25		Appennino umbro-marchigiano	22	5-6	4.93
6	1838	06	23				Costa pesarese	4	6	4.63
5	1870	02	08				Anconetano	10	7	5.15
5	1875	03	17	23	51		Costa romagnola	144	8	5.74
4	1887	05	26				Jesi	19	5	4.44
7	1897	09	21				Marche settentrionali	44	7	5.40
3	1897	12	18	07	24	2	Alta Valtiberina	132	7	5.09
2	1898	06	27	23	38		Reatino	186	8	5.50
NF	1898	08	25	16	37	4	Valnerina	67	7	5.03
NF	1904	09	02	11	21		Maceratese	59	5-6	4.63
NF	1904	11	17	05	02		Pistoiese	204	7	5.10
NF	1908	03	17	03	59		Marche meridionali	54	5-6	4.61
4	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
F	1911	02	19	07	18	3	Forlivese	181	7	5.26
F	1914	10	27	09	22		Lucchesia	660	7	5.63
5-6	1915	01	13	06	52	4	Marsica	1041	11	7.08
5	1916	05	17	12	50		Riminese	132	8	5.82
2	1917	04	26	09	35	5	Alta Valtiberina	134	9-10	5.99
5	1917	11	05	22	47		Costa anconetana	26	6	5.22
2	1920	09	07	05	55	4	Garfagnana	750	10	6.53
4-5	1922	10	11	06	43	4	Costa anconetana	20	5	4.34
7-8	1924	01	02	08	55	1	Senigallia	76	7-8	5.48
4-5	1928	05	30	20	01		Senigallia	17	5	5.02
8-9	1930	10	30	07	13		Senigallia	268	8	5.83
4-5	1931	06	25	05	01		Senigallia	14	4-5	4.02
NF	1933	09	26	03	33	2	Maiella	325	9	5.90
4	1934	11	30	02	58	2	Adriatico settentrionale	51	5	5.30
6	1943	07	31	04	37		Senigallia	5	5	4.16

NF	📄	1948	06	13	06	33	3	Alta Valtiberina	142	7	5.04
4	📄	1950	09	05	04	08		Gran Sasso	386	8	5.69
3	📄	1957	11	11	21	40		Costa anconetana	50	5	4.50
3	📄	1962	01	23	17	31		Costa pesarese	49	5	4.35
NF	📄	1971	02	11	18	49	2	Valle del Chiascio	71	6	4.61
6	📄	1972	02	04	02	42	1	Costa anconetana	75		4.57
6	📄	1972	02	04	09	18	3	Costa anconetana	56		4.36
6	📄	1972	02	05	07	08	1	Costa anconetana	6		4.46
5	📄	1972	06	14	18	55	5	Costa anconetana	17		4.68
2-3	📄	1972	10	25	21	56	1	Appennino settentrionale	198	5	4.87
5	📄	1972	11	30	11	25	2	Costa pesarese	30		4.52
4	📄	1973	11	10	03	01	0	Costa anconetana	5		
3-4	📄	1976	05	06	20	00	1	Friuli	770	9-10	6.45
3	📄	1979	09	19	21	35	3	Valnerina	694	8-9	5.83
F	📄	1980	02	28	21	04	4	Valnerina	146	6	4.97
4	📄	1984	04	29	05	02	5	Umbria settentrionale	709	7	5.62
NF	📄	1984	05	07	17	50		Monti della Meta	911	8	5.86
NF	📄	1984	05	11	10	41	4	Monti della Meta	342	7	5.47
NF	📄	1986	10	13	05	10	0	Monti Sibillini	322	5-6	4.46
NF	📄	1987	07	03	10	21	5	Costa Marchigiana	359	7	5.06
3	📄	1993	06	05	19	16	1	Valle del Topino	326	6	4.72
5	📄	1997	09	26	00	33	1	Appennino umbro-marchigiano	760	7-8	5.66
5-6	📄	1997	09	26	09	40	2	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5.97
NF	📄	1997	10	03	08	55	2	Appennino umbro-marchigiano	490		5.22
2	📄	1997	10	06	23	24	5	Appennino umbro-marchigiano	437		5.47
4	📄	1997	10	14	15	23	1	Valnerina	786		5.62
3-4	📄	2006	04	10	19	03	3	Maceratese	211	5	4.06
4-5	📄	2006	10	21	07	04	1	Anconetano	287	5	4.21
5	📄	2016	10	30	06	40	1	Valnerina	379		6.61
4	📄	2017	01	18	10	14	0	Aquilano	280		5.70

Figura 23: Lista dei terremoti registrati nel territorio comunale

Nei secoli tali eventi hanno causato perdite di vite umane e gravi danni agli edifici, condizionando molte volte la struttura del centro storico e compromettendo il patrimonio artistico e culturale.

Per ridurre la gravità delle conseguenze dovute ad un sisma sugli edifici o aggregati urbani, è necessario indagare la resistenza e reazione alla sollecitazione. Tale valutazione è eseguita determinando il grado di vulnerabilità delle strutture al fine di ottenere in modo più fedele il grado di danno degli edifici.

3.1.1.1 La pericolosità sismica di Senigallia

La pericolosità sismica di un sito indica l'esposizione di quella porzione di territorio a fenomeni di entità sismica.

- Zona 1 - È la zona più pericolosa. La probabilità che capiti un forte terremoto è alta
- Zona 2 - In questa zona forti terremoti sono possibili
- Zona 3 - In questa zona i forti terremoti sono meno probabili rispetto alla zona 1 e 2
- Zona 4 - È la zona meno pericolosa: la probabilità che capiti un terremoto è molto bassa ^[26]

Il comune di Senigallia viene classificato in zona sismica 2, dunque si possono verificare fenomeni di forte intensità ^[22].

Inoltre, la normativa ha reso disponibili le mappe di pericolosità sismica che discretizzano il territorio nazionale con maglie di 5km per 5km. Ciascuna maglia racchiude una porzione di territorio che viene caratterizzato con il valore di accelerazione sismica PGA correlata al periodo di ritorno T_r .

3.1.2 Storico fenomeni alluvionali

La città di Senigallia si sviluppa lungo il bacino e in prossimità della foce del fiume Misa. L'area urbana e industriale della città è cresciuta attorno al bacino del fiume mentre il centro storico si trova in prossimità della foce. Nella seguente immagine vengono identificate le principali aree della città: il cerchio più piccolo indica la posizione del centro storico rispetto al corso del fiume mentre il cerchio più grande individua l'area industriale, che si sviluppa in corrispondenza delle anse del fiume a monte della città.

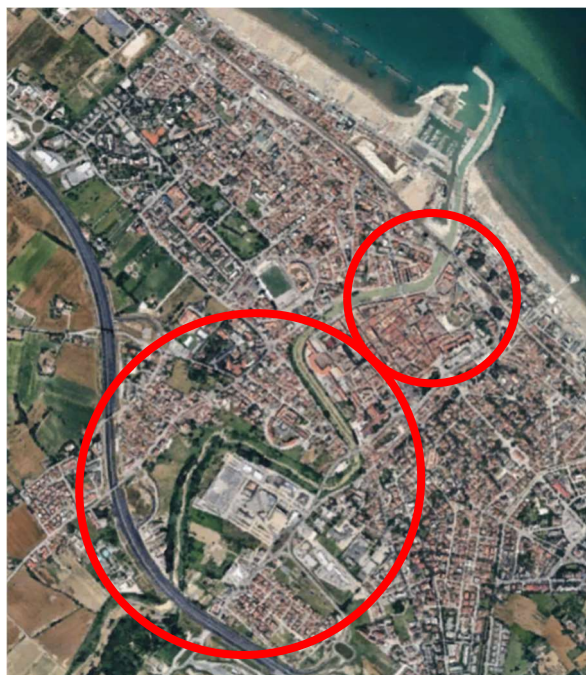


Figura 24: Rappresentazione del corso del fiume nella zona industriale della città (cerchio grande) e in prossimità del centro storico (cerchio piccolo)

A causa della configurazione del percorso del fiume e delle anse che si formano per i cambiamenti di direzione del flusso d'acqua, il fiume rappresenta la principale causa delle criticità idrogeologiche del comune. Le esondazioni si verificano in concomitanza con precipitazioni intense, causando allagamenti sia nelle aree periurbane sia nel centro storico. Le cause dei frequenti fenomeni di allagamento delle aree prossime al corso del fiume sono il costante incremento dell'intensità dei fenomeni meteorologici, la vulnerabilità idrogeologica del fiume dovuto ad un bacino idrico limitato e l'urbanizzazione in prossimità degli argini che ha ridotto la capacità di drenaggio del terreno.

Nel 2021 è stato pubblicato un volume "Misa Amaro", ^[13]^[14] presente anche negli archivi della biblioteca comunale della città, in cui sono riportati, attraverso le voci dei testimoni e le documentazioni storiche, i principali eventi alluvionali che hanno interessato la città di Senigallia. Di seguito sono riportate delle tabelle presenti nel volume che riassumono i principali eventi alluvionali che hanno colpito la città.

Anno	Mese	Giorno	Gravità	Principali luoghi alluvionati
1472	11	27	***	Chiesa e prati della Maddalena
1476	02	16-19	***	Mura, ponte, porto, con numero grande ma imprecisato di morti
1611	07	25	***	Porto, fosse della città, guazzi
1675	s.m.	s.d.	*	Porto e foce impaludati ¹
1721	07	08	**	Campagne e porto
1728	11	02-03	**	Portone, S. Sebastiano, Saline
1731	07	26 e 28	*	Campagne e Porto
1742	01	21-22	*	Porto-canale
1742	03	11 e 26	*	Porto-canale
1762	07	06-07	*	Campagne dell'entroterra
1762	10	14-15	**	Asportato un tratto di mura della nuova ampliamento tra il Portone e l'ansa del Misa che si immette nel porto-canale
1764	12	03	**	Porto-canale, Ponte Cappuccini
1765	07	22-23 e 29	***	Esondati Misa e Penna, allagati il rione Porto e i Portici, danni a 2 ponti (quello dei Cappuccini e Levatore); allagati il Condotto, le Saline, S. Sebastiano
1782	07	18	**	Porto-canale
1827	10	07	***	Ponti Portone e Cappuccini
1844	12	21	**	Strade del quartiere Porto, forno comunale, ponte a Porta Cappuccina e otturazione della chiavica in via Posta Vecchia, con allagamento delle cantine dell'Orfanotrofio Testaferrata
1845	09	28	**	Straripamento del porto-canale con allagamenti dei Portici e del rione Porto; intasamento di fogne; danni al Ponte Draga a Montignano, strada e ponte del Molino, fosso di via Capanna
1846	03	10	*	Inondazione del rione Porto e dei Portici

1846	12	09	*	Allagamento Porto e Portici
1855	08	ante 16	*	Campagne Brugnetto-Cannella
1855	09	22	***	Porto, Pace, Portone, litorale da Fiumesino a Pesaro
1856	07	29	*	Porto, dogana vecchia
1856	10	19-20	***	Tassatore del Penna, ponte del Portone
1875	04	ante 20	*	Frana lungo lo Stradone Misa
1876	07	26	*	Limitato tratto del Misa ²
1884	10	05	***	Porto, Squero, Pace, Portone
1885	01	ante 15	*	Stradone Misa
1896	11	11-12	***	Porto, Pace, Filetto, Triponzio
1897	03	07	*	Portone, Vallone, ponte Draga
1897	10	06	***	Molino, Portone, Rubbiano a Montemarciano e Chiaravalle
1897	10	22 e 24	***	Porto, Pace, Portici, piazza delle Erbe, Foro Annonario, piazza Roma, Porta Garibaldi, 4 ponti ferroviari abbattuti
1898	05	06-07-08	*	Allagamenti di sobborghi
1904	10	04 e 09-10	*	Portone, Pace, Porto, darsena
1905	05	16 e 19	*	Triponzio
1939	05	30-31	**	Porto, piazza Roma, Bettolelle
1940	11	30	***	Porto, via Carducci, Portici
1951	04	21		Fonti non documentate ³
1954	09	s.d.		Fonti non documentate ⁴
1955	09	11-12	***	Porto, Pace, Ponte Rosso, fosso Morignano (Ciarnin), Molinello, Portone, Borgo Bicchia, Vallone, Brugnetto, Pianello e Casine di Ostra, Monterado, Castel Colonna, Ripe (Ponte Lucerta)

1955	10	10-11	***	Via Mercantini e IV Novembre
1976	08	16-17-18-19	***	Portici, Foro Annonario, Saline, Ponte Rosso, Borgo Bicchia e Borgo Molino
2014	05	03	***	Ponte Rosso, Portone, Saline

Tabella 5: Estratto dal libro "Misa amaro" riguardo lo storico degli eventi alluvionali che hanno colpito la città di Senigallia

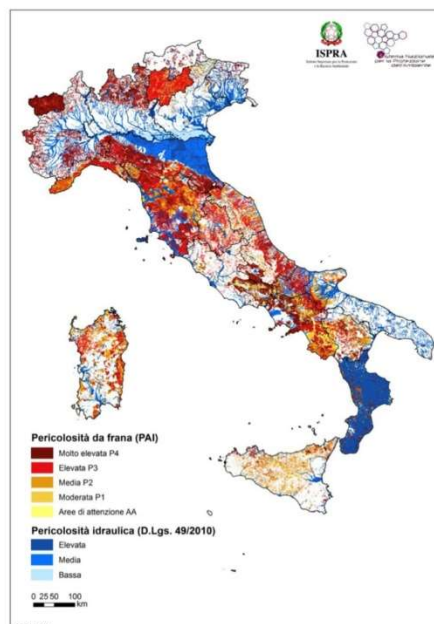
Come specificato nel libro:

“la tabella presenta una colonna denominata “gravità”, in cui, constatata la mancanza di una scala di riferimento scientifica delle portate e gravità delle alluvioni, come avviene invece per altri bacini idrografici più importanti e popolosi, si è cercato di dare con dei simboli convenzionali (asterischi) una valutazione degli eventi sulla base delle conseguenze note, cioè dell’estensione approssimativa delle aree alluvionate e della quantità e consistenza dei danni prodotti.

- *** indicano una alluvione di portata eccezionale con danneggiamenti gravissimi;
- ** una alluvione di portata grande e conseguenze gravi;
- * una piena di portata minore e danni moderati.”

La seguente tabella, presente all’interno del volume sopra citato, riporta gli eventi alluvionali che hanno colpito la città, la gravità del fenomeno e le aree che hanno subito le conseguenze peggiori e quelle interessate dalle inondazioni. Si può notare come sia ricorrente il coinvolgimento di specifiche zone del centro storico come la zona del Porto, via Portici Ercolani e il Foro Annonario.

L’ ISPRA, ovvero l’Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, fornisce una mappa di rischio idrogeologico di tutto il territorio nazionale, distinguendo la pericolosità da frane e la pericolosità idraulica. Di seguito è riportata la mappa aggiornata al 2021.



La mosaicatura del territorio nazionale per pericolosità idraulica è redatta dalle Autorità di Bacino Distrettuali rispetto ai dati raccolti fino al 2021, ed è relativa a tre scenari:

- pericolosità idraulica elevata con tempo di ritorno tra 20 e 50 anni e alluvioni frequenti;
- pericolosità media con tempo di ritorno tra 100 e 200 anni con alluvioni poco frequenti;
- pericolosità bassa, probabilità scarsa di alluvioni o scenari di eventi estremi;

In accordo con questa classificazione il comune di Senigallia rientra in un valore di pericolosità media, come si può evincere dall'immagine seguente.

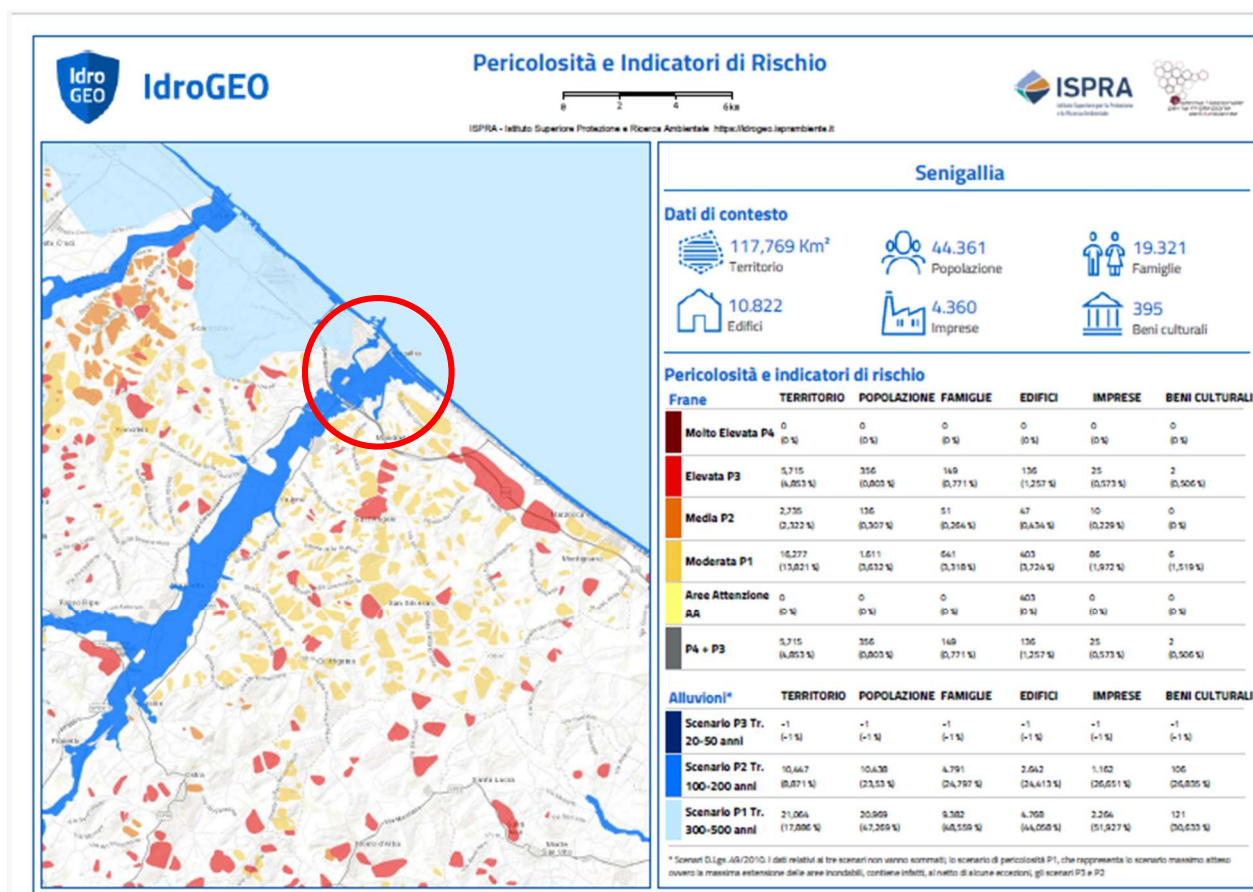


Figura 25: Rappresentazione degli indicatori di rischio della città di Senigallia. In rosso è evidenziata l'area di interesse trattata nel caso studio

3.2 Analisi del layout urbano

In questo paragrafo si descrivono le documentazioni e le scelte attuate per individuare l'area oggetto di studio. La documentazione citata nei paragrafi successivi è stata consultata grazie agli archivi comunali online del comune di Senigallia.

3.2.1 Documentazione cartografica

Il centro storico della città presenta edifici realizzati con differenti tipologie costruttive in quanto appartenenti a diverse epoche storiche. Oltre alla presenza di edifici di carattere storico che sono beni culturali, la città presenta una eterogeneità di tipologie edilizie che mette in risalto l'evoluzione e le modalità di accrescimento che hanno interessato il centro storico. A supporto dell'individuazione dell'area oggetto di studio, si sono indagati documenti ^{[15][27]} come:

- "Registro delle tipologie edilizie", per individuare le tipologie storiche presenti all'interno delle mura cittadine;
- "Mappatura delle tipologie edilizie", per individuare le modalità costruttive più frequenti nel centro storico;
- "Netto storico", per eseguire un riscontro sulle epoche di costruzione;
- Inoltre, è stato confrontato il sito dei Beni Culturali ^[30] per individuare gli edifici di carattere storico.

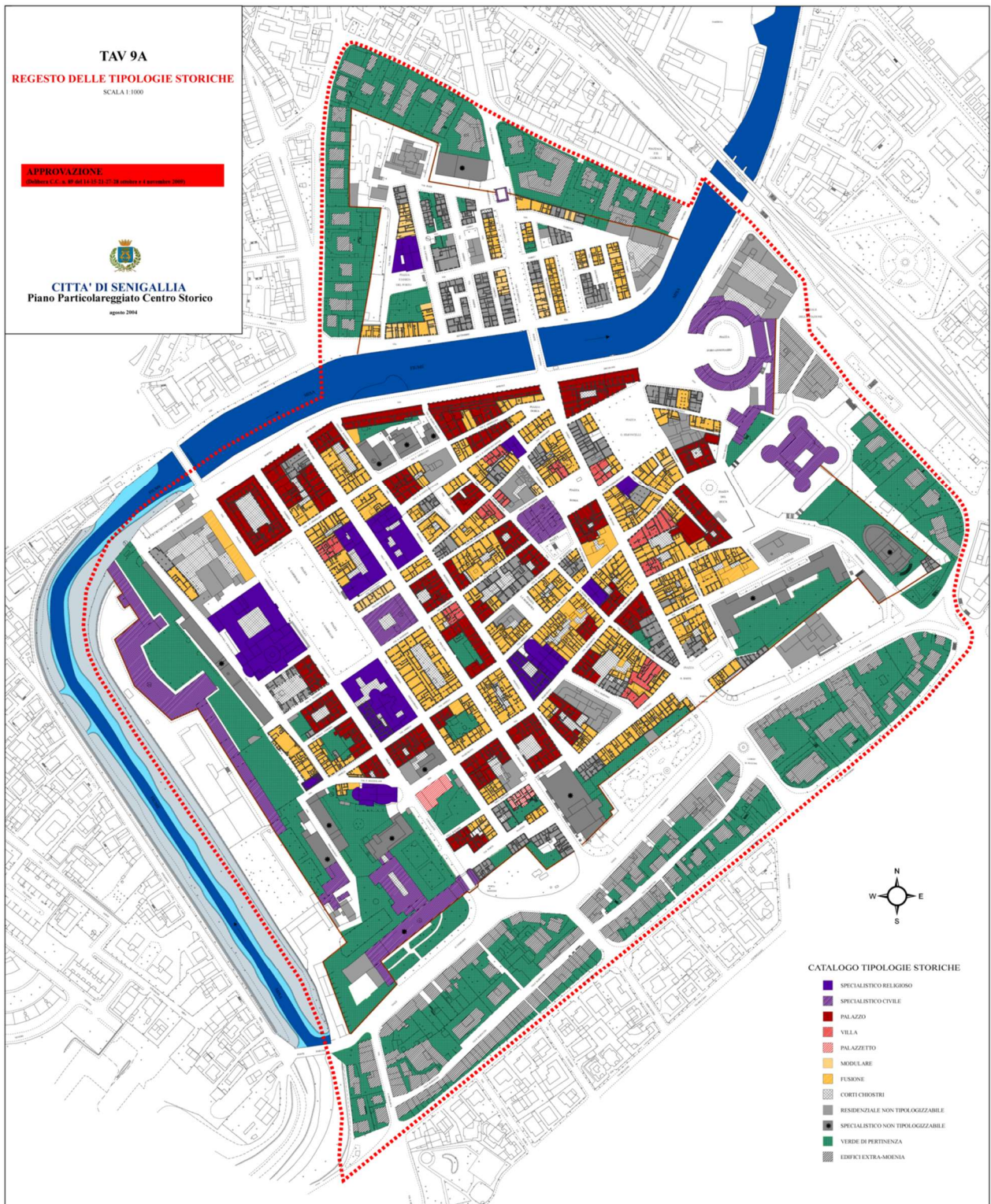


Figura 26: Regesto delle tipologie storiche degli edifici del centro storico

TIPOLOGIE COSTRUTTIVE

	MURATURA STORICA TRADIZIONALE
	MURATURA RISTRUTTURATA
	MURATURA INTELAIATA
	CEMENTO ARMATO



Figura 27: Mappa delle tipologie costruttive [9]

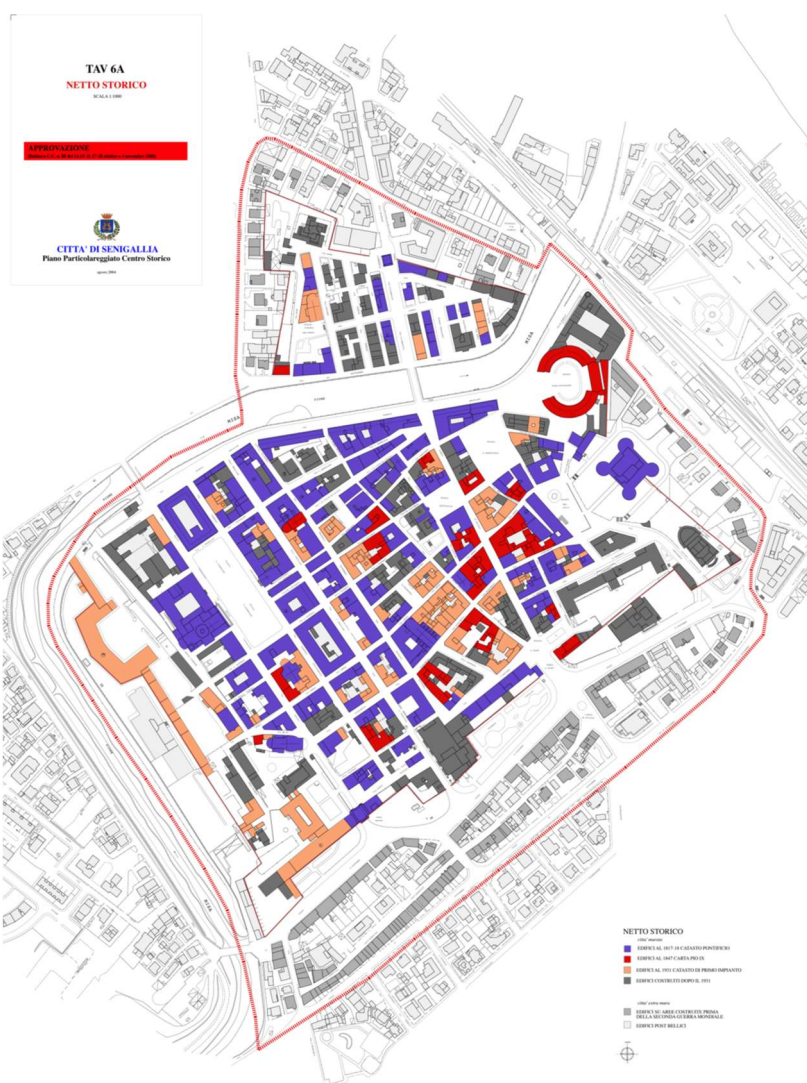


Figura 28: Tavola Netto storico che evidenzia i periodi di costruzione degli edifici del centro storico

3.2.2 Definizione dell'area di studio

L'area oggetto di studio è una porzione di centro storico che comprende i principali edifici caratterizzanti l'immagine della città. La superficie si estende da via Mastai fino a Piazza del Duca e al Foro Annonario in direzione Ovest-Est, e da via Portici Ercolani a via Arsili in direzione Nord-Sud.



Figura 29: Immagine del centro storico di Senigallia

Nella superficie scelta sono presenti i principali edifici di importanza storica e civica della città, come il Foro Annonario, la Rocca Roveresca, Palazzo Gherardi ma anche il Palazzo del Comune.

3.2.3 Schematizzazione dell'area di studio

Successivamente è stata eseguita una schematizzazione della superficie secondo quanto indicato al capitolo 2.1.2. L'obiettivo è avere una visione semplificata della struttura del centro storico per individuare le singole unità strutturali, gli spazi aperti e le piazze. Ciascuna

unità strutturale è stata associata ad un codice identificativo, le vie e le piazze sono state identificate attraverso delle sigle mentre gli incroci sono rappresentati da un punto.

L'immagine seguente riporta graficamente quanto appena descritto.



Figura 30: Schematizzazione dell'area di interesse

Da questa immagine si può dedurre che un edificio può affacciarsi su più spazi aperti quindi è stata realizzata una tabella riassuntiva in cui sono riportati tutti gli edifici prospicienti un determinato spazio aperto con un accesso diretto ad esso.

Capitolo 4 - Risultati: valutazioni di rischio legate all'ambiente costruito

In questo capitolo sono riportate le ipotesi assunte per classificare gli edifici tramite i contributi dei parametri di vulnerabilità, distinguendo la trattazione per vulnerabilità per alluvione I_{fv} e vulnerabilità per sisma I_{fv} . Per ciascun contributo sono riportate delle mappe che descrivono la distribuzione delle classi dei rispettivi parametri. Sono discussi anche i risultati ricavati dalle matrici di rischio per esposizione all'alluvione e di danno per sisma. Nell'ultima sezione del capitolo vengono descritti gli scenari per ciascuno degli eventi analizzati.

4.1 Definizione dei parametri di input

Lo step successivo alla caratterizzazione dell'area di studio consiste nella determinazione dei parametri che concorrono a restituire la vulnerabilità per fenomeno sismico e alluvionale. Tali informazioni sono state ricavate da documentazioni ufficiali presenti sul sito del comune di Senigallia e strumenti come Google Maps e Google Earth ([Google Maps](#), [Google Earth](#)).

Nei successivi paragrafi saranno indicate le ipotesi assunte per la valutazione della vulnerabilità per evento alluvionale secondo quanto descritto nel paragrafo 2.2.1 e successivamente le ipotesi per definire il valore I_{fv} di vulnerabilità sismica delle strutture in funzione delle procedure descritte nella sezione 2.2.2. In questa fase le valutazioni vengono eseguite a livello di microscala, dunque per le singole unità strutturali. È necessario specificare che, per configurazione del centro storico, alcuni edifici occupano posizioni d'angolo, presentando facciate su più spazi aperti. Nei processi di determinazione delle classi di appartenenza per i rispettivi parametri indagati, lo stesso edificio può appartenere a più classi in quanto può presentare facciate su differenti spazi aperti. Affinché la valutazione del grado di vulnerabilità sia eseguita a vantaggio di sicurezza, gli edifici che presentano tali problematiche sono stati associati alla classe più gravosa.

4.1.1 Le ipotesi per FV

Come descritto nel paragrafo 2.2.1 l'indicatore di vulnerabilità degli edifici per alluvione dipende dal contributo di esposizione EC e di sensibilità SC della struttura, ciascuno con i rispettivi contributi.

4.1.1.1 Le assunzioni del contributo EC

L'individuazione del parametro di esposizione EC richiede uno studio della configurazione urbana rispetto alla direzione del flusso d'acqua. In questo caso studio sono stati valutate due possibili situazioni di allagamento del centro storico:

- direzione del flusso in direzione Ovest- Est, simulando un'esondazione a monte del centro storico;
- direzione del flusso Nord-Sud, simulando un'esondazione perpendicolare all'asse del fiume.

Queste ipotesi sono state assunte in funzione dell'andamento del letto del fiume: il corso del Misa presenta una grande ansa prima di attraversare il centro storico, obbligando il fiume ad un brusco cambio di direzione. Il cambio di direzione del percorso combinato ad una portata straordinaria del fiume possono essere le cause principali di un possibile fenomeno di esondazione in direzione Ovest-Est.

Lo studio in direzione Nord- Sud invece viene eseguito in quanto si vuole ipotizzare un'esondazione per rottura degli argini del fiume. Questa possibile modalità di esondazione potrebbe potenzialmente coinvolgere le zone che nella tabella degli storici in tab. 5 sono state maggiormente colpite.

Di seguito sono riportate delle immagini esemplificative dei casi appena descritti.

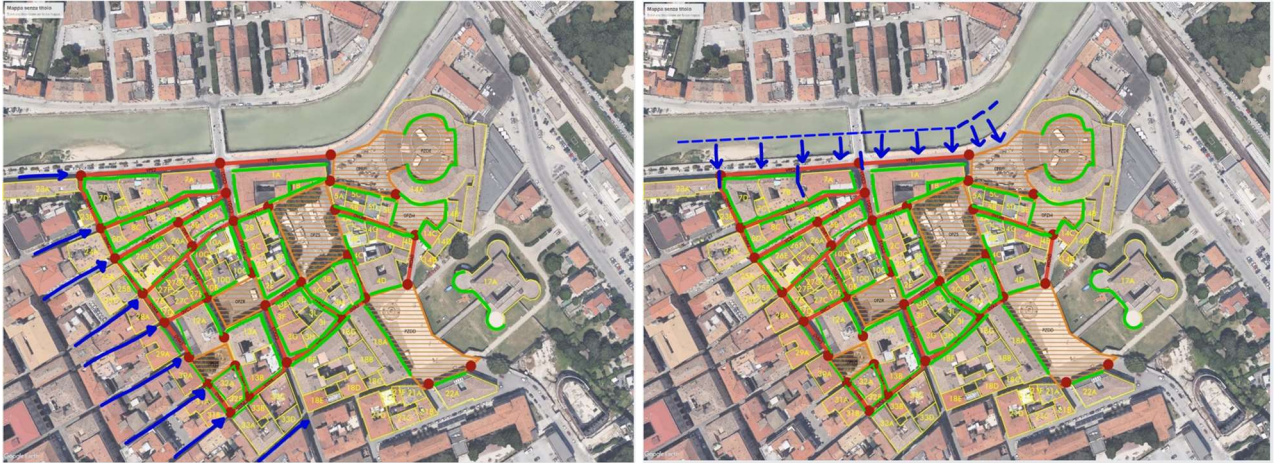


Figura 31: Rappresentazione delle direzioni di flusso indagate nel caso studio

L'attribuzione delle classi di appartenenza A, B, C, D, descritte nel paragrafo 2.2.1, è stata eseguita valutando la presenza di aperture nella facciata e l'angolo di incidenza del flusso d'acqua sulla facciata.

Il fatto che una facciata sia indicata come "parzialmente esposta" implica che l'angolo di incidenza del flusso sull'edificio sia di 180° , parallelo alla facciata, mentre la definizione "totalmente esposta" viene associata ad un angolo di incidenza di 90° , dunque il flusso è perpendicolare alla facciata.

In questo caso studio le generali classi A, B, C e D rappresentano le seguenti condizioni:

- A: facciata priva di accessi diretti alla strada con angolo di 180° tra flusso e l'edificio;
- B: facciata con accessi diretti alla strada e angolo di 180° tra il flusso e l'edificio;
- C: facciata priva di accessi diretti alla strada con angolo di 90° tra il flusso e l'edificio;
- D: facciata con accessi diretti alla strada con angolo di 90° tra il flusso e l'edificio;

Questa valutazione è stata eseguita per ciascuna unità strutturale per entrambe le direzioni di flusso.

Le mappe riportate di seguito mostrano la distribuzione delle classi del parametro EC per gli edifici dell'area di studio, per entrambe le possibili direzioni del flusso.

ESPOSIZIONE AL FLUSSO

Direzione del flusso perpendicolare all'asse del fiume

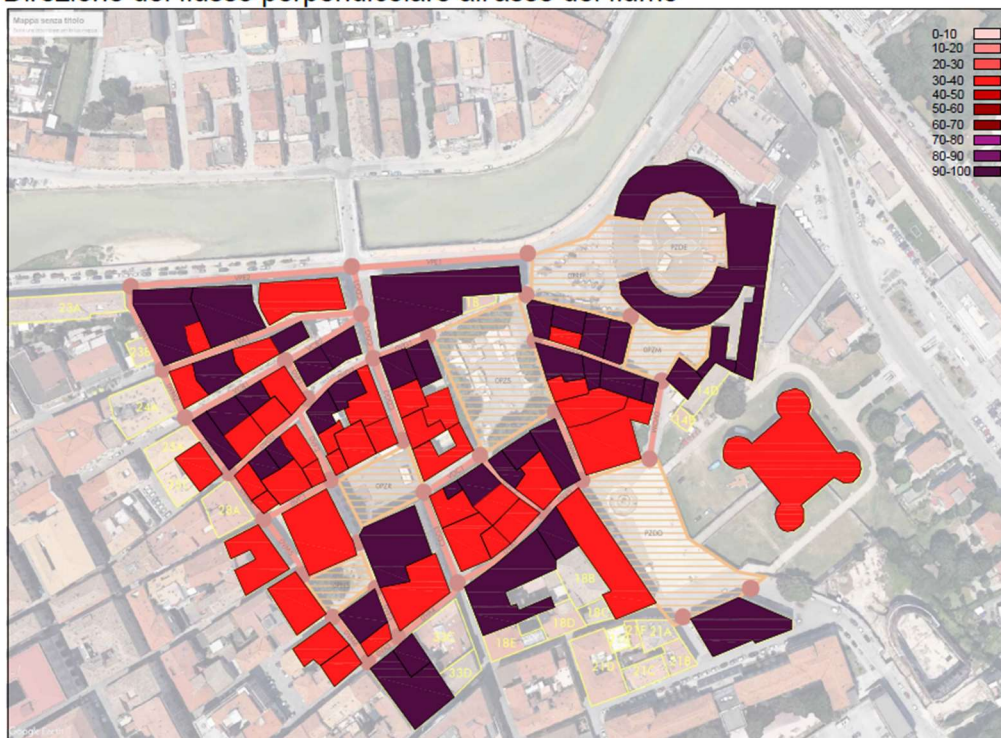


Figura 32: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell'area di interesse per il contributo EC per flusso con direzione perpendicolare all'asse del fiume

ESPOSIZIONE AL FLUSSO

Direzione del flusso "da monte"

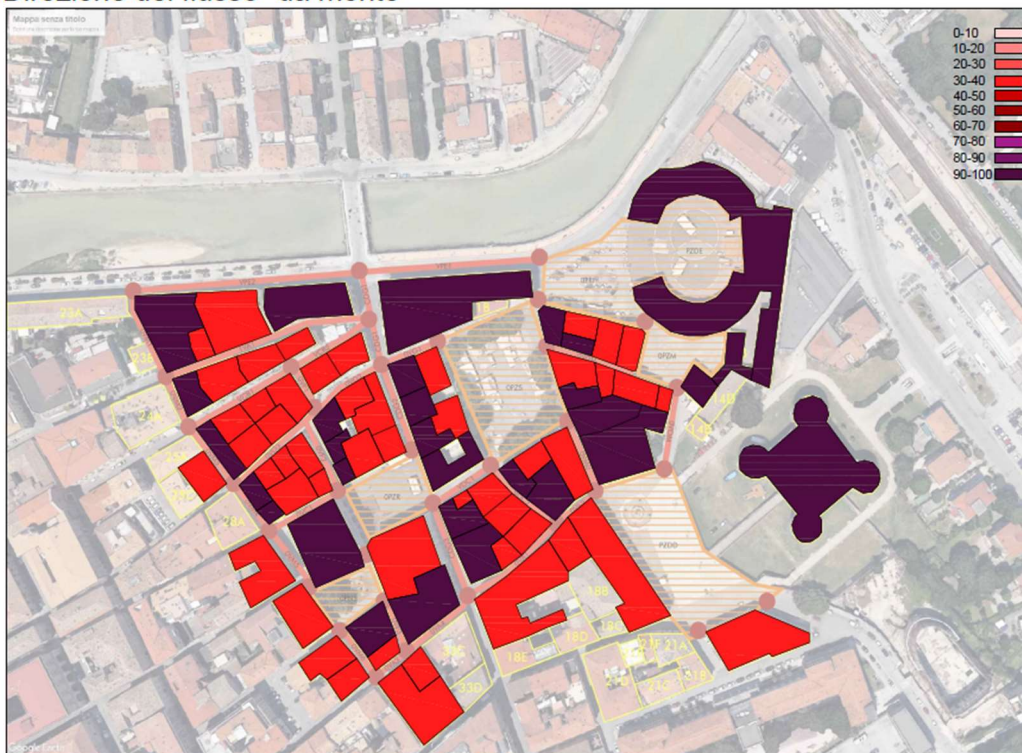


Figura 33: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell'area di interesse per il contributo EC per flusso proveniente da monte

4.1.1.2 Le ipotesi del contributo SC

L'individuazione del parametro SC per ogni edificio richiede che vengano attribuite le classi di appartenenza per ciascuno dei cinque contributi, descritti nel paragrafo 2.2.2.2.

Il coefficiente "Materiale" classifica le strutture in funzione del materiale con cui sono state realizzate. La caratterizzazione degli edifici dell'area di studio secondo questo parametro è stata possibile studiando la tavola "Mappatura delle tipologie costruttive" in fig.27. Le categorie di unità strutturali riportate nella mappa sono: muratura storica tradizionale, muratura ristrutturata, muratura intelaiata e calcestruzzo armato.

Per concordare i dati riportati nella mappa e le classi del parametro si è ipotizzato che tutte le tipologie di muratura presenti nella mappa sono state raggruppate nella classe B "strutture in muratura" mentre gli edifici associati alla tipologia costruttiva "cemento armato" sono associati alla classe A "strutture in cemento armato o acciaio".

Di seguito è riportata una mappa indicativa della classe di tipologia costruttiva di ciascun edificio del centro storico compreso nell'area di studio.

MATERIALE

Componente SC

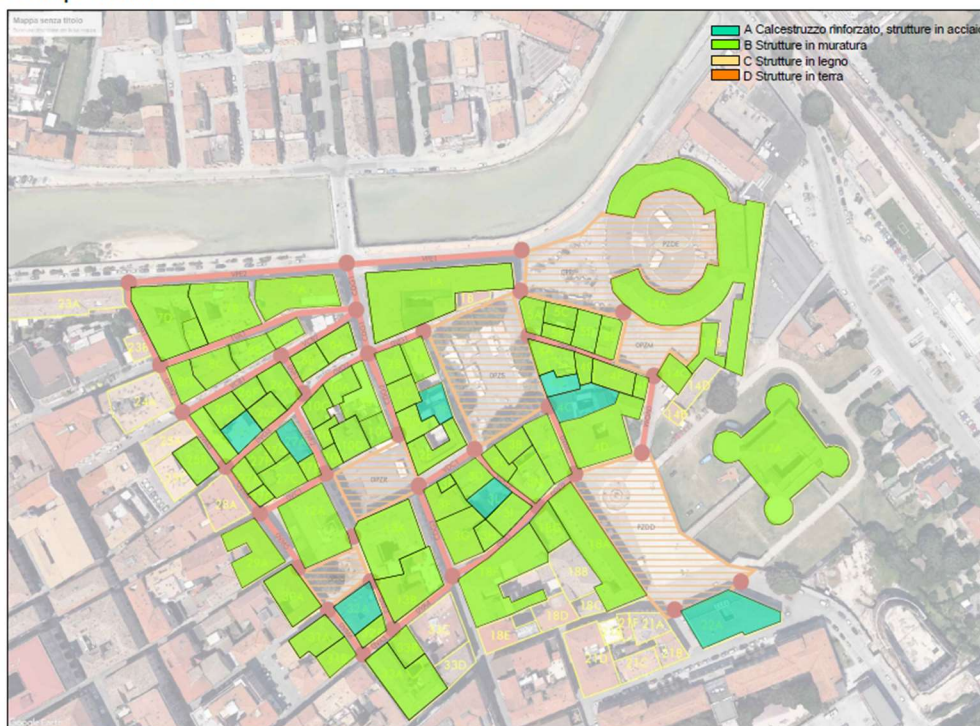


Figura 34: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell'area di interesse per il contributo "Materiale"

Il coefficiente “Condizione” descrive lo stato in cui si trova la struttura e l’eventuale presenza di fessurazioni. Le informazioni necessarie per definire la classe di appartenenza degli edifici sono state ricavate da un’osservazione dello stato delle facciate tramite Google Maps. Nell’immagine seguente sono riportate le classi di appartenenza delle strutture rispetto al parametro di “Condizione”.

STATO DI CONSERVAZIONE

Componente SC

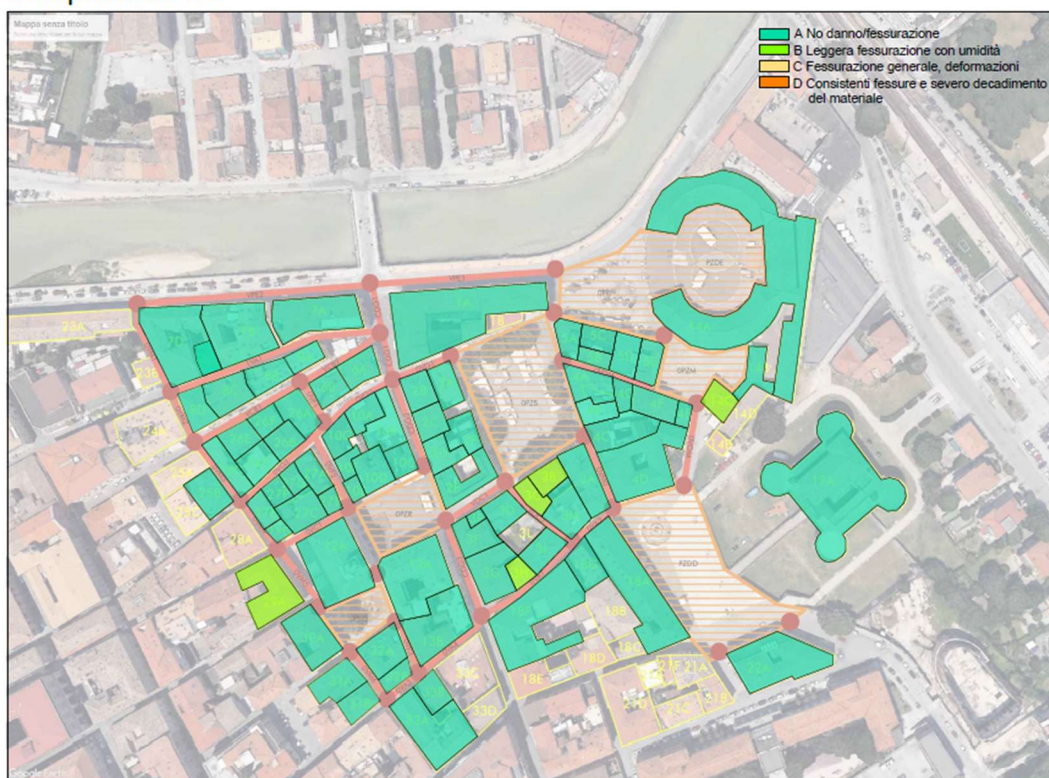


Figura 35: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell’area di interesse per il contributo “Stato di conservazione”

Il coefficiente “Numero di piani” è stato indagato tramite Google Maps e la documentazione presente nel sito del comune di Senigallia relativa al Piano Particolareggiato del centro storico. In questi documenti sono presenti i prospetti di alcune vie interessate dallo studio e in tal caso la determinazione del numero di piani si è basata sui disegni delle facciate presenti nelle tavole. Per alcune vie, invece, non sono disponibili documentazioni ufficiali; quindi, il numero di piani è stato conteggiato in funzione dei livelli di aperture presenti sulla facciata.

Di seguito sono riportate le classi di appartenenza di ogni edificio all'interno della zona studiata.

NUMERO DI PIANI

Componente SC

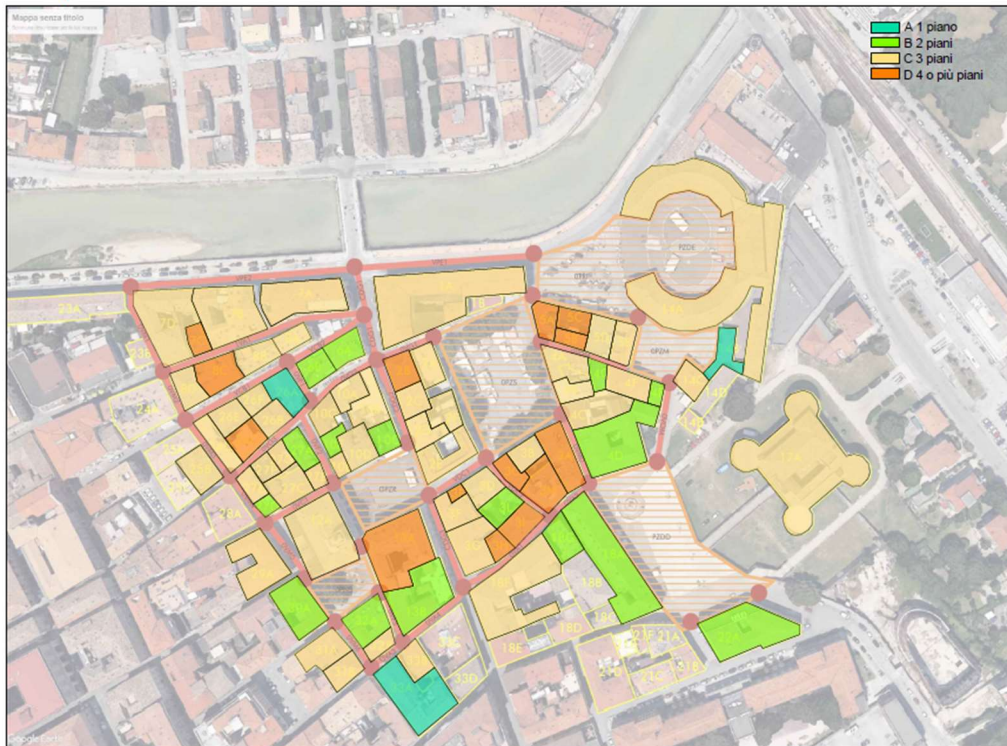


Figura 36: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell'area di interesse per il contributo "Numero di piani"

Il coefficiente "Età" è stato definito grazie alla tavola "Netto storico" presente sempre all'interno del Piano Particolareggiato del centro storico. In questa tavola sono indicati gli edifici permanenti dal 1818 ad oggi e quelli modificati tra il catasto pontificio e il 1930, confrontando la mappa del catasto pontificio del 1818, il catasto di primo impianto del 1891-1894 e la mappa dell'Istituto Geografico Militare del 1917 e il catasto degli anni '30 del 1900.

Per combinare i dati disponibili nella mappa con le classi del parametro, sono state fatte delle assunzioni: gli edifici presenti al catasto pontificio del 1817-1818, colorati di viola nella tavola, e gli edifici presenti nella carta Pio IX del 1847, colorati di rosso, sono stati classificati con il parametro C, ovvero per l'arco temporale dal XV al XX secolo.

Gli edifici presenti al catasto di primo impianto del 1931, indicati con il colore arancione nella tavola, e gli edifici costruiti dopo il 1931, indicati con il colore grigio, sono stati associati alla classe B che rappresenta tutti gli edifici costruiti tra il XX e il XXI secolo.

Nella mappa seguente viene rappresentata la classe di appartenenza di ogni edificio dell'area di studio.

ETA' Componente SC

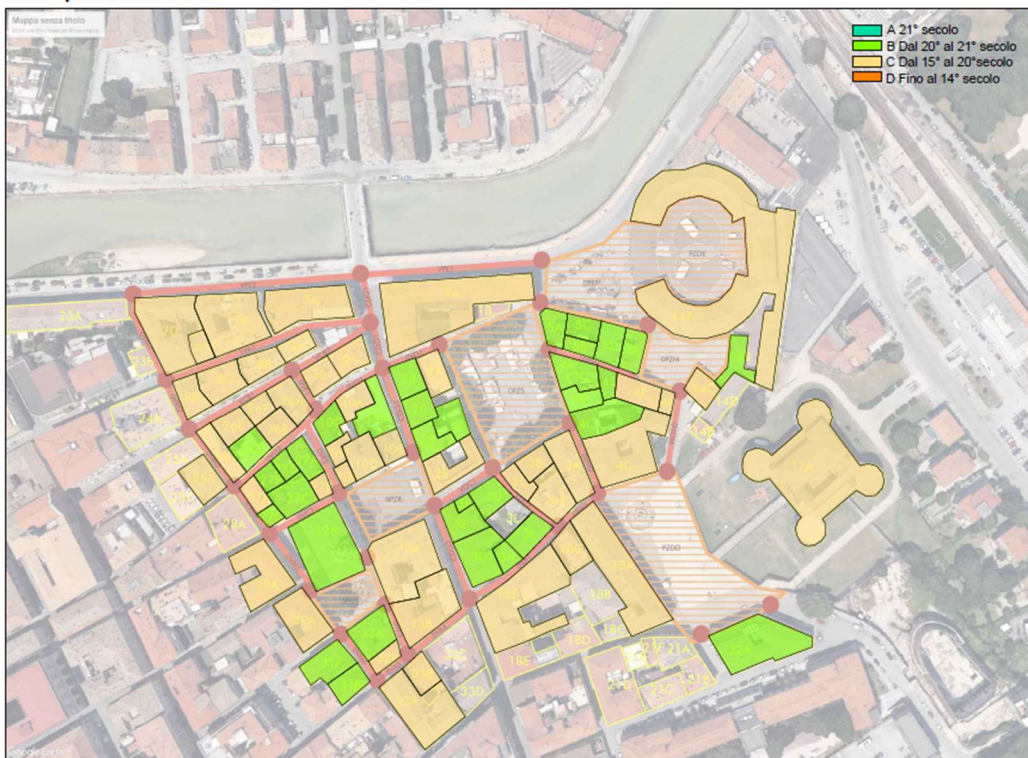


Figura 37: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell'area di interesse per il contributo "Età"

L'ultimo coefficiente necessario per determinare il contributo di sensibilità SC è lo "Stato del patrimonio". Per ottenere le informazioni necessarie per determinare la classe di appartenenza dell'edificio, si è consultato il sito dei beni culturali italiani ([Catalogo Generale dei Beni Culturali](#)), nel quale è stato possibile individuare la lista dei beni culturali di interesse nazionale della città di Senigallia. Gli edifici appartenenti alla lista dei beni sono stati classificati con la lettera C mentre gli altri sono stati classificati con la lettera A. La mappa seguente schematizza tale classificazione.

STATUS DEL PATRIMONIO

Componente SC

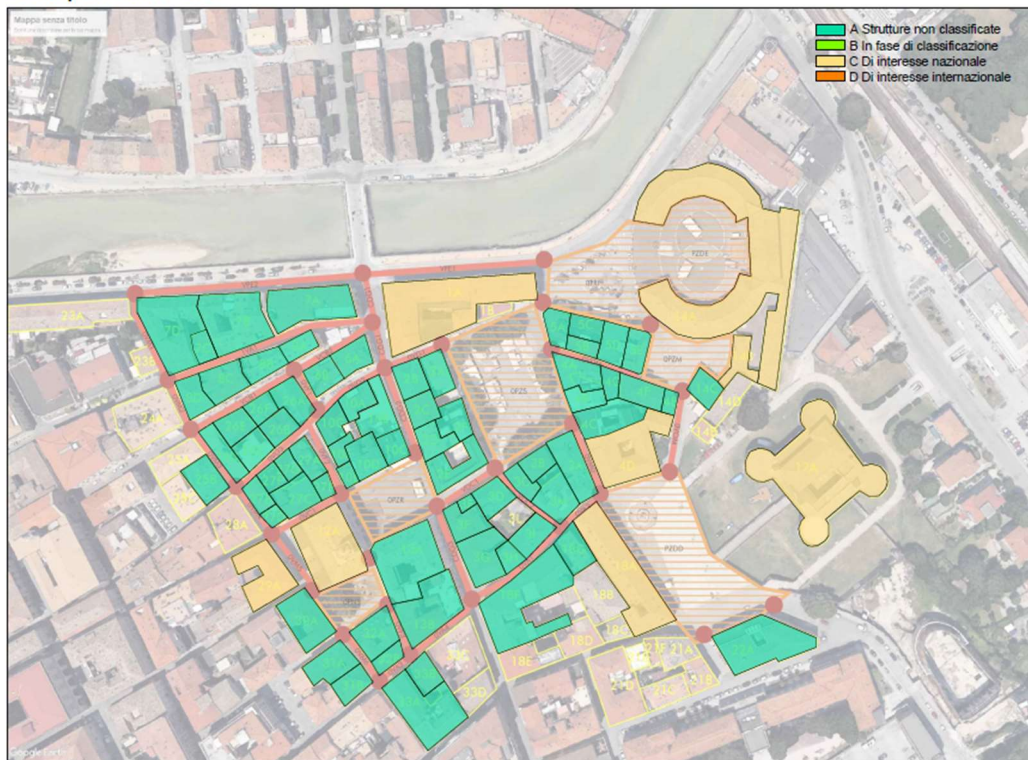


Figura 38: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell'area di interesse per il contributo "Stato del patrimonio"

Il parametro SC, come descritto nel paragrafo 2.2.1, è stato calcolato sommando i valori numerici associati alle classi di appartenenza degli edifici per ciascuno dei contributi descritti precedentemente, e poi normalizzato. Il valore di SC normalizzato è riportato per ciascun edificio nella seguente mappa.

SENSIBILITA'

Sc

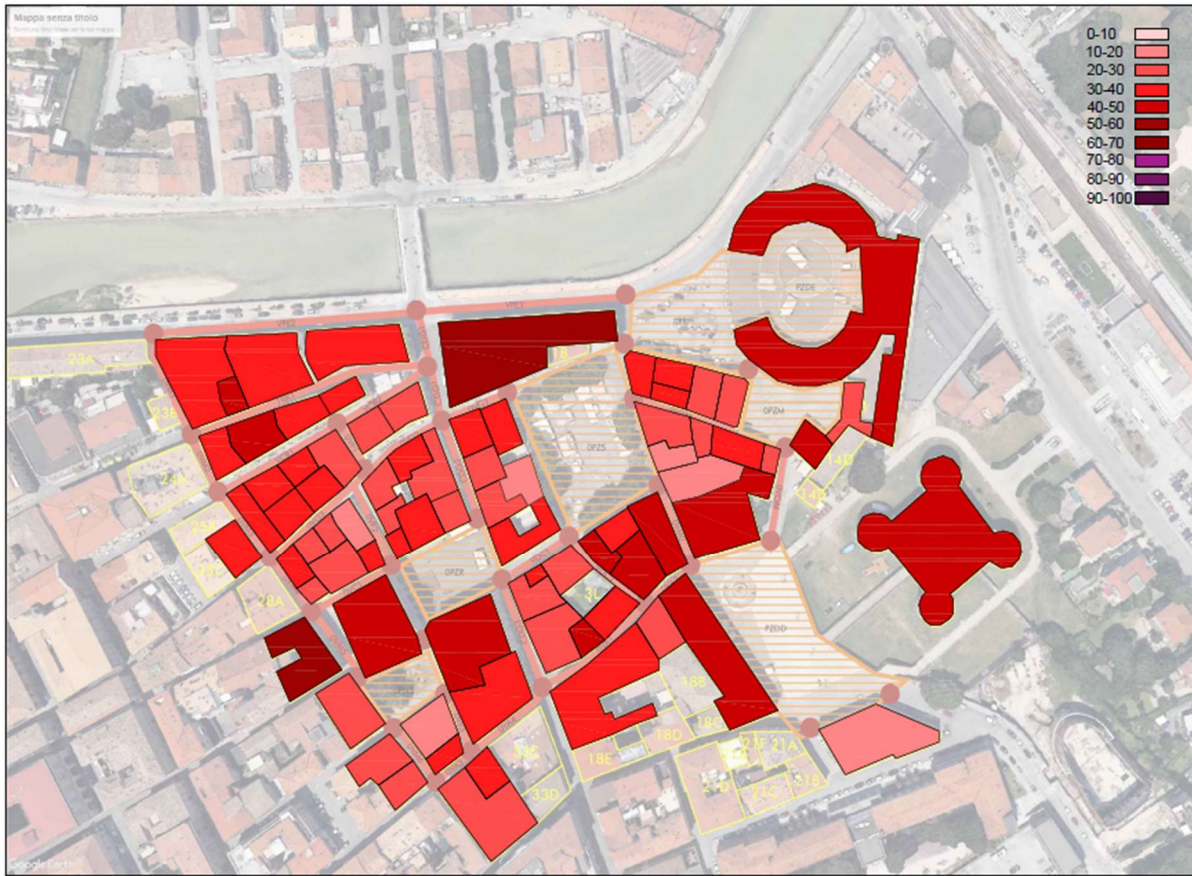


Figura 39: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell'area di interesse per il contributo SC dell'indice di vulnerabilità per alluvione FV

4.1.2 La distribuzione del parametro FV

Come indicato nel capitolo 2.2.1 si è ottenuto il valore FV che poi è stato normalizzato. Di seguito sono riportate le mappe che descrivono la distribuzione del valore di vulnerabilità normalizzato per entrambe le direzioni di flusso per ciascun edificio nell'area di studio. Il valore è fortemente influenzato dal contributo di EC perché lo studio fatto per la componente di sensibilità è unico, in quanto le classi attribuite agli edifici non sono condizionate dalla direzione del flusso.

VULNERABILITA' PER ALLUVIONE

Direzione del flusso perpendicolare all'asse del fiume

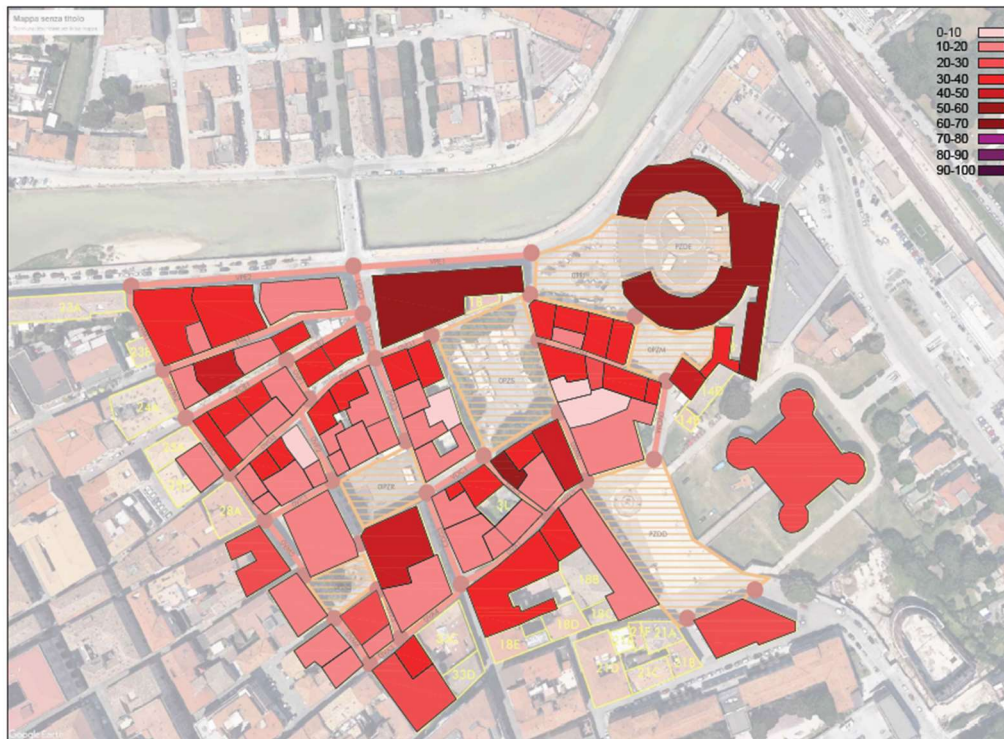


Figura 40: Rappresentazione delle classi di vulnerabilità FV degli edifici dell'area di interesse per alluvione per direzione del flusso perpendicolare all'asse del fiume

VULNERABILITA' PER ALLUVIONE

Direzione del flusso "da monte"

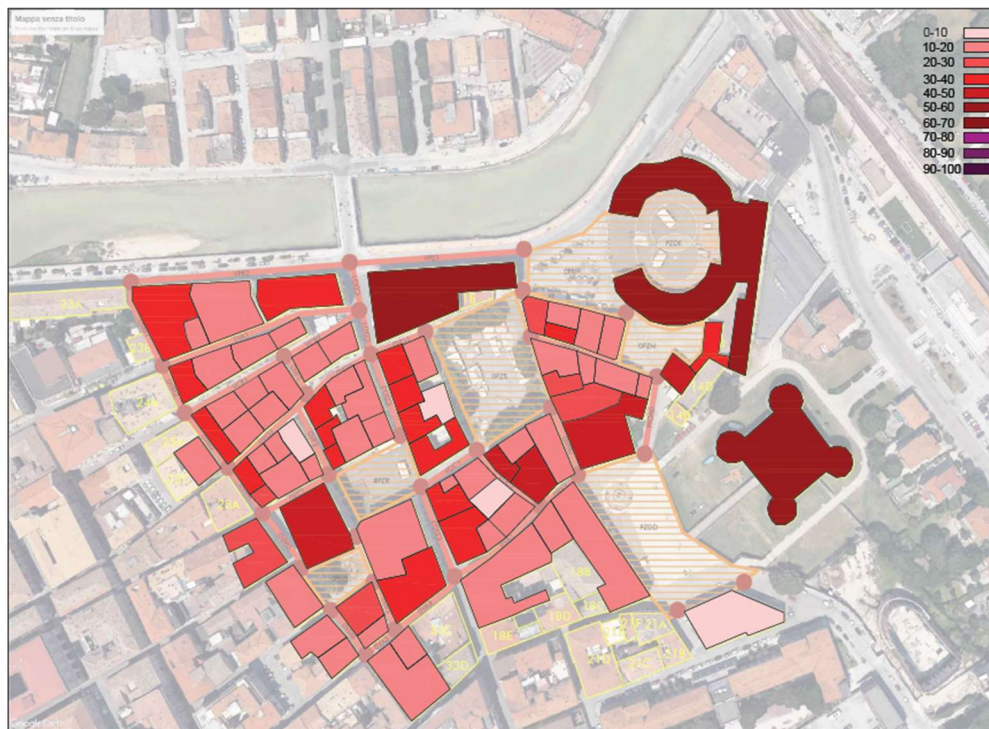


Figura 41: Rappresentazione delle classi di vulnerabilità FV degli edifici dell'area di interesse per alluvione per flusso proveniente da monte

4.1.3 Le ipotesi per la vulnerabilità sismica I_{fv}

Per determinare la vulnerabilità sismica I_{fv} di ciascun edificio, come descritto al paragrafo 2.2.2, è necessario determinare i valori dei cinque coefficienti c_j elencati nel paragrafo 2.2.2.2 che mediano il peso W_i di ciascun parametro. È necessario specificare che il metodo descritto è stato applicato per le strutture realizzate in muratura. Le strutture in cemento armato sono state associate ad un valore di vulnerabilità I_{fv} come indicato nella tabella EMS-98, riportata di seguito, senza seguire gli step e le ipotesi descritti al paragrafo successivo.

Le strutture in c.a. sono state associate ad un valore di vulnerabilità sismica I_{fv} di 0,64 poiché sono state classificate come strutture RC1, ovvero realizzate con telaio in cemento armato (frame in reinforced concrete) [1].

Table 5. Vulnerability Index values for the buildings typology.

Typologies		Building type	□ulnerabilità Classes				
			V_{Imin}	V_{I-}	V_{I+}	V_{I+}	V_{Imax}
Masonry	M1	Rubble stone	0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
	M2	Adobe (earth bricks)	0.62	0.687	0.84	0.98	1.02
	M3	Simple stone	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M4	Massive stone	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
	M5	Unreinforced M (old bricks)	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M6	Unreinforced M with r.c. floors	0.3	0.49	0.616	0.79	0.86
	M7	Reinforced or confined masonry	0.14	0.33	0.451	0.633	0.7
Reinforced Concrete	RC1	Frame in r.c. (without E.R.D)	0.3	0.49	0.644	0.8	1.02
	RC2	Frame in r.c. (moderate E.R.D.)	0.14	0.33	0.484	0.64	0.86
	RC3	Frame in r.c. (high E.R.D.)	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.7
	RC4	Shear walls (without E.R.D)	0.3	0.367	0.544	0.67	0.86
	RC5	Shear walls (moderate E.R.D.)	0.14	0.21	0.384	0.51	0.7
	RC6	Shear walls (high E.R.D.)	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54
Stell	S	Steel structures	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.7
Tiber	W	Timber structures	0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

Tabella 6: Tabella EMS-98 degli indici di vulnerabilità sismica per differenti tipologie edilizie

Inoltre, per le strutture in muratura che sono state indagate per individuare la classe di appartenenza degli indicatori secondo quanto descritto al capitolo 2.2.2.2, è necessario assumere un'ulteriore ipotesi. In assenza di dati ufficiali presenti nelle documentazioni oppure non reperibili tramite un'indagine speditiva, sono stati assunti i valori di riferimento per l'edificio in muratura standard descritti sempre nel capitolo 2.2.2.2.

4.1.3.1 Le assunzioni per determinare i coefficienti

Ogni parametro è moltiplicato per il relativo coefficiente, il quale è suddiviso in quattro classi ognuna associata ad un valore numerico differente.

Il parametro W_i “Numero di piani” è stato determinato, come per l’alluvione, tramite le tavole del piano particolareggiato del centro storico di Senigallia e, per gli edifici che non sono rappresentati nelle tavole, tramite Google Maps, correlando il numero di piani al numero di livelli di aperture. In funzione del numero di piani l’edificio è associato ad una classe di valore del coefficiente. Di seguito è riportata una mappa per rappresentare le classi di appartenenza degli edifici all’interno dell’area.

NUMERO DI PIANI

Componente l_{fv}

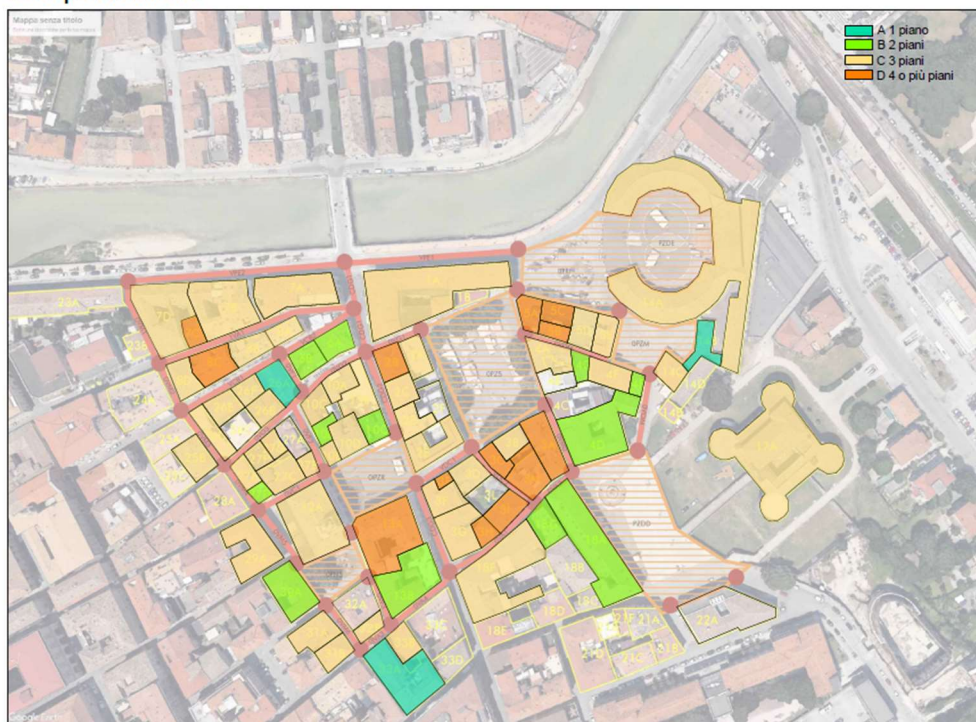


Figura 42: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell’area di interesse per il contributo “Numero di piani”

La classe di coefficiente del parametro “Peso specifico” richiede la conoscenza del materiale con cui sono state realizzate le strutture comprese nell’area oggetto di studio. Per ricavare tale informazione si è utilizzata la tavola “Mappa delle tipologie costruttive”, in figura 27 e la

tabella proposta dalla normativa italiana Tab.C 8.5.I., in cui sono elencati i pesi specifici delle differenti tipologie di costruzioni in muratura.

Tabella C8.5.I – Circolare 2019

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- -	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- -	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	- -	900-1260	300-420	13 + 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

Tabella 7: Tabella C8.5.I della Circolare 2019 in cui sono riportati i pesi specifici delle differenti tipologie di muratura

Dalla mappa delle tipologie costruttive si può individuare la tipologia per ciascun edificio e le principali del centro storico sono: cemento armato, muratura storica tradizionale, muratura ristrutturata e muratura intelaiata. Affinché si individuasse il valore di peso specifico, sono state fatte le seguenti ipotesi:

- la tipologia costruttiva “muratura storica tradizionale” è stata associata alla tipologia “muratura in mattoni pieni e malta di calce” della Tab C8.5.I con peso specifico di 18 kN/m³. Di conseguenza le strutture realizzate con questa tipologia sono state associate alla classe C.
- le tipologie costruttive “muratura ristrutturata” e “muratura intelaiata” sono state associate alla tipologia “muratura in mattoni semipieni con malta cementizia” della Tab C 8.5.I con peso specifico 15 kN/m³. Le strutture realizzate con queste modalità sono state associate alla classe D.
- la tipologia costruttiva “cemento armato” è stata associata ad un peso standard delle strutture in c.a. di 23 kN/m³, ma come anticipati non sono state considerate in questa valutazione.

Di seguito è riportata una mappa che restituisce la distribuzione delle classi di coefficiente relative al peso specifico delle strutture, escludendo le strutture in c.a.

PESO SPECIFICO

Componente l_{fv}

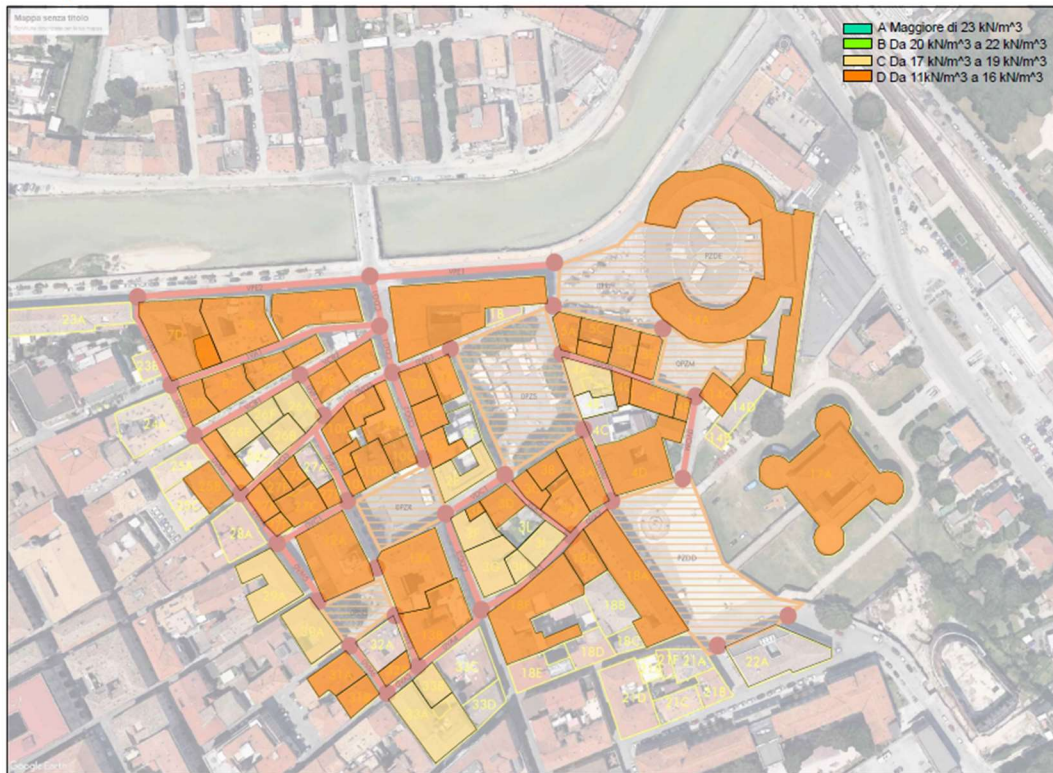


Figura 43: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell'area di interesse per il contributo "Peso specifico"

Il parametro "Snellezza" è stato determinato attraverso l'elaborazione dei dati ricavati dalle tavole "Progetto delle pavimentazioni stradali" [27] e i prospetti delle vie del centro storico.

La tavola delle pavimentazioni riporta lo spessore dei muri degli edifici; dunque, è stato possibile ricavare lo spessore delle facciate. Alcuni edifici non sono riportati nella pianta delle pavimentazioni, dunque, per determinare lo spessore dei muri, si è fatto riferimento al valore di snellezza dell'edificio in muratura di riferimento descritto al paragrafo 2.2.2.2. Un'altra ipotesi è stata assunta per lo spessore dei muri della Rocca Roveresca, il cui valore utilizzato è 1,5m, la media rispetto ai valori individuati.

Per quanto riguarda il valore di altezza della facciata sono stati usati metodi differenti: per le strutture rappresentate nelle tavole dei prospetti il valore è stato misurato mentre per le

strutture non riportate sui documenti è stato associato un valore approssimativo ricavato attribuendo un valore medio di altezza d'interpiano di 4,5 m poi moltiplicato per il numero di piani.

Ottenuti i valori necessari, sono stati elaborati i dati dividendo l'altezza della facciata per lo spessore. Tale valutazione è stata eseguita per ogni facciata di ogni edificio prospiciente uno spazio aperto. Gli edifici d'angolo, che presentano facciate su più spazi aperti, appartenenti a differenti classi sono stati associati alla classe più gravosa. Di seguito, la mappa riporta la distribuzione delle classi di snellezza a cui appartengono gli edifici del centro storico.

SNELLEZZA

Componente lfv

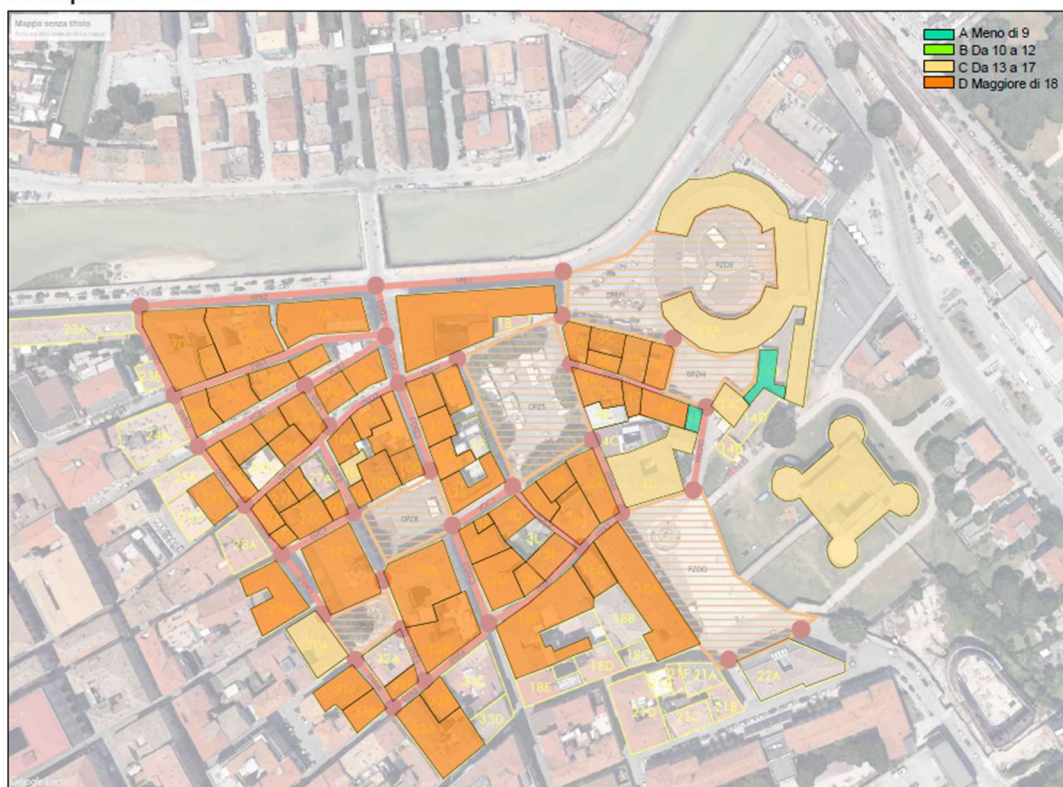


Figura 44: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell'area di interesse per il contributo "Snellezza"

La valutazione del parametro "Aperture" ha comportato il calcolo della percentuale di aperture rispetto alla superficie della facciata. Le informazioni necessarie, per definire il valore di superficie finestrata, sono state ricavate sempre dai prospetti delle vie, disponibili

all'interno del Piano particolareggiato del centro storico, in quanto hanno permesso una misurazione diretta dei valori. Durante lo studio si è riscontrata la ripetitività di determinate tipologie di aperture in edifici con stessa funzionalità: le dimensioni delle bucaure di edifici di carattere residenziale sono indicativamente le stesse in ogni facciata. Questo aspetto ha semplificato la determinazione delle dimensioni delle aperture per gli edifici non presenti sulle mappe in quanto è stato possibile eseguire delle correlazioni dimensionali. Successivamente al reperimento dei dati, è stata calcolata la percentuale di apertura di ogni facciata. Di seguito è riportata la distribuzione delle classi di appartenenza degli edifici.

APERTURE

Componente lfv

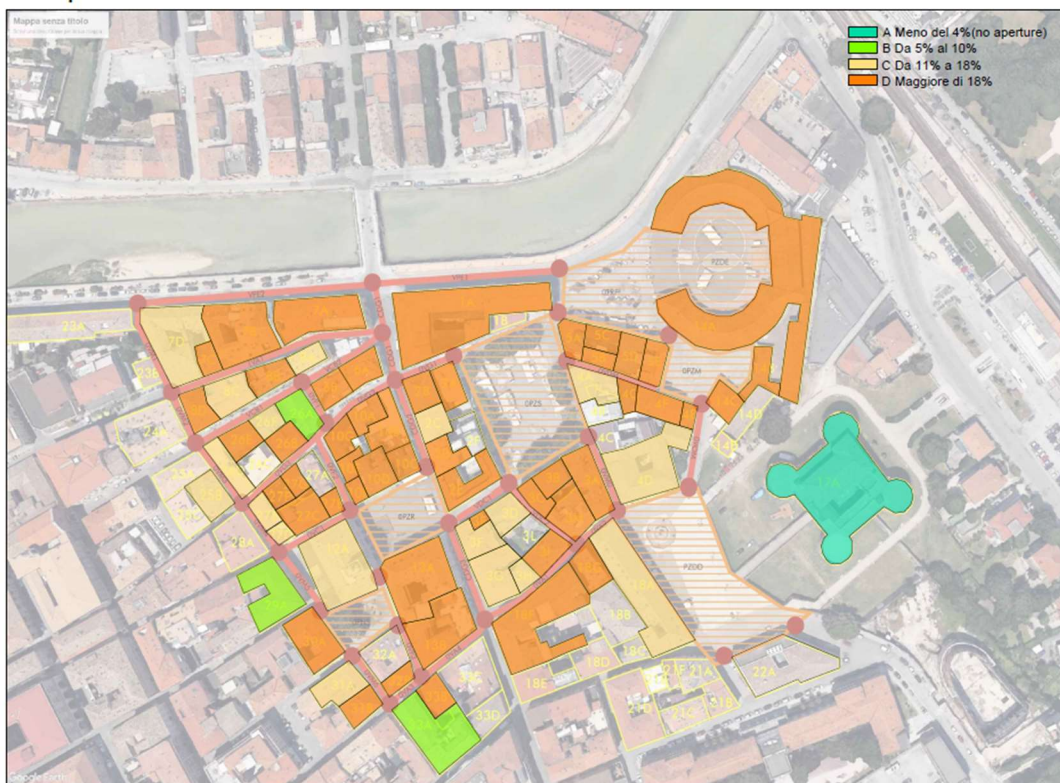


Figura 45: Rappresentazione della classificazione degli edifici dell'area di interesse per il contributo "Aperure"

Il quinto parametro, "Tipologia di copertura", richiede informazioni riguardo la modalità realizzativa delle coperture degli edifici. Il reperimento di tale informazione richiede il supporto di un'indagine speditiva non eseguibile in questo caso specifico, dunque, è stato adottato il seguente metodo. Come primo step, le strutture sono state ipotizzate tutte con copertura spingente e associate alla classe di coefficiente D, simulando la condizione

peggiore. In un altro foglio di calcolo, le strutture sono state ipotizzate tutte con copertura piana e associate alla classe A, rappresentando la condizione più favorevole.

L'ipotesi è stata eseguita affinché si potessero avere indicazioni relativamente le configurazioni estreme in termini di copertura. Di conseguenza, tale procedimento ha richiesto un duplice calcolo per determinare il coefficiente di vulnerabilità sismica, sdoppiando i risultati e ottenendo valori di vulnerabilità sismica per coperture spingenti e valori di vulnerabilità sismica per coperture piane. Ovviamente, non è corretto estremizzare le condizioni rispetto a coperture "spingenti" o "piane", in quanto gli edifici del centro storico presentano entrambe le tipologie.

Il valore di vulnerabilità sismica per coperture spingenti è utilizzato per descrivere uno scenario in cui le coperture sono "non completamente piane", ammettendo una prevalenza di elementi spingenti. Ugualmente il grado di vulnerabilità sismica per coperture piane è utilizzato per descrivere uno scenario in cui le coperture sono "non completamente spingenti" con prevalenza di coperture piane.

4.1.3.2 Le ipotesi dei coefficienti C_1 e C_2

Per determinare il grado di vulnerabilità sismica I_{fv} secondo la formula descritta nella sezione 2.2.2 è necessario determinare la classe di appartenenza anche per i coefficienti aggiuntivi C_1 e C_2 descritti nel paragrafo 2.2.2.3.

Il coefficiente C_1 rappresenta l'influenza dello stato di conservazione in caso di fenomeni di ribaltamenti fuori dal piano. La scelta della classe di appartenenza del coefficiente dipende dall'esperienza e la capacità decisionale dell'utente che esegue lo studio. In questo caso studio, non essendo possibile eseguire una valutazione speditiva, la valutazione è stata eseguita tramite un'indagine visiva attraverso lo strumento Google Maps. La valutazione si è concentrata nell'individuazione delle fessure che possono rappresentare fenomeni di instabilità delle facciate come lesioni con andamento prevalentemente verticale in corrispondenza dell'intersezione tra il muro di facciata e i muri di spina.

Il coefficiente C_2 rappresenta il contributo positivo della presenza di presidi antisismici. La determinazione di tale parametro richiede una valutazione dell'efficacia del presidio antisismico che non è stato possibile riscontrare direttamente. Dunque, nel caso studio sono state eseguite due valutazioni in fogli di calcolo separati considerando, rispettivamente la condizione in cui i presidi siano posizionati in modo efficace e in modo inefficace.

Le classi del coefficiente, in entrambe le valutazioni, dipendono dal numero di piani che è stato determinato in funzione dei livelli di apertura presenti su ogni facciata.

4.1.4 La distribuzione del parametro I_{fv}

Le assunzioni relative alla tipologia di copertura e all'efficienza dei presidi antisismici hanno comportato l'individuazione di quattro valori differenti di I_{fv} che rappresentano le seguenti casistiche:

- C1: indice di vulnerabilità per coperture piane e presidi sismici inefficaci;
- C2: indice di vulnerabilità per coperture piane e presidi sismici efficaci;
- C3: indice di vulnerabilità per coperture spingenti e presidi sismici inefficaci;
- C4: indice di vulnerabilità per coperture spingenti e presidi sismici efficaci;

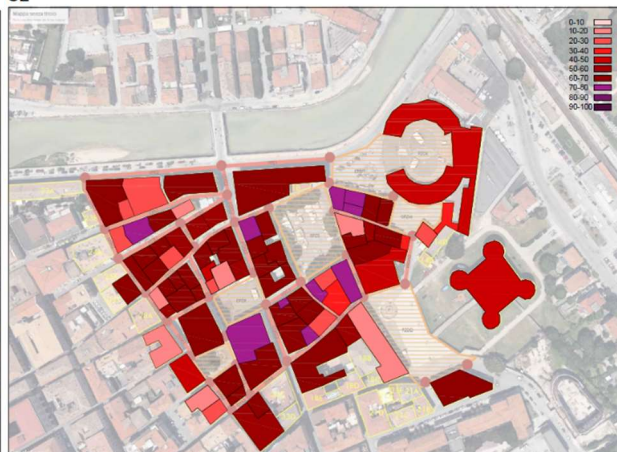
La denominazione "spingenti" o "non spingenti" è utilizzata per semplificare la gestione delle informazioni e sono utilizzate con l'accezione descritta precedentemente.

Di seguito sono riportate le mappe rappresentative della distribuzione dei valori normalizzati di I_{fv} per le quattro casistiche, si ricorda che, per i beni monumentali, le assunzioni potrebbero avere minore validità date le caratteristiche costruttive speciale che possono essere presenti a livello di soluzioni di dettaglio in questi edifici, e che possono essere oggetto di valutazioni più approfondite:

VULNERABILITA' Ifv
C1



VULNERABILITA' Ifv
C2



VULNERABILITA' Ifv
C3



VULNERABILITA' Ifv
C4

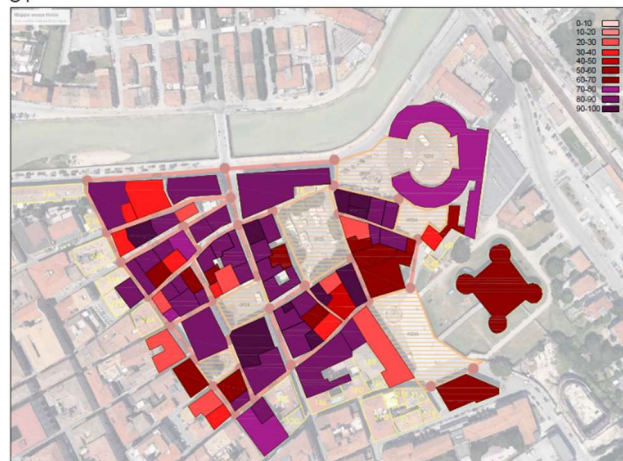


Figura 46: Rappresentazione della distribuzione delle classi di vulnerabilità sismica dei singoli edifici all'interno dell'area di interesse

4.2 I dati di output dei metodi

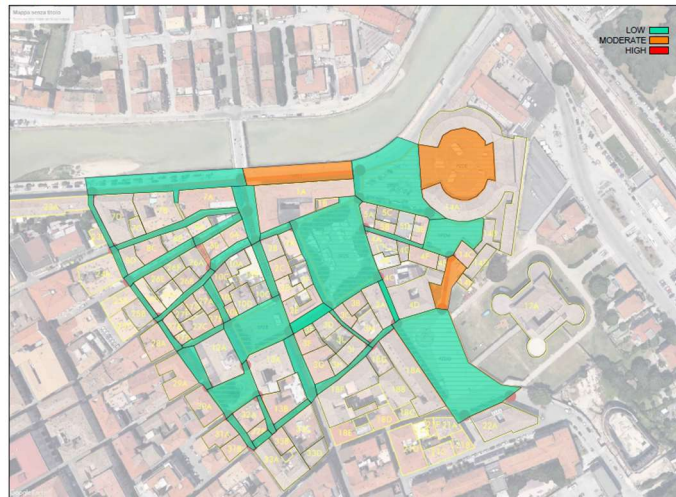
In questo paragrafo sono descritti i risultati ottenuti dalla matrice di rischio per alluvione e dalla matrice di danno per evento sismico. I valori di output rappresentano rispettivamente il grado di esposizione e di danno a cui sono esposti gli edifici. Lo step successivo in questo capitolo consiste nel passare da un livello di indagine microscala, ovvero del singolo edificio, a livello mesoscala, individuando il grado di esposizione e danno degli spazi aperti.

4.2.1 I valori di output per rischio alluvione

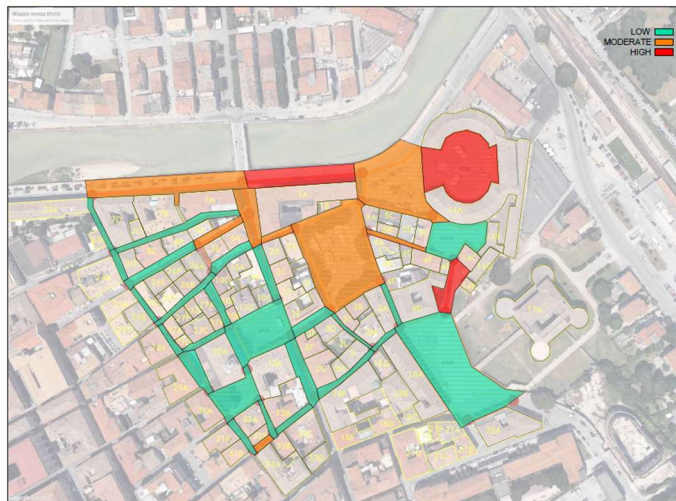
La matrice di rischio alluvione R , valutata per entrambe le direzioni del flusso, ha restituito informazioni relativamente gli edifici più esposti al fenomeno in funzione della velocità del fronte d'acqua.

I dati di output sono stati elaborati per ottenere i valori di danno riferiti agli spazi aperti compresi nell'area di studio. Questo passaggio è stato eseguito normalizzando i gradi di rischio come descritto al paragrafo 2.4.1. Di seguito sono riportate le mappe che descrivono i gradi di rischio associati agli spazi aperti per ciascun livello di rischio H e direzione del flusso.

SCENARIO flusso perpendicolare all'asse del fiume
H: LOW



SCENARIO flusso perpendicolare all'asse del fiume
H: MODERATE

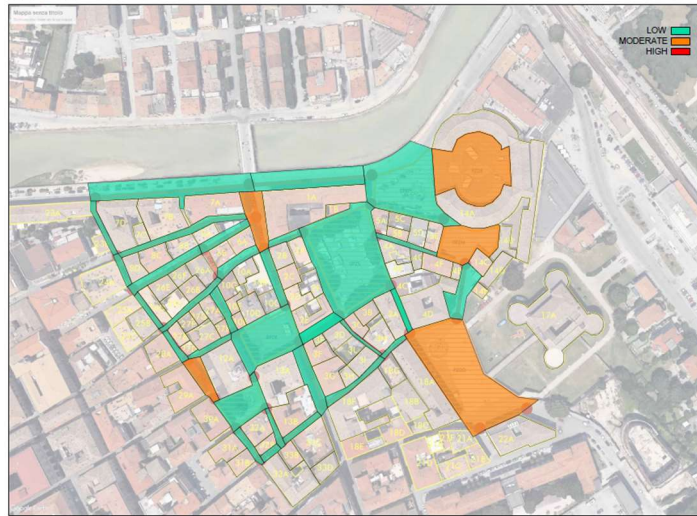


SCENARIO flusso perpendicolare all'asse del fiume
H: HIGH

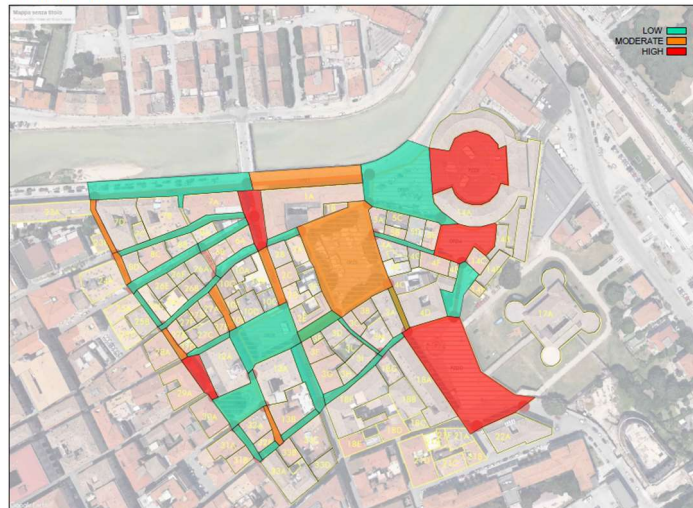


Figura 47: Scenari di rischio per alluvione con flusso perpendicolare all'asse del fiume

SCENARIO flusso da monte
H: LOW



SCENARIO flusso da monte
H: MODERATE



SCENARIO flusso da monte
H: HIGH

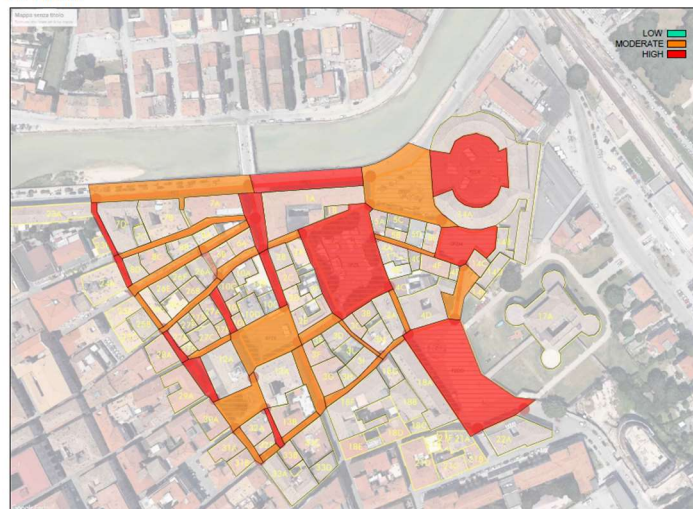


Figura 48: Scenari di rischio per alluvione con flusso proveniente da monte

In entrambi gli scenari, la condizione che presenta più criticità è quella che ipotizza un livello di rischio H “alto”, come atteso. Analizzando lo scenario con rischio “basso” e direzione del flusso perpendicolare all’asse del fiume, si può notare che gli spazi aperti che presentano un rischio di esposizione sono solamente Via Portici Ercolani 1, la piazza del Foro Annonario e via Ottorino Manni, colorate di arancione. Per la stessa direzione del flusso con rischio di livello “moderato” il rischio di esposizione risulta essere più critico. In tal senso tutta l’area in prossimità dell’argine del fiume presenta un rischio almeno moderato mentre le aree precedentemente citate risultano avere un livello di rischio alto. Sempre per questa direzione di flusso, le aree meno prossime all’argine del fiume presentano un livello di rischio basso.

Inoltre, per il livello di rischio “alto” l’interno ambiente costruito in analisi risulta essere esposto ad una condizione critica per tutti gli spazi aperti.

Per quanto riguarda lo scenario per flusso d’acqua proveniente da monte, il livello di rischio presenta una distribuzione più omogenea, con la presenza di spazi aperti classificati con rischio moderato o alto diffusi su tutta l’area di studio, ovvero senza poli di maggior ricorrenza nello spazio urbano. Ipotizzando un grado di rischio H “basso” le aree che presentano un livello di esposizione moderato sono Corso Due Giugno¹, via Mastai 5, Piazza del Duca, Piazza Manni e la piazza del Foro Annonario. Invece, lo scenario che ipotizza un livello di rischio “moderato” presenta una distribuzione molto omogenea del rischio di esposizione: le aree precedentemente associate al livello moderato sono classificate con livello alto e altre aree, come via Mastai 1-2-4, via Fagnani 2-3, Corso Due Giugno, via Portici Ercolani 1 e Piazza Simoncelli, sono classificate con rischio moderato. Il livello di rischio H “alto” espone l’interno ambiente costruito ad un livello critico in termini di esposizione al rischio per alluvione.

4.2.2 I valori di output per rischio sismico

Le matrici di danno, che si sono ottenute tramite i dati di input, evidenziano quali sono gli edifici esposti a danni maggiori in funzione del periodo di ritorno scelto. Per ciascuno dei quattro casi è stata realizzata una matrice di danno per un totale di sedici scenari possibili.

In riferimento alla struttura della matrice i periodi di ritorno di 475 e 975 anni rappresentano, in ognuno dei 4 casi, gli scenari di danno più gravosi con il maggior numero di edifici esposti a collasso C o prossimi al collasso NC.

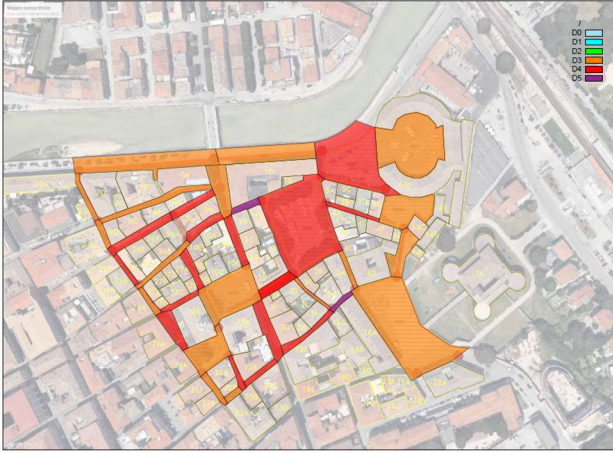
I dati di output sono stati elaborati per ottenere i valori di danno riferiti agli spazi aperti compresi nell'area di studio. Questo passaggio è stato eseguito normalizzando i gradi di danno come descritto al paragrafo 2.4.2.

Di seguito le mappe del centro storico di Senigallia riportano la distribuzione dei gradi di danno degli spazi aperti riferiti ad ognuno dei quattro casi studiati per ogni tempo di ritorno.



Figura 49: Scenari di danno per C1

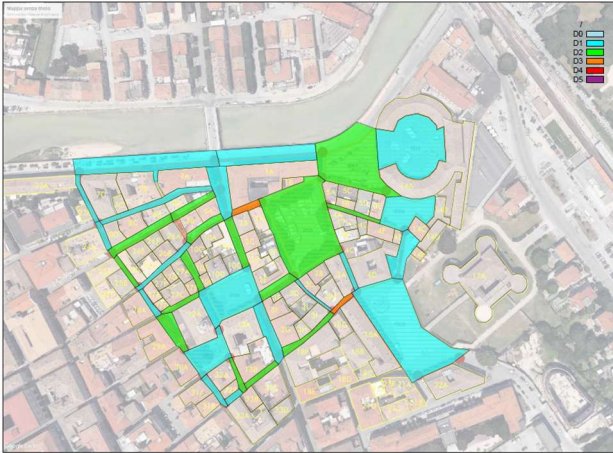
975 yr



475 yr



101 yr



50 yr

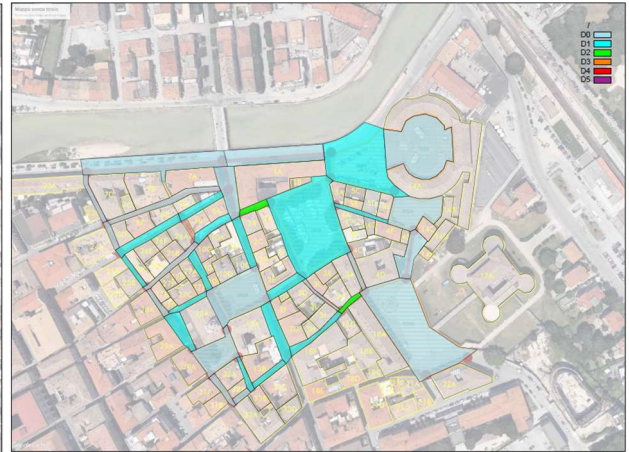
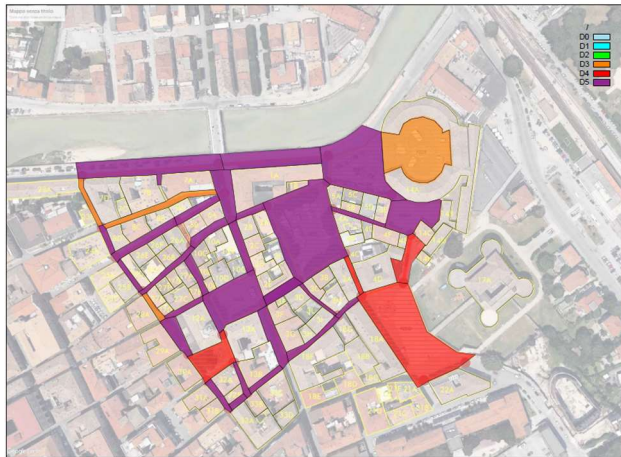
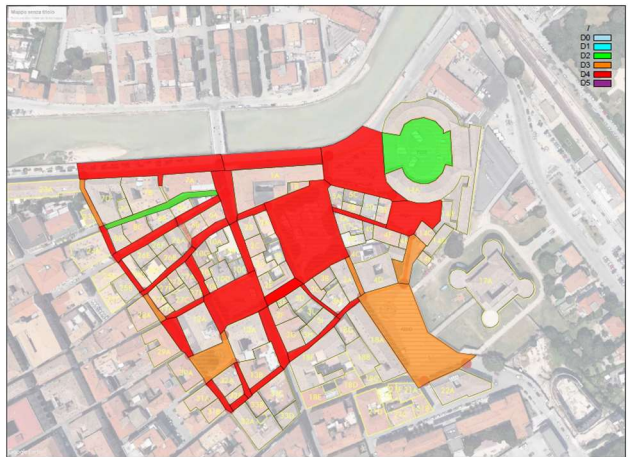


Figura 50: Scenari di danno per C2

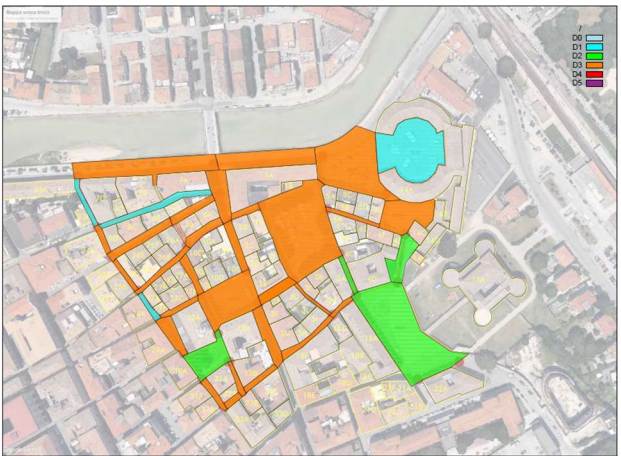
975 yr



475 yr



101 yr



50 yr

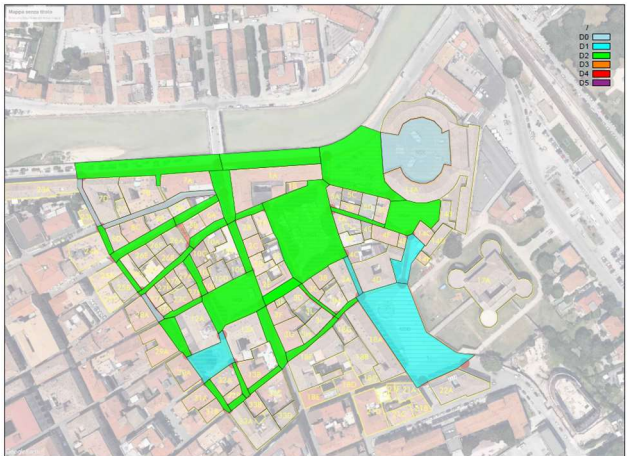
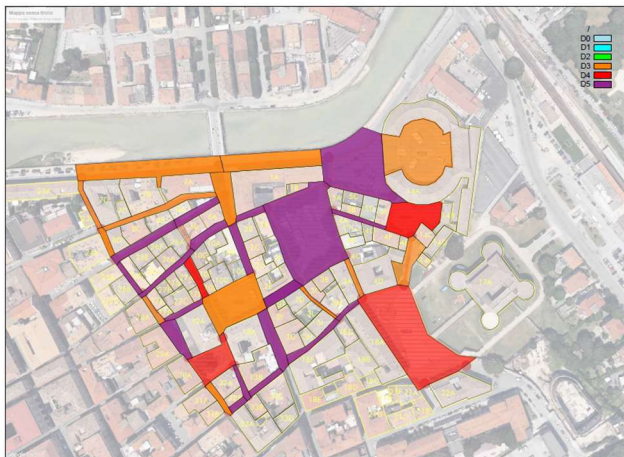
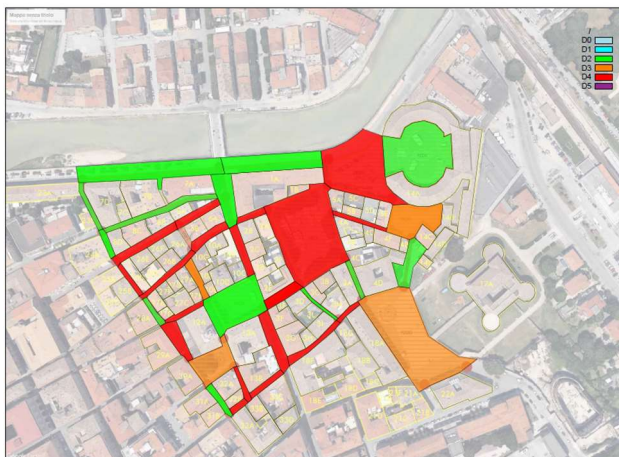


Figura 51: Scenari di danno per C3

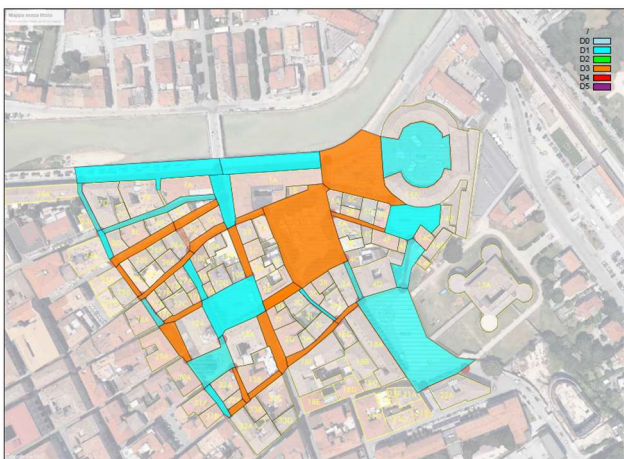
975 yr



475 yr



101 yr



50 yr

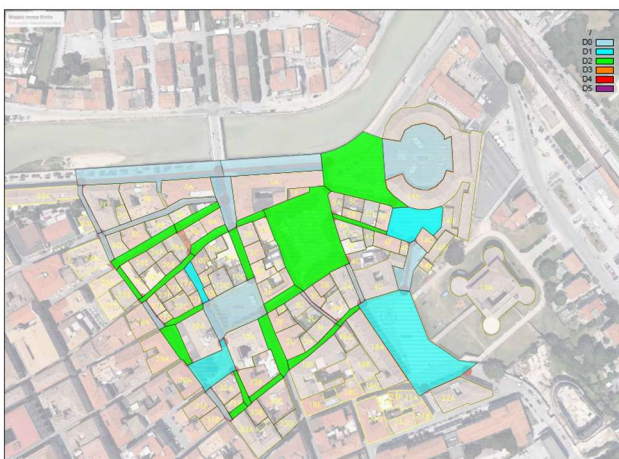


Figura 52: Scenari di danno per C4

Si può dedurre che gli scenari di danno più critici appartengono al caso C3, ovvero per la configurazione di coperture spingenti e presidi antisismici inefficaci, come atteso. Inoltre, è possibile notare che per questo caso gli spazi aperti come le piazze, che possono rappresentare zone sicure, in realtà sono coinvolte da un grado di danno di modeste entità. Lo scenario C4 presenta un livello di danno per spazi aperti di minore criticità rispetto a C3, mentre gli scenari per i casi C1 e C2 sono tra loro confrontabili e non presentano notevoli differenze.

Affinché si possano ottenere degli scenari di danno per sisma più dettagliati e individuare le effettive zone sicure di ogni scenario e tempo di ritorno, sono state calcolate le macerie presenti al suolo come indicato nel paragrafo 2.4.2. Le macerie sono state determinate solamente per gli edifici che rientrano nella categoria di danno NC o C, in quanto il metodo

permette di utilizzare la formula solo per fenomeni di ribaltamento associati a tali entità di danneggiamento. Le successive immagini riportano l'impronta al suolo delle macerie, rappresentate con il retino rosso, per i tempi di ritorno di 475 e 975 anni per tutti e 4 casi.

975 yr



Figura 53: Rappresentazione dell'impronta dei cumuli di macerie al suolo (retino rosso) per il tempo di ritorno di 975 anni per il caso C1

475 yr



Figura 54: Rappresentazione dell'impronta dei cumuli di macerie al suolo (retino rosso) per il tempo di ritorno di 475 anni per il caso C1

975 yr



Figura 55: Rappresentazione dell'impronta dei cumuli di macerie al suolo (retino rosso) per il tempo di ritorno di 975 anni per il caso C2

475 yr

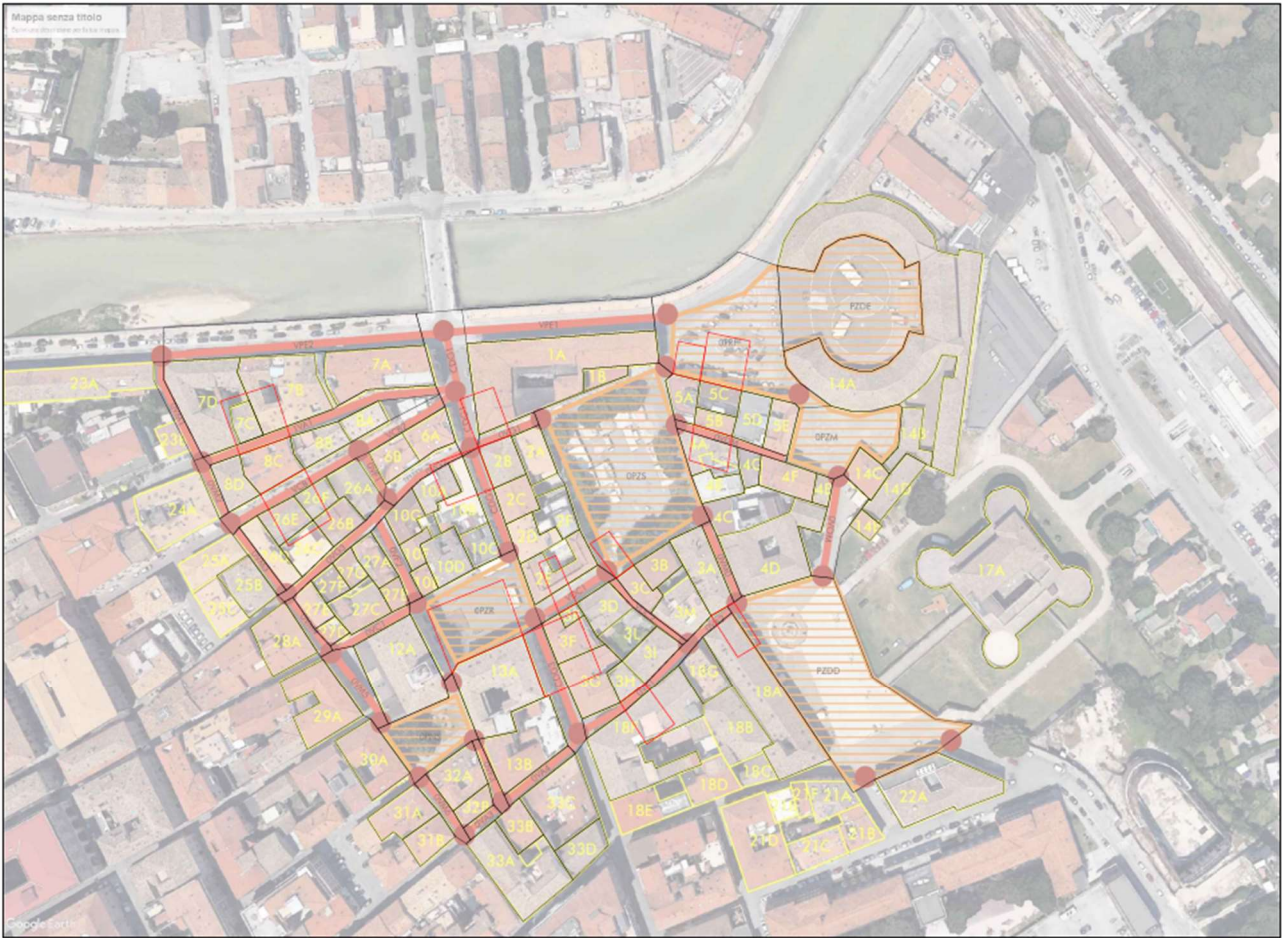


Figura 56: Rappresentazione dell'impronta dei cumuli di macerie al suolo (retino rosso) per il tempo di ritorno di 475 anni per il caso C2

975 yr

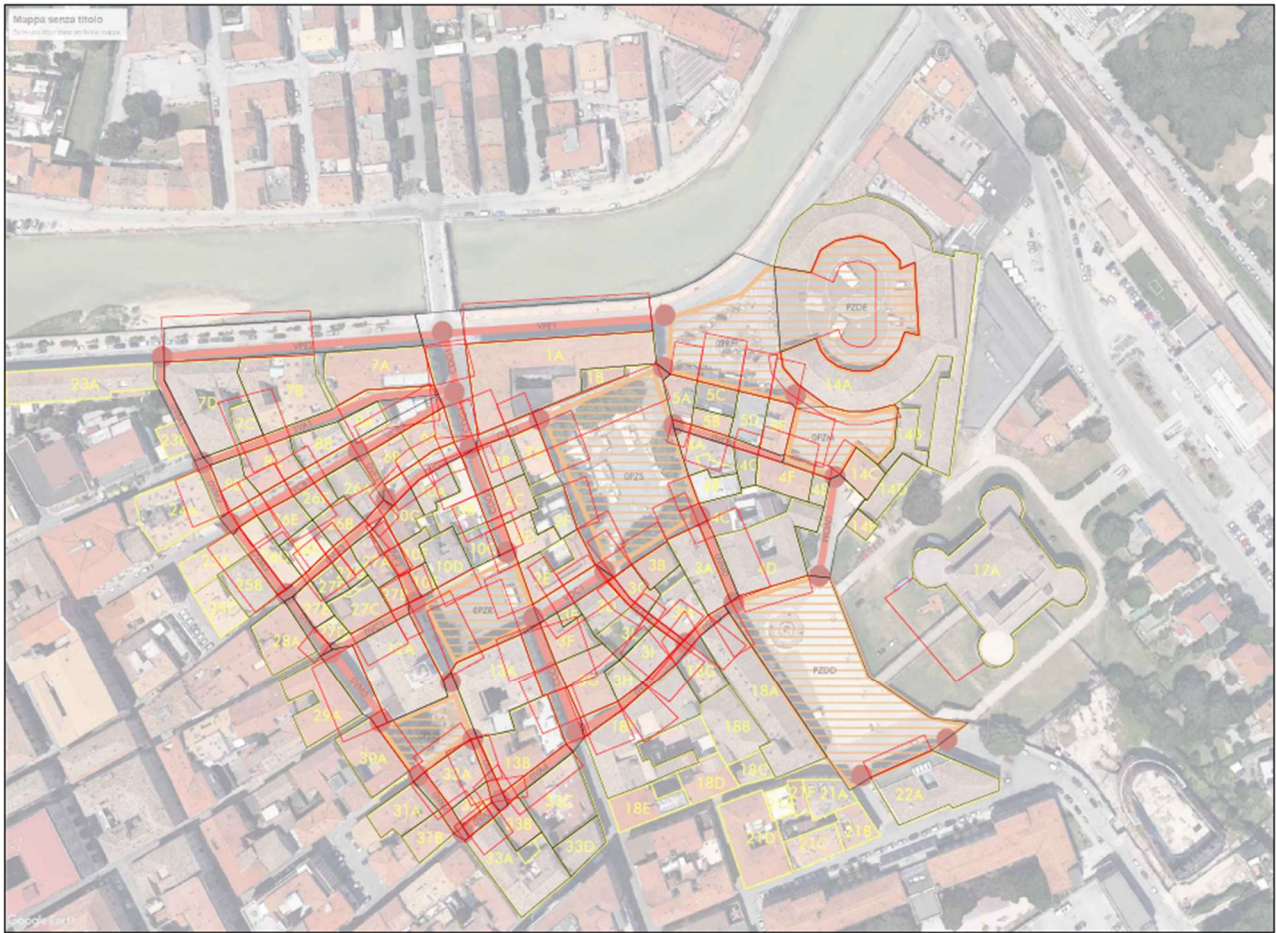


Figura 57: Rappresentazione dell'impronta dei cumuli di macerie al suolo (retino rosso) per il tempo di ritorno di 975 anni per il caso C3

475 yr

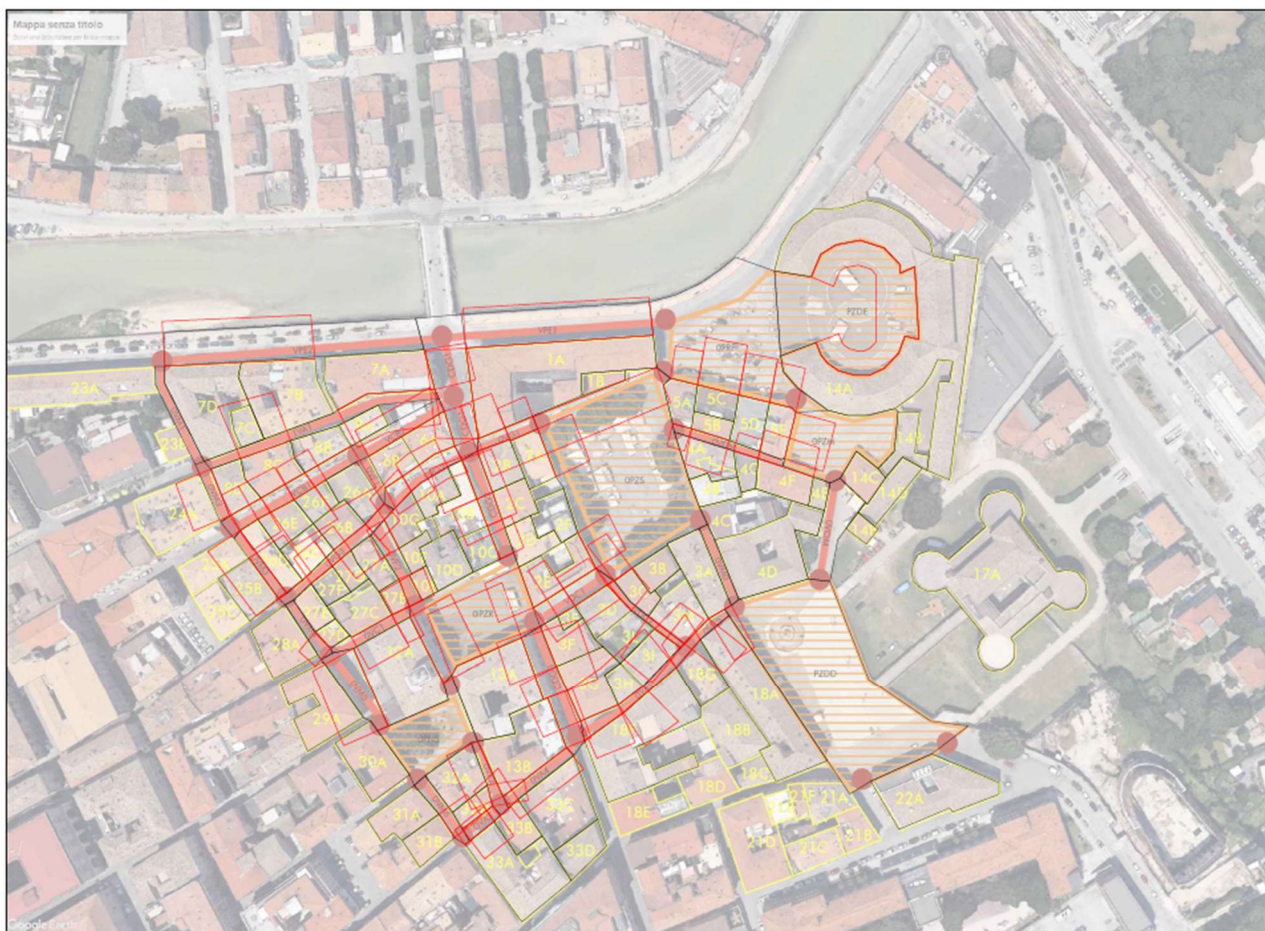


Figura 58: Rappresentazione dell'impronta dei cumuli di macerie al suolo (retino rosso) per il tempo di ritorno di 475 anni per il caso C3

975 yr

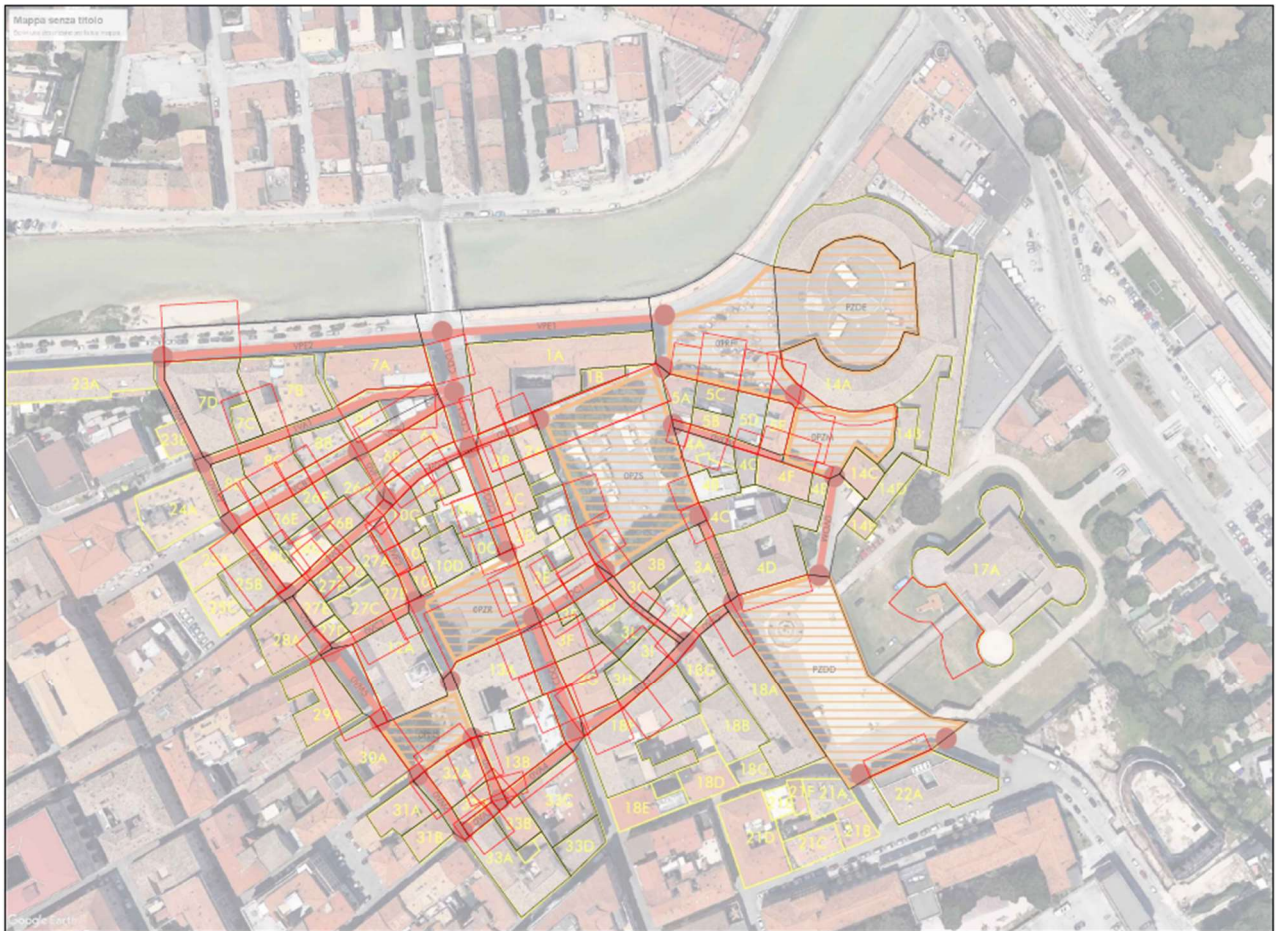


Figura 59: Rappresentazione dell'impronta dei cumuli di macerie al suolo (retino rosso) per il tempo di ritorno di 975 anni per il caso C4

475 yr

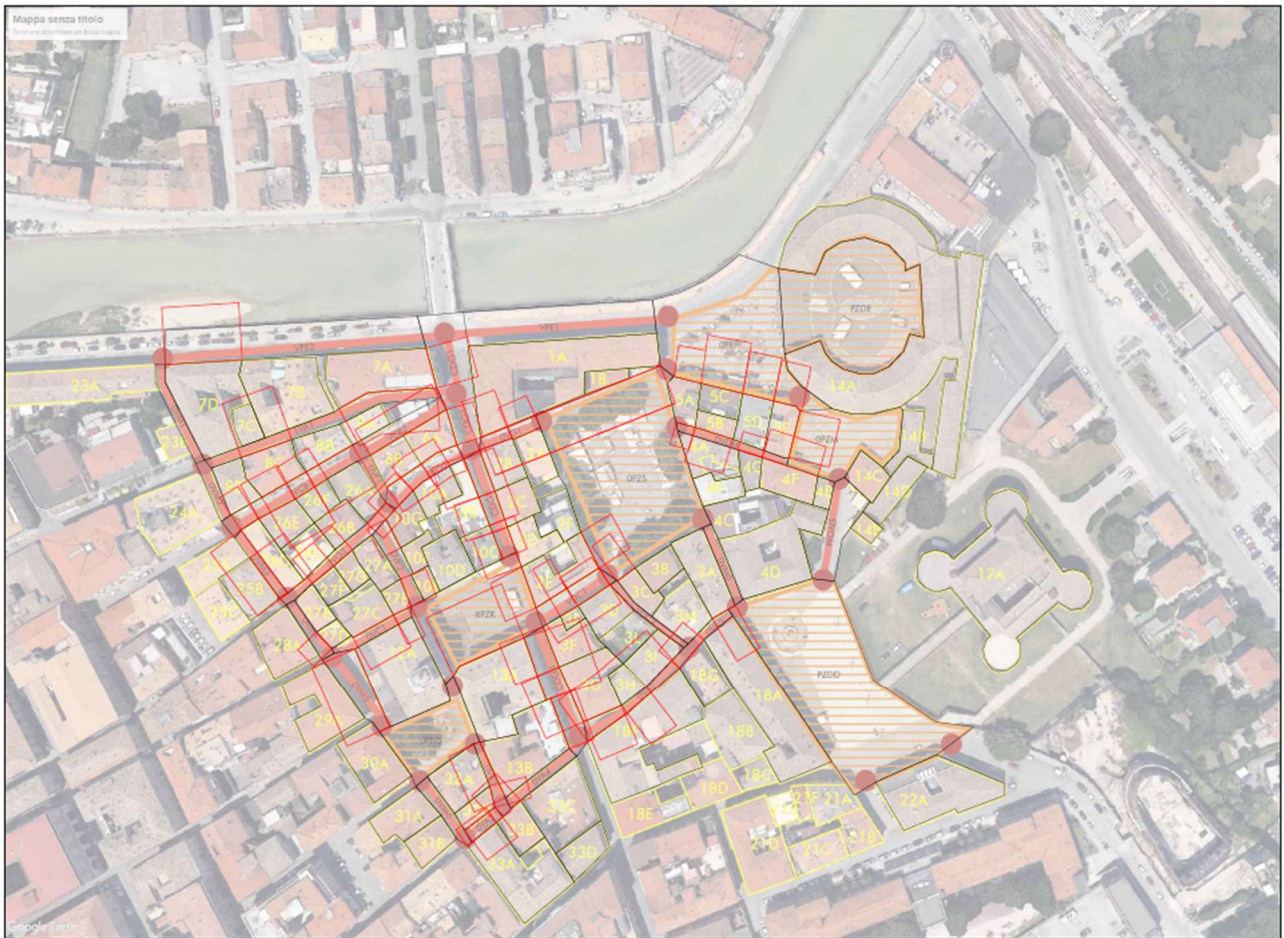


Figura 60: Rappresentazione dell'impronta dei cumuli di macerie al suolo (retino rosso) per il tempo di ritorno di 475 anni per il caso C4

L'indice di macerie al suolo ha rivelato degli scenari molto differenti tra loro. La prima evidente differenza si presenta tra gli scenari C1, C2 e C3, C4: l'entità di macerie al suolo maggiore per gli scenari dei casi 3 e 4 è imputabile all'ipotesi di "coperture spingenti", che amplificano gli effetti negativi del sisma sulle strutture favorendo fenomeni di ribaltamento.

Nei casi 1 e 2, per entrambi i tempi di ritorno, non sono presenti sostanziali differenze eccetto la presenza di alcuni cumuli nel caso C1 che non si verificano nel caso C2. Tale differenza non condiziona la liberazione o l'ostruzione di un numero maggiore di vie di fuga; quindi, non incrementa il livello di esposizione per gli occupanti. Tali crolli, che si verificano in vie di esodo bloccate a causa di altri edifici prospicienti la stessa strada, si possono attribuire all'ipotesi di presidi antisismici inefficaci, assunta nel caso C1, e non alla tipologia di copertura in quanto

per entrambi i casi sono ipotizzate “non spingenti”. In accordo con l’ipotesi di presidi antisismici efficaci in C2, è corretto evidenziare che rispetto a C1 l’entità di macerie al suolo è minore ed è attribuibile al corretto funzionamento di presidi antiribaltamento della facciata.

Nei casi C3 e C4, per entrambe i tempi di ritorno, l’entità di macerie al suolo rende impraticabili le stesse vie di esodo, causando un livello di esposizione elevato per gli occupanti che non possono percorrere alcuna via di esodo.

Le macerie al suolo per i tempi di ritorno di 975 anni per tutti e 4 i casi sembrano rendere impossibile le fasi di esodo e soccorso in quanto quasi tutte le vie sono bloccate e le piazze, che rappresentano le possibili zone sicure, sono ostruite dalle macerie. Ovviamente tale valutazione emerge anche in correlazione con la speditività dei metodi analizzati, che semplificano i meccanismi di danno assumendo per tutti gli edifici quello più oneroso di ribaltamento e cuneo di macerie.

In conclusione, gli scenari di macerie al suolo che possono essere oggetto di ulteriori analisi rispetto al processo di esodo sono C1 e C2 per un periodo di ritorno di 475 anni, in quanto non presentano delle condizioni estreme e permetterebbero lo svolgimento delle fasi di esodo e di primo soccorso. Tra i due scenari si è deciso di valutare quello più critico, ovvero C1 per 475 anni, in quanto presenta una quantità di macerie al suolo maggiore rispetto a C2.

Capitolo 5 – Risultati: valutazioni di rischio legate al fattore umano

In questo capitolo sono descritte le fasi di modellazione dell'ambiente costruito, attraverso il software di simulazione MassMotion. Inoltre, sono riportati i risultati ottenuti nella fase di simulazione. In ogni sezione sono riportati i valori numerici caratterizzanti il modello e la tipologia di evacuazione indagata rispetto agli indicatori citati nella sezione 2.5.3. Nella prima parte del capitolo sono riportati i risultati per il fenomeno alluvionale mentre nella seconda i risultati che descrivono l'evacuazione per fenomeni sismici. I risultati delle simulazioni di entrambe i fenomeni sono descritti tramite indicatori generali e comuni, ma anche con indicatori specifici dell'evento in questione.

5.1 La modellazione e simulazione con MassMotion

In questa sezione sono descritte le valutazioni eseguite per poter individuare gli scenari, sulla quale basare le modellazioni e le simulazioni, più rilevanti per sisma e per alluvione. Nelle ulteriori sezioni saranno descritte tutte le fasi di realizzazione del modello e di caratterizzazione degli occupanti in funzione di differenti livelli di affollamento.

5.1.1 La scelta degli scenari

Gli scenari per alluvione ed evento sismico ottenuti e descritti rispettivamente nelle sezioni 4.2.1 e 4.2.2 devono essere selezionati affinché si possano individuare quelli più rappresentativi e utili ai fini della modellazione. Tali scelte sono state sostenute dalle seguenti ipotesi e assunzioni.

Per quanto riguarda l'evento alluvionale, gli scenari sono stati valutati in funzione del valore di rischio di esposizione associato agli spazi aperti. Rispetto le tre classi di rischio H, sono state escluse le colonne di rischio "alto" e "moderato" ed è stata scelta la colonna di rischio "basso" poiché è l'unica condizione entro la quale è previsto il movimento delle persone come indicato dai limiti di Cox ^{[31][6]}:

- $V < 3 \text{ m/s}$, $D < 1,2 \text{ m}$, $DV < 1,2 \text{ m}^2/\text{s}$

Nel rispetto di questa assunzione sono stati esclusi gli scenari per rischio H “alto” e “moderato” per entrambe le direzioni di flusso. Dunque, rispetto quanto appena descritto e le direzioni di flusso studiate, si è scelto di studiare lo scenario per direzione perpendicolare all’asse del fiume combinato con il rischio H basso.

L’individuazione dello scenario per l’evento sismico è stata attuata studiando le mappe delle macerie al suolo. La strategia, con la quale sono state valutate le mappe presenti nella sezione 4.2.2, si basa non solo sulla quantità e l’estensione dei cumuli di macerie ma anche sul numero di vie bloccate e ostruite dai crolli. In relazione a tali aspetti si è deciso di escludere entrambi gli scenari dei casi C3 e C4 in quanto i detriti ostruiscono la quasi totalità delle strade e restituiscono degli scenari che rappresentano delle condizioni eccessivamente estreme che non permetterebbero lo svolgimento delle fasi di esodo ed evacuazione. Le stesse assunzioni sono state fatte per gli scenari con tempi di ritorno di 975 anni per i casi C1 e C2: anche in queste condizioni i cumuli di macerie rendono impossibili le fasi di esodo e soccorso.

Dunque, lo scenario su cui si basa la modellazione è quello del caso C1 con tempo di ritorno di 475 anni. È stato scelto in quanto, nonostante presenti considerevoli quantità di macerie al suolo con importanti aree d’ingombro, la criticità rappresentata in questo scenario è accettabile e permette di ipotizzare una fase di esodo degli occupanti.

Inoltre, si è individuato tale scenario rispetto al corrispettivo per il caso C2 in quanto presenta maggior quantità di macerie al suolo e dunque rappresenta un livello di criticità maggiore.

In conclusione, gli scenari indagati per entrambe gli eventi sono riassunti nella seguente tabella.

SCENARI		
EVENTO	CASO	RISCHIO H
SISMA	C1: coperture non spingenti e presidi sismici inefficaci	475 yr
ALLUVIONE	Flusso perpendicolare all'asse del fiume	basso

Tabella 8: Schematizzazione degli scenari indagati con le simulazioni

5.1.2 La creazione del modello

Il modello è stato realizzato con il software MassMotion per simulare il comportamento di evacuazione degli occupanti. La realizzazione dell'ambiente costruito è stata realizzata con il programma Revit affinché si potessero rispettare le effettive dimensioni delle vie e degli edifici. È stato possibile utilizzare Revit in quanto il software di simulazione permette di importare file .ifc, individuando gli elementi come oggetti. L'immagine seguente mostra le geometrie caratterizzanti l'ambiente costruito oggetto di studio.

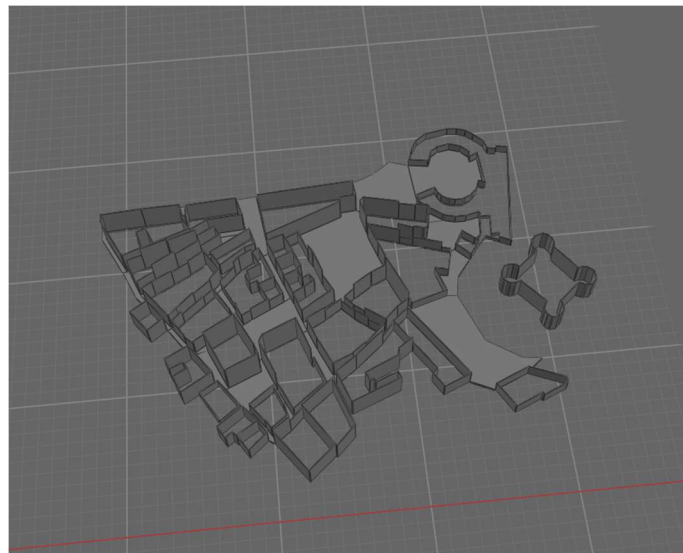


Figura 61: Immagine dell'ambiente costruito importato sul software MassMotion

Lo step successivo consiste nell'attribuire a ciascun oggetto dello scenario una funzione. Le vie e le piazze sono state associate alla funzione *floor* affinché possano rappresentare l'area calpestabile sulla quale possono transitare per gli occupanti durante la fase di esodo. I *floor* sono resi comunicanti tra loro grazie ai *link*, ovvero degli oggetti che permettono il passaggio degli utenti da un *floor* all'altro. In questa modellazione il collegamento dei vari *floor* non si è realizzata tramite l'utilizzo di link bensì sono stati collegati con la funzione "Merge". Dopo aver selezionato tutti i *floor*, con il tasto destro si è selezionata l'opzione "Merge" affinché si possa generare un'unica area calpestabile.

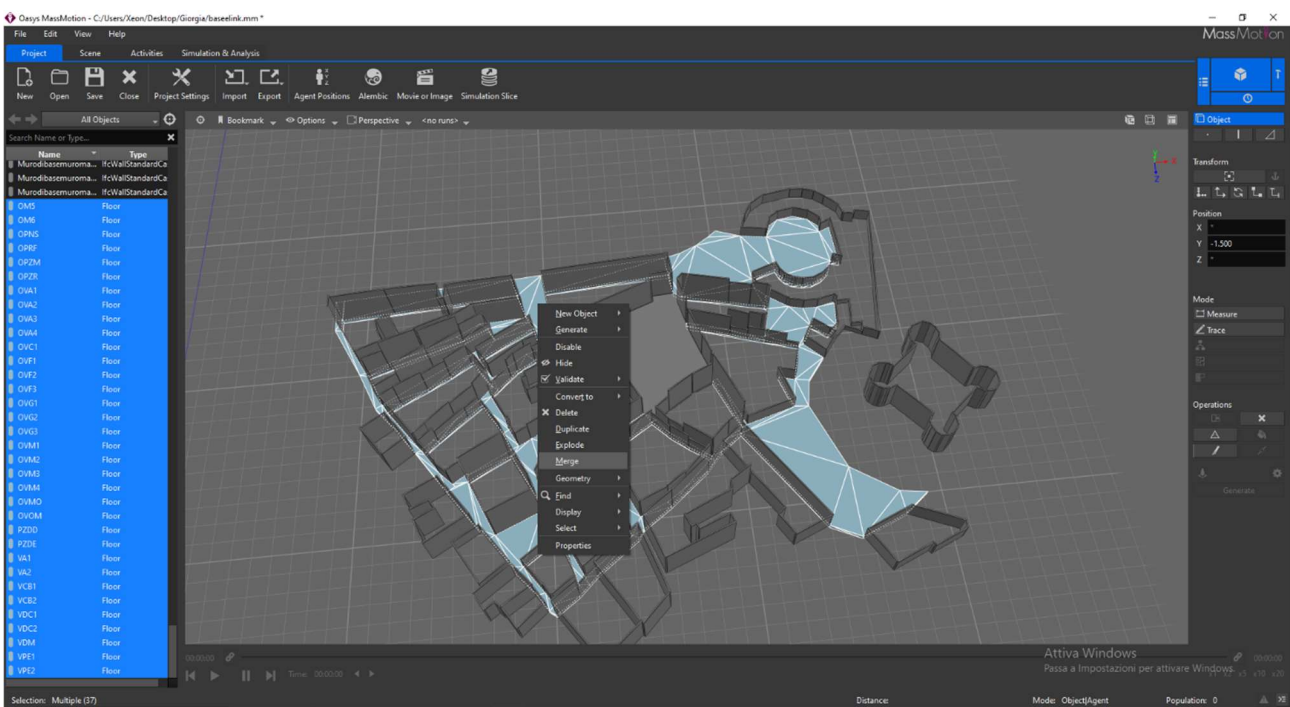


Figura 62: Rappresentazione del passaggio di unione dei vari floor in un unico elemento

Al termine di questa prima fase si è ottenuto, quindi, un ambiente costruito modellato che rispetta le funzionalità e la configurazione degli elementi reali. L'immagine seguente rappresenta la modellazione dell'ambiente costruito.

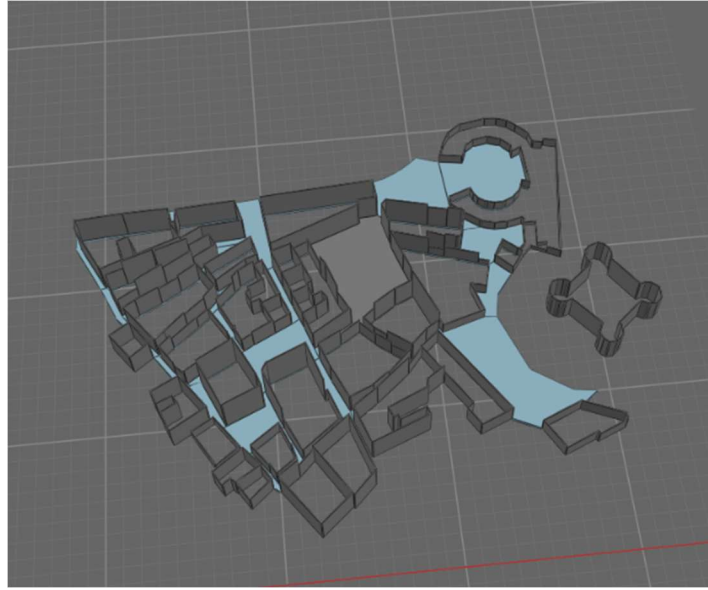


Figura 63: Restituzione dell'ambiente costruito: in azzurro è evidenziata la superficie calpestabile dove si muovono gli agenti

Il modello è stato duplicato in due file per poter eseguire modellazioni separate e caratteristiche per ciascun evento indagato. La modellazione per alluvione non ha richiesto ulteriori passaggi, mentre per l'evento sismico ha richiesto un ulteriore step, ovvero l'inserimento delle macerie. Per rappresentare i detriti al suolo si sono utilizzati gli oggetti chiamati *barrier*. La caratteristica principale di questo specifico elemento del modello è di poter rappresentare elementi o regioni dello spazio che non possono essere attraversate dagli occupanti, modificando il percorso stesso degli agenti. Nel caso specifico si è utilizzata una visualizzazione tridimensionale dell'oggetto: sono state definite le dimensioni di base in accordo con i valori ottenuti dai calcoli indicati nel capitolo 2.4.2 ed è stata associata un'altezza di 1 m per assicurarsi che l'oggetto fosse effettivamente un ostacolo non superabile dagli agenti. L'inserimento e posizionamento delle barriere sono stati eseguiti per tutti gli edifici che, nel rispetto dello scenario individuato descritto nella sezione 5.1.1, presentano crolli di facciata.

Di seguito viene riportata un'immagine della modellazione dell'ambiente costruito in pianta che evidenzia la presenza delle macerie al suolo.



Figura 64: Immagine delle macerie nell'ambiente costruito

5.1.3 Il popolamento degli scenari

Dopo aver realizzato la modellazione di ambienti costruiti che rispecchiano le condizioni di ciascuna tipologia di evento, è stata inserita la componente umana. Questo passaggio è stato realizzato tramite l'inserimento di oggetti detti *portal*. Tali elementi di modellazione rappresentano le zone dalle quali saranno generati gli agenti; dunque, è una strategia utile per rappresentare le persone presenti nell'ambiente costruito. In questa fase di modellazione si è resa necessaria l'individuazione del numero di persone con cui popolare l'ambiente.

I dati necessari sono stati forniti da un altro lavoro di tesi che si occupa di indagare i livelli di affollamento degli spazi aperti del centro storico della città di Senigallia. Gli scenari a disposizione si differenziano per diversi livelli di affollamento e ciascuno presenta specifiche condizioni come, ad esempio, affollamento estivo, invernale e in presenza o meno di mass gathering, ovvero raduni di massa in concomitanza di eventi.

Gli scenari a disposizione, trattata in tesi svolte allo stesso tempo da C. Aligheri e M. Natalucci, sono:

- Scenario 1: stagione invernale, no mass gathering e livello di mobilità pedonale A;
- Scenario 2: stagione invernale, mass gathering 1.2 pp/mq e livello di mobilità pedonale A;
- Scenario 3: stagione estiva, no mass gathering e livello di mobilità pedonale A;
- Scenario 4: stagione estiva, mass gathering 1.2 pp/mq e livello di mobilità pedonale C;
- Scenario 5: stagione estiva, mass gathering 2pp/mq e livello di mobilità pedonale E;
- Scenario 6: stagione estiva, mass gathering 4 pp/mq e livello di mobilità pedonale E;

Si è ritenuto interessante studiare specifici e differenti tipologie di scenari di affollamento combinati agli eventi citati nella tab. 8 presente nella sezione 3.5.1. Lo scenario alluvionale è stato combinato con gli scenari 1 di affollamento, per rappresentare le conseguenze di un'alluvione nella stagione invernale in assenza di mass gathering; mentre l'evento sismico è stato combinato con gli scenari di affollamento 1 e 5 per indagare le conseguenze per l'avvento di un sisma nella stagione invernale priva di mass gathering e nella stagione estiva con presenza di raduni di persone.

Dunque, la tabella in sezione 5.1.1 viene aggiornata per una miglior comprensione delle combinazioni di evento e scenari di affollamento indagati.

SCENARI				
EVENTO	CASO	RISCHIO H	SCENARI	
SISMA	C1: coperture non spingenti e presidi sismici inefficaci	475 yr	Scenario 1: stagione invernale e no mass gathering	Scenario 5: stagione estiva e mass gathering
ALLUVIONE	Flusso perpendicolare all'asse del fiume	basso	Scenario 1: stagione invernale e no mass gathering	

Tabella 9: Schematizzazione degli scenari indagati combinati con le condizioni di affollamento

Tali scenari fornisco indicazioni relative al numero e alla tipologia di occupanti presenti nell'ambiente costruito in funzione delle ore del giorno.

Gli utenti sono suddivisi in quattro categorie:

- Only Outdoor OO (solo esterni): agenti presenti solamente negli spazi aperti come vie o piazze;
- Prevalent Outdoor PO (prevalentemente esterni): agenti presenti prevalentemente negli spazi aperti come dehor;
- Resident Rn (residenti): occupanti interni agli edifici in unità strutturali con destinazione d'uso residenziale;
- Non Resident NRn (non residenti): occupanti interni presenti in unità strutturali con destinazione d'uso differenti dalla residenziale;

e per ciascuna categoria i dati sono organizzati in fasce orarie di 1 ora e sono associati al singolo spazio aperto.

Affinché si possa ottenere una confrontabilità tra gli scenari, sono stati utilizzati valori relativi al numero di occupanti in funzione del picco di presenza giornaliero. Individuata la fascia oraria in cui si verifica il picco del numero totale di occupanti interni all'area oggetto di studio, si sono utilizzati i valori di riferimento per ogni classe di agenti, relativi alla stessa fascia oraria. Dunque, per organizzare i valori di affollamento si è operato con le seguenti procedure:

- Fase 1: si individua la fascia oraria che corrisponde al picco per il totale degli utenti;
- Fase 2: gli utenti OO sono determinati in funzione del valore totale corrispondente la fascia oraria di riferimento;
- Fase 3: gli utenti PO e Indoor (RN+NRn) sono stati determinati per ciascuno spazio aperto in cui è suddiviso l'ambiente costruito relativamente alla fascia oraria di riferimento;

tale procedura è stata eseguita per ciascun livello di affollamento.

Successivamente, i valori numerici ricavati dall'elaborazione dei dati sono stati associati ai portali. Ogni singola classe di occupanti viene associata al portale di riferimento secondo specifiche modalità.

Per quanto riguarda gli Only outdoor, è stato generato un unico portale chiamato Portal_Outdoor. La caratteristica di tale portale è quella di poter redistribuire le persone ad esso associato su tutta la superficie del floor attraverso l'impostazione "On floor" nella sezione Agent Placement come mostrato in figura.

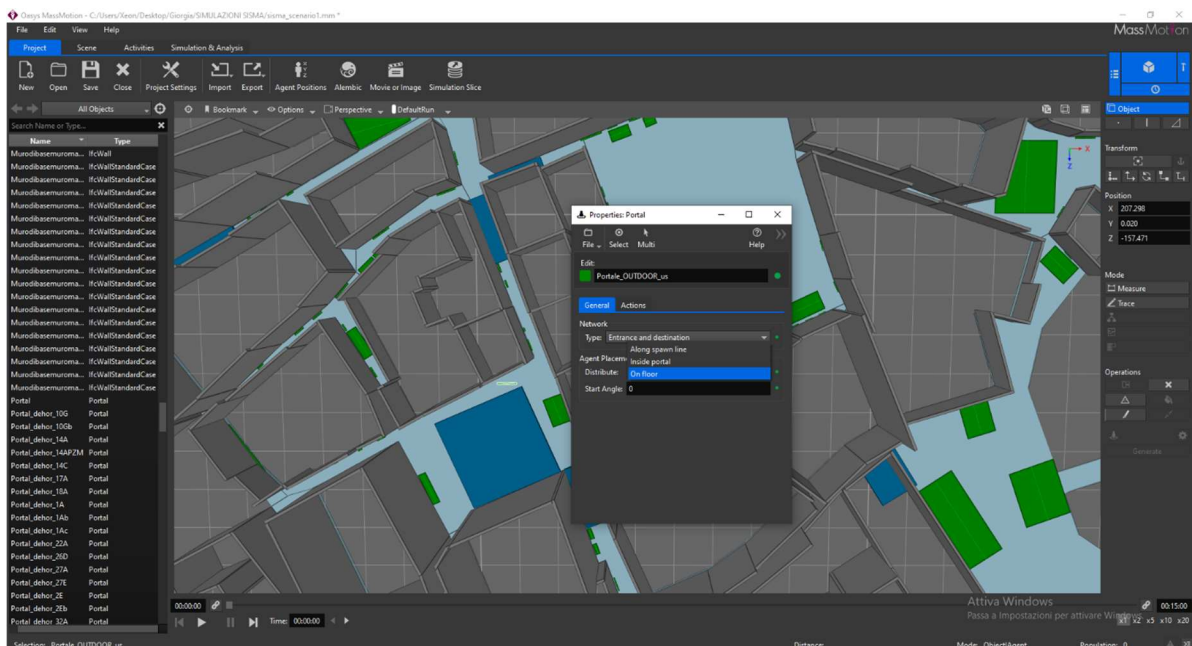


Figura 65: Immagine delle impostazioni dei portali utilizzati per generare gli utenti Outdoor

I portali necessari per rappresentare le persone classificate come Prevalent Outdoor sono stati modellati in funzione dell'effettiva estensione dei dehor reali. I portali dedicati agli utenti PO sono stati impostati affinché gli agenti fossero generati all'interno dell'area del portale attraverso i comandi "Inside porta" per la sezione Agent come mostrato nell'immagine seguente.

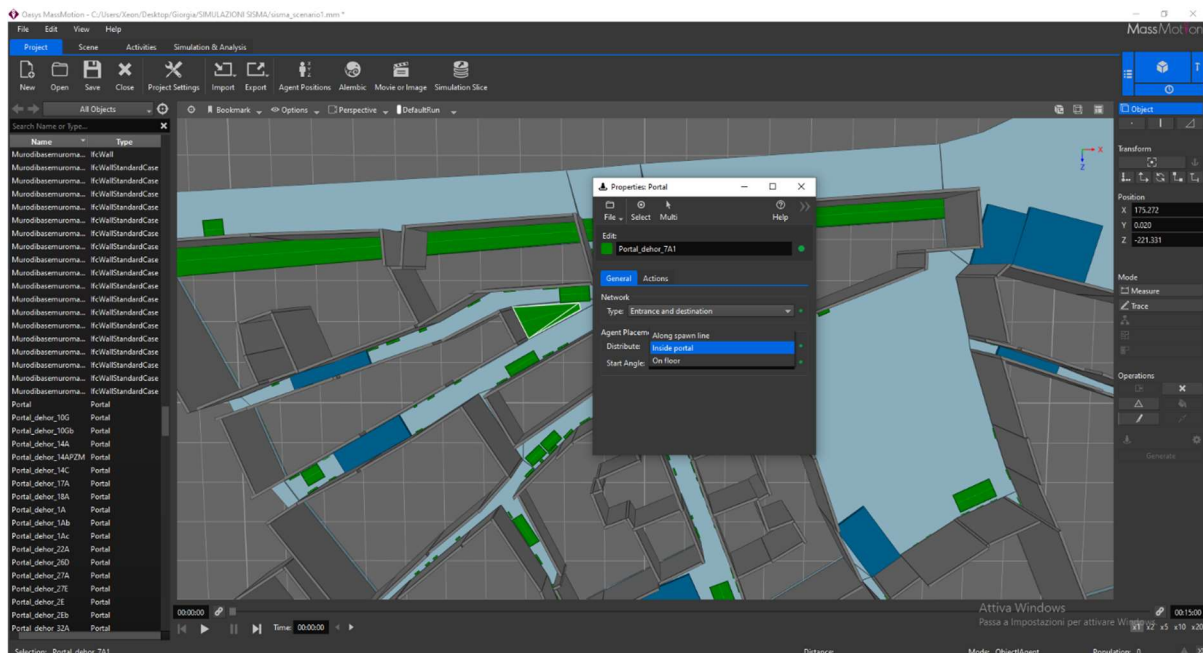


Figura 66: Immagine delle impostazioni dei portali utilizzati per generare gli utenti Dehor

Per rappresentare le persone classificate come utenti Indoor, indipendentemente se RN o NRn, i portali sono stati posizionati in prossimità delle facciate degli edifici in corrispondenza degli accessi delle unità strutturali. Tali posizionamenti sono stati eseguiti confrontando le immagini a disposizione su Google Maps e ha permesso di distinguere gli accessi di unità residenziali e unità commerciali. È necessario specificare che in corrispondenza dei portici di via Portici Ercolani, i portali sono stati generati con le dimensioni effettive del porticato affinché si potesse simulare il passaggio delle persone al loro interno. Affinché gli occupanti simulino l'esodo attraverso un'apertura i portali sono stati modellati come riportato nell'immagine seguente:

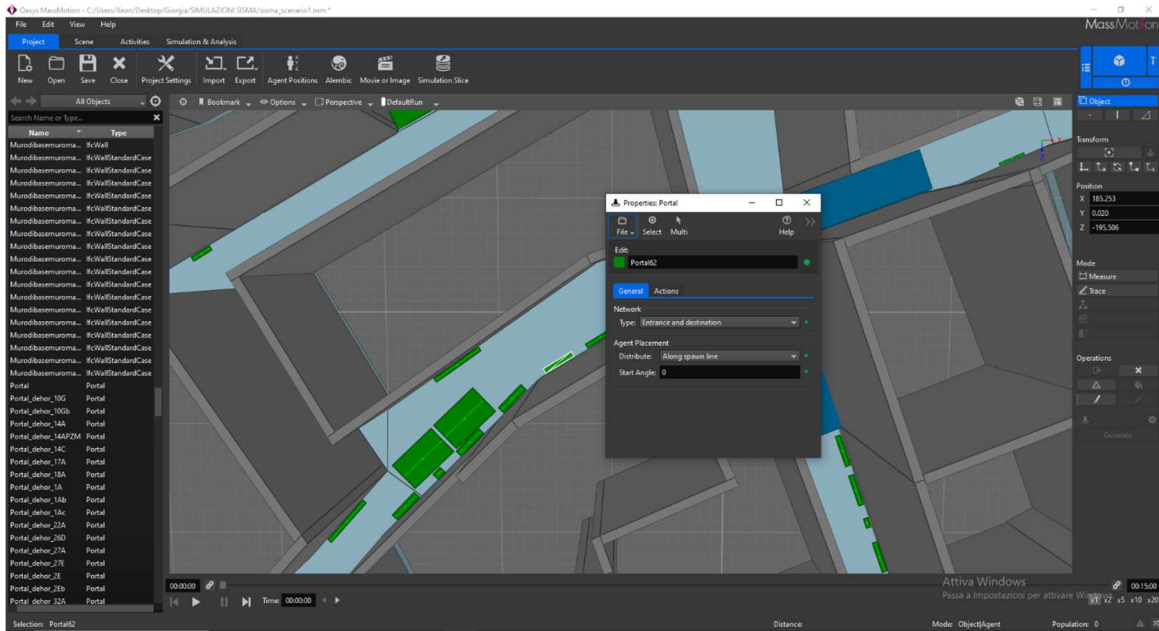


Figura 67: Immagine delle impostazioni dei portali utilizzati per generare gli utenti Indoor

Successivamente alla fase di posizionamento dei portali sono stati creati i *journey*. L'elemento *journey* permette l'effettivo popolamento dello scenario, associando gli agenti ai corrispondenti portali e istruendoli rispetto le loro caratteristiche. Nello specifico caso studio sono state realizzate tre differenti journey, rispettivamente per gli utenti OO, PO e Indoor. Il journey per gli utenti OO è stato caratterizzato dalla seguente impostazione della sezione "Origin":

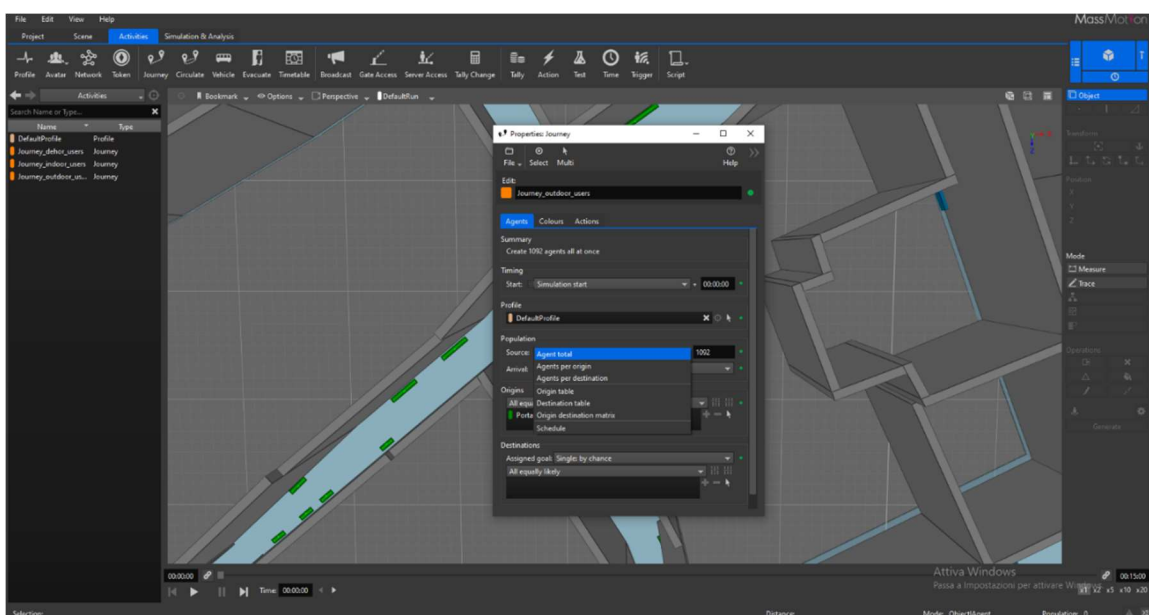


Figura 68: Immagine delle impostazioni del Journey per gli utenti Outdoor

associando a tale journey il comportamento di tutti gli occupanti esterni.

Per quanto riguarda i journey degli utenti PO e Indoor la sezione “Origin” è stata impostata secondo quanto segue:

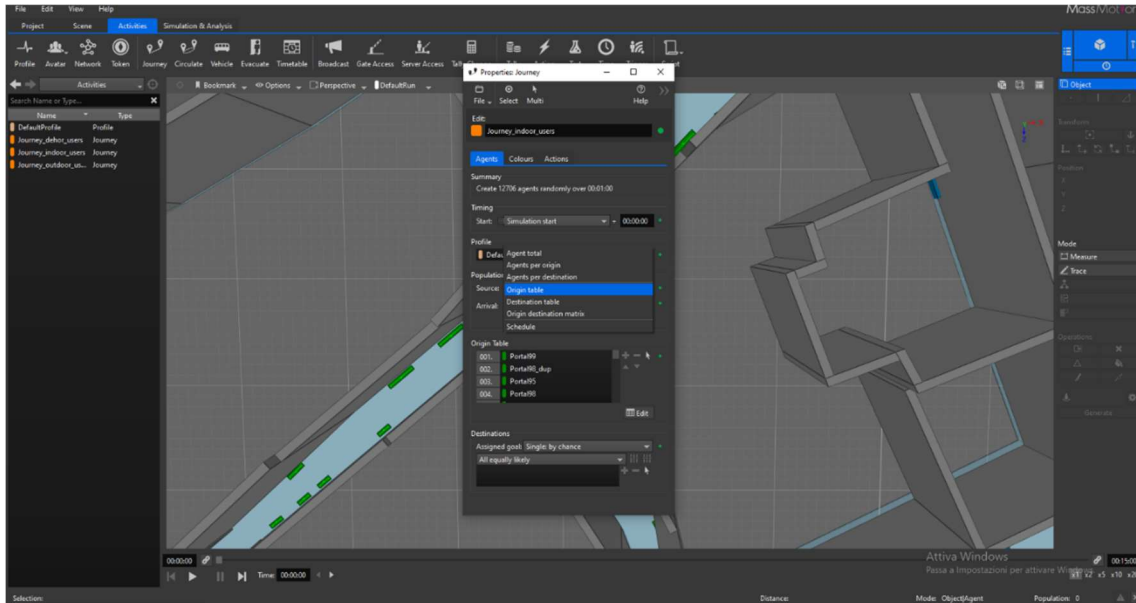


Figura 69: Immagine delle impostazioni del Journey per gli utenti Dehor e Indoo

Selezionando “origin table” per la sezione “Origin” è stato possibile associare ad ogni portale il numero corrispondente di occupanti, come specificato nell’immagine seguente.

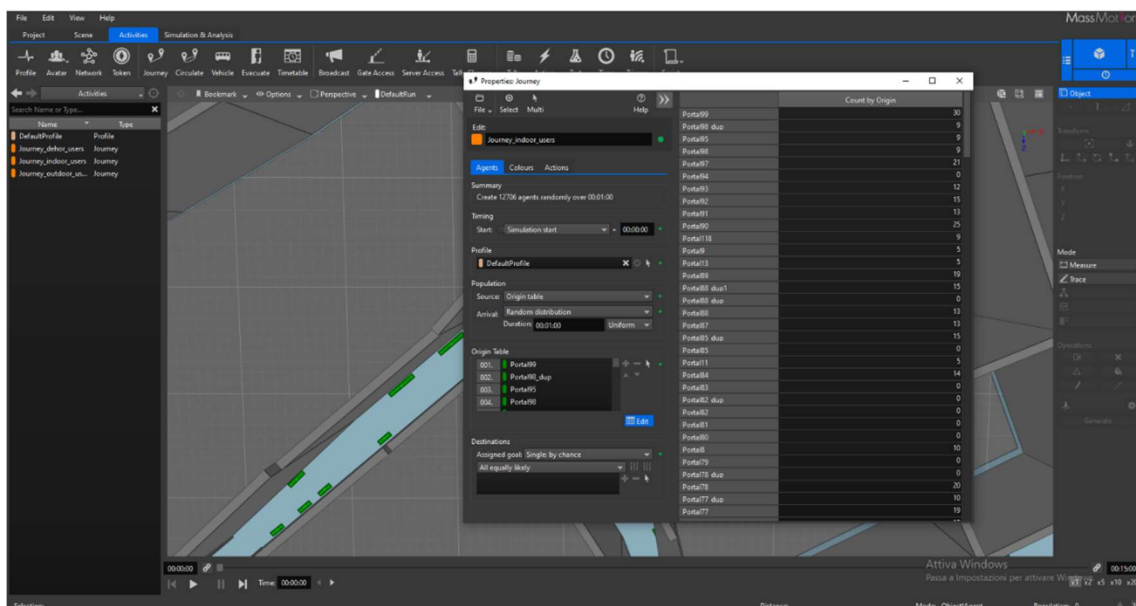


Figura 70: Immagine delle impostazioni per Journey per gli utenti Dehor e Indoor per associare il numero di agenti ai singoli portali

È importante evidenziare che per gli utenti Indoor è stata eseguita una distribuzione omogenea degli utenti, dividendo il numero di agenti per il numero di attività o accessi residenziali presenti. Tale applicazione è stata eseguita distinguendo gli occupanti RN dagli NRn e associandoli a differenti portali.

Infine, i procedimenti appena descritti sono stati replicati per ogni scenario indagato.

5.1.4 Gli scenari evacuazione: sheltering e leaving

L'ultima fase, prima di avviare la simulazione, consiste nella caratterizzazione del movimento degli occupanti tramite la sezione "Destination" dell'elemento Journey. La modellazione della fase di esodo è stata indagata secondo due modalità differenti:

- Scenario "Leaving": in questo caso le persone sono convogliate verso le zone di uscita poste al limite dell'area di studio secondo il criterio di abbandono dell'area, dirigendosi verso l'uscita più vicina.
- Scenario "Sheltering": in questo caso le persone vengono indirizzate verso le aree con minor rischio interne alla zona di studio; ^[10]

Lo scenario di "Leaving" è stato applicato allo stesso modo sia per evento sismico sia per alluvione, in quanto le vie di esodo coincidono. Invece, lo scenario "Sheltering" ha richiesto una valutazione differenziata per i due casi studio.

5.1.4.1 Scenario "Leaving" per alluvione e sisma

Lo scenario "Leaving" di simulazione dell'esodo ha richiesto l'individuazione delle zone che permettono agli occupanti di uscire dall'area di studio. Le vie di esodo sono state individuate confrontando le indicazioni presenti nel Piano di gestione delle emergenze del comune di Senigallia ^{[28][29]}. Le strade indicate come adeguate a garantire l'esodo delle persone sono

Corso Due Giugno, Piazza del Duca e via Mastai come riportato nell' estratto delle mappe di seguito.

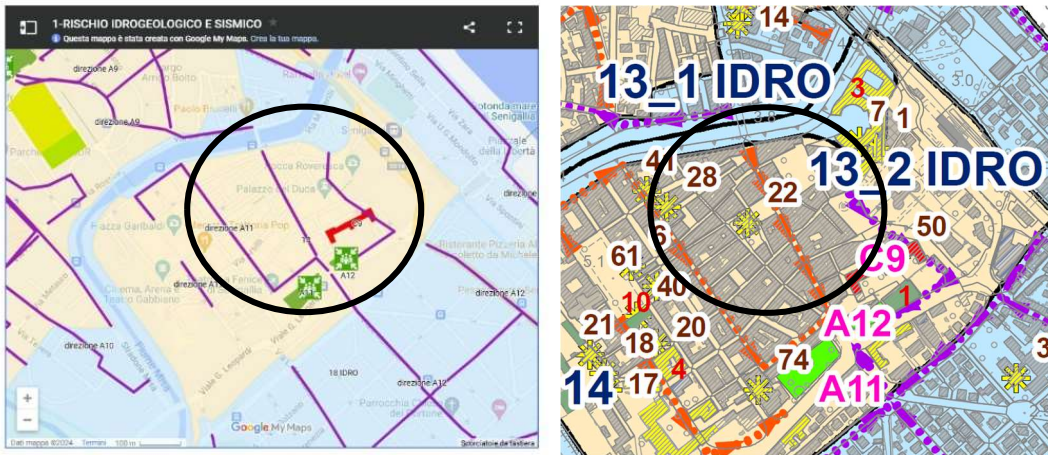


Figura 71: Estratti delle mappe del piano per la gestione delle emergenze del comune di Senigallia

In accordo con le indicazioni delle vie di esodo del piano comunale ^{[28][29]}, ovvero i percorsi rappresentati dalle linee rosse e viola, sono state scelte le seguenti uscite per lo scenario di “Leaving”. Tali aree sono in prossimità dell’uscita in direzione sud di Piazza del Duca, di via Corso Due Giugno e di via Mastai.

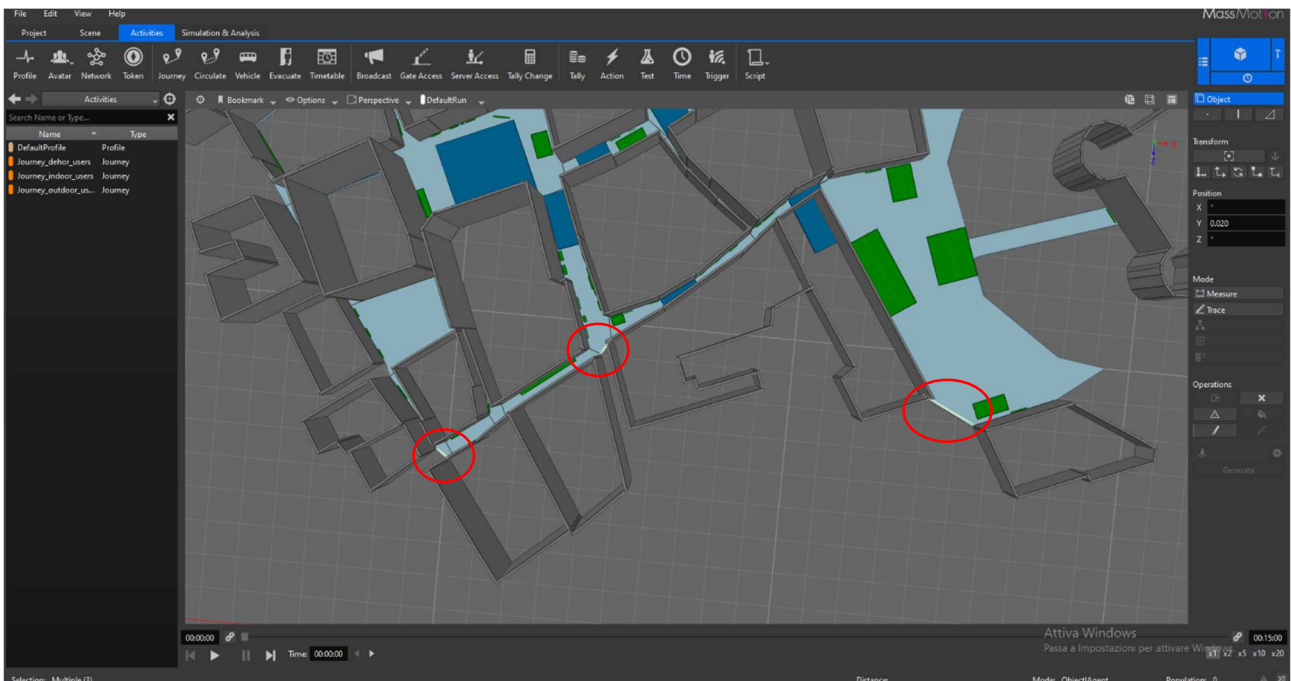


Figura 72: Immagine di varchi di uscita per l'esodo secondo i criteri di “Leaving”

La configurazione rappresentata è applicabile per eseguire lo studio del fenomeno sismico ma anche del fenomeno alluvionale.

Affinché gli occupanti siano indirizzati verso le vie di esodo individuate, vengono posizionati dei portali, in corrispondenza delle stesse aree, denominati Portal_exit. Inoltre, nella sezione “Destination”, dei journey realizzati precedentemente, è stata selezionata l’opzione “Lowest cost” e i portali appena citati cosicché gli agenti si possano muovere con l’obiettivo di raggiungerli, simulando l’esodo dall’area di studio. La modalità di esodo “Lowest cost” è stata scelta per rappresentare una popolazione consapevole della posizione delle zone sicure.

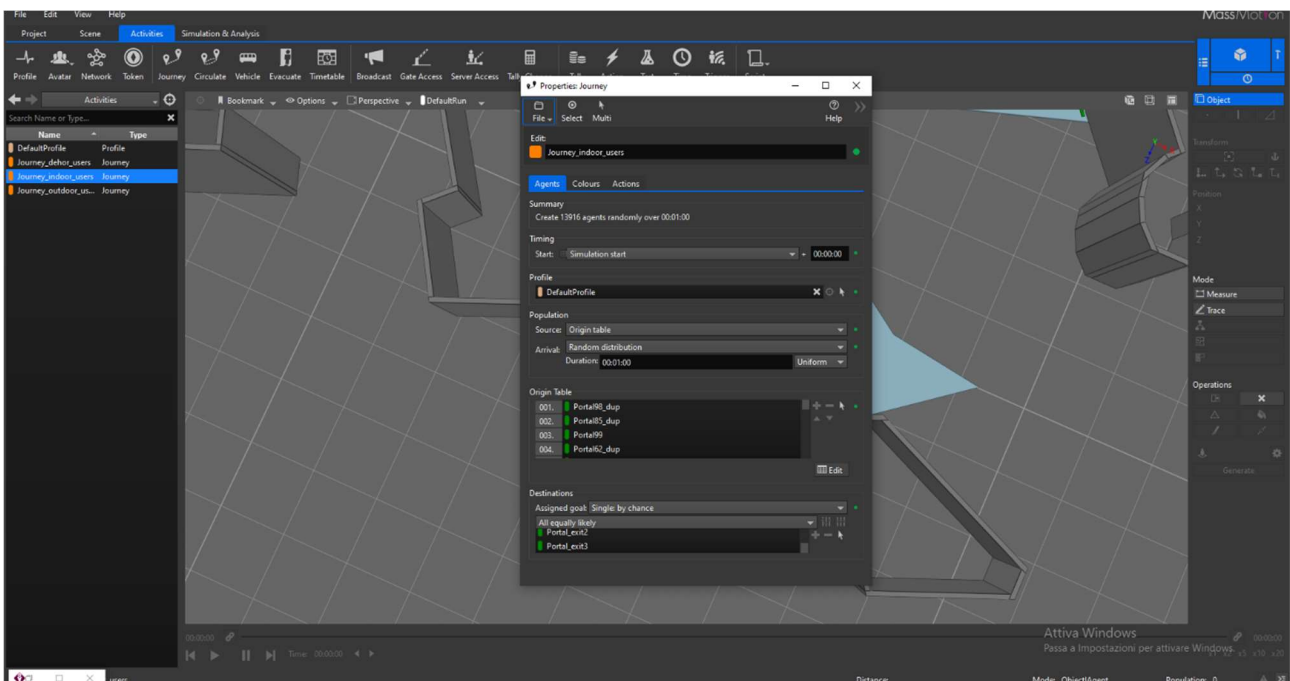


Figura 73: Immagine delle impostazioni per l’individuazione delle destinazioni di moto degli agenti

5.1.4.2 Scenario “Sheltering” per alluvione

Lo scenario di “Sheltering” implica che le persone si muovono nell’area di studio senza uscirne. In questo caso gli occupanti sono indirizzati verso gli spazi aperti più sicuri dell’area di studio. Le aree sicure, in caso di alluvione, sono state individuate valutando il grado di rischio per esposizione PVH e il grado di affollamento, che deve rimanere inferiore a 3 pp/mq. Le aree, che potenzialmente possono essere indicate come sicure, dove poter convogliare il flusso di persone rispetto al valore di rischio PVH sono Piazza Simoncelli, Piazza del Duca e Piazza Roma, come indicato nella seguente immagine:



Figura 74: Immagine delle zone di raccolta interne all’area di studio per fenomeno alluvionale

Le aree evidenziate sono state valutate per ciascuno scenario per fenomeno alluvionale, affinché la densità di persone a seguito della fase di esodo risulti ancora inferiore a 3pp/mq, in quanto superato tale valore si possono verificare fenomeni di sovraffollamento. Tutte le aree individuate rispettano il valore massimo di affollamento, dunque, la simulazione è stata eseguita convogliando gli occupanti in tali aree tramite il posizionamento di portali, che sono stati modellati affinché l’area occupata corrisponda alle effettive dimensioni delle aree reali. Affinché le persone raggiungessero le zone sicure, la sezione “Destination” dei journey per ciascuna tipologia di utenti è stata impostata secondo le seguenti indicazioni: “Lowest cost”

per rappresentare la modalità di movimento delle persone e le destinazioni di arrivo sono state individuate selezionando i portali di riferimento.

5.1.4.3 Scenario di “Sheltering” per sisma

Lo scenario “Sheltering” per l’evento sismico ha richiesto una modifica rispetto alla struttura per l’evento alluvionale a causa della presenza di macerie al suolo. Anche in questo caso gli occupanti sono indirizzati verso gli spazi aperti più sicuri dell’area di studio, ma per evento sismico tali aree sono differenti. Le aree sicure sono state individuate valutando il grado di danno dello spazio aperto, la presenza di macerie al suolo e il grado di affollamento, che deve rimanere inferiore a 3 pp/mq. La valutazione rispetto a questi parametri ha permesso di individuare come aree sicure Piazza Simoncelli, Piazza del Duca e Piazza Nazario Sauro.



Figura 75: Immagine delle zone di raccolta interne all’area di studio per fenomeno sismico

Non è stato possibile individuare Piazza Roma come zona sicura in caso di sisma perché le macerie presenti al suolo, ipotizzate per il tempo di ritorno in analisi, occuperebbero il 67% della superficie della piazza della piazza. Invece Piazza Simoncelli può rappresentare un’area di raccolta nonostante sia classificata con grado di danno 3 in quanto è il valore limite per poter ipotizzare un determinato spazio aperto come una zona sicura ^[17].

Affinché gli occupanti siano indirizzati verso le zone di raccolta individuate, vengono posizionati dei portali, in corrispondenza delle stesse aree, denominati Portal_exit. Inoltre, nella sezione “Destination”, dei journey realizzati precedentemente, è stata selezionata l’opzione “Lowest cost” e i portali appena citati affinché gli occupanti si possano muovere con l’obiettivo di raggiungerli. La modalità di esodo “Lowest cost” è stata scelta per rappresentare una popolazione consapevole della posizione delle zone sicure che si muove basandosi su scelte fondate sulla conoscenza della destinazione del movimento.

5.2 Gli scenari di evacuazione per alluvione

Gli scenari di esodo per alluvione sono stati valutati rispetto a un tempo di modellazione di 15 minuti ed in entrambe i casi la simulazione ha raggiunto il termine entro tale valore, indicando che la fase di evacuazione si è completata in un tempo minore.

5.2.1 Scenario “Leaving” per alluvione

Lo scenario di esodo secondo i criteri di “Leaving” per alluvione è stato indagato con un livello di mobilità pedonale LOSA, ovvero 0,2 pp/mq, e assenza di affollamenti. Gli occupanti sono stati convogliati verso le zone esterne all’area di studio e tale processo di evacuazione è descritto da indicatori generali e specifici, ottenuti dall’elaborazione dei valori restituiti dal software di modellazione.

I dati riportati di seguito sono indicatori che rappresentano i valori massimi, descritti nella sezione 2.5.3, affinché si possa avere un approccio conservativo nella valutazione delle simulazioni in quanto gli scenari sono influenzati dalle condizioni esterne.

Utilizzando i dati relativi al numero di occupanti presenti nel modello al variare del tempo è stato possibile ricavare le curve di evacuazione in quanto permettono di indagare il livello di occupanti presenti nell’ambiente costruito in funzione del tempo e l’andamento generale del processo di esodo. Il seguente grafico è stato fornito dal software di simulazione e rappresenta il numero di occupanti presenti nel modello all’aumentare del tempo. Si può

dedurre che il numero di occupanti diminuisce fino a raggiungere quota zero in un intervallo di tempo compreso tra 480 e 540 secondi.

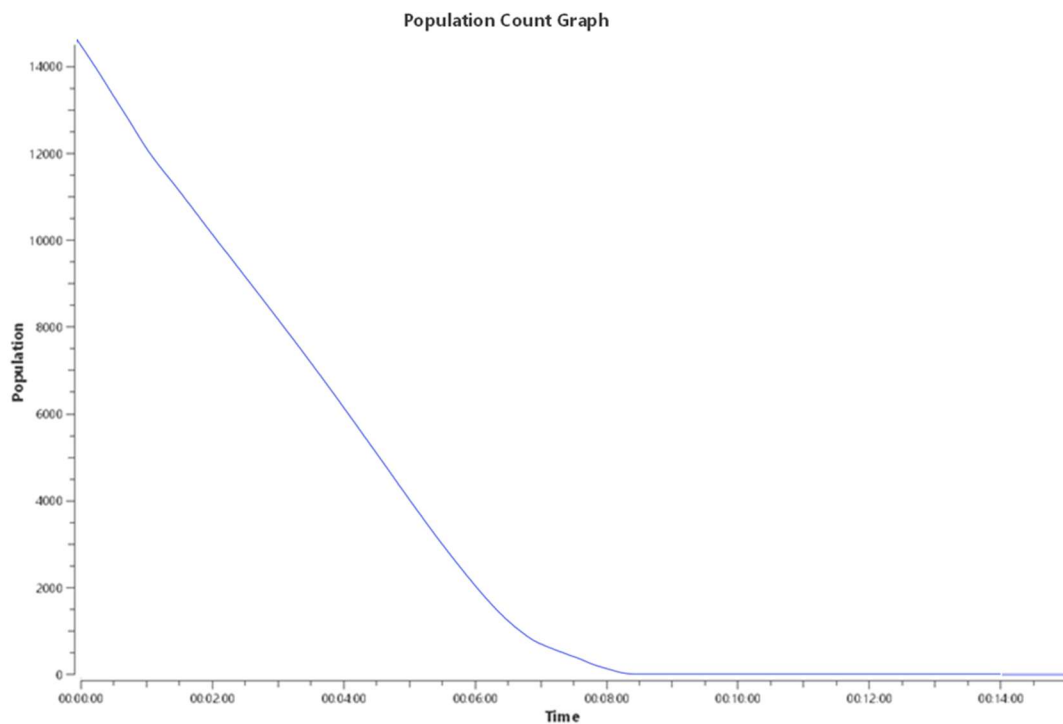


Grafico 1: Andamento del numero di occupanti nell'ambiente costruito all'aumentare del tempo

I dati forniti sono stati elaborati per individuare l'andamento del flusso di persone in uscita dall'area di studio. La curva rappresenta il numero di agenti usciti dall'ambiente costruito all'aumentare del tempo:

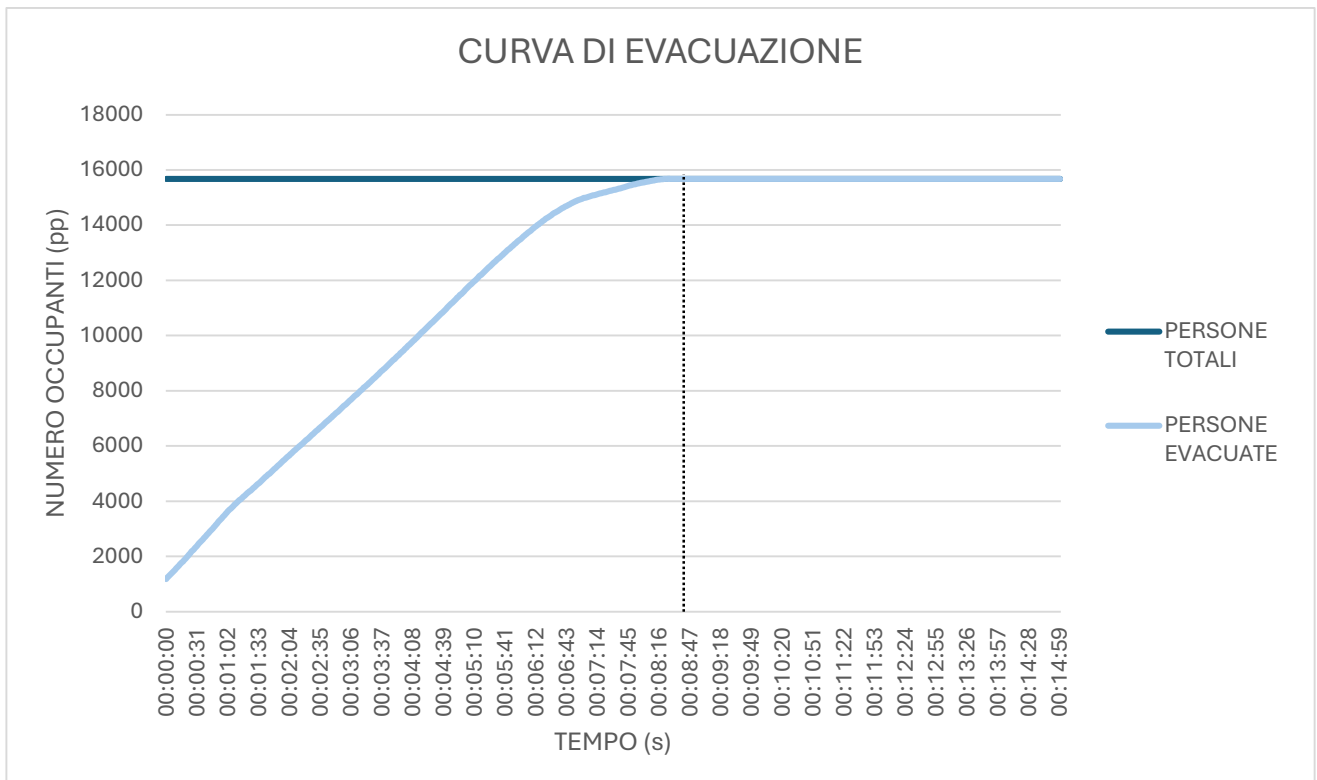


Grafico 2: Curva di flusso per evacuazione dello scenario di “Leaving” per alluvione

È possibile ricavare informazioni riguardo l’andamento del processo di evacuazione:

- Andamento del flusso di persone evacuate: la sovrapposizione delle curve “Persone totali” e “Persone evacuate” ad un certo istante indica che tutti gli occupanti ipotizzati nell’ambiente costruito hanno raggiunto le zone reputate sicure e dunque si possono considerare esenti da alcun rischio;
- Il tempo di evacuazione: il tempo massimo $t_{max,evacuazione}$ [s] corrisponde a 08:27 minuti, ovvero 507s. Nel grafico è rappresentato in corrispondenza della sovrapposizione delle due curve, in quanto indica che il numero di persone evacuate corrisponde al totale delle persone presenti nel modello ad inizio simulazione;
- Persone intrappolate: il numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure è pari a zero, in quanto tutti gli utenti hanno completato il processo di esodo;
- Distanza massima: d_{Max} [m] percorsa da un agente per raggiungere una delle vie di esodo è 393 m.

- È possibile individuare il numero di persone già situate nelle aree di raccolta per tempo $t=0$: il numero di agenti è 1185, ovvero il 7,5% della popolazione dello scenario. Tale valore si può giustificare in quanto i portali di destinazione del movimento degli agenti sono caratterizzati da un'estensione superficiale che comporta l'esclusione del conteggio degli agenti che ad inizio simulazione sono già in queste aree e devono muoversi, come ad esempio alcuni agenti outdoor che sono distribuiti su tutto il floor o alcuni agenti dehor.

Di seguito sono riassunti i valori degli indicatori generali per evento alluvionale:

INDICATORI MASSIMI		
$t_{max, evacuazione}$	[s]	567
numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure	[pp]	/
$N_{a,M}$ pedoni non arrivati (%)	%	0
d_{Max}	[m]	393
Te,M Tempo di evacuazione normalizzato		0.63

Tabella 10: Indicatori generali del processo di evacuazione "Leaving" per alluvione

Di seguito è stata riportata la mappa della distribuzione di densità per individuare le aree dell'ambiente costruito che sono maggiormente condizionate da una concentrazione di agenti durante la fase di evacuazione.

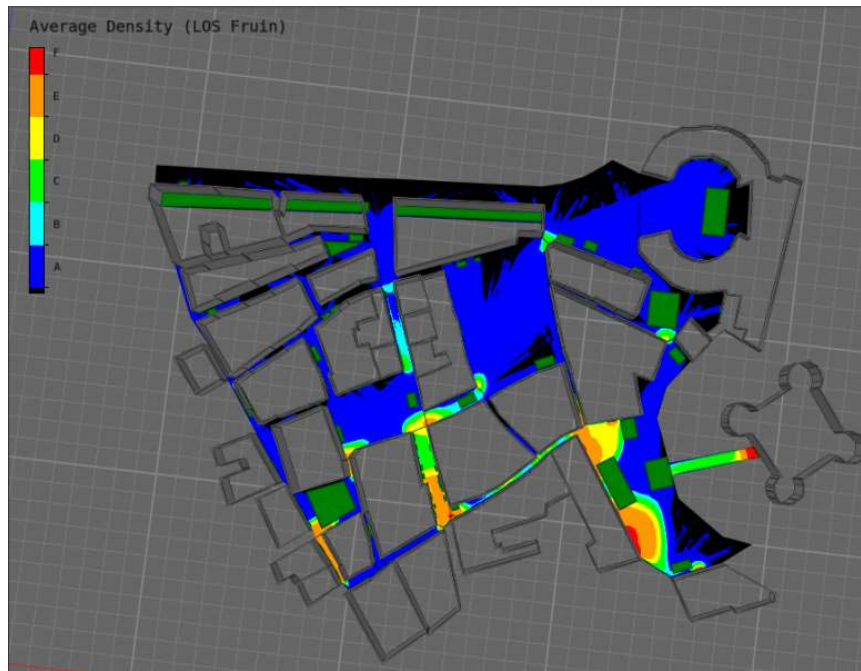


Figura 76: Distribuzione del valore di densità di affollamento per evacuazione "Leaving" per alluvione

Da tale mappa si può riscontrare che le zone in cui si verificano aumenti di densità corrispondono a incroci di limitata estensione che causano la formazione di code di attesa e colli di bottiglia che provocano la congestione di evacuanti che scelgono di intraprendere quel percorso di fuga. Le aree in cui si verificano aumenti di densità sono:

- l'incrocio tra Piazza Ottorino Manni e via Ottorino Manni;
- il collegamento pedonale alla Rocca Roveresca;
- l'incrocio tra Piazza parcheggio del Foro a Piazza Simoncelli;
- l'incrocio tra Piazza Simoncelli e via dei Commercianti;
- Corso Due Giugno;
- l'incrocio tra Piazza Roma e via Fagnani 3;
- Via Mastai;
- Corso Due Giugno 3;
- Piazza del Duca;

La formazione di colli di bottiglia si verifica anche in prossimità delle vie di fuga in quanto la loro estensione è ridotta e implica un rallentamento del flusso di evacuazione. Nonostante la concentrazione di evacuanti in specifiche aree di spazi aperti, la configurazione del layout urbano non condiziona la sicurezza degli occupanti in quanto la fase di esodo è completata

entro il tempo massimo considerato di simulazione, e tutti gli agenti riescono a raggiungere le aree sicure.

5.2.2 Scenario “Sheltering” per alluvione

Lo scenario di evacuazione per il criterio “Sheltering” richiede l’individuazione di zone sicure interne all’area di studio ed è stato popolato con un livello di mobilità pedonale LOSA, ovvero 0,2pp/mq, e assenza di affollamenti. Le zone di raccolta, individuate nella sezione 5.1.4.2, devono essere valutate rispetto al grado di affollamento al termine della fase di esodo.

I punti di raccolta come Piazza Simoncelli, Piazza del Duca e Piazza Roma sono stati verificati rispetto al massimo valore di affollamento di 3pp/mq utilizzando i dati forniti dal software di simulazione. Le tabelle “Agent Summary” restituiscono il numero di agenti che raggiungono il portale che rappresenta il punto di raccolta. Di seguito sono riportati i valori che hanno permesso di verificare tutte e tre le zone individuate nella fase di modellazione dell’ambiente costruito.

VERIFICA ZONE DI RACCOLTA					
	NUMERO AGENTI [pp]	AREA ZONA SICURA [mq]	DENSITA' [pp/mq]	DENSITA' LIMITE [pp/mq]	VERIFICA
Piazza del Duca	6903	3064	2.25	3	SI
Piazza Simoncelli	5897	2200	2.68	3	SI
Piazza Roma	2879	1000	2.88	3	SI

Tabella 11: Riassunto della verifica di affollamento per le zone di raccolta

Tutte le zone individuate come possibili punti di raccolta hanno rispettato la verifica relativa alla densità di persone in quanto i valori risultano inferiori al massimo consentito.

Successivamente si sono indagati gli indicatori massimi per comprendere l’andamento della fase di evacuazione: i dati relativi al numero di occupanti presenti nel modello al variare del tempo ha consentito di ricavare le curve di evacuazione che mostrano il numero di occupanti presenti nell’ambiente costruito in funzione del tempo e l’andamento generale del processo

di esodo. Il seguente grafico, disponibile nel software di simulazione, mostra la variazione del numero di agenti presenti all'interno del modello:

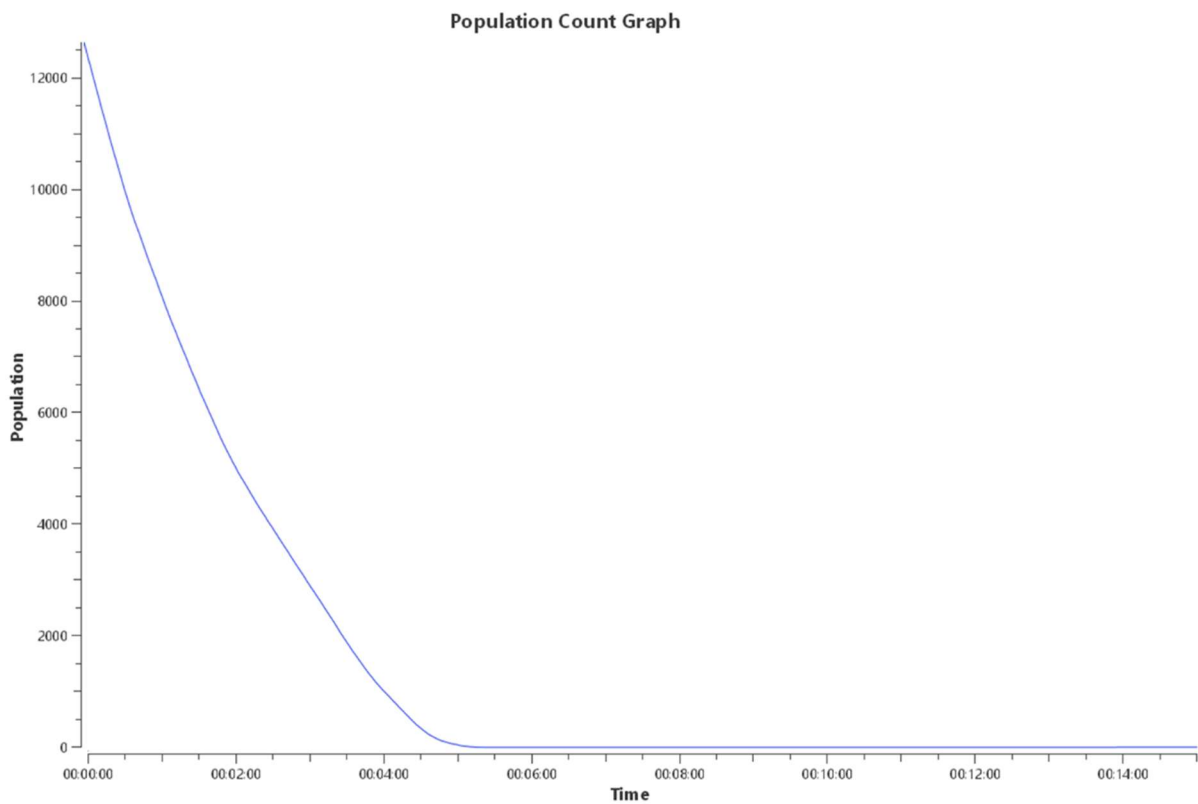


Grafico 3: Andamento del numero di occupanti nell'ambiente costruito all'aumentare del tempo

Si può notare che il numero di agenti presenti nel modello raggiunge valore zero tra 430 e 530 secondi. I dati presenti in questo grafico sono stati elaborati per ricavare la curva di flusso che rappresenta il numero di occupanti che hanno raggiunto le zone di raccolta interne all'ambiente costruito in analisi all'aumentare del tempo:

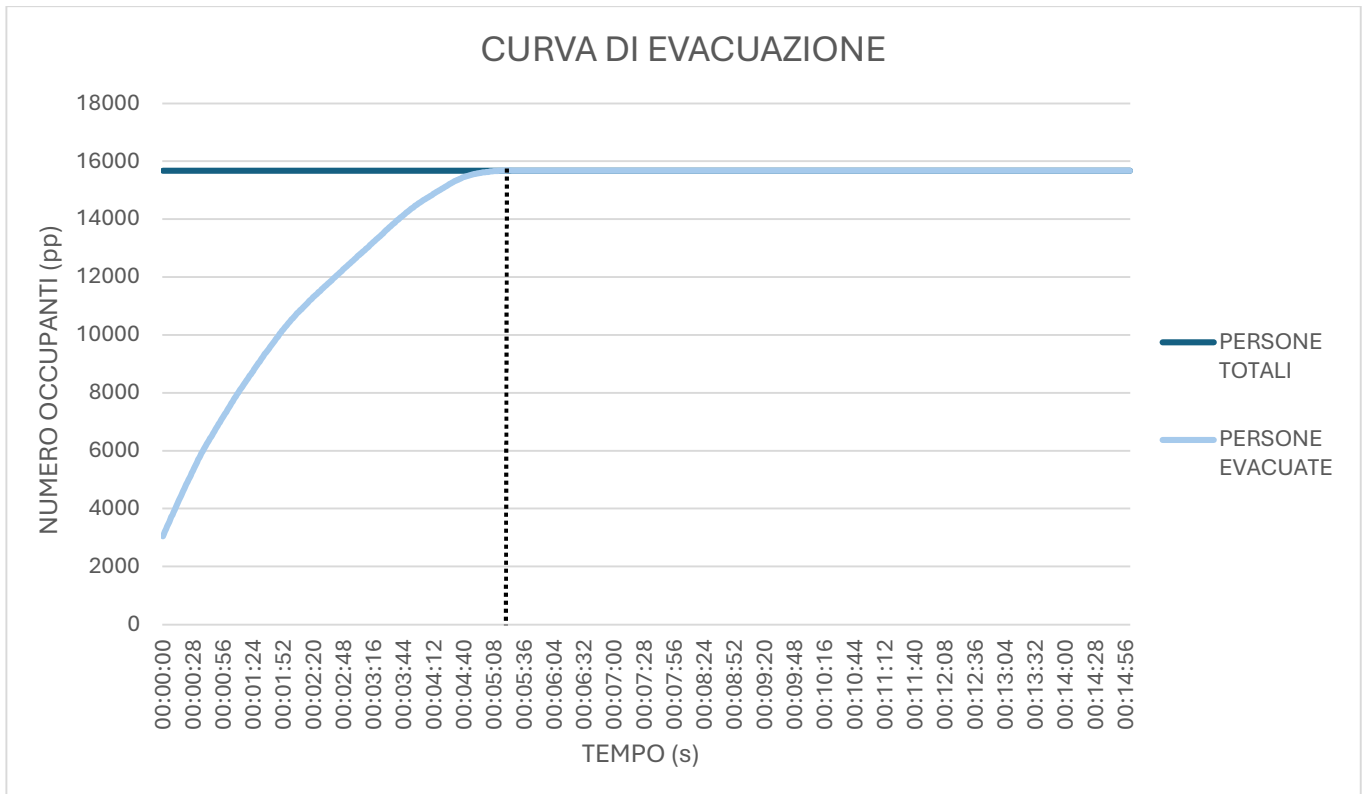


Grafico 4: Curva di evacuazione dello scenario di “Sheltering” per alluvione

Le principali informazioni che si possono dedurre dal grafico di flusso sono:

- Andamento del flusso di persone evacuate: la sovrapposizione delle curve “Persone totali” e “Persone evacuate” ad un certo istante indica che tutti gli agenti ipotizzati nell’ambiente costruito hanno raggiunto le zone reputate sicure e dunque si possono considerare esenti da alcun rischio;
- Tempo di evacuazione: il tempo massimo $t_{max, evacuazione}$ [s] corrisponde a 05:25 minuti, ovvero 325 s. Nel grafico è rappresentato in corrispondenza della sovrapposizione delle due curve, in quanto indica che il numero di persone evacuate corrisponde al totale delle persone presenti nel modello ad inizio simulazione;
- Persone intrappolate: il numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure è pari a zero, in quanto tutti gli utenti hanno completato il processo di esodo;
- Distanza massima: d_{Max} [m] percorsa da un agente per raggiungere una delle aree sicure è 215 m.

- È possibile individuare il numero di persone già situate nelle aree di raccolta per tempo $t=0$: il numero di agenti è 3048, ovvero il 19% della popolazione dello scenario. Tale valore si può giustificare in quanto i portali di destinazione del movimento degli agenti sono caratterizzati da un'estensione superficiale che comporta l'esclusione del conteggio degli agenti che ad inizio simulazione sono già in queste aree e devono muoversi, come ad esempio alcuni agenti outdoor che sono distribuiti su tutto il floor o alcuni agenti dehor.

Nella tabella successiva sono riassunti i valori degli indicatori generali per evento alluvionale:

INDICATORI MASSIMI		
$t_{max,evacuazione}$	[s]	325
numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure	[pp]	/
$N_{a,M}$ edoni non arrivati (%)	%	0
d_{Max}	[m]	215
Te,M Tempo di evacuazione normalizzato		0.36

Tabella 12: Indicatori generali del processo di evacuazione "Sheltering" per alluvione

Un ulteriore strumento di indagine è la mappa di distribuzione della densità degli agenti durante la fase di esodo. L'immagine seguente riporta le zone caratterizzate da maggiore concentrazione di persone a causa della formazione di colli di bottiglia e code di attesa. La formazione di blocchi durante l'esodo si può ricondurre a collegamenti di ridotta estensione tra le zone di raccolta e gli spazi aperti circostanti.

Infatti, le principali aree con densità rilevanti sono:

- l'incrocio tra Piazza Simoncelli e Piazza parcheggio del Foro;
- l'accesso sud di Piazza Simoncelli da via Marzi;
- il collegamento pedonale tra la Rocca Roveresca e Piazza del Duca;
- l'accesso a via Manni da Piazza del Duca;

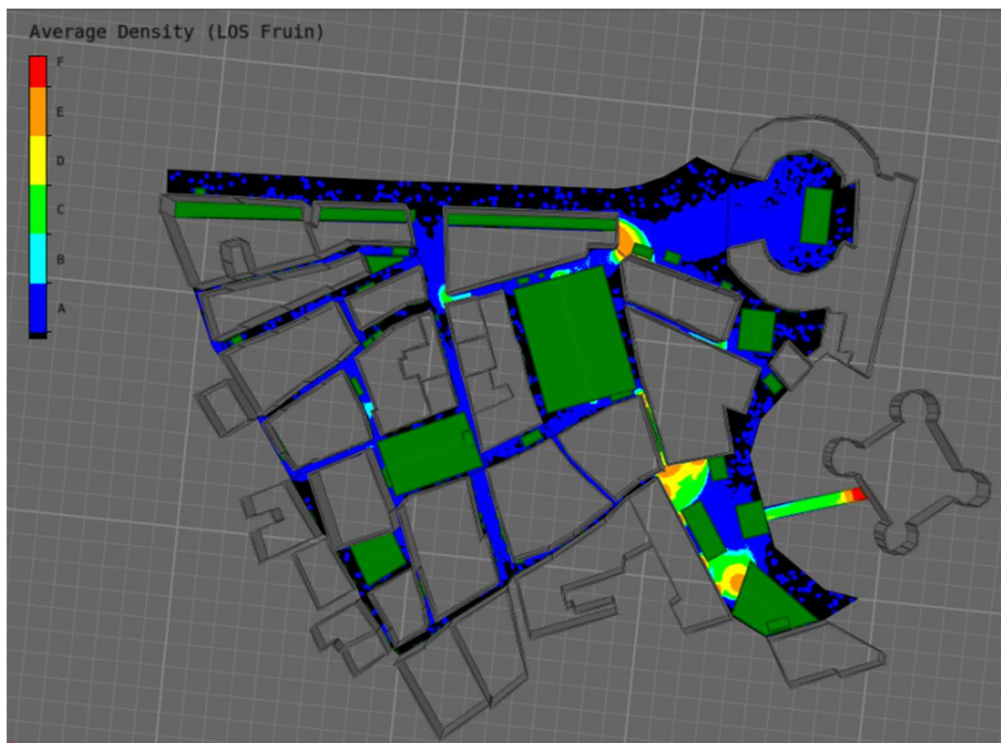


Figura 77: Distribuzione del valore di densità di affollamento per evacuazione "Sheltering" per alluvione

Si può comunque affermare che, nonostante la formazione di zone con maggiore affollamento durante la fase di evacuazione, tutti gli agenti hanno raggiunto le zone di raccolta ed è possibile escludere l'esposizione al rischio.

5.3 Gli scenari di evacuazione per sisma

Le simulazioni di evacuazione per fenomeno sismico sono state valutate rispetto due differenti scenari affollamento, ciascuno dei quali valutato per evacuazione secondo la modalità “Leaving” e “Sheltering” come riportato nella tabella 9. Nelle successive sezioni sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni.

5.3.1 Scenario di evacuazione “Leaving” per sisma e affollamento LOSA

La simulazione per lo scenario “Leaving” con affollamento LOSA, ovvero 0,2 pp/mq, non considera la presenza di affollamenti e ha l’obiettivo di convogliare il flusso di agenti presso aree di raccolta esterne l’area di studio. Di conseguenza gli indicatori utilizzati per descrivere la fase di evacuazione si concentrano sul flusso degli occupanti, la distanza massima percorsa dagli agenti, il numero di persone rimaste bloccate e il tempo massimo di evacuazione. Nel caso di evacuazione secondo i criteri di “Leaving” sono esclusi indicatori relativi alle aree di raccolta in quanto sono ipotizzate all’esterno dell’area di interesse.

I dati riportati di seguito sono indicatori che rappresentano i valori massimi, descritti nella sezione 2.5.3, affinché si possa avere un approccio conservativo nella valutazione delle simulazioni in quanto gli scenari sono influenzati dalle condizioni esterne.

Anche per questa simulazione le principali informazioni sono state ricavate dal grafico che descrive il flusso di evacuazione. I dati utilizzati per realizzare il grafico sono stati restituiti dal software di simulazione MassMotion e indicano il numero di occupanti presenti nel modello al variare del tempo. Si può dedurre che il numero di occupanti diminuisce fino a raggiungere quota zero in un intervallo di tempo compreso tra 600 e 660 secondi.

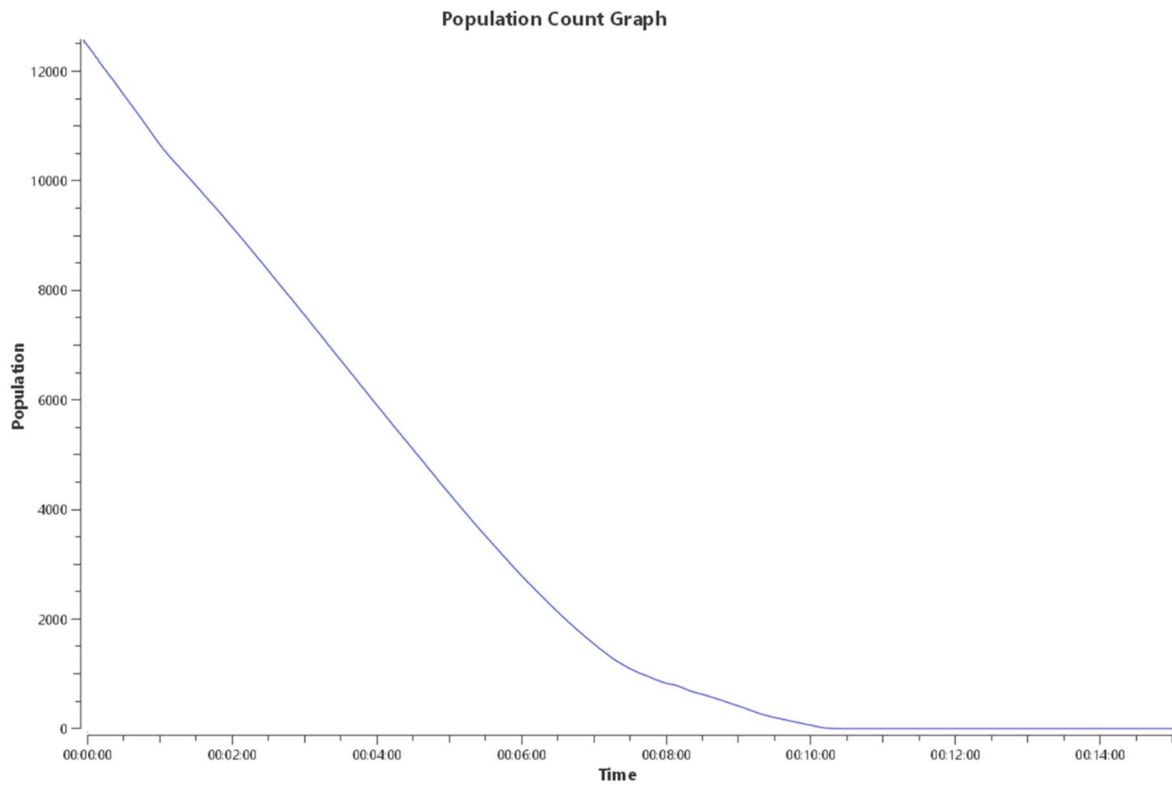


Grafico 5: Andamento del numero di occupanti nell'ambiente costruito all'aumentare del tempo

I dati sono stati elaborati per individuare il grafico di flusso:

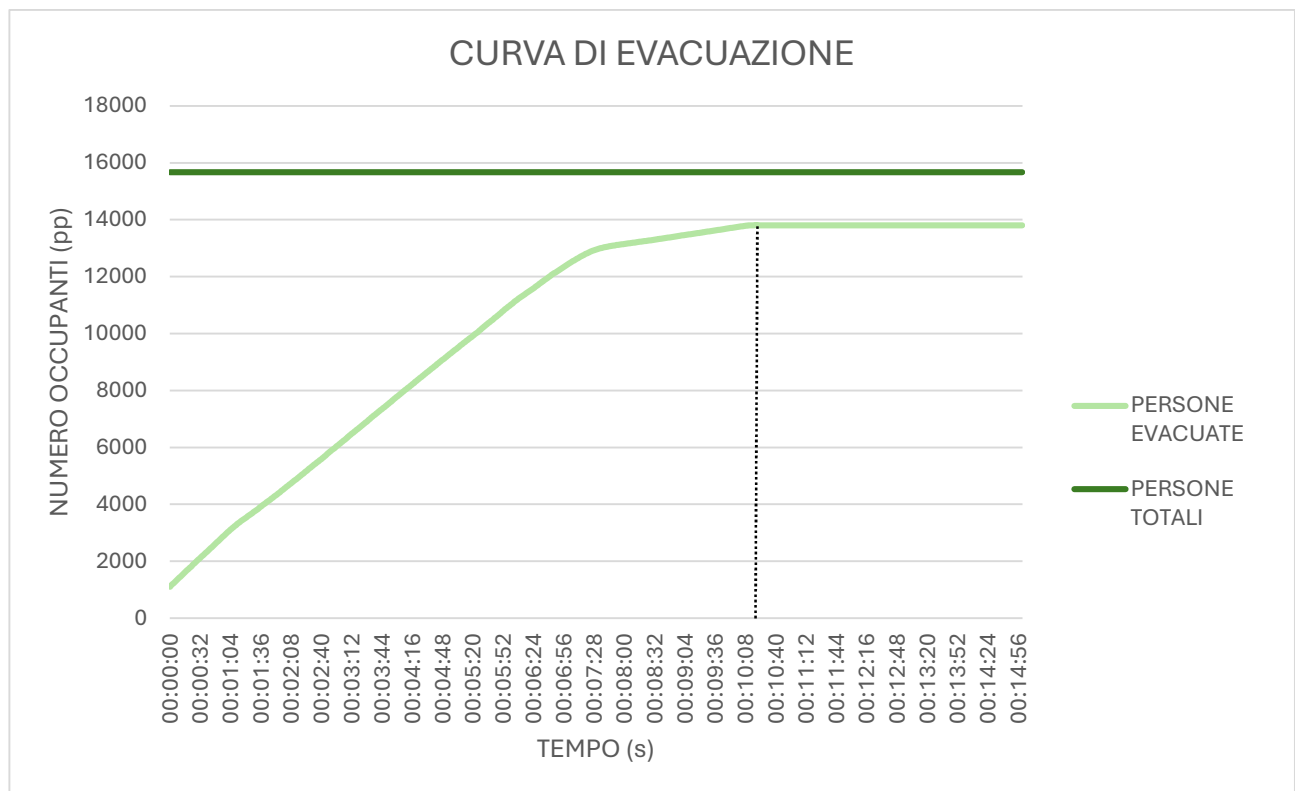


Grafico 6: Curva di evacuazione dello scenario di "Leaving" per sisma

Il grafico restituisce informazioni importanti relative alla fase di evacuazione:

- Andamento del flusso di persone evacuate: l'andamento costante della curva "Persone evacuate" da un certo istante indica che gli agenti presenti ad inizio simulazione, in grado di muoversi nell'ambiente costruito, hanno raggiunto le zone reputate sicure e dunque si possono considerare esenti da alcun rischio. È necessario evidenziare la differenza di andamento delle curve che rappresentano le persone evacuate e il valore totale di agenti con cui è stato popolato lo scenario. Tale differenza rappresenta la quota di popolazione che si può ipotizzare impossibilitata a raggiungere le vie di esodo indicate in quanto bloccata all'interno degli edifici a causa dalle macerie presenti;
- Tempo di evacuazione: il tempo massimo $t_{max,evacuazione}$ [s] corrisponde a 10:22 minuti, ovvero 622s. Nel grafico è rappresentato in corrispondenza dell'inizio del tratto ad andamento costante della curva "Persone evacuate", in quanto indica che il numero di persone evacuate corrisponde al totale delle persone in grado di muoversi presenti nel modello ad inizio simulazione;
- Persone intrappolate: il numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure è pari a 1868, ovvero la differenza tra il numero di agenti con cui è stato popolato lo scenario, rappresentato dalla curva "Persone totali", e il numero di persone a fine simulazione, rappresentato dalla curva "Persone evacuate". Il numero di persone bloccate corrisponde al 13% della popolazione dello scenario.
- Distanza massima: d_{Max} [m] percorsa da un agente per raggiungere una delle vie di esodo è 496 m.
- È possibile individuare il numero di persone già situate nelle aree di raccolta per tempo $t=0$: il numero di agenti è 1112, ovvero il 7% della popolazione dello scenario. Tale valore si può giustificare in quanto i portali di destinazione del movimento degli agenti sono caratterizzati da un'estensione superficiale che comporta l'esclusione del conteggio degli agenti che ad inizio simulazione sono già in queste aree e devono muoversi, come ad esempio alcuni agenti outdoor che sono distribuiti su tutto il floor o alcuni agenti dehor.

Nella seguente tabella sono riassunti i valori degli indicatori massimi che descrivono lo scenario:

INDICATORI MASSIMI		
$t_{max, evacuazione}$	[s]	622
numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure	[pp]	1868 (13%)
d_{Max}	[m]	496

Tabella 13: Indicatori generali del processo di evacuazione "Leaving" per sisma

Per la specifica simulazione di evacuazione dall'area di interesse in caso di sisma, la mappa di distribuzione della densità restituisce informazioni relative alla concentrazione degli agenti principalmente in corrispondenza delle vie di esodo.

Le aree con maggiore densità, rappresentate da colore rosso, si verificano in corrispondenza dell'uscita pedonale dalla Rocca Roveresca e nell'area sud di Piazza del Duca, in corrispondenza dell'uscita. Ulteriori zone caratterizzate da un'elevata concentrazione di agenti si verificano in prossimità di incroci che delimitano spazi aperti di notevole estensione, come piazze, e vie di limitata larghezza. Le principali aree sono:

- l'incrocio tra Piazza Ottorino Manni e via Manni
- l'uscita a sud di Piazza Simoncelli e via Marzi
- via Fagnani e l'incrocio tra Piazza Roma e via Fagnani
- l'ultimo tratto di via Mastai

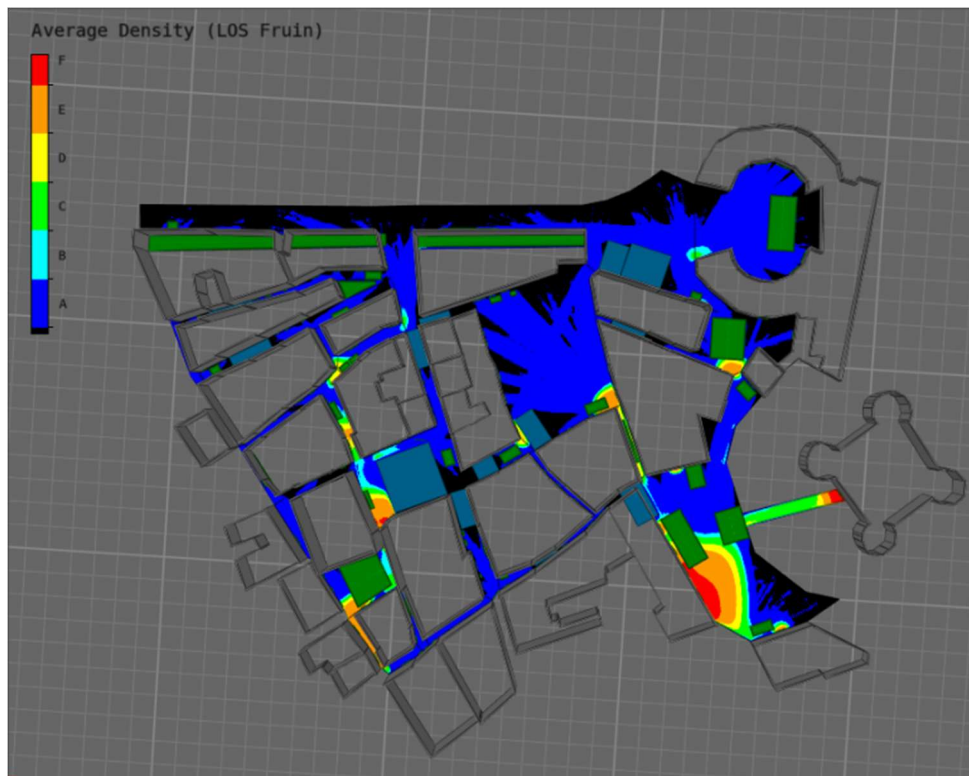


Figura 78: Distribuzione del valore di densità di affollamento per evacuazione “Leaving” per sisma

La formazione di colli di bottiglia, dovuti ad agenti in attesa di poter intraprendere tale via, non condiziona il completamento della fase di esodo in quanto tutti gli agenti riescono a raggiungere i varchi di evacuazione in tempistiche inferiori a 15 minuti.

5.3.2 Scenario di evacuazione “Sheltering” per sisma e affollamento LOSA

La simulazione di evacuazione secondo i criteri “Sheltering” ha l’obiettivo di convogliare gli agenti in zone di raccolta reputate sicure all’interno dell’area di studio. In questa simulazione lo scenario è stato popolato con un livello di mobilità pedonale LOSA, ovvero 0,2 pp/mq, e si è esclusa la presenza di affollamento. Le aree indicate come possibili zone di raccolta nella sezione 5.1.4.3 devono essere verificate in funzione del numero di agenti presenti al termine della fase di evacuazione.

Le zone di raccolta come Piazza Simoncelli, Piazza del Duca e Piazza Nazario Sauro sono stati verificati rispetto al massimo valore di affollamento di 3pp/mq utilizzando i dati forniti dal

software di simulazione. In questa simulazione è stata esclusa dalla lista delle possibili zone di raccolta Piazza Roma, presente nello scenario “Sheltering” per alluvione, in quanto il 67% della sua superficie è potenzialmente occupata da macerie e non garantirebbe la permanenza di persone. Di conseguenza la scelta è ricaduta su Piazza Nazario Sauro poiché prossima a Piazza Roma e priva di macerie. Le tabelle “Agent Summary” restituiscono il numero di agenti che raggiungono il portale che rappresenta il punto di raccolta. Di seguito sono riportati i valori che hanno permesso di verificare tutte e tre le zone individuate nella fase di modellazione dell’ambiente costruito.

VERIFICA ZONE DI RACCOLTA					
	NUMERO AGENTI [pp]	AREA ZONA SICURA [mq]	DENSITA' [pp/mq]	DENSITA' LIMITE [pp/mq]	VERIFICA
Piazza del Duca	7642	3064	2.48	3	SI
Piazza Simoncelli	3650	2200	1.83	3	SI
Piazza Nazario Sauro	2537	400	6.34	3	NO

Tabella 14: Riassunto della verifica di affollamento per le zone di raccolta



Figura 79: Immagine delle zone di raccolta per evacuazione “Sheltering” per evento sismico

Piazza Nazario Sauro presenta una criticità in quanto il grado di affollamento al termine della fase di evacuazione è pari al doppio del valore massimo consentito, causando un sovraffollamento di persone. È necessario evidenziare che tale criticità non ha condizionato la fase di evacuazione in quanto il grafico della curva di flusso, riportato di seguito, evidenzia che il processo di evacuazione è terminato entro 15 minuti.

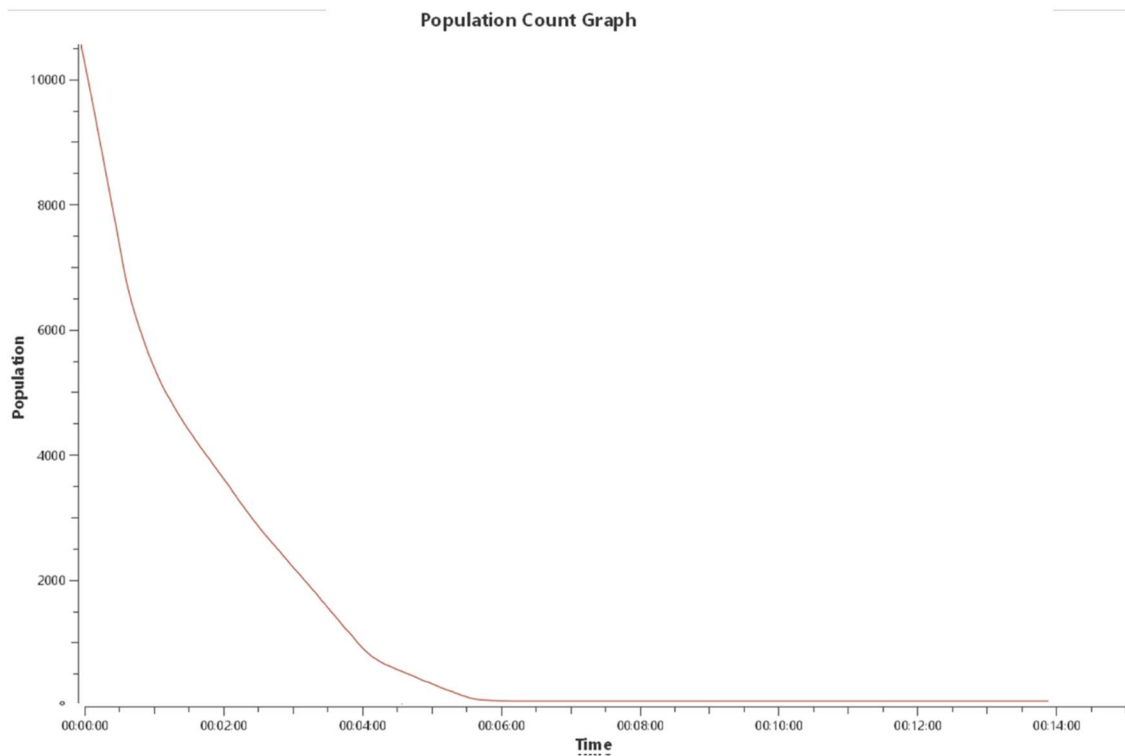


Grafico 7: Andamento del numero di occupanti nell'ambiente costruito all'aumentare del tempo

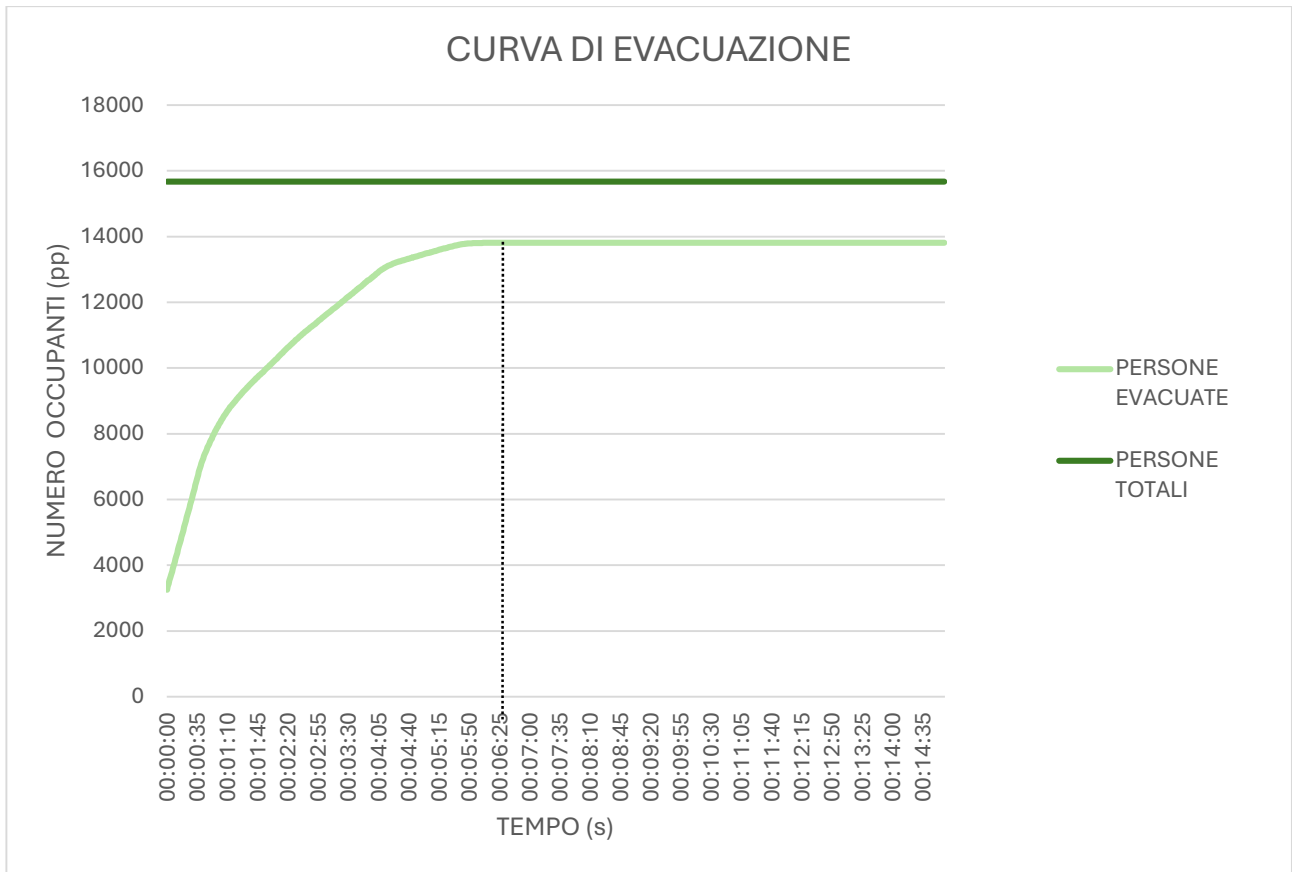


Grafico 8: Curva di evacuazione dello scenario di "Sheltering" per sisma

La mancata verifica di una delle aree di raccolta ha suggerito l'individuazione di un'ulteriore possibile area di raccolta in Piazza del Foro Annonario. L'area è stata introdotta per valutare un'eventuale riduzione dei flussi verso le aree precedentemente individuate.



Figura 80: Immagine delle nuove aree di raccolta individuate per evacuazione "Sheltering" per sisma

Si è iterato il processo di verifica del grado di affollamento per ciascuna delle possibili aree di raccolta. I dati sono riportati nella seguente tabella:

VERIFICA ZONE DI RACCOLTA					
	NUMERO AGENTI [pp]	AREA ZONA SICURA [mq]	DENSITA' [pp/mq]	DENSITA' LIMITE [pp/mq]	VERIFICA
Piazza del Duca	7342	3064	2.40	3	SI
Piazza Simoncelli	2355	2200	1.07	3	SI
Piazza del Foro Annonario	1577	750	2.10	3	SI
Piazza Nazario Sauro	2537	400	6.34	3	NO

Tabella 15: Riassunto della verifica di affollamento per le zone di raccolta

Si può dedurre che l'aggiunta di un'ulteriore area di raccolta non comporta miglioramenti rispetto alla criticità precedente poiché si verifica una diminuzione del grado di affollamento nelle piazze che già rispettavano la condizione limite a discapito di Piazza Nazario Sauro. L'introduzione della nuova area causa una redistribuzione degli agenti rispetto alle zone di raccolta della parte Est dell'area di studio senza avere ricadute positive sul moto degli agenti presenti nella zona Ovest, dove si è manifestato il problema di sovrappollamento.

Tale fenomeno si può ricondurre alla presenza di macerie in aree specifiche che bloccano il flusso di agenti da Ovest verso le zone di raccolta con maggior estensione. Inoltre, tale criticità ha evidenziato la mancanza di ulteriori spazi aperti individuabili come possibili aree sicure nella zona Ovest a causa della conformazione del centro storico, caratterizzato da minor presenza di spazi aperti come piazze.



Figura 81: Immagine delle macerie che bloccano le vie di fuga per l'evacuazione "Sheltering" per sisma

Nonostante permanga la criticità rispetto al grado di affollamento di Piazza Nazario Sauro, si possono indagare gli indicatori massimi che descrivono l'andamento del flusso di occupanti durante la fase di evacuazione, in quanto il processo termina entro 15 minuti. I dati riportati di seguito sono indicatori che rappresentano i valori massimi, descritti nella sezione 2.5.3, affinché si possa avere un approccio conservativo nella valutazione delle simulazioni in quanto gli scenari sono influenzati dalle condizioni esterne.

I dati utilizzati per realizzare il grafico sono stati restituiti dal software di simulazione MassMotion e indicano il numero di occupanti presenti nel modello al variare del tempo. Si può dedurre che il numero di occupanti diminuisce fino a raggiungere quota zero in un intervallo di tempo compreso tra 240 e 300 secondi.

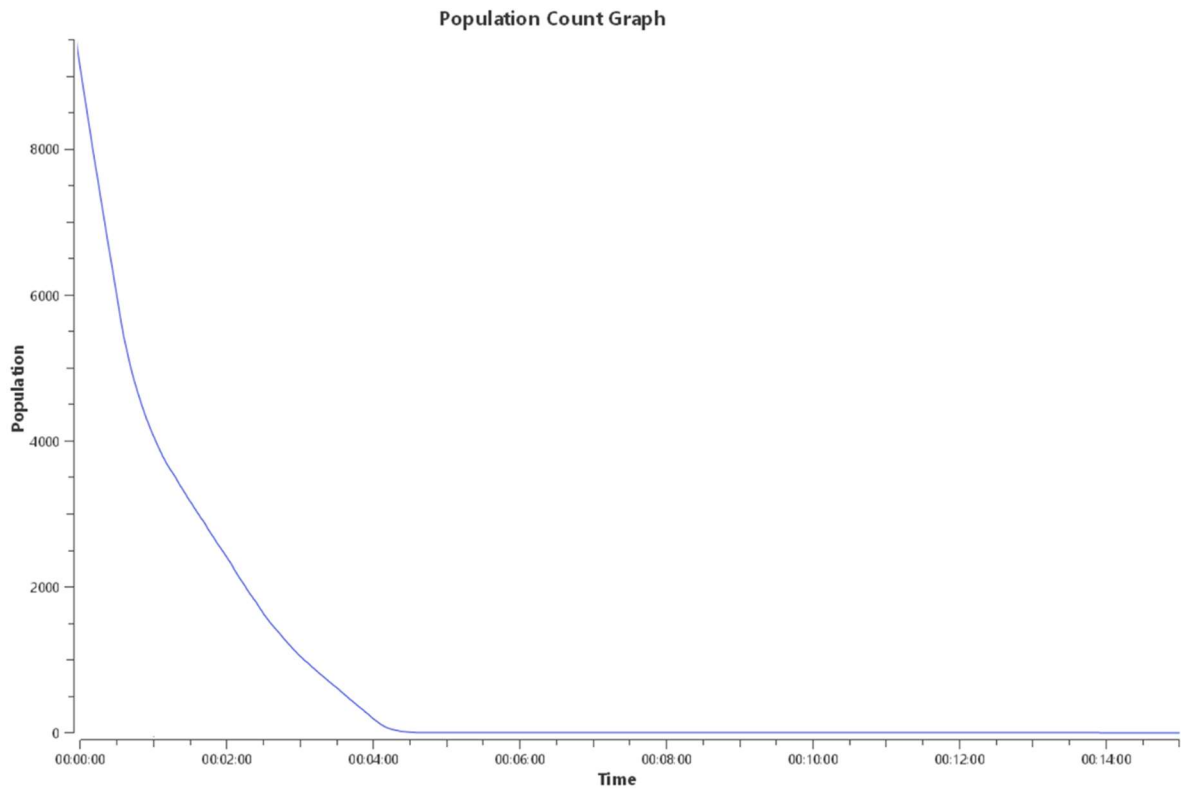


Grafico 9: Andamento del numero di occupanti nell'ambiente costruito all'aumentare del tempo

I dati presenti in questo grafico sono stati elaborati per ricavare l'andamento della curva di flusso che rappresenta il numero di occupanti evacuati che hanno raggiunto le zone di raccolta:

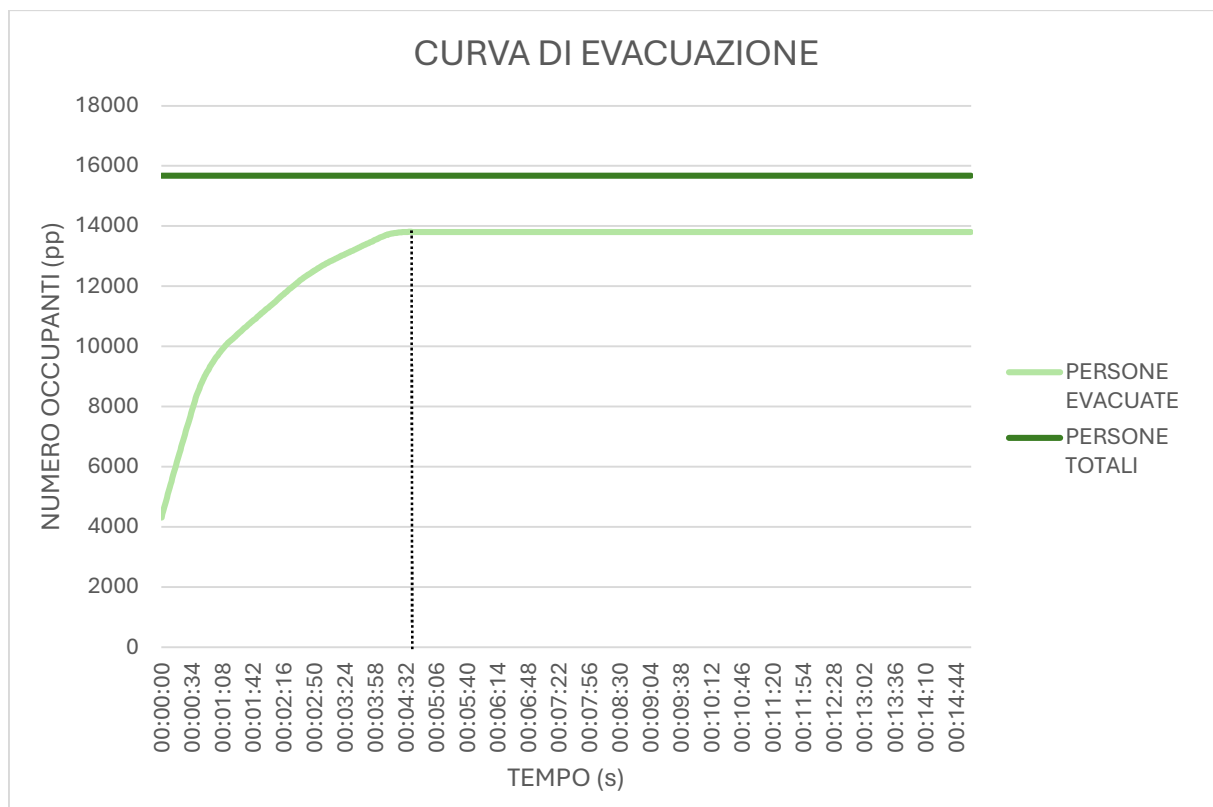


Grafico 10: Curva di evacuazione dello scenario di “Sheltering” per sisma

Le principali informazioni che si possono dedurre dal grafico di flusso sono:

- Andamento del flusso di persone evacuate: l’andamento costante della curva “Persone evacuate” da un certo istante indica che gli agenti presenti ad inizio simulazione, in grado di muoversi nell’ambiente costruito, hanno raggiunto le zone reputate sicure e dunque si possono considerare esenti da alcun rischio. È necessario evidenziare la differenza di andamento delle curve che rappresentano le persone evacuate e il valore totale di agenti con cui è stato popolato lo scenario. Tale differenza rappresenta la quota di popolazione che si può ipotizzare impossibilitata a raggiungere le vie di esodo indicate in quanto bloccata all’interno degli edifici a causa dalle macerie presenti;
- Tempo di evacuazione: il tempo massimo $t_{max, evacuazione}$ [s] corrisponde a 04:39 minuti, ovvero 279 s. Nel grafico è rappresentato in corrispondenza dell’inizio del tratto ad andamento costante della curva “Persone evacuate”, in quanto indica che il numero

- di persone evacuate corrisponde al totale delle persone in grado di muoversi presenti nel modello ad inizio simulazione;
- Persone intrappolate: il numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure è pari a 1868, ovvero la differenza tra il numero di agenti con cui è stato popolato lo scenario, rappresentato dalla curva “Persone totali Persone totali”, e il numero di persone a fine simulazione, rappresentato dalla curva “Persone evacuate”. Il numero di persone bloccate corrisponde al 13% della popolazione dello scenario.
 - Distanza massima: d_{Max} [m] percorsa da un agente per raggiungere una delle vie di esodo è 210 m.
 - È possibile individuare il numero di persone già situate nelle aree di raccolta per tempo $t=0$: il numero di agenti è 4310, ovvero il 27,5% della popolazione dello scenario. Tale valore si può giustificare in quanto i portali di destinazione del movimento degli agenti sono caratterizzati da un'estensione superficiale che comporta l'esclusione del conteggio degli agenti che ad inizio simulazione sono già in queste aree e devono muoversi, come ad esempio alcuni agenti outdoor che sono distribuiti su tutto il floor o alcuni agenti dehor.

Di seguito sono riassunti i valori dei principali indicatori generali:

INDICATORI MASSIMI		
$t_{max, evacuazione}$	[s]	279
numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure	[pp]	1868 (13%)
d_{Max}	[m]	210

Tabella 16: Indicatori generali del processo di evacuazione “Sheltering” per sisma

Inoltre, è possibile indagare le principali criticità legate all'aumento di densità degli agenti durante la fase di evacuazione attraverso la mappa di distribuzione della densità.



Figura 82: Distribuzione del valore di densità di affollamento per evacuazione "Sheltering" per sisma

Si può dedurre che le principali criticità si manifestano in corrispondenza di:

- il passaggio pedonale che collega la Rocca Roveresca a Piazza del Duca;
- l'incrocio tra Piazza Simoncelli e Piazza parcheggio del Foro,
- l'accesso a Piazza Simoncelli da via dei Commercianti;
- l'accesso a Piazza Nazario Sauro da Piazza Roma;

e la formazione dei colli di bottiglia è dovuta alla presenza delle macerie, rispettivamente in Piazza Simoncelli e Piazza Roma, che riducono l'ampiezza delle vie di passaggio. La formazione di aree con maggior densità non influisce sul completamento della fase di evacuazione.

In quanto scenario "Sheltering" è stato possibile indagare anche indicatori specifici per le singole aree di raccolta. I principali indicatori che descrivono la condizione degli occupanti

nell'area al termine della fase di evacuazione sono il numero di occupanti, il tempo massimo impiegato per raggiungere l'area e il tasso di occupazione Or.

Nella seguente tabella sono riassunti in valori di ogni singola area di raccolta per lo specifico scenario:

INDICATORI AREA DI RACCOLTA					
	NUMERO AGENTI [pp]	NUMERO AGENTI %	AREA ZONA SICURA [mq]	AREA DETRITI [mq]	Or
Piazza del Duca	7342	53	3064	0	0.72
Piazza Simoncelli	2355	17	2200	150	0.34
Piazza del Foro Annonario	1577	11	750	0	0.63
Piazza Nazario Sauro	2537	18	400	0	1.90

Tabella 17: Indicatori delle singole aree di raccolta

Da tali dati è possibile affermare che l'area di raccolta in Piazza Nazario Sauro ha un tasso di occupazione pari 1.90, indicando un grado di affollamento superiore alla condizione limite con valore pari a 1. Questo valore suggerisce una riflessione per quanto riguarda la fase di soccorso: è necessario che le squadre di primo soccorso intervengano per avviare il processo di deflusso dall'area della piazza prima del termine della fase di evacuazione affinché all'interno della zona il tasso di occupazione Or rimanga entro i limiti di 3 pp/mq.

5.3.3 Scenario di evacuazione "Leaving" per sisma e affollamento LOSE

Lo scenario di evacuazione secondo i criteri "Leaving" è stato valutato per un grado di mobilità pedonale LOSE, ovvero 1,9pp/mq, e un grado di affollamento per massgathering di 2pp/mq. I risultati ottenuti dalla modellazione permettono di comprendere come si sviluppa la fase di evacuazione verso zone di raccolta esterne all'area di interesse e dunque gli indicatori utilizzati per descrivere la fase di evacuazione si concentrano sul flusso degli occupanti, la distanza massima percorsa dagli agenti, il numero di persone rimaste bloccate e il tempo massimo di evacuazione. Nel caso di evacuazione secondo i criteri di "Leaving"

sono esclusi indicatori relativi alle aree di raccolta in quanto sono ipotizzate all'esterno dell'area di interesse. A causa di un elevato livello di affollamento, la simulazione è stata estesa ad un intervallo di tempo di 30 minuti.

Le principali informazioni sono state ricavate attraverso l'elaborazione dei dati forniti dal software di simulazione:

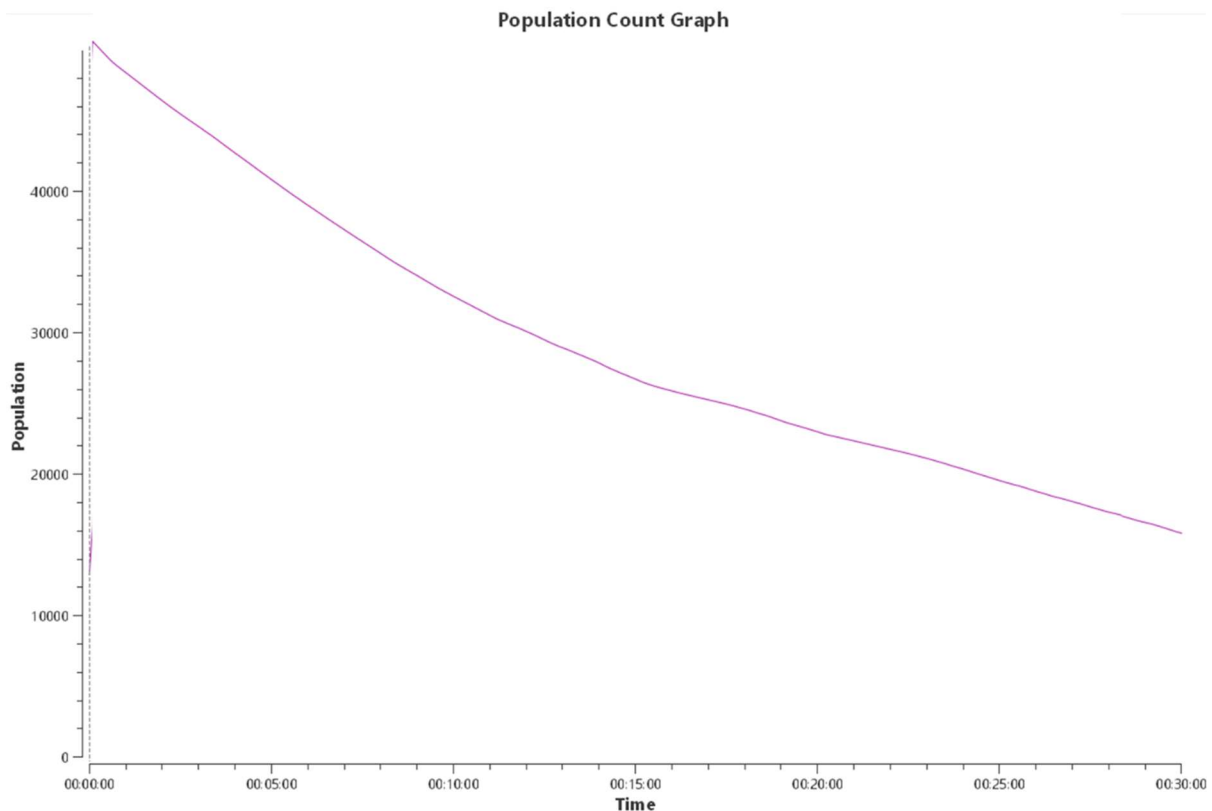


Grafico 11: Andamento del numero di occupanti nell'ambiente costruito all'aumentare del tempo

Il grafico mostra l'andamento del numero di persone presenti nell'ambiente costruito all'aumentare del tempo. È possibile notare che, nonostante la simulazione sia durata 30 minuti, permangono nello scenario 15.837 agenti, pari al 28% della popolazione presente ad inizio simulazione.

Una miglior condizione di esodo si è ottenuta aggiungendo un'ulteriore via di evacuazione a sud di Piazza del Duca, nel rispetto delle indicazioni presenti nei piani di evacuazione del Comune di Senigallia.



Figura 83: Immagine che mostra l'uscita aggiunta nella simulazione dell'evacuazione per "Leaving" per scenario LOSE

I dati relativi alla fase di evacuazione sono rappresentati dal seguente grafico, restituito dal programma di simulazione:

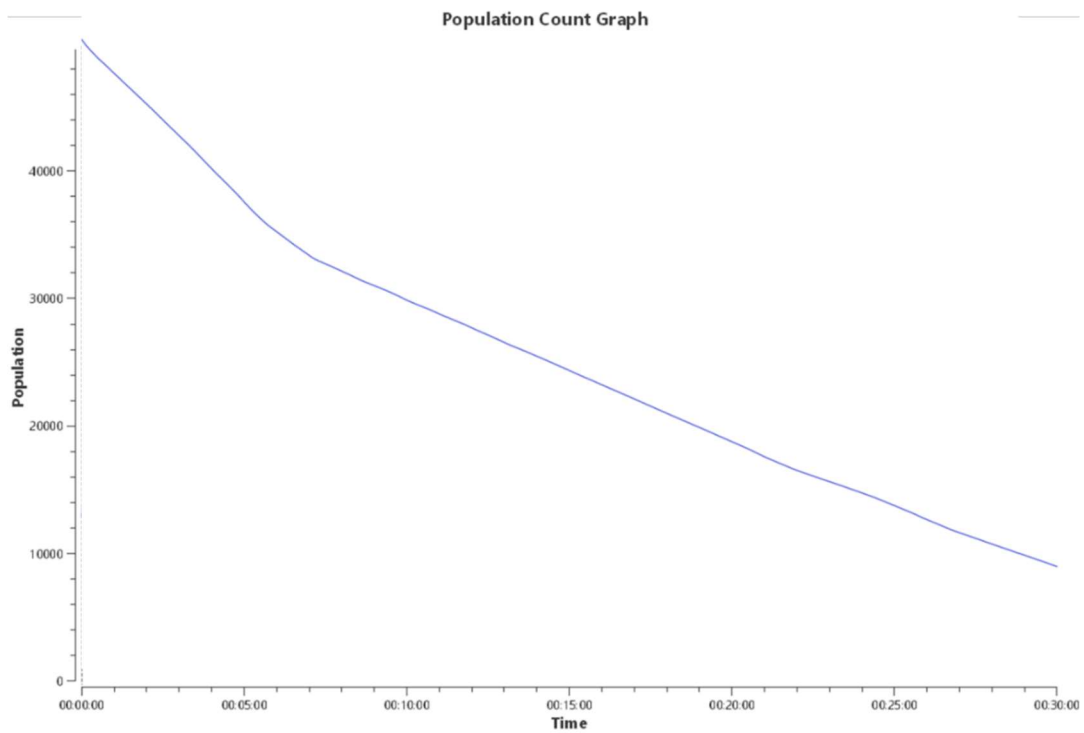


Grafico 12: Andamento del numero di occupanti nell'ambiente costruito all'aumentare del tempo

È possibile notare che il numero di agenti, che permangono nell'ambiente costruito, sono diminuiti rispetto alla configurazione precedente e corrispondono ad un valore di 8973 agenti, pari al 16% della popolazione con cui si è popolato lo scenario. Per indagare l'andamento del flusso di evacuazione i dati sono stati elaborati e riportati nel seguente grafico:

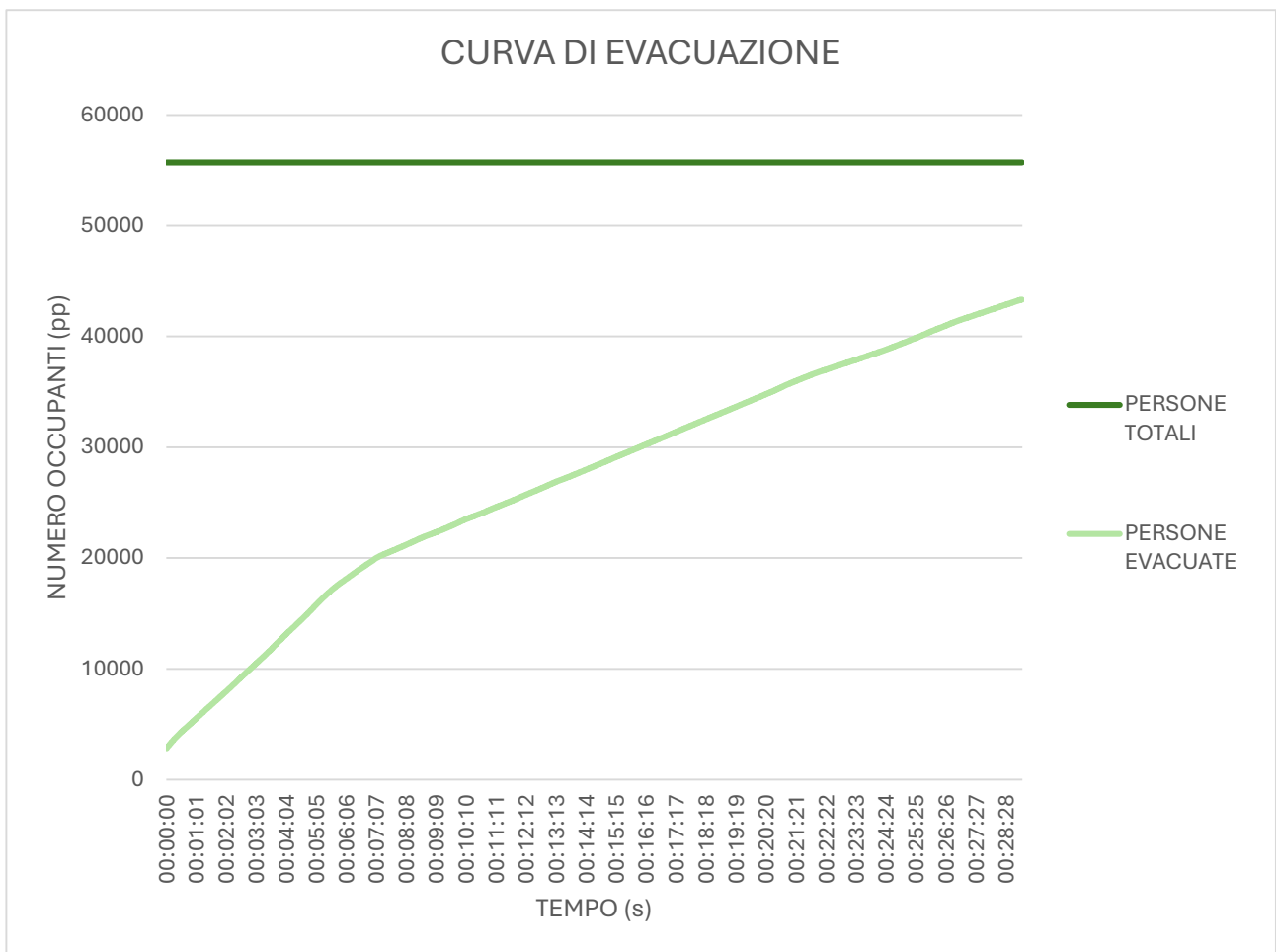


Grafico 13: Curva di evacuazione dello scenario di "Leaving" per sisma

Le informazioni che si possono ricavare riguardo l'andamento della fase di evacuazione sono:

- Andamento del flusso di persone evacuate: le curve "Persone evacuate" e "Persone totali" non si intersecano nell'intervallo di tempo di 30 minuti; dunque, si può dedurre che al termine dell'evacuazione degli agenti rimangono bloccati.

- Tempo di evacuazione: il tempo massimo $t_{max,evacuazione}$ [s] non è possibile definirlo in quanto al termine della simulazione sono presenti ancora degli agenti nell'ambiente costruito;
- Persone intrappolate: il numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure è pari a 12372, ovvero la differenza tra il numero di agenti con cui è stato popolato lo scenario, rappresentato dalla curva "Persone totali", e il numero di persone a fine simulazione, rappresentato dalla curva "Persone evacuate". Il numero di persone bloccate corrisponde al 22% della popolazione dello scenario. Tale numero si può scomporre in due contributi: il numero di agenti che permangono nello scenario al termine della fase di evacuazione, ovvero 8973 unità pari al 16% della popolazione nello scenario, e 3399 agenti, pari al 6% della popolazione totale, che dall'inizio della simulazione sono bloccati all'interno degli edifici e sono impossibilitati a muoversi.
- Distanza massima: d_{Max} [m] percorsa da un agente per raggiungere una delle vie di esodo non è determinabile in quanto il processo di evacuazione non si può ritenere completato.
- È possibile individuare il numero di persone già situate nelle aree di raccolta per tempo $t=0$: il numero di agenti è 2823, ovvero il 5% della popolazione dello scenario. Tale valore si può giustificare in quanto i portali di destinazione del movimento degli agenti sono caratterizzati da un'estensione superficiale che comporta l'esclusione del conteggio degli agenti che ad inizio simulazione sono già in queste aree e devono muoversi, come ad esempio alcuni agenti outdoor che sono distribuiti su tutto il floor o alcuni agenti dehor.

Nella seguente tabella sono riassunti i valori degli indicatori massimi che descrivono lo scenario:

INDICATORI MASSIMI		
$t_{max, evacuazione}$	[s]	/
numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure	[pp]	12732 (22%)
d_{Max}	[m]	/

Tabella 18: Indicatori generali del processo di evacuazione “Leaving” per sisma

Un altro strumento a disposizione per indagare le criticità di questo scenario è la mappa di densità fornita dal software di simulazione:

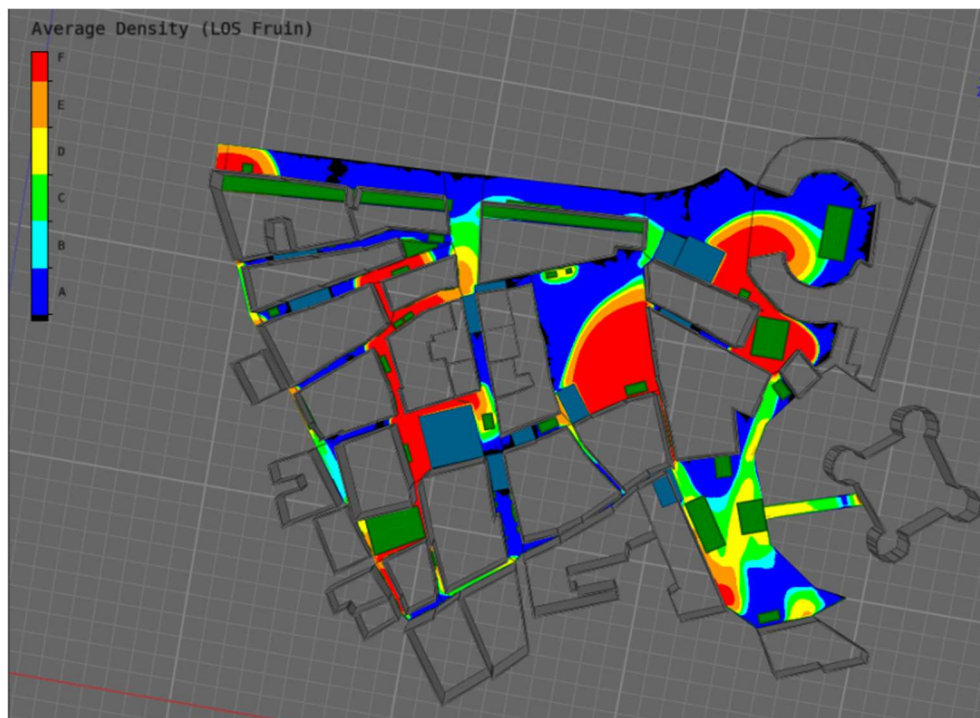


Figura 84: Distribuzione del valore di densità di affollamento per evacuazione “Leaving” per sisma

Dalla mappa è possibile dedurre le aree con maggiori criticità. Si verifica la formazione di colli di bottiglia in prossimità di:

- via Fagnani;
- l'intersezione di via Fagnani e Piazza Roma;
- l'uscita sud di Piazza Simoncelli in direzione Piazza del Duca;
- Piazza Manni e l'intersezione con Piazza parcheggio del Foro;
- Piazza Nazario Sauro;

La formazione di aree con maggiore densità si può correlare al ridotto numero di percorsi che permettono di raggiungere i varchi di uscita a causa della presenza di macerie al suolo. L'ingente ingombro dei detriti, che rende percorribili solamente alcune vie, e l'elevato numero di agenti causano la formazione di colli di bottiglia in attesa di raggiungere le vie di fuga.

È necessario evidenziare che il numero di persone presenti ancora nella simulazione al termine dei 30 minuti non risulta bloccata dai detriti e impossibilitata a muoversi, ma si trova congestionata al seguito della formazione di colli di bottiglia.

I risultati di questa analisi restituiscono l'esigenza di incrementare il numero di varchi per ridistribuire il numero di agenti su ciascuno di essi, affinché la fase di evacuazione si possa completare in un intervallo di tempo inferiore a 30 minuti. A causa della conformazione del layout urbano del centro storico e della presenza del fiume a Nord, si rende necessario l'istituzione di vie di esodo in direzione Ovest-Est in aggiunta alle già presenti in direzione Nord-Sud, affinché la popolazione possa ridistribuirsi e scegliere differenti percorsi evitando la formazione di congestioni.

5.3.4 Scenario di evacuazione "Sheltering" per sisma e affollamento LOSE

La simulazione della fase di evacuazione secondo i criteri "Sheltering" prevede di convogliare gli agenti in zone di raccolta all'interno dell'area di studio. La simulazione di questo scenario prevede che l'ambiente costruito sia popolato con un livello di mobilità pedonale di 1,9

pp/mq e un livello di affollamento per massgathering di 2 pp/mq. Le aree indicate come punti raccolta indicate alla sezione 5.1.4.3 sono state incrementate in quanto il livello di affollamento presentava già una criticità in termini di densità di occupanti. Le ulteriori aree individuate, che si aggiungono a Piazza Nazario Sauro, Piazza Simoncelli e Piazza del Duca, sono Piazza Ottorino Manni e Piazza del Foro Annonario. Tali aree devono essere verificate affinché la densità di popolazione, al termine della fase di evacuazione, sia inferiore al limite consentito di 3 pp/mq. A causa dell'elevato livello di affollamento, la simulazione è stata estesa ad un intervallo di tempo di 30 minuti.



Figura 85: Immagine delle zone di raccolta interne all'area di studio per evacuazione "Sheltering"

La verifica di densità di popolazione è stata eseguita grazie alle informazioni restituite dal software raccolte nelle tabelle "Agent summary" in cui sono elencati tutti gli agenti che hanno raggiunto una determinata area di raccolta.

VERIFICA ZONE DI RACCOLTA					
	NUMERO AGENTI [pp]	AREA ZONA SICURA [mq]	DENSITA' [pp/mq]	DENSITA' LIMITE [pp/mq]	VERIFICA
Piazza del Duca	12543	3064	4.09	3	NO
Piazza Simoncelli	13005	2200	6.5	3	NO
Piazza Nazario Sauro	13732	400	64	3	NO
Piazza del Foro Annonario	8107	1750	4.64	3	NO
Piazza Manni	4934	400	12.3	3	NO

Tabella 19: Riassunto della verifica di affollamento per le zone di raccolta

A seguito dell'elevato grado di affollamento dello scenario, la verifica di densità delle aree di raccolta non viene rispettata da nessuna di esse. Nonostante tale indicazione la fase di evacuazione termina entro l'intervallo di tempo della simulazione come rappresentato dal seguente grafico.

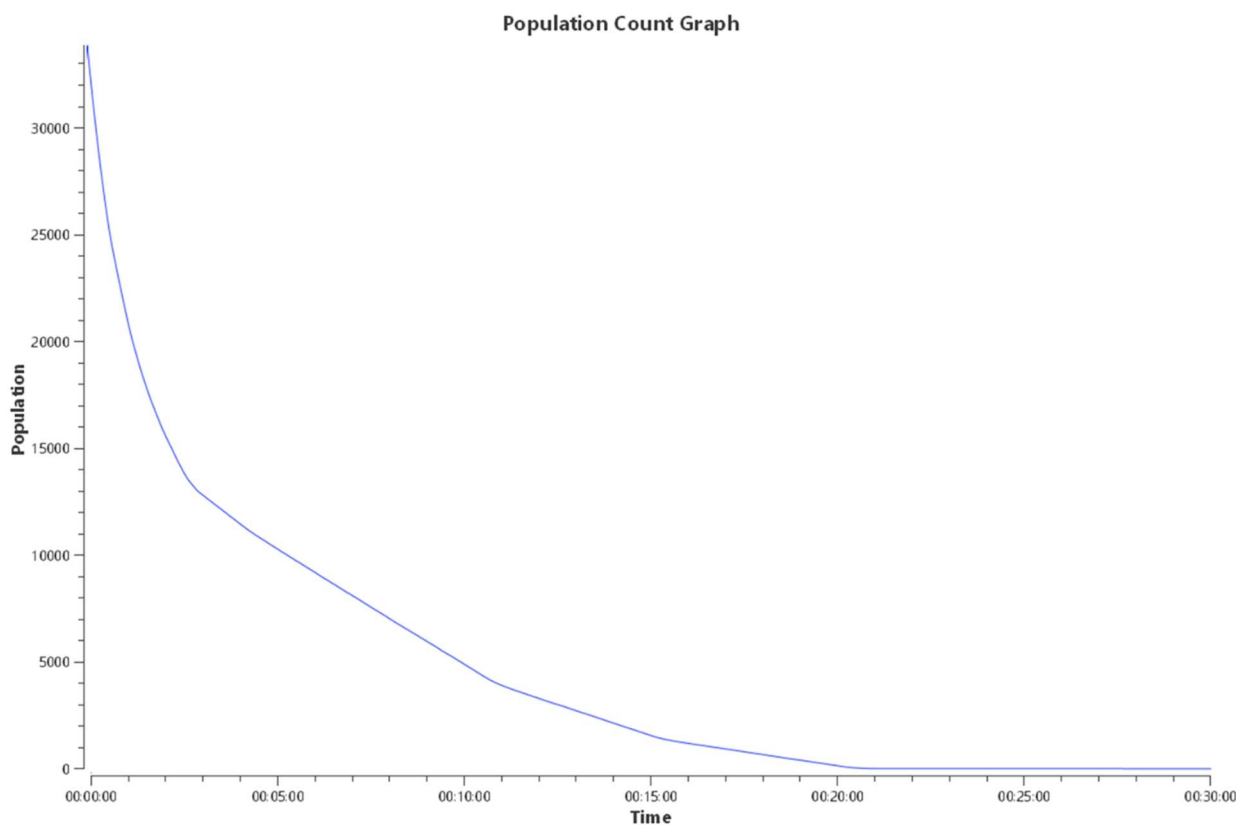


Grafico 14: Andamento del numero di occupanti nell'ambiente costruito all'aumentare del tempo

L'andamento del numero di agenti nell'ambiente costruito diminuisce fino ad annullarsi nell'intervallo di tempo compreso tra 20 e 21 minuti da inizio simulazione. I dati presenti in questo grafico sono stati elaborati per comprendere l'andamento della curva di flusso di evacuazione come riportato di seguito:

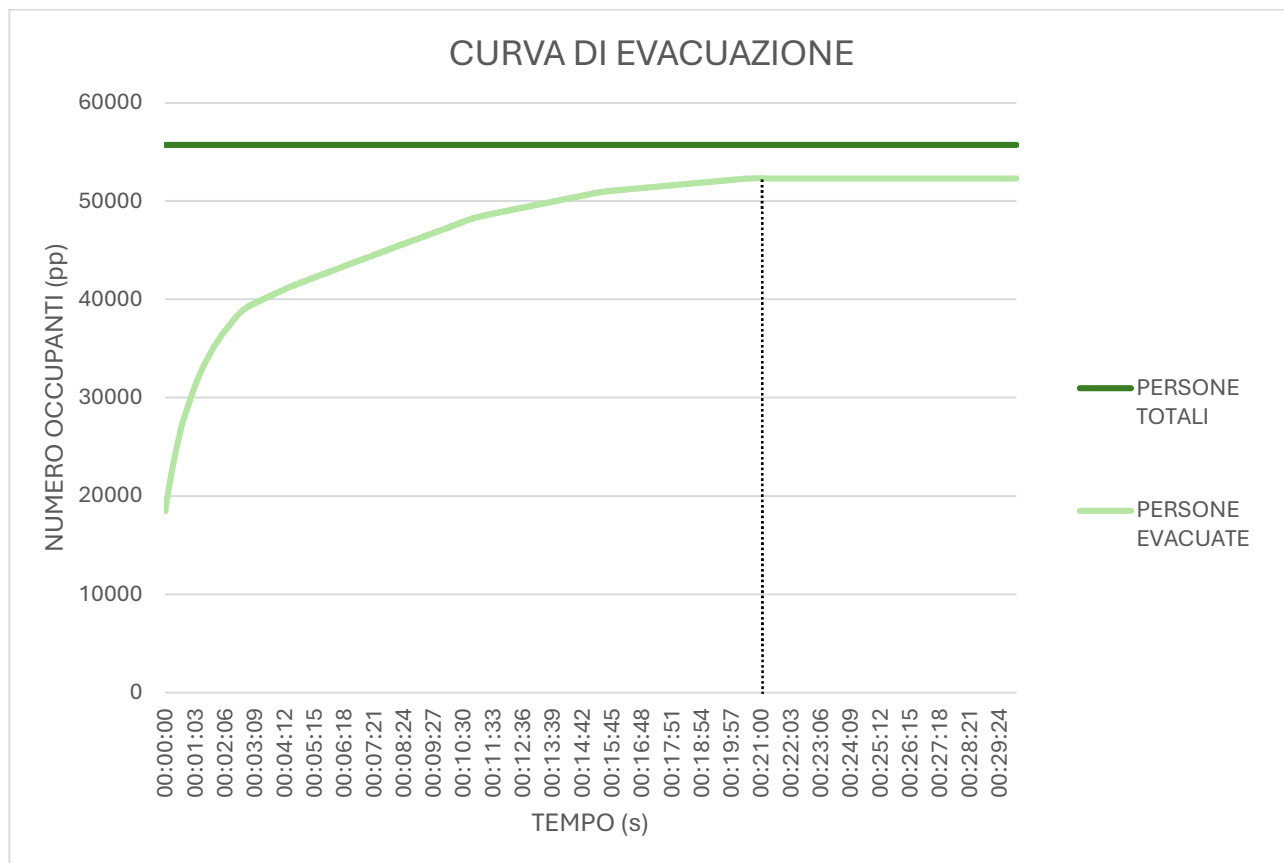


Grafico 15: Curva di evacuazione dello scenario di "Sheltering" per sisma

Nonostante le criticità rispetto al grado di affollamento in tutte le aree di raccolta, si possono indagare gli indicatori massimi che descrivono l'andamento del flusso di occupanti durante la fase di evacuazione, in quanto il processo termina entro 30 minuti. I dati riportati di seguito sono indicatori che rappresentano i valori massimi, descritti nella sezione 2.5.3, affinché si possa avere un approccio conservativo nella valutazione delle simulazioni in quanto gli scenari sono influenzati dalle condizioni esterne.

Le principali informazioni che si possono dedurre dal grafico di flusso sono:

- Andamento del flusso di persone evacuate: l'andamento costante della curva "Persone evacuate" ad un certo istante indica che tutti gli agenti ipotizzati nell'ambiente costruito ad inizio simulazione hanno raggiunto le zone reputate sicure e dunque si possono considerare esenti da alcun rischio. È rilevante evidenziare la differente tendenza tra la curva "Persone totali", che rappresenta il numero di persone che popolano lo scenario, e "Persone evacuate", che rappresenta il numero totale di agenti che hanno raggiunto le aree sicure. Tale differenza rappresenta il numero di agenti che non hanno potuto completare la fase di esodo e raggiungere le zone di raccolta in quanto bloccati all'interno degli edifici a causa dalle macerie dall'inizio della simulazione;
- Tempo di evacuazione: il tempo massimo $t_{max, evacuazione}$ [s] corrisponde a 21:08 minuti, ovvero 1268 s. Nel grafico è rappresentato in corrispondenza dell'inizio del tratto ad andamento costante della curva "Persone evacuate" in quanto indica che il numero di persone evacuate corrisponde al totale delle persone in grado di muoversi presenti nel modello ad inizio simulazione;
- Persone intrappolate: il numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure è pari a 3399, ovvero la differenza tra il numero di agenti con cui è stato popolato lo scenario, rappresentato dalla curva "Persone totali", e il numero di persone a fine simulazione, rappresentato dalla curva "Persone evacuate". Il numero di persone bloccate corrisponde al 6% della popolazione dello scenario.
- Distanza massima: d_{Max} [m] percorsa da un agente per raggiungere una delle vie di esodo è 405 m.
- È possibile individuare il numero di persone già situate nelle aree di raccolta per tempo $t=0$: il numero di agenti è 18466, ovvero il 33% della popolazione dello scenario. Tale valore si può giustificare in quanto i portali di destinazione del movimento degli agenti sono caratterizzati da un'estensione superficiale che comporta l'esclusione del conteggio degli agenti che ad inizio simulazione sono già in

queste aree e devono muoversi, come ad esempio alcuni agenti outdoor che sono distribuiti su tutto il floor o alcuni agenti dehor.

I dati descritti sono riassunti nella seguente tabella:

INDICATORI MASSIMI		
$t_{max,evacuazione}$	[s]	1268
numero di persone che non hanno raggiunto le aree sicure	[pp]	3399 (6%)
d_{Max}	[m]	405

Tabella 20: Indicatori generali del processo di evacuazione “Sheltering” per sisma

Un ulteriore strumento di indagine per comprendere lo sviluppo della fase di evacuazione è la mappa di densità degli occupanti.



Figura 86: Distribuzione del valore di densità di affollamento per evacuazione “Sheltering” per sisma

Le principali criticità si verificano in corrispondenza di:

- il passaggio da Piazza parcheggio del Foro e Piazza Simoncelli;
- l'accesso da sud di Piazza Simoncelli per via dei Commercianti;
- l'intersezione tra Piazza Roma e via Fagnani;
- l'accesso a nord di via Mastai;

a seguito della formazione di colli di bottiglia dovuti ad agenti in attesa di poter percorrere la via di fuga. L'aumento di densità in determinate aree non è dovuto all'impossibilità di movimento degli agenti a causa di macerie al suolo in quanto tutti gli agenti riescono a completare la fase di evacuazione.

La criticità relativa alla densità della popolazione nelle aree di raccolta si può considerare con relativa importanza in quanto si può ipotizzare che negli ultimi minuti della fase di evacuazione la popolazione sia aiutata dalle squadre di primo soccorso. In tal senso è corretto affermare che le aree di raccolta con maggiore densità di agenti saranno le prime in cui è necessario intervenire spostando la popolazione al di fuori dell'area di studio permettendo una riduzione del valore di densità di affollamento.

In quanto scenario "Sheltering" è stato possibile indagare anche indicatori specifici per le singole aree di raccolta. I principali indicatori che descrivono la condizione degli occupanti nell'area al termine della fase di evacuazione sono il numero di occupanti, il tempo massimo impiegato per raggiungere l'area e il tasso di occupazione Or. Nella seguente tabella sono riassunti in valori di ogni singola area di raccolta per lo specifico scenario:

VERIFICA ZONE DI RACCOLTA					
	NUMERO AGENTI [pp]	NUMERO AGENTI %	AREA ZONA SICURA [mq]	AREA DETRITI [mq]	Or
Piazza del Duca	12543	24	3064	0	1.2
Piazza Simoncelli	13005	25	2200	150	1.9
Piazza Nazario Sauro	13732	26	400	0	10.3
Piazza del Foro Annonario	8107	15	1750	0	1.4
Piazza Manni	4934	9	400	0	3.7

Tabella 21: Indicatori delle singole aree di raccolta

I dati evidenziano che nessuna area di raccolta è adeguata ad ospitare il flusso di persone in quanto il coefficiente O_r risulta sempre superiore a 1. È possibile ipotizzare che, nella fase di soccorso, le squadre di intervento possano favorire l'evacuazione delle persone all'interno delle aree di raccolta affinché il tasso di occupazione possa rientrare nei limiti consentiti.

Capitolo 6 -Discussioni

In questo capitolo sono riportati i principali risultati ottenuti dall'applicazione dei metodi al caso studio. Di seguito sono evidenziate le informazioni più rilevanti delle indicazioni ricevute nei capitoli 4 e 5.

Dalla valutazione dei risultati per vulnerabilità per evento alluvionale si può affermare che:

- l'appartenenza degli edifici di via Portici Ercolani e del Foro Annonario alla classe di vulnerabilità fisica più alta per entrambe le direzioni di flusso;
- la condizione più critica si verifica nello scenario di flusso perpendicolare in quanto si ha un maggior numero di edifici appartenenti alle classi di vulnerabilità maggiori;

Dunque, si può affermare che lo scenario di PVH, che combina la vulnerabilità fisica con il pericolo a cui è esposto l'edificio, più critico è quello con flusso proveniente da monte in quanto si ha, per tutti e tre i livelli di pericolosità, una maggiore omogeneità di grado di rischio per spazi aperti. Ciò implica che si ha la presenza di spazi aperti classificati con rischio moderato o alto diffusi su tutta l'area di studio, ovvero senza poli di maggior ricorrenza nello spazio urbano.

I risultati della caratterizzazione dell'ambiente costruito per evento sismico hanno evidenziato che:

- il caso che presenta una criticità maggiore, con la quasi totalità degli edifici classificati con grado di vulnerabilità superiori a 0,5, è C3 ovvero per coperture spingenti e presidi sismici inefficaci. Tali edifici sono classificati con rischio almeno pari NC o C, ovvero prossimi al collasso o collasso, generando un indice di macerie al suolo che rende impossibile l'esecuzione della fase di evacuazione.
- i casi C1 e C2 presentano un grado medio di vulnerabilità inferiore agli scenari C3 e C4, come atteso in quanto rappresentano i casi di coperture non spingenti. A tal punto si può affermare che la condizione discriminante per la criticità legata alla vulnerabilità fisica degli edifici in caso di evento sismico è la tipologia di copertura, seguita dal parametro di efficienza dei presidi sismici.

Inoltre, è possibile affermare che gli scenari di danno più critici, ottenuti dall'elaborazione dei dati delle matrici di danno, si verificano sempre per i casi C3 e C4. Le condizioni a cui è sottoposto l'ambiente urbano sono estremamente critiche in quanto l'ingombro delle macerie al suolo rende impossibile le fasi di evacuazione e soccorso. Gli scenari C1 e C2 invece presentano delle condizioni critiche ma accettabili in quanto l'ingombro delle macerie al suolo è notevolmente ridotto e permette lo svolgimento delle fasi di evacuazione e soccorso.

Nel capitolo 5 si descrivono due differenti modalità di esodo: "Leaving", che rispecchia il piano attuale e convoglia le persone fuori dall'area di studio, e "Sheltering", che ha l'obiettivo di individuare aree di raduno all'interno dell'area. È necessario ricordare che gli agenti simulati nell'ambiente costruito sono determinati rispetto a condizioni conservative rispetto possibili scenari reali, come evidenziato nel lavoro di tesi svolto allo stesso tempo da C. Aligheri e M. Natalucci, dalla quale provengono i valori. Gli scenari valutati per un grado LOSA in esterno prevedono un numero maggiore di persone negli ambienti indoor e ai piani superiori degli edifici, mentre gli scenari valutati con un grado LOSE prevedono un affollamento maggiore nelle aree esterne rispetto agli agenti indoor.

I risultati delle simulazioni sono differenziati in funzione del grado di affollamento e di conseguenza del numero di agenti che popolano lo scenario. Le informazioni ottenute dai risultati numerici hanno permesso di valutare la resilienza del centro storico e il rischio per gli occupanti per un possibile fenomeno alluvionale.

Le principali informazioni che si possono ricavare sono:

- gli spazi aperti con grado di rischio maggiore, in tutti gli scenari valutati, sono via Portici Ercolani, Piazza del Foro Annonario, Piazza Simoncelli e il tratto nord di Corso Due Giugno;
- le simulazioni della fase di evacuazione per entrambe le modalità di esodo terminano entro il tempo di simulazione, ovvero prima di 15 minuti;
- nessuna persona rimane bloccata all'interno dell'ambiente costruito a causa di formazione di colli di bottiglia in entrambe gli scenari di modellazione;

E' possibile validare tali informazioni in quanto il grado di rischio associato agli spazi aperti, restituito dalla matrice di rischio, è affine e compatibile con le informazioni ricavate da un'indagine storiografica delle principali aree del centro storico colpite da alluvioni.

I risultati hanno evidenziato minime criticità per gli occupanti in caso di fenomeno alluvionale in quanto l'intervallo temporale nel quale si conclude la fase di evacuazione è inferiore ai 15 minuti. Per migliorare l'esodo per "Leaving", che presenta una durata maggiore, sarebbe adeguato individuare ulteriori varchi per l'evacuazione dall'area affinché gli occupanti possano ridistribuirsi su percorsi differenti.

I risultati delle simulazioni, per evento sismico, hanno permesso una valutazione dell'esposizione degli occupanti rispetto a differenti livelli di affollamento per lo stesso periodo di ritorno. Da tale confronto si è riscontrato un incremento elevato della criticità, alla quale sono esposti gli occupanti, all'aumentare del numero di agenti nello scenario. Rispetto ad un livello di affollamento LOSA, la simulazione dello scenario di evacuazione, indipendentemente dalla condizione "Leaving" o "Sheltering", ha evidenziato un dato di notevole importanza rispetto al numero di agenti che popolano lo scenario. Come si può dedurre dalle curve di flusso, le macerie dovute al crollo di alcuni edifici hanno causato l'impossibilità di movimento di 1868 persone bloccate al loro interno, pari al 13% della popolazione nell'ambiente. Rispetto allo scenario di evacuazione "Leaving" il resto della popolazione riesce a completare la fase di evacuazione in 622s senza notevoli problematiche di formazione di colli di bottiglia.

Lo scenario più critico per evento sismico è presentato dalla condizione di affollamento LOSE per evacuazione secondo i criteri di "Leaving" in quanto un considerevole numero di occupanti viene convogliato attraverso un numero insufficiente di varchi, oltretutto di limitata estensione. In questo scenario la problematica principale risiede nel grado affollamento in quanto non è compatibile con le dimensioni delle vie di fuga. Infatti, nonostante sia stato incrementato il tempo di simulazione fino a 30 minuti, la fase di esodo non volge al termine in quanto le persone risultano rallentate dalla formazione di colli di bottiglia a causa di una ridotta larghezza delle vie nelle quali si muovono gli agenti. Dunque,

la problematica principale non risiede nella durata della fase di evacuazione ma nelle dimensioni dei varchi e delle vie di fuga.

Un'altra criticità evidenziata da entrambe gli scenari "Sheltering", per fenomeno sismico, è l'inadeguatezza degli spazi aperti, individuati come zone di raccolta, a garantire un tasso di occupazione che rispetti i limiti indicati. Anche in questo caso la problematica risiede nella dimensione delle aree disponibili a svolgere tali funzioni e non nella tempistica di evacuazione.

Si possono individuare una serie di azioni che, se attuate, potrebbero ridurre le criticità a cui sono esposti gli occupanti per entrambe i fenomeni indagati:

- aumentare il numero di varchi per evacuazione ""Leaving"" in direzione Ovest-Est affinché si possa ridurre l'affollamento nelle vie di evacuazione in direzione Nord-Sud già esistenti e la formazione di colli di bottiglia;
- modificare la gestione delle persone nelle zone di raccolta, per entrambe le strategie, individuando le aree con maggior affollamento e avviare il processo di deflusso degli occupanti di tali aree ancor prima del termine della fase di evacuazione.

Capitolo 7 - Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha raggiunto l'obiettivo preposto, ovvero l'individuazione di eventuali criticità presenti in caso di fenomeni sismici o alluvionali nel centro storico della città di Senigallia. La valutazione non si è concentrata nella sola determinazione di conseguenze in termini di perdite economiche o culturali ma soprattutto in termini di vite umane. Infatti, l'obiettivo del lavoro si è incentrato sull'indagine delle conseguenze per gli occupanti del centro storico in condizioni di maggiore o minore affollamento e in funzione dei due differenti eventi emergenziali indagati.

Lo studio e l'applicazione dei metodi innovativi ha permesso di caratterizzare la resilienza del centro storico della città indagando le prestazioni degli spazi aperti, oltre che dei singoli edifici, in funzione di un differente evento sollecitante. Tali metodi sono da preferire rispetto alla prassi attuale in quanto permettono di indagare il problema ad un livello mesoscala e dunque di considerare sia il contributo dei singoli edifici, ma soprattutto degli spazi aperti, ovvero l'ambiente in cui si svolgono le fasi di evacuazione e primo soccorso. Inoltre, integrano la componente comportamentale umana oltre alla caratterizzazione fisica del costruito. L'applicazione dei metodi ad un caso reale ha richiesto l'assunzione di ipotesi che non hanno però condizionato l'esito finale delle valutazioni, bensì hanno favorito la valutazione di più scenari e condizioni del costruito.

Per quanto riguarda i risultati relativi alle simulazioni della fase di evacuazione, basate su indicazioni riferite all'attuale piano di gestione delle emergenze, i dati restituiscono informazioni positive rispetto al rischio di esposizione degli occupanti. Entrambe le modalità di evacuazione evidenziano il completamento della fase di esodo entro quindici minuti, tempistica entro la quale si ipotizza l'intervento delle squadre di soccorso. L'evacuazione secondo i criteri di "Leaving" ha evidenziato una prestazione sufficiente dei varchi di uscita escludendo la formazione di colli di bottiglia e lunghe attese degli agenti prima di giungere al varco. L'esodo rispetto le indicazioni di evacuazione "Sheltering" evidenzia l'efficacia delle zone di raccolta individuate in termini di densità della popolazione che si raduna in tali aree. La fase di evacuazione si conclude in tempistiche inferiori di quelle secondo i criteri di

“Leaving” ed è attribuibile all’adeguatezza delle zone di raccolta individuate. Tali aree, infatti, rispettano il criterio di densità massima, garantendo agli occupanti la permanenza nello spazio senza subire elevati contatti con altri agenti.

Un confronto tra i due scenari, rispetto indicatori generali, permette di individuare la modalità di evacuazione “Sheltering” più efficace in quanto gli utenti impiegano un tempo massimo di evacuazione inferiore, concludendo tale fase in 325 s.

Nella tabella seguente sono riportati gli indicatori per un confronto tra le due modalità di evacuazione:

CONFRONTO SCENARI PER ALLUVIONE					
	N° PERSONE TOTALI	N° PERSONE EVACUATE	N° PERSONE IN AREE SICURE AD INIZIO EVACUAZIONE	N° PERSONE BLOCCATE	TEMPO DI EVACUAZIONE (s)
LEAVING	15679	15679 (100%)	1185 (7,5%)	0 (0%)	567
SHELTERING	15679	15679 (100%)	3048 (19%)	0 (0%)	325

Tabella 22: Confronto tra i principali indicatori dell’evacuazione per alluvione

I risultati numerici e la loro elaborazione rispetto ad un fenomeno sismico hanno permesso l’individuazione delle eventuali criticità e la resilienza del centro storico della città di Senigallia. Rispetto gli scenari di danno indagati è stato possibile individuare un aspetto costante: le principali piazze interne all’area di studio, come Piazza Simoncelli, Piazza del Foro Annonario, Piazza del Duca e Piazza Roma sono sempre esposte ad un grado di danno maggiore rispetto agli altri spazi aperti al variare del tempo di ritorno considerato.

Lo scenario secondo i criteri di “Sheltering” permette di affermare che la fase di evacuazione avviene con un riscontro positivo per gli agenti non coinvolti dal crollo di macerie. Le aree di raccolta si possono considerare adeguate ad eccezione di Piazza Nazario Sauro che raggiunge un livello di affollamento superiore al doppio del massimo consentito. In tal caso è necessario ipotizzare nel piano di gestione dell’emergenza un intervento delle squadre di soccorso per trasferire parte degli occupanti in aree esterne all’area di raccolta stessa. La fase di

evacuazione si conclude in tempi inferiori all'evacuazione per "Leaving" e si riducono anche le aree con un incremento di densità degli agenti durante la fase di moto per raggiungere le zone di raccolta.

Le simulazioni degli scenari con affollamento LOSE e massgathering restituiscono condizioni critiche per gli occupanti. Indifferentemente dalla tipologia di evacuazione, il tempo di ritorno e il conseguente crollo di edifici hanno causato l'impossibilità di movimento di 3400 persone bloccate al loro interno, pari al 6% della popolazione nell'ambiente costruito. Rispetto allo scenario di "Leaving", la condizione risulta ancora più critica in quanto al termine della simulazione si registra la presenza di circa 8900 elementi all'interno dell'area studiata. Il numero di persone bloccate al termine della simulazione risulta essere 12300, pari al 22% della popolazione. La problematica, resa evidente da questi risultati, consiste nella presenza di un numero non sufficiente di vie di fuga indicate nel piano di gestione delle emergenze. La problematica è acuita anche dalla configurazione del layout urbano. Le vie di limitata estensione e la quasi totale assenza di spazi aperti, come piazze, nella parte ovest dell'area di studio rende difficile la gestione del flusso di utenti in quella specifica area.

La fase di evacuazione per "Sheltering" si conclude senza ulteriori problematiche per i restanti occupanti, in quanto tutti hanno potuto raggiungere le zone di raccolta; le criticità sono dovute all'elevato valore di affollamento nelle aree deputate sicure.

Nella tabella seguente sono riportati gli indicatori per un confronto tra le due modalità di evacuazione per i differenti scenari di affollamento:

CONFRONTO SCENARI PER SISMA					
	N° PERSONE TOTALI	N° PERSONE EVACUATE	N° PERSONE IN AREE SICURE AD INIZIO EVACUAZIONE	N° PERSONE BLOCCATE	TEMPO DI EVACUAZIONE (s)
LOSA					
LEAVING	15679	13811 (87%)	1112 (7%)	1868 (13%)	622
SHELTERING	15679	13811 (87%)	4310 (27,5%)	1868 (13%)	279
LOSE					
LEAVING	55720	43348 (78%)	2823 (5%)	12732 (22%)	/
SHELTERING	55720	52321 (94%)	18466 (33%)	3399 (6%)	1268

Tabella 23: Confronto tra i principali indicatori dell'evacuazione per sisma

In conclusione, l'elaborazione dei risultati di simulazione della fase di esodo ed evacuazione non evidenzia notevoli differenze tra la modalità di evacuazione "Leaving" e "Sheltering" in quanto tutti gli occupanti riescono a completare la fase di esodo entro il termine della simulazione. Lo scenario "Sheltering" permette agli agenti di completare la fase di evacuazione in tempo minore rispetto alla condizione "Leaving", ricordando che lo scenario più critico si verifica con flusso perpendicolare all'asse del fiume. Invece, i risultati per fenomeno sismico evidenziano l'esigenza di incrementare il numero delle vie di fuga per condizione di "Leaving", ovvero abbandono dell'area, in quanto si verifica la formazione di colli di bottiglia e aree di attesa e una criticità per quanto riguarda il tasso di occupazione delle aree di raccolta al termine della fase di evacuazione in condizione di "Sheltering", come riassunto nella tabella 23. Tali problematiche possono essere imputate alla configurazione del layout urbano in quanto la fitta rete di strade nella zona Ovest non permette l'individuazione di un adeguato numero di punti di raccolta, causando la concentrazione delle persone in vie di limitata ampiezza.

Possibili idee di soluzione da valutare in futuro possono essere:

- ridurre il numero di macerie al suolo, intervenendo sugli edifici attraverso una riduzione del grado di vulnerabilità. Ciò restituirebbe un numero minore di vie e piazze bloccate dalle macerie e una maggior libertà di movimento per gli occupanti;

- l'individuazione di vie di fuga con direzioni Ovest-Est affinché gli utenti si possano ridistribuire su più direzioni di moto durante la fase di evacuazione, evitando la formazione di colli di bottiglia.

Il lavoro svolto in questo elaborato si inserisce in una serie di studi relativi alla città di Senigallia che hanno come obiettivo l'incremento della prestazione di resilienza per fenomeni di tipo emergenziale. Il contenuto si può considerare un punto di partenza per successivi lavori, in quanto i metodi utilizzati permettono la replicabilità ad altri scenari e contesti urbani. Lo scopo di tali lavori consiste nell'intervenire su componenti della città per ridurre il rischio della sua popolazione e modificare le fasi di gestione delle emergenze.

APPENDICE A

Riassunto dei principali valori di dei parametri descritti nei metodi per gli edifici compresi nell'area di studio

STREE ID	BUILDING ID	Codice US	EXPOSURE COMPONENT (EC)		SENSITIVITY COMPONENT (SC)	FLOOD VULNERABILITY NORMALIZZATO per flusso a monte	FLOOD VULNERABILITY NORMALIZZATO per flusso perpendicolare all'asse del fiume	INDICE DI VULNERABILITA' SISMICA per copertura piana e C1 NORMALIZZATO IVf	INDICE DI VULNERABILITA' SISMICA per copertura piana e C2 NORMALIZZATO IVf	INDICE DI VULNERABILITA' SISMICA per copertura spingente e C1 NORMALIZZATO IVf	INDICE DI VULNERABILITA' SISMICA per copertura spingente e C2 NORMALIZZATO IVf	
			WALL ORIENTATION per flusso perpendicolare all'asse del fiume valore normalizzato	WALL ORIENTATION per flusso a monte valore normalizzato	SC normalizzato							
VPE1	01A1101	1A	100	33	53	22	58	0.53	0.27	0.72	0.36	
	01A1102											
	01A0501											
	01A0502											
	01A0503											
	01A0504											
	01A0505											
CDG1	01A0507	1A	33	100	53	58	22	0.54	0.27	0.73	0.37	
	06A0501	6A	33	33	27	13	13	0.58	0.58	0.81	0.81	
	07A0501	7A	33	33	33	15	15	0.63	0.63	0.86	0.86	
CDG2	02B0501	2B	33	100	33	39	15	0.77	0.77	1.00	1.00	
	02B0502											
	02C0501	2C	33	100	27	33	13	0.62	0.62	0.85	0.85	
	02C0502											
	02C0503											
	02D0501	2D	33	100	27	33	13	0.63	0.63	0.86	0.86	
	02D0502											
	02D0503											
	10B0501	10B	33	33	27	13	13	0.63	0.63	0.86	0.86	
	10B0502											
10B0503												
10B0201												
10C0501	10C	33	33	27	13	13	0.58	0.58	0.81	0.81		
OVG1	10C0101											
	02B0101	2B	100	33	33	15	39	0.76	0.76	0.99	0.99	
	02A0501	2A	100	33	33	15	39	0.62	0.62	0.85	0.85	
VDC1	02E0503	2E	33	33	33	15	15	0.61	0.61	0.83	0.83	
	02E0201											
	02E0101											
	03D0501		3D	100	33	27	13	33	0.62	0.62	0.85	0.85
	03D0101											
OVM0	03E0501	3E	100	33	33	15	39	0.77	0.77	1.00	1.00	
	03A1201	3A	33	33	40	18	18	0.50	0.24	0.65	0.31	
	03A0101											
	04C0501		4C	33	100	20	27	10	0.64	0.64	0.64	0.64
VDC2	04C0201											
	04C1202											
	03C0501	3C	33	100	40	45	18	0.41	0.20	0.56	0.27	
	03M0101	3M	33	100	40	45	18	0.66	0.33	0.85	0.43	
	03I0102	3I	33	33	33	15	15	0.51	0.26	0.70	0.35	
	03L0101	3L	33	33	13	8	8	0.64	0.64	0.64	0.64	
	03D0701	3D	33	33	27	13	13	0.53	0.27	0.72	0.36	
OVA2	03M0501	3M	33	33	40	18	18	0.65	0.33	0.84	0.43	
	03M0101											
	03M0201											
CDG3	18G0801	18G	100	33	27	13	33	0.58	0.58	0.81	0.81	
	03A0501	3A	33	33	40	18	18	0.76	0.76	0.99	0.99	
	03F0101	3F	33	100	27	33	13	0.61	0.61	0.83	0.83	
	03F0102											
	03F0501											
	03F0502											
	03G0501	3G	33	100	27	33	13	0.61	0.61	0.83	0.83	
	03G0502											
	03G0503											
	13A0502	13A	33	33	40	18	18	0.76	0.76	0.99	0.99	
13A0503												
13A0504												
13A0505												
13A0201												
13A0202												
13A0103												
13B0501	13B	33	33	27	13	13	0.57	0.57	0.80	0.80		
13B0502												
OVA1	03G0201	3G	33	33	27	13	13	0.61	0.61	0.83	0.83	
	03G0505											
	03G0101											
	03H0501	3H	33	33	40	18	18	0.75	0.75	0.97	0.97	
	03H0101											
18F	03I0101	3I	33	33	33	15	15	0.49	0.24	0.64	0.31	
	03I0501											
	18F0501											
18F1201	18F	100	33	33	15	39	0.63	0.63	0.86	0.86		
18F0201												

OVDM	04A0101	4A	100	33	27	13	33	0.33	0.16	0.46	0.22
	04F0101	4F	100	33	33	15	39	0.62	0.62	0.85	0.85
	04G0101	4G	100	33	20	10	27	0.58	0.58	0.81	0.81
	05A0101	5A	33	100	20	27	10	0.58	0.58	0.81	0.81
OVOM	05B0101	5B	33	100	33	39	15	0.77	0.77	1.00	1.00
	14C1101	14C	100	33	40	18	45	0.41	0.21	0.60	0.30
OPZS	01A0506		33	33	53	22	22	0.61	0.61	0.84	0.84
	01A1103	1A									
	01A1201										
	02A0502	2A	100	33	33	15	39	0.54	0.27	0.73	0.37
	02A0101										
	02E0504	2E	33	33	33	15	15	0.61	0.61	0.83	0.83
	02E0505										
	02F0501	2F	33	33	20	10	10	0.64	0.64	0.64	0.64
	02F0101							0.00			
	03A0101	3A	100	33	40	18	45	0.50	0.24	0.64	0.31
	03A1201										
	03A0501										
OPZR	03B0101	03B	100	33	33	15	39	0.43	0.21	0.59	0.28
	03B0501										
	03C0101	3C	100	33	47	20	52	0.77	0.77	1.00	1.00
	04B0101	4B	33	100	20	27	10	0.64	0.64	0.64	0.64
	04C1201	4C	33	100	20	27	10	0.64	0.64	0.64	0.64
	02E1101	2E	33	100	33	39	15	0.62	0.62	0.84	0.84
	02E0501										
	02E0502										
	10D0501	10D	33	33	33	15	15	0.41	0.20	0.56	0.27
	10D0502										
10D0101											
PZDD	10E0501	10E	33	33	33	15	15	0.35	0.16	0.47	0.22
	12A0601	12A	33	33	40	18	18	0.53	0.27	0.72	0.36
	13A0501	13A	100	33	40	18	45	0.77	0.77	1.00	1.00
	13A0101										
	13A0102										
	04D0801	4D	33	100	40	45	18	0.42	0.42	0.65	0.65
OPRF	17A0201	17A	33	100	47	52	20	0.44	0.44	0.66	0.66
	17A0801										
	18A1201	18A	33	33	40	18	18	0.31	0.15	0.44	0.21
	18A1202										
	18A1203										
	18A0501										
18A0801											
22A0501	22A	100	33	13	8	21	0.64	0.64	0.64	0.64	
PZDE	05A1201	5A	100	33	33	15	39	0.77	0.77	1.00	1.00
	05C1201	5C	100	33	33	15	39	0.77	0.77	1.00	1.00
	05C1202										
	05C0101										
	05D0101	5D	100	33	27	13	33	0.63	0.63	0.86	0.86
05D1201											
05E1101	5E	100	33	27	13	33	0.63	0.63	0.86	0.86	
OPZM	14A1101	14A	100	100	47	52	52	0.31	0.15	0.46	0.22
	14A1201										
	14A1202										
	14A0501										
	14A1102										
	14A0502										
	14A0503										
	14A1103										
	14A1203										
14A0504											
VPE2	04E0501	04E	100	33	27	13	33	0.35	0.35	0.58	0.58
	04F0501	04F	100	33	33	15	39	0.63	0.63	0.86	0.86
	05E0501	05E	100	33	27	13	33	0.63	0.63	0.86	0.86
	05E0502										
	05E0201										
	05E0101										
	14A0501	14A	33	100	47	52	20	0.48	0.48	0.70	0.70
OVM1	14B0501	14B	100	100	27	33	33	0.32	0.32	0.55	0.55
	14B0502										
	14C0501	14C	100	100	40	45	45	0.30	0.14	0.45	0.21
	14C0201										
14C0101											
OVM2	07B0501	07B	100	33	33	15	39	0.54	0.27	0.73	0.37
	07B0101										
	07B0102										
	07B0103										
	07D0101	07D	100	33	33	15	39	0.62	0.62	0.85	0.85
OVM3	07D0102										
	07D0103										
	07D0104										
	07D0501	07D	33	100	33	39	15	0.40	0.19	0.55	0.26
1VA1	07D0502	07D	33	33	33	15	15	0.40	0.19	0.54	0.26
	07D0105										
	07C1201	07C	33	33	40	18	18	0.50	0.24	0.65	0.31
	07C0101										
	07B0502	07B	33	33	33	15	15	0.34	0.16	0.47	0.22
	07B0104										
	07B0503										
	07A1201	07A	33	100	33	39	15	0.62	0.62	0.85	0.85
07A0101											
07A1101											
VCB1	08A0101	08A	100	33	33	15	39	0.40	0.19	0.55	0.26
	08C0501	08C	100	33	40	18	45	0.76	0.76	0.99	0.99
	08D0101	08D	33	100	33	39	15	0.52	0.26	0.71	0.36
	08D0501	08D	33	33	33	15	15	0.54	0.27	0.73	0.37
	08D0502										
	08C0101	08C	33	33	40	18	18	0.76	0.76	0.99	0.99
	08B0504	08B	33	33	33	15	15	0.63	0.63	0.86	0.86
	08B0505										
	08B0105										
	26D1201	26D	100	33	33	15	39	0.62	0.62	0.85	0.85
VCB2	26E0501	26E	100	33	33	15	39	0.62	0.62	0.84	0.84
	26E0502	26E									
	26E0101										
	26F0501	26F	100	33	33	15	39	0.61	0.61	0.83	0.83
	26F0502										
26F0503											
26F0504											
OVM3	06B0501	06B	100	33	27	13	33	0.58	0.58	0.81	0.81
	06B0502										
	06A0101	06A	100	33	27	13	33	0.58	0.58	0.81	0.81
OVM3	06A0503										
	25D0101	25D	33	100	33	39	15	0.62	0.62	0.85	0.85
	25B0101	25B	33	33	33	15	15	0.62	0.62	0.85	0.85
25B1001											

OVG3	26C0101	26C	33	33	27	13	13	0.64	0.64	0.64	0.64
	26B0501	26B	33	33	33	15	15	0.52	0.27	0.72	0.36
	26B0502										
	26A0701	26A	33	33	20	10	10	0.52	0.52	0.74	0.74
	27G0101	27G	100	33	27	13	33	0.63	0.63	0.86	0.86
	27F0501	27F	100	33	27	13	33	0.63	0.63	0.86	0.86
OVG2	10G0501	10G	100	33	27	13	33	0.63	0.63	0.86	0.86
	10G0502										
	10G0101										
	10A0501	10A	100	33	33	15	39	0.63	0.63	0.86	0.86
	10A0502										
	10A0503										
OVF2	06A0503	06A	33	33	27	13	13	0.58	0.58	0.81	0.81
	06B0503	06B	33	33	27	13	13	0.58	0.58	0.81	0.81
	10G0503	10G	33	100	27	33	13	0.63	0.63	0.86	0.86
	10G0102										
	10F0501	10F	33	100	27	33	13	0.43	0.43	0.66	0.66
	10F0502										
OVF1	10E0101	10E	33	100	33	39	15	0.54	0.27	0.73	0.37
	10E0601										
	27B0501	27B	33	33	33	15	15	0.63	0.63	0.86	0.86
	27A0501	27A	33	33	13	8	8	0.64	0.64	0.64	0.64
	27A1201										
	27C0101	27C	33	33	27	13	13	0.63	0.63	0.86	0.86
OVM4	27C0501										
	27C0502										
	27B0502	27B	33	33	33	15	15	0.63	0.63	0.86	0.86
	27D0501	27D	33	100	20	27	10	0.57	0.57	0.80	0.80
	27E1201	27E	33	100	33	39	15	0.40	0.19	0.55	0.26
	27E101										
OVM5	29A0801	29A	33	33	53	22	22	0.39	0.18	0.53	0.25
	12A0602										
	12A0603	12A	33	100	40	45	18	0.62	0.62	0.85	0.85
	12A0604										
	30A0501	30A	33	33	27	13	13	0.42	0.42	0.64	0.64
	30A0502										
OVM6	30A0101	30A	100	33	13	8	21	0.64	0.64	0.64	0.64
	32A0501	32A	33	33	27	13	13	0.40	0.19	0.55	0.26
	31A0501	31A	33	33	27	13	13	0.40	0.19	0.55	0.26
	31B0101	31B	33	33	27	13	13	0.54	0.27	0.73	0.37
	32A0102	32A	33	100	13	21	8	0.64	0.64	0.64	0.64
	32A0502										
OVA3	32B0501	32B	33	33	33	15	15	0.63	0.63	0.86	0.86
	33A0701	33A	100	33	20	10	27	0.52	0.52	0.74	0.74
	33B0501	33B	100	33	33	15	39	0.62	0.62	0.84	0.84
	33B0101										
	32B0502	32B	33	33	33	15	15	0.63	0.63	0.86	0.86
	32B0101										
OVA4	32A1201	32A	33	33	13	8	8	0.64	0.64	0.64	0.64
	32A0103										
	13B0101	13B	33	100	33	39	15	0.63	0.63	0.86	0.86
	13B0503										
	13B0102										
	13B0504	13B	33	33	27	13	13	0.57	0.57	0.80	0.80
OVA4	13B0505										
	13B0506										
	13B0103										
	33B0501	33B	100	33	33	15	39	0.62	0.62	0.84	0.84
	33B1101										

Bibliografia

[1] *“A MACROSEISMIC METHOD FOR THE VULNERABILITY ASSESSMENT OF BUILDINGS”* Sonia GIOVINAZZI e Sergio LAGOMARSINO

[2] *“A NOVEL SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT OF MASONRY FAÇADES: FRAMING AND VALIDATION ON CALDAROLA CASE STUDY AFTER 2016 CENTRAL ITALY EARTHQUAKE”* Letizia Bernabei, Generoso Vaiano, Federica Rosso, Giovanni Mochi

[3] *“AMBIENTE COSTRUITO RESILIENTE IN CONDIZIONI MULTIRISCHIO METODI, STRUMENTI E SOLUZIONI BEHAVIOURAL-BASED”* Enrico Quagliarini, Edoardo Currà, Fabio Fatiguso, Giovanni Mochi, Graziano Salvalai

[4] *“An Integrated Approach for Assessing Flood Risk in Historic City Centres”* Tiago M. Ferreira, and Pedro P. Santos

[5] *“Assessing the spatiotemporal impact of users’ exposure and vulnerability to flood risk in urban built environments”* Gabriele Bernardini, Tiago Miguel Ferreira, Pilar Baquedano Juli`, Rafael Ramírez Eudave, Enrico Quagliarini

[6] *“AUSTRALIAN RAINFALL AND RUNOFF PROJECT 10: APPROPRIATE SAFETY CRITERIA FOR VEHICLES”* T D Shand, R J Cox, M J Blacka, G P Smith

[7] *“Combining Structural and Non-structural Risk-reduction Measures to Improve Evacuation Safety in Historical Built Environments”* Gabriele Bernardini, Tiago Miguel Ferreira

[8] *Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018 in Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 – Suppl. Ordinario n.8*

[9] *"Emergenza Sismica da grande Affollamento nei Centri Storici: dal Comportamento umano gli Strumenti di Progetto"* Chiara David FACOLTA' DI INGEGNERIA Corso di Laurea in INGEGNERIA EDILE – ARCHITETTURA

[10] *"How urban layout and pedestrian evacuation behaviours can influence flood risk assessment in riverine historic built environments"* Gabriele Bernardini, Guido Romano, Luciano Soldini, Enrico Quagliarini

[11] *"Il terremoto del 30 ottobre 1930 a Senigallia tra "casette asismiche" e modernizzazione urbanistica – INGVterremoti*

[12] MassMotion (guide)

[13] *"MISA AMARO. Piogge intense, inondazioni e alluvioni storiche a Senigallia"* Parte prima secoli XV-XIX Giuseppe Santoni e Rossano Morici

[14] *"MISA AMARO. Piogge intense, inondazioni e alluvioni storiche a Senigallia"* Parte seconda secolo XX Giuseppe Santoni e Rossano Morici

[15] Piano Particolareggiato del Centro storico della Città di Senigallia

[16] *"QUICK SEISMIC RISK ASSESSMENT FOR HISTORICAL SQUARES: DEFINITION AND APPLICATION OF A TIME-DEPENDENT MATRIXBASED APPROACH"* GABRIELE BERNARDINI, LETIZIA BERNABEI, GIOVANNI MOCHI, ENRICO QUAGLIARINI

[17] *“Seismic risk of Open Spaces in Historic Built Environments: A matrix-based approach for emergency management and disaster response”* L. Bernabei, G. Mochi, G. Bernardini, E. Quagliarini

[18] *“SIMULATING TO EVALUATE, MANAGE AND IMPROVE EARTHQUAKE RESILIENCE IN HISTORICAL CITY CENTERS: APPLICATION TO AN EMERGENCY SIMULATION-BASED METHOD TO THE HISTORIC CENTRE OF COIMBRA”* G. Bernardini, T. M. Ferreira

[19] *“Strumenti per la gestione dell'emergenza nei centri storici”* G. Bernardini, E. Quagliarini, M. D'Orazio

[20] UN office for Disaster Risk Reduction, UNDRR 2024

SITOGRAFIA

[21] [Home | bes2ecure](#)

[22] [Homepage | Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - CSLP](#)

[23] <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15>

[24] <https://it.wikipedia.org/wiki/Senigallia#Territorio>

[25] <https://rischi.protezionecivile.gov.it/>

[26] <https://rischi.protezionecivile.gov.it/it/sismico/attivita/classificazione-sismica>

[27] https://www.comune.senigallia.an.it/documento_pubblico/p-p-c-s-senigallia/

[28] Rischio Idrogeologico – Idraulico – Protezione Civile Senigallia

[29] Rischio sismico – Protezione Civile Senigallia

[30] Catalogo Generale dei Beni Culturali

[31] www.arr-software.org | 502: Bad gateway