

Università della Calabria  
Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile e Industriale (XXXII Ciclo)  
Dipartimento di Ingegneria Civile

Tesi di Dottorato

**Resilienza e Rischio  
nella rilettura urbanistica dell'emergenza**  
*Il ruolo della viabilità strategica*

Dottoranda: Sara Gaudio  
Supervisore: Mauro Francini



UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



Dipartimento di Ingegneria Civile

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile e Industriale

CICLO

XXXII

**RESILIENZA E RISCHIO**  
**NELLA RILETTURA URBANISTICA DELL'EMERGENZA**  
*Il ruolo della viabilità strategica*

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

**Coordinatore:** Ch.mo Prof. Franco Furgiuele

 Firma oscurata in base alle linee guida del Garante della privacy

**Supervisore:** Ch.mo Prof. Mauro Francini

 Firma oscurata in base alle linee guida del Garante della privacy

**Dottoranda:** Dott.ssa Sara Gaudio

 Firma oscurata in base alle linee guida del Garante della privacy



## *Sommario*

Nell'ambito dei processi di evoluzione, di cambiamento, di transizione che i sistemi urbani vivono e/o subiscono, emerge l'esigenza di identificare nuovi approcci pianificatori che mirino a rispondere prontamente ed efficacemente alle numerose necessità mutevoli e improvvise.

Nonostante, infatti, nel corso degli anni i temi del rischio e della sicurezza abbiano, in maniera più o meno spontanea, contribuito a orientare le modalità di governo dei territori, ancora oggi, al verificarsi di una crisi, affiorano chiaramente alcune criticità irrisolte che spingono l'urbanistica a interrogarsi su nuove sfide da intraprendere, specie in termini di pianificazione dell'emergenza.

Il lavoro di tesi rappresenta, allora, un percorso di ricerca che, partendo da una riflessione teorica sugli orientamenti pianificatori attuali e sul concetto di resilienza urbana, evolve verso un nuovo approccio metodologico che tenta di offrire ai Piani di Emergenza una caratterizzazione maggiormente spaziale e non solo operativa.

Attraverso il focus tematico sulla viabilità strategica, il framework *performance-based* proposto offre una procedura formale per la sua individuazione sul territorio, al fine di pianificare già in "tempo di pace" le alternative migliori da percorrere per giungere in sicurezza alle aree preposte dalla Protezione Civile in caso di evento e per facilitare eventuali operazioni di soccorso.

L'analisi delle relazioni fisiche e funzionali che intercorrono tra i diversi elementi strategici del territorio sposta il focus dell'emergenza da un approccio puntuale a uno maggiormente integrato, capace di indirizzare in modo più opportuno le future decisioni relative all'assetto urbanistico del territorio, proprie della pianificazione ordinaria.



## *Abstract*

Urban systems are increasingly experiencing processes of evolution, change and transition. Therefore, there is an urgent need of identifying new planning approaches aimed at promptly responding to them.

Over the years, the themes of risk and security have, more or less spontaneously, contributed to direct the ways of governing the territories. However, the most recent crises have shown how many critical issues have remained unresolved. In this respect, new challenges have to be faced, especially in terms of emergency planning.

Starting from a theoretical reflection on the current planning orientation and on the concept of urban resilience, this research tries to use a novel methodological approach with a view to provide a new characterisation to Emergency Plans, more spatial and not just operational.

Following the need to identify some categories of relevant urban elements on the territory, the proposed performance-based framework offers a formal procedure for the detection of strategic road infrastructures. The obtained results allow to plan already in “peacetime” the best alternative routes to arrive safely in the areas established by Civil Protection in case of event and to facilitate rescue operations.

Therefore, the analysis of the physical and functional relationships among different elements of the territory shifts the focus of emergency from a piecemeal approach to a more integrated one. This will be capable of addressing more consistently the future decisions concerning the urban structures, typical of ordinary territorial planning.



---

---

## Indice

<b>Introduzione</b>	pag.	1
<b>1. La resilienza urbana: origini ed evoluzioni</b>	»	5
1.1. Come nasce e come si evolve il concetto di resilienza	»	5
1.2. Resilienza urbana e gestione dei rischi	»	11
1.2.1. Una misura quantitativa di <i>disaster resilience</i>	»	16
1.2.2. La dimensione <i>physical infrastructures</i>	»	22
1.2.3. Gli indicatori di resilienza	»	25
1.3. Resilienza, rischio e strumenti urbanistici	»	27
<b>2. Tra gli strumenti di pianificazione resiliente: i piani di emergenza</b>	»	31
2.1. Il ruolo dei piani di emergenza nella pianificazione spaziale	»	31
2.1.1. Gli aspetti normativi nel contesto nazionale	»	31
2.1.2. Gli aspetti “operativi”	»	40
2.2. Gli elementi urbani strategici nel Piano di emergenza	»	44
2.3. La pianificazione preventiva e “consuntiva” nel processo di piano	»	47



2.4. Il caso Calabria: dallo stato di fatto a una prima sperimentazione operativa	pag.	53
<b>3. Viabilità strategica: l'Indice di Rischio e le sue componenti</b>	»	61
3.1. Il framework del metodo	»	61
3.2. Il modello proposto e gli strumenti utilizzati	»	63
3.3. L'Indice di Rischio nella valutazione delle diverse alternative	»	75
3.4. La Pericolosità nell'Indice di Rischio	»	78
3.4.1. Pericolo sismico	»	81
3.4.1.1. Lo scenario sismico di riferimento	»	85
3.4.1.2. Valutazione percorribilità in base al collasso degli edifici	»	87
3.4.1.3. Valutazione percorribilità in base al collasso delle tamponature esterne	»	93
3.4.2. Pericolo idrogeologico	»	104
3.4.2.1. Pericolo alluvioni	»	105
3.4.2.2. Pericolo frane	»	107
3.4.3 Altri pericoli naturali	»	110
3.5. La Vulnerabilità nell'Indice di Rischio	»	111
3.5.1. Definizione dei parametri	»	113
3.5.2. Definizione dei pesi attraverso un'analisi multicriterio AHP	»	115
3.6. L'Esposizione nell'Indice di Rischio	»	118
3.6.1. Analisi dell'esposizione diretta	»	119
3.6.1.1. <i>Fuzzy logic</i> : definizione delle variabili, delle funzioni di appartenenza e delle espressioni linguistiche	»	120
3.6.1.2. <i>Fuzzy logic</i> : assegnazione dei punteggi e definizione delle regole	»	122

3.6.1.3. <i>Fuzzy logic</i> : fuzzificazione, inferenza/composizione e defuzzificazione	pag.	123
3.6.2 Analisi dell'esposizione indiretta	»	126
<b>4. La verifica dei risultati: due casi studio a confronto</b>	»	128
4.1. Per la valutazione delle componenti strutturali: la <i>virtual city</i> di Torino	»	128
4.2. Per la metodologia performance-based: il Comune di Rende (CS)	»	132
4.2.1 Calcolo dell'Indice di Pericolosità $I_{Hj}$	»	137
4.2.2 Calcolo dell'Indice di Vulnerabilità $I_{Vj}$	»	148
4.2.3 Calcolo dell'Indice di Esposizione $I_{Ej}$	»	150
4.2.4 L'analisi dei risultati in funzione dell'Indice di Rischio $I_{Rj}$	»	154
4.2.5 Confronto con la Condizione Limite di Emergenza	»	156
<b>Conclusioni</b>	»	159
Assunti riepilogativi della ricerca	»	159
Prefigurazioni future per l'integrazione della pianificazione di emergenza nelle pratiche urbane	»	161
<b>Indice delle figure</b>	»	165
<b>Indice delle tabelle</b>	»	171
<b>Bibliografia</b>	»	173



## Introduzione

Sebbene nel corso degli anni i temi del rischio e della sicurezza abbiano, in maniera più o meno spontanea, contribuito a orientare in modo considerevole e significativo le modalità di governo dei territori, ancora oggi, al generarsi di una crisi, emergono chiare ed evidenti criticità irrisolte che spingono l'urbanistica a interrogarsi sulle nuove sfide da intraprendere, specie in termini di gestione dell'emergenza.

Il presente lavoro di tesi vuole essere specchio di un percorso di ricerca che, partendo da una riflessione incentrata sui principi cardine della pianificazione urbana della nostra era, evolve verso un nuovo quadro metodologico che si propone quale approccio utile per mitigare i livelli di rischio dei territori e per incrementare l'efficacia del sistema di emergenza, fornendo linee di indirizzo e indicazioni agli strumenti di pianificazione ordinaria su eventuali – e diverse – previsioni di uso e assetto del territorio.

Nello specifico, nel *Capitolo 1*, di carattere più teorico, si introduce il tema della resilienza urbana, approfondendone le origini e le molteplici declinazioni. Attraverso un excursus storico e tematico, i diversi filoni di ricerca presenti in letteratura hanno permesso di individuare alcuni parametri di raffronto che legano e/o diversificano il concetto di resilienza urbana a/da quello di sostenibilità, adattamento, vulnerabilità e gestione dei rischi. È proprio verso quest'ultima relazione che la ricerca sceglie di muoversi, affrontandone limiti e contraddizioni attuali, non solo in termini di difficili pratiche di attuazione, ma anche in riferimento a una disciplina, quella della tecnica urbanistica appunto, forse non ancora pienamente disposta a entrare nel merito di questioni per troppo tempo di competenza esclusiva di altri specifici settori.

Non abbandonando il carattere tecnico-scientifico che caratterizza, non solo il lavoro di tesi in sé, ma anche il background di chi questa ricerca l'ha condotta, il nuovo approccio tenta di rappresentare fin dall'inizio un'apertura

multidisciplinare al tema di *disaster resilience*, specificandone aspetti quantitativi, ma anche dimensioni fisiche e sociali.

Dopo un'analisi generale degli strumenti presenti nel panorama urbanistico-territoriale cui potrebbero essere associate nuove finalità per una più opportuna gestione dei rischi territoriali, il *Capitolo 2* individua nel Piano di Emergenza comunale lo strumento che, qualora opportunamente concepito, sia in grado di perseguire criteri di resilienza urbana e mitigazione del rischio, fornendo regole da seguire al verificarsi di un'emergenza, ma anche opportune strategie di prevenzione in "tempo di pace".

Con specifico riferimento al contesto normativo italiano, è presentata l'evoluzione delle modalità di adozione del Piano e l'attuale strutturazione in termini di contenuti e obiettivi, oggi quasi esclusivamente orientati alla suddivisione di compiti e risorse in caso di crisi. Superando l'attuale concezione puramente operativa del Piano, il lavoro si pone come obiettivo trasversale quello arricchire lo stesso, per sua natura originariamente caratterizzato da elementi "non strutturali", di strumenti "strutturali" di mitigazione del rischio, attraverso una prima fase di individuazione di tre categorie di elementi urbani particolarmente rilevanti tra cui la cosiddetta viabilità strategica.

Attraverso un approfondimento dello stato dell'arte nazionale e internazionale, viene formalizzata una relazione tra la formulazione matematica di resilienza urbana presentata nel *Capitolo 1* e le fasi, universalmente riconosciute, della pianificazione di emergenza. A questa prima relazione ne viene associata una seconda, che individua due sottocategorie di pianificazione: una preventiva, da attuare in "tempo di pace" e capace di influire sulla resilienza urbana riducendo la perdita di performance del sistema in caso di evento, e una denominata "consuntiva", da attuare nella fase post-evento attraverso strategie di recupero e ricostruzione e in grado di incidere sulla resilienza urbana innalzando il livello di performance raggiunto dal sistema in seguito alla crisi.

La presentazione di una prima sperimentazione operativa condotta in collaborazione con la U.O.A. di Protezione Civile della Regione Calabria conclude il secondo capitolo e introduce il terzo, attraverso l'individuazione di una serie di criticità che il lavoro tenta, almeno in parte, di risolvere.

Il *Capitolo 3*, infatti, presenta il vero e proprio approccio metodologico proposto, con l'obiettivo principale di definire un framework *performance-based* per l'individuazione della viabilità strategica interna a un Comune, già annoverata tra gli elementi urbani di particolare importanza introdotti nel capitolo precedente. In particolare, la metodologia prevede di assegnare un indice, detto Indice di Rischio, a ciascun percorso di collegamento tra edificio

strategico e area di emergenza, e di considerare come infrastruttura strategica l'alternativa con indice minore.

Dopo una breve introduzione alle motivazioni che hanno spinto la ricerca a considerare di importanza vitale le infrastrutture stradali nell'ambito della pianificazione di emergenza e territoriale in generale, il capitolo presenta il modello adoperato, cosiddetto di *virtual city*, assimilabile a un sistema urbano virtuale con caratteristiche fisico-strutturali ispirate a contesti reali. L'utilizzo di *virtual city* prende forma attraverso l'implementazione di *shape-file* relativi agli elementi presenti sul territorio, gestiti tramite il software opensource QGIS. L'integrazione tra i Sistemi Informativi Geografici, l'utilizzo di codici automatizzati in Python, la necessità di attingere alle potenzialità di software strutturali, di analisi multicriterio e di logiche non tradizionali come quella *fuzzy*, è uno degli aspetti innovativi della metodologia presentata, che fa di "multi-" il prefisso ricorrente di ogni sua fase concettuale e formale.

L'approccio, infatti, può essere definito *multi-strumentale*, in considerazione delle diverse tecniche utilizzate, e *multi-componente* vista la visione di città come insieme di elementi interdipendenti e l'identificazione del livello di rischio quale prodotto tra i tre contributi di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione.

Ciascun fattore presentato è definito da un indice: l'Indice di Pericolosità è *multi-hazard* perché coinvolge la trattazione di più tipologie di pericolo e, nel caso particolare di pericolo sismico, valuta l'interazione tra il costruito e le infrastrutture stradali attraverso la stima dei possibili detriti generati dal collasso degli edifici - o di parti di essi - prospicienti le strade; l'Indice di Vulnerabilità è caratterizzato da una serie di parametri in relazione tra loro grazie all'utilizzo di un'analisi *multi-criterio* del tipo *Analytic Hierarchy Process* (AHP); l'Indice di Esposizione è contraddistinto da un'ottica *multi-agente* perché ingloba nell'analisi sia una valutazione relativa agli utenti della strada (esposizione diretta) che considerazioni riferite alla popolazione residente nell'intorno considerato (esposizione indiretta). La formulazione dell'Indice di Rischio, per sua natura *multidisciplinare*, è frutto di diverse collaborazioni intersettoriali nate durante l'implementazione della ricerca e descritte più nel dettaglio nella parte centrale del lavoro.

Nel *Capitolo 4*, l'approccio metodologico è testato su due casi studio: il primo relativo alla *virtual city* della città di Torino, capoluogo della Regione Piemonte, e il secondo in riferimento al sistema urbano virtuale di Rende, cittadina in provincia di Cosenza e sede dell'Università della Calabria. Le due applicazioni permettono un confronto del framework proposto con la pianificazione di emergenza tradizionale e con lo strumento della Condizione Limite di Emergenza, già utilizzato dalla Protezione Civile.

Inoltre, i risultati ottenuti, oltre a permettere di individuare sul territorio il sistema di viabilità strategica per consentire alla popolazione colpita di raggiungere in sicurezza le aree di emergenza e ai mezzi di soccorso di conoscere a priori i collegamenti migliori con i punti del territorio più suscettibili di affollamento, possono rappresentare un importante volano per le future previsioni urbanistiche, sia di aree urbanizzabili che di quelle già urbanizzate, e per l'eventuale programmazione di più efficaci interventi di messa in sicurezza perché mirati a particolari elementi di maggiore vulnerabilità.

## Capitolo 1

### *La resilienza urbana: origini ed evoluzioni*

Rather than “*bouncing back*”, resilience and sustainability could instead be demonstrated through a society that does not get “*back to normal*”, but instead does better, even through “*bouncing forward*” (Manyena *et al.*, 2011).

#### **1.1 Come nasce e come si evolve il concetto di resilienza**

Il termine *resilienza*, come molti tra i vocaboli scientifici, è di origine latina: esso deriva da *resiliens*, participio presente del verbo *resilire*, formato dall’aggiunta del prefisso *re-* (indietro) al verbo *salire* (saltare). Il suo significato, allora, è immediatamente riconducibile all’azione di saltare indietro, rimbalzare, ritornare di fretta (Glare, 1980).

Nel corso dei secoli e con lo sviluppo del pensiero scientifico, l’aggettivo *resiliens* abbandona il semplice concetto associato alla capacità di un oggetto di rimbalzare, indicando nuove caratteristiche legate all’elasticità dei corpi, come quella di assorbire l’energia di un urto contraendosi o di riassumere la forma originaria una volta sottoposto a una deformazione (Cresti, 2014): entra così a pieno titolo tra i vocaboli tecnico-scientifici di uso corrente, specie nei campi della fisica e dell’ingegneria, con particolare riferimento all’abilità di un materiale di ritornare in una condizione di equilibrio precedente dopo essere stato sottoposto ad uno sforzo (Acierno, 2015).

A partire da questa definizione specifica, negli anni il significato di *resilienza* è stato adattato ad ambiti disciplinari differenti e con diverse estensioni: in metallurgia è la capacità dei metalli di superare una prova di rottura, in informatica è l’abilità di un sistema di adattarsi alle condizioni d’uso e di resistere all’usura al fine di garantire la disponibilità dei servizi erogati, in biologia rappresenta la capacità di una materia vivente di autoripararsi dopo un danno, in psicologia, invece, l’attitudine di un individuo a far fronte ad eventi traumatici, affrontando lo shock subito e dando prova di elasticità esistenziale.

Nel 1973, Crawford Stanley Holling introduce il concetto di *resilienza* in



ecologia, definendola come

la quantità di anomalie che un ecosistema può tollerare senza cambiare i processi di autorganizzazione e le sue strutture di base.

Appare evidente fin da allora una chiara distinzione, formalizzata poi dallo stesso Holling nel 1996, tra *resilienza ingegneristica* e *resilienza ecologica* (Fig. 1.1) (Holling, 1996). La caratteristica preponderante della prima è la stabilità e fonda il suo essere su concetti quali il tempo di ritorno, l'efficienza e soprattutto l'unicità dello stato di equilibrio. La seconda, invece, per come precedentemente definita, si basa sui concetti di persistenza, cambiamento, imprevedibilità, adattabilità, variabilità e, in particolar modo, sulla possibile pluralità degli stati di equilibrio, ammettendo una duplice possibilità per un sistema: assorbire perturbazioni entro una certa soglia, mantenendo inalterate le proprie caratteristiche e la propria struttura, oppure, una volta raggiunta tale soglia limite, trasformarsi in un sistema differente, non necessariamente migliore o più efficiente del precedente (Galderisi, 2013).

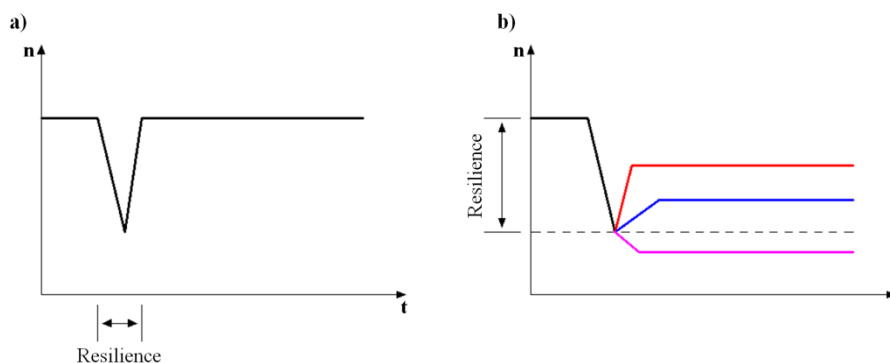


Fig. 1.1 - Misure della resilienza ingegneristica (a), intesa come tempo di recupero necessario affinché il sistema ritorni alla condizione preesistente e della resilienza ecologica (b), intesa come la quantità di perturbazione che il sistema può subire prima di cambiare stato. Elaborazione da: Adger (2000).

È grazie a questa nuova visione ecosistemica che il concetto di resilienza ecologica si rafforza con il tempo, rientrando tra le caratteristiche e le dimensioni delle diverse fasi dei cicli adattivi cui i sistemi complessi sono soggetti (Fig. 1.2) secondo una gerarchia “evolutiva” chiamata *panarchia* (Gunderson, 2001; Holling, 2001). È interessante osservare come, secondo questo modello, la fase *omega* che denota una “distruzione creativa”, ossia una crisi nel sistema dovuta a fattori interni o esterni, sia seguita rapidamente da una

nuova fase *alpha* di riorganizzazione e ripresa, funzione proprio della resilienza ecosistemica: secondo il modello panarchico, allora, il cambiamento che allontana il sistema socio-ecologico dalla stabilità e dall'equilibrio può essere momento di rinnovamento e trasformazione grazie al quale la crisi può essere trasformata in opportunità.

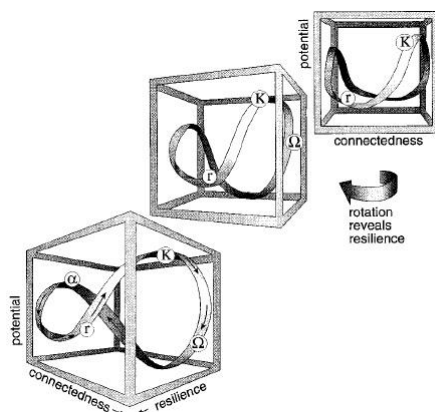


Fig. 1.2 - Rappresentazione in campo tridimensionale delle diverse fasi di un ciclo adattivo. Le tre dimensioni sono: il potenziale, ossia il capitale di risorse disponibili che determina le future opzioni di cambiamento; la connessione, ossia il grado di "controllabilità" del sistema, inteso come legame tra le variabili che entrano in gioco durante il processo; la resilienza che si accresce nelle fasi di riorganizzazione e di crescita. Fonte: Holling (2001).

In base a questa nuova chiave di lettura è possibile associare il sistema urbano a un sistema socio-ecologico resiliente caratterizzato dalla stretta interrelazione tra componenti antropiche e componenti naturali: il concetto di resilienza arriva così nel campo della pianificazione urbanistica e territoriale, guardando alla città come a un organismo in continua trasformazione, capace di organizzarsi e ri-organizzarsi in conseguenza di eventi naturali, fisici, culturali e socio-economici per raggiungere nuovi stati di equilibrio.

La natura dinamica dei sistemi urbani porta a prendere coscienza che esistono rischi che non possono essere evitati, ma che piuttosto devono essere accettati, preparandosi a realtà che mutano e sviluppando, di conseguenza, abilità nel leggere le trasformazioni e nell'adattarsi ad esse.

Secondo quest'ottica, la pianificazione ha il compito di immaginare futuri alternativi per le città in cambiamento (Davoudi, 2012), offrendo una buona dose di preparazione di fronte alle incertezze al fine di garantire un passaggio efficace e resiliente dalla condizione *omega* a una nuova fase *alpha* di mutamento e rigenerazione.

Di fronte a tale dimensione di trasformazione o, spesso, di rischio, occorre superare l'approccio esclusivamente difensivo, come quello tipico della

“urbanistica della sicurezza” (Gasparrini, 2015), ripensando strategie pianificatorie e progettuali secondo metodologie resilienti e interdisciplinari capaci di leggere e comprendere il funzionamento delle complesse interdipendenze delle componenti urbane (Oliva, 2015).

Proprio a tal fine, si riterrà utile nel presente lavoro parlare nello specifico di resilienza urbana, assumendo la scala di città come quella più adatta per pianificare incrementi di resilienza dei territori. Le comunità urbane, infatti, sono le più sensibili a shock e cambiamenti, a causa di vulnerabilità legate a fattori come la densità abitativa e di servizi.

Una realtà più ridotta come quella di quartiere, inoltre, non permetterebbe di apprezzare a pieno le interrelazioni tra le diverse componenti costituenti il sistema, con il rischio di progettare mirando a obiettivi utopici, non in grado di essere attuati in modo concreto perché privi di una visione globale integrata: una pianificazione che non inglobi analisi approfondite su sistemi a rete, servizi, infrastrutture, ma anche considerazioni a scala urbana di carattere ambientale, sociale ed economico non può, senza alcun dubbio, ritenersi un insieme di strategie efficaci di resilienza.

D'altro canto, una pianificazione a larga scala o di area vasta può avvenire solo in un secondo momento, non consentendo in prima battuta di gestire in modo dettagliato ed efficace i diversi processi complessi tipici dei sistemi precedentemente descritti, universalmente riconosciuti come caotici, incerti e imprevedibili.

Nonostante ciò, l'azione locale deve comunque essere indispensabile accompagnata da un pensiero globale al territorio, offrendo alle strategie di pianificazione urbana resiliente possibilità tangibili di applicazione futura a contesti territoriali più ampi, di cui possono e devono essere driver vivo e attivo.

È proprio partendo dal monito «*Think globally, act locally*» che è possibile guardare al concetto di resilienza urbana come via per garantire un effettivo sviluppo sostenibile dei sistemi socio-ecologici (Colucci, 2012), dove per sviluppo sostenibile si intende lo

sviluppo che garantisce i bisogni delle generazioni attuali senza compromettere la possibilità che le generazioni future riescano a soddisfare i propri (WCED, 1987).

È l'*Agenda 21*, ossia il programma di azione promosso dalla Conferenza ONU su ambiente e sviluppo tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992, infatti, a stabilire che processi di sviluppo sostenibile possono essere perseguiti, in contesti e in ambiti differenti, solo tramutando principi globali e comuni in azioni locali e concrete.

Il legame tra resilienza e sostenibilità è attualmente tema aperto di dibattito in diverse discipline: alcuni autori ritengono i due approcci pianificatori strettamente correlati, configurabili in molti casi non tanto come pratiche progettuali, ma come etica stessa del progetto<sup>1</sup> (Francini *et al.*, 2018b); altri ne analizzano le differenze in base alle ricerche condotte, alla scala di azione e ai soggetti coinvolti (Zhang & Li, 2018), a volte identificando la resilienza come indicatore proprio della sostenibilità (Cimellaro, 2016).

Un discorso a parte andrebbe affrontato per i modelli urbani sostenibili promossi negli ultimi anni in cui la resilienza viene utilizzata come chiave per costruire strategie di adattamento rispetto ai cambiamenti climatici (Hopkins, 2008; Chamberlin, 2009).

Numerose sono state le occasioni nelle quali le Nazioni si sono confrontate su questi temi. Risale a dicembre 2007, con la *Conference of Parties 13*, sotto il patrocinio della Conferenza strutturale delle Nazioni Unite proprio sul cambiamento climatico, il *Bali Action Plan* che ha definito una prima serie di impegni e obiettivi ricollegabili al concetto di resilienza.

Successivamente, nell'aprile del 2009, il "*Dialogue on land and water management for adaptation to climate change*" ha prodotto a Nairobi un primo Statement fissando alcuni principi guida e raccomandazioni tra i quali la costruzione della resilienza, con particolare riferimento al governo del suolo e dell'acqua.

Nel 2007 anche l'Unione Europea ha prodotto un *Libro Verde*, contenente analisi e indicazioni per gli Stati membri e impegni per le politiche comunitarie in cui si ribadisce la necessità di integrare le azioni di mitigazione e di adattamento in un'unica strategia tematica sul clima. Successivamente a questo, è stato presentato un *Libro Bianco*, nell'aprile 2009, atto ad aumentare la resilienza di tutti gli ecosistemi.

Nel 2010, a Bonn, si è definito per la prima volta il tema a livello internazionale, con il primo congresso mondiale sull'adattamento al cambiamento climatico nel quale è stata richiamata l'attenzione sull'importanza del ruolo dei governi locali per combattere gli impatti del clima e ridurre i disastri conseguenti. Il Congresso di Bonn è diventato un appuntamento annuale, nel 2012 rinominato "*Global Forum on Urban Resilience and Adaptation*", durante il quale riflettere e confrontarsi su *topic* quali rischi urbani, logistiche urbane resilienti, finanziamenti per le città resilienti, agricoltura e cibo, infrastrutture intelligenti e così via.

---

<sup>1</sup>Strategie di pianificazione resilienti e sostenibili possono essere, ad esempio, quelle legate ad azioni di rigenerazione urbana o politiche di "consumo di suolo zero", utili al fine di contrastare fenomeni come quello dell'*urban sprawl*.

Anche relativamente al rapporto tra resilienza e vulnerabilità la ricerca scientifica ha opinioni contrastanti: seppur da una prima analisi i concetti sembrerebbero essere due opposti (Adger *et al.*, 2005; Folke *et al.*, 2002) e sarebbe immediato associare un sistema vulnerabile a un sistema a ridotta resilienza (*Resilience Alliance*<sup>2</sup>), non è nella stessa misura semplice affermare che un sistema poco vulnerabile è, di conseguenza, un sistema molto resiliente. Per comprendere meglio questo concetto, Larry Mallak definisce resilienza e vulnerabilità come due costrutti separati mediante una metafora efficace:

Credo che un buon parallelismo sia la teoria dei due fattori di Herzberg [...] che riguardano essenzialmente la soddisfazione e l'insoddisfazione sul lavoro che, secondo Herzberg, non sono realmente opposti. L'assenza di insoddisfazione lavorativa, infatti, non implica automaticamente che qualcuno sia soddisfatto del proprio lavoro. La stessa cosa con la resilienza: l'assenza di vulnerabilità di un sistema non lo rende necessariamente un sistema resiliente. (Mallak, 1998)

Tra le due scuole di pensiero che vedono i due concetti o come opposti o come entità totalmente separate, ne esistono altre (Cutter *et al.*, 2008) che considerano resilienza e vulnerabilità legate solo in alcune circostanze e condizioni particolari:

le caratteristiche socioeconomiche possono indicare vulnerabilità, ma non necessariamente hanno a che fare con la mancanza di conoscenza o di preparazione a un ciclone. In modo analogo, gli indicatori di resilienza sono un insieme differente di misure rispetto a quelli della vulnerabilità (King, 2006).

Dalle considerazioni precedenti si comprende bene quanto complesso sia per la pianificazione urbanistica identificare univocamente processi resilienti per le città e di quanto vasta sia la gamma di approfondimenti possibili: in riferimento a ciò, il presente lavoro sceglie di indagare, sia in termini teorici che metodologici, il filone di ricerca che, specialmente negli ultimi anni, lega il concetto di resilienza urbana alla gestione dei rischi territoriali.

---

<sup>2</sup>*Resilience Alliance* è una rete multidisciplinare di ricercatori che unisce diverse università e centri di ricerca che promuovono politiche e processi di sviluppo regionale e locale basati sulla resilienza ([www.resalliance.org](http://www.resalliance.org)) (Colucci, 2012).

## 1.2 Resilienza urbana e gestione dei rischi

Partendo dal concetto di resilienza proposto da Holling (1973) e identificando i rischi territoriali come le “anomalie” che possono generare profondi cambiamenti nei sistemi socio-ecologici, è stata negli anni formalizzata una nuova definizione di resilienza, quella di *disaster resilience*.

L’evento, il disastro, l’emergenza danno inizio a un cambiamento

non nella sua radice prima, ma nella sua manifestazione ormai innegabile, quando ormai il sistema non può più pensarsi e agire rimuovendo questa (Bertin, 2018).

Il concetto di *disaster resilience* è allora visto come:

l’abilità dei paesi, delle comunità e delle famiglie di gestire il cambiamento, mantenendo o trasformando le proprie abitudini di vita di fronte a shock o crisi – come terremoti, siccità o conflitti violenti – senza compromettere le loro prospettive a lungo termine (DFID, 2011).

O, ancora, può essere definito come:

la capacità di un sistema, di una comunità, di una società potenzialmente esposti a pericoli di adattarsi, resistendo o trasformandosi per raggiungere e mantenere un livello accettabile di funzionalità (UNISDR, 2005).

Le motivazioni che hanno spinto amministrazioni, mondo accademico, enti pubblici e privati a interrogarsi su nuovi approcci metodologici per far sì che l’idea di *disaster resilience* diventasse sia obiettivo di pianificazione che processo stesso di prevenzione e mitigazione di pericoli naturali e antropici (Manyena, 2006), sono da ricercarsi nell’incremento degli impatti negativi che eventi disastrosi hanno generato nel tempo a causa della loro natura distruttiva e, nella maggior parte dei casi, totalmente imprevedibile.

Nonostante i recenti progressi tecnologici abbiano migliorato le performance di strutture e infrastrutture, infatti, i disastri naturali, sono ancora responsabili di perdite di vite umane, di danni a servizi essenziali, di distruzione di reti commerciali e finanziarie.

Anche l’azione dell’uomo sull’ambiente, attraverso specialmente l’incontrollata urbanizzazione ed edificazione, ha in qualche modo contribuito all’incremento della vulnerabilità dei territori, estendendo non solo i confini delle aree a rischio, ma anche la frequenza con cui accadono certi eventi (Menoni, 1997).

Con particolare riferimento ai disastri naturali<sup>3</sup>, l'*Annual Disaster Statistical Review* del 2017 (Fig. 1.3) riporta che, solo nell'anno citato, i disastri naturali hanno colpito oltre 95,6 milioni di persone, causandone la morte di 9.697.

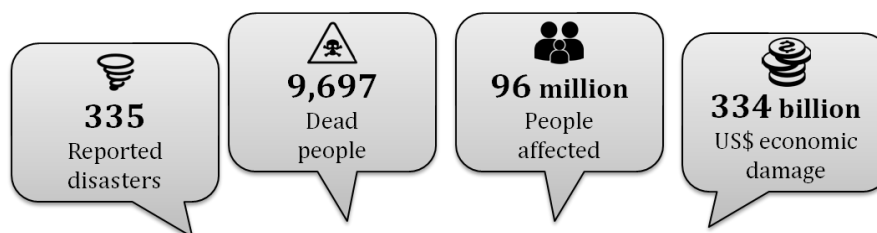


Fig. 1.3 - Dati relativi agli effetti dei disastri naturali nel mondo. Fonte: Annual Disaster Statistical Review (2017).

Nel 2016, a causa del terremoto del Centro Italia verificatosi nell'agosto dello stesso anno, l'Italia conserva un triste primato mondiale collocandosi nella quinta posizione tra gli Stati in cui un singolo disastro naturale ha causato più morti (Tab. 1.1) e più danni economici (Tab. 1.2) e nella settima posizione tra i Paesi con più alto tasso di mortalità dovuta ad eventi calamitosi (Tab. 1.3).

Tab. 1.1 - Top 10 dei disastri naturali per numero di morti nel 2016.

Evento	Paese	N° di morti
Terremoto, Aprile	Ecuador	676
Uragano, Matthew, Settembre	Haiti	546
Alluvione, Agosto	Corea	538
Ondata di calore, Aprile	India	300
<b>Terremoto, Agosto</b>	<b>Italia</b>	<b>296</b>
Alluvione, Giugno	Cina	289
Alluvione, Luglio	Cina	289
Alluvione, Luglio	India	254
Alluvione, Novembre	Zimbabwe	246
Alluvione, Maggio	Sri Lanka	203

Fonte: Annual Disaster Statistical Review (2016).

<sup>3</sup>Eventi improvvisi non causati da azioni dirette dell'uomo che generano danni diffusi a cose e/o persone (es. terremoti, alluvioni, eruzioni vulcaniche, frane, uragani, incendi boschivi, tornado, valanghe, cicloni, etc.) (Cimellaro, 2016).

Tab. 1.2 - Top 10 dei disastri naturali per danni economici.

<b>Evento</b>	<b>Paese</b>	<b>Danni (in milioni di \$)</b>
Alluvione, Giugno	Cina	22.00
Terremoto, Aprile	Giappone	20.00
Alluvione, Agosto	Stati Uniti d'America	10.00
Uragano Matthew, Settembre	Stati Uniti d'America	10.00
<b>Terremoto, Agosto</b>	<b>Italia</b>	<b>5.00</b>
Alluvione, Giugno	Cina	4.50
Incendio boschivo, Maggio-Luglio	Canada	4.00
Temporal, Aprile	Stati Uniti d'America	3.90
Tsunami, Novembre	Nuova Zelanda	3.90
Siccità, Giugno-Agosto	Cina	3.00

Fonte: Annual Disaster Statistical Review (2016).

Tab. 1.3 - Top 10 dei Paesi in termini di mortalità dovuta ad eventi calamitosi.

<b>Paese</b>	<b>N° di morti</b>
Cina	1335
India	1142
Ecuador	686
Korea	612
Haiti	599
Pakistan	409
<b>Italia</b>	<b>299</b>
Zimbabwe	277
Indonesia	270
Stati Uniti d'America	255

Fonte: Annual Disaster Statistical Review (2016).

In base a questi dati, emerge chiaramente la necessità di introdurre pratiche e processi di incremento di *disaster resilience* non solo nelle strategie di pianificazione d'emergenza, ma all'interno degli approcci di pianificazione urbanistica ordinaria, che altrimenti si limiterebbero a leggere le realtà territoriali in base a specifiche condizioni e circostanze, senza una visione strategica delle trasformazioni e dei cambiamenti futuri:



Pianificare nella continuità di uno stato di normalità, rimuovendo i rischi territoriali e socio-economici di evoluzione violenta del sistema significa modellizzare un periodo molto breve e peculiare di una storia, e assurgere questo modello al di fuori del suo dato di realtà profonda (Bertin, 2018).

Inglobare la pianificazione di emergenza nelle pratiche di pianificazione ordinaria non è quindi solo compito delle politiche nazionali e internazionali ma

La gestione dei rischi a livelli diversi è un'operazione che soltanto la pianificazione può fare. Esistono territori e casi differenti per ogni rischio, di conseguenza la complessità aumenta ed è sempre più forte l'esigenza dei pianificatori di confrontarsi, di estendere gli orizzonti, le terminologie e la capacità di acquisire padronanza di nuove tecniche (Balamir, 2007).

A tal riguardo, occorre specificare che proprio le scelte di trasformazione e pianificazione del territorio influenzano in modo determinante la generazione del rischio: basti pensare all'eccessiva impermeabilizzazione dei suoli causata dall'incontrollato fenomeno dell'urbanizzazione che altera il normale ciclo idraulico delle acque e che contribuisce al verificarsi di possibili inondazioni o allo smisurato prelievo di inerti dagli alvei fluviale che concorre all'impoverimento del trasporto solido a valle generando conseguenze sull'erosione delle coste. In merito a ciò, è necessario introdurre una terza famiglia di rischi (oltre ai naturali e a quelli di origine antropica già citati) che la prof.ssa Ioannilli (2014a) definisce socio-naturali, ossia che si verificano a causa dell'intervento umano sull'ambiente naturale, imputabili a una gestione inadeguata delle componenti naturali del territorio. La pianificazione ordinaria dovrebbe allora interrogarsi su possibili soluzioni strutturali in merito, proprio attraverso misure di prevenzione capaci di regolare le modalità di trasformazione dei territori per minimizzare gli effetti dannosi che le stesse sono portate a generare.

A livello internazionale, negli ultimi anni, sono state diverse le occasioni in cui le Nazioni si sono confrontate sul tema di *disaster resilience*. Nel 2012, quando l'uragano Sandy mise in ginocchio la città di New York, isolando milioni di persone, la *Rockefeller Foundation* ha compreso la reale urgenza del problema, lanciando il programma *100 Resilient Cities* (100RC) che ha previsto 100 milioni di dollari da distribuire a 100 città diverse: tra le città protagoniste di questa rete spiccano gli esempi di Rotterdam, in Olanda, in cui la stazione dei treni è stata progettata per essere essa stessa un'area adibita allo stoccaggio delle acque, o Copenaghen, in Danimarca, caratterizzata attualmente da un sistema di canali a cielo aperto per il deflusso naturale delle acque in modo da evitare pericolose inondazioni in caso di emergenza

(Pelizzaro, 2016).

Un'altra iniziativa interessante, connessa al concetto di città resiliente e gestione dei rischi territoriali, è quella promossa dalla campagna mondiale delle Nazioni Unite *Making Cities Resilient*, che sostiene lo sforzo delle comunità locali per la riduzione dei disastri. In particolare, la campagna è stata lanciata nel 2010 dall'UNISDR, *United Nations International Strategy for Disaster Reduction*, per sensibilizzare le amministrazioni locali sulle azioni da mettere in campo per aumentare la resilienza attraverso la conoscenza, la prevenzione, la mitigazione dei rischi e la preparazione all'evento (Gissara, 2013).

Anche l'Europa, negli ultimi anni, ha promosso numerosi studi trasversali di *multi-risk management* attraverso il finanziamento di diversi progetti supervisionati da *European Disaster Risk Management* della Commissione Europea: è il caso di *LessLoss* che definisce scenari e modellazioni per la mitigazione del rischio sismico e del rischio frana, di *MEDIGRID* che mira a creare una piattaforma di verifica per il rischio incendi o di *Armonia* finalizzata a sviluppare una strategia transfrontaliera per la gestione dei rischi naturali tramite la collaborazione tra diversi istituti di Protezione Civile. Molti sono stati, inoltre, i progetti europei finanziati sul tema della resilienza delle città, analizzata sotto diversi punti di vista (si può far riferimento, a tal riguardo, ai progetti di emBRACE, RAMSES, TURAS).

A livello nazionale, il governo italiano ha associato il concetto di resilienza urbana a quello relativo alla gestione dei rischi in occasione dell'istituzione del Dipartimento Casa Italia (decreto legge n.8/2017), struttura dedicata alla cultura della prevenzione contro le catastrofi naturali nata nell'aprile 2017 successivamente agli eventi sismici del Centro Italia già citati in precedenza. In particolare, all'interno del Rapporto sulla promozione della sicurezza dai rischi naturali del patrimonio abitativo (2017), la resilienza viene interpretata come

la capacità della comunità di resistere alle minacce o agli eventi negativi non solo perché la struttura fisica che li ospita è in grado di resistere alle calamità naturali, ma anche perché i quartieri urbani non sono in stato di degrado fisico e sociale e i borghi e le frazioni non sono spopolati e privi di quelle opportunità economiche che consentono alla popolazione di restare.

Interventi e politiche (nel Rapporto solo delineate) a supporto della prevenzione (anche a lungo termine) e un'attenta e rigorosa pianificazione delle risorse umane ed economiche rappresentano il primo passo, in tanti contesti urbani ancora incompiuto, per rafforzare la resilienza delle città.

### 1.2.1. Una misura quantitativa di disaster resilience

Sebbene le attuali idee progettuali e i più moderni approcci pianificatori in materia di *disaster resilience* spazino in termini di tematiche, priorità e metodi proposti, con il passare del tempo la comunità scientifica, le amministrazioni e gli enti locali hanno riscontrato difficoltà nel comprendere e verificare l'efficacia delle strategie poste in essere. Come è possibile determinare se le comunità stiano realmente diventando più resilienti? È possibile confrontare due città in termini di resilienza urbana? Da questi interrogativi emerge la necessità di superare, o quantomeno integrare, la concettualizzazione esclusivamente qualitativa di *disaster resilience* tramite misure più quantitative della stessa, sia per comprendere meglio il contributo delle diverse componenti urbane alla creazione di un sistema resiliente, sia per verificare in modo continuo e sistematico gli effettivi benefici delle varie attività di ricerca e di pianificazione (Bruneau *et al.*, 2003). In relazione a ciò, il MCEER, *Multidisciplinary Earthquake Engineering to Extreme Events Center*, con specifico riferimento al rischio terremoti, propone una valutazione quantitativa della resilienza sismica tramite la formulazione matematica:

$$R = \int_{t_{0E}}^{t_{0E}+T_{LC}} \frac{Q(t)}{T_{LC}} dt \quad \text{Eq. 1.1}$$

Nel dettaglio, si indica con:

$R$ , il valore della resilienza, definita come la capacità di un sistema di mantenere un dato livello di efficienza;

$Q(t)$ , espressa come funzione adimensionale del tempo (%), definisce l'efficienza globale del sistema urbano e il suo valore può variare da 0 (totale inefficienza del sistema) a 100 (piena funzionalità del sistema);

$t_{0E}$ , l'istante di tempo relativo al verificarsi dell'evento;

$T_{LC}$ , il tempo di controllo, definito dai pianificatori o dagli stakeholder in funzione del periodo di interesse.

La formulazione può essere trasferita dal caso specifico riferito a un evento sismico al caso più generale di generica calamità naturale.

Dalle considerazioni precedenti deriva che il concetto di *disaster resilience* può essere definito, graficamente, come l'area sottesa dalla funzione  $Q(t)$  nel tempo e che il tempo di controllo  $T_{LC}$  include il periodo di recupero  $T_{RE}$ , ossia il tempo necessario al sistema per riacquisire la piena funzionalità (Fig. 1.4).

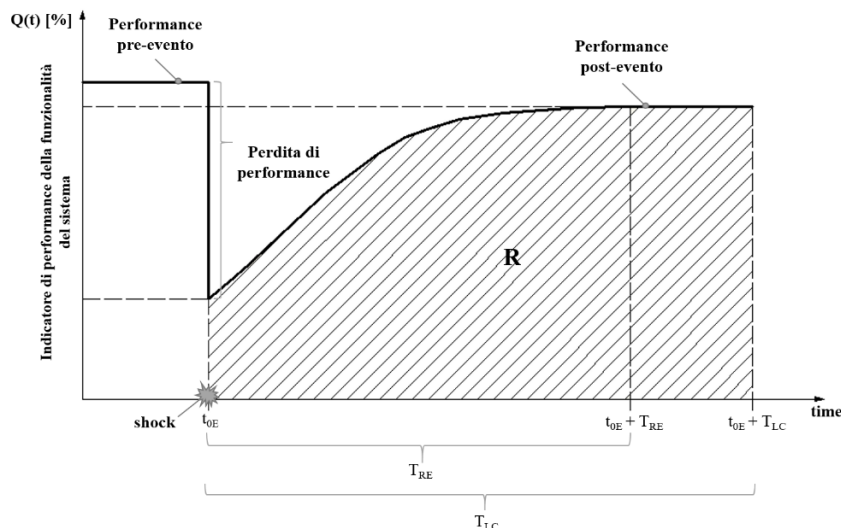


Fig. 1.4 - Misura di disaster resilience (MCEER). Elaborazione da: Cimellaro (2016).

In virtù della definizione di *resilienza ecologica* appare chiaro che, anche in questo caso, il sistema dopo esser stato perturbato, può ammettere una pluralità di stati di equilibrio. Successivamente all'evento, infatti, l'efficienza del sistema città potrebbe non essere uguale a quella pre-disastro: teoricamente la funzionalità finale potrebbe essere maggiore rispetto a quella iniziale (Fig. 1.5 – curva C), per esempio nel caso in cui il sistema sfrutti l'opportunità della crisi per programmare azioni di ricostruzione o rigenerazione urbana che vadano a sanare problemi preesistenti, oppure inferiore, nel caso in cui il sistema subisca danni permanenti a causa della calamità naturale (Fig. 1.5 – curva A).

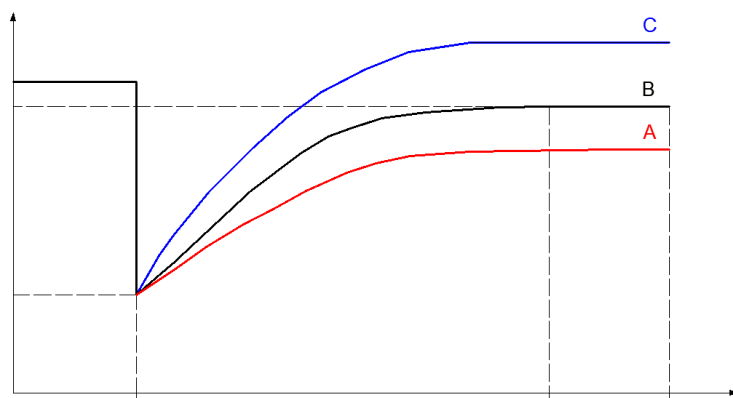


Fig. 1.5 - Rappresentazione schematica di disaster resilience. Fonte: Cimellaro (2016).

Per tendere a stati di equilibrio quantomeno comparabili a quelli pre-disastro è necessario individuare i fattori che contribuiscono a raggiungere un triplice obiettivo:

- ridurre la probabilità che si verifichi la crisi del sistema urbano in caso di evento;
- ridurre gli effetti negativi successivi all'evento, in termini di perdite economiche e sociali;
- ridurre il tempo di recupero di cui il sistema urbano necessita per ritornare alla condizione preesistente o per tendere a un nuovo stato di equilibrio.

Proprio a tal fine, i ricercatori del MCEER (Bruneau *et al.*, 2003; Bruneau & Reinhorn, 2007) hanno individuato quattro proprietà fondamentali dei sistemi resilienti (4R's framework): *robustness*, *resourcefulness*, *redundancy* e *rapidity*.

Comunità *robuste* sono comunità resistenti, ossia sistemi urbani che possiedono elevate capacità di far fronte ai disastri.

La *resourcefulness* riguarda l'abilità di stabilire priorità, identificare i problemi e mobilitare le risorse.

I sistemi *ridondanti* possiedono la disponibilità di risorse alternative e di componenti funzionanti in sostituzione di elementi deteriorati in caso di evento.

La *rapidity* si riferisce alla capacità di rispondere velocemente ai disastri naturali al fine di minimizzare le perdite.

Oltre alle quattro proprietà fondamentali dei sistemi resilienti, gli stessi ricercatori descrivono il concetto di *disaster resilience* come comprensivo di quattro dimensioni che, interconnesse tra loro, permetterebbero una valutazione globale della resilienza dei sistemi urbani: dimensione tecnica, dimensione economica, dimensione organizzativa e dimensione sociale (Tab. 1.4).

Le prime due sono legate principalmente agli elementi fisici del sistema, mentre le ultime alle componenti proprie della società e della comunità.

La dimensione tecnica si riferisce all'abilità del sistema di mantenere livelli accettabili di funzionalità, anche nel caso di evento.

La dimensione economica è legata alla capacità dello stesso di ridurre o quantomeno limitare le perdite economiche dirette e indirette dovute a un disastro (Rose & Liao, 2005).

La dimensione organizzativa è principalmente legata all'abilità di organizzazioni ed enti di gestire l'emergenza, di essere in grado di prendere decisioni e di agire in maniera rapida ed efficace.

La dimensione sociale riguarda il modo in cui la società affronta e gestisce i danni provocati dall'evento.

Tab. 1.4 - Matrice delle dimensioni della resilienza con esempi relativi alle infrastrutture.

Dimensione	Tecnica	Economica	Organizzativa	Sociale
Robustness	Elaborazione di codici e procedure costruttive per le infrastrutture	Estensione della diversificazione economica	Pianificazione di operazioni di emergenza	Vulnerabilità sociale e grado di preparazione della comunità
Redundancy	Capacità di sostituzioni tecniche e soluzioni alternative	Abilità nel sostituire e conservare gli input necessari	Siti alternativi per la gestione delle operazioni di emergenza	Disponibilità di opzioni abitative per le vittime di catastrofi
Resourcefulness	Disponibilità di attrezzature e materiali per il recupero e la riparazione	Capacità imprenditoriale e industriale di improvvisare	Capacità di improvvisare, innovare ed espandere le operazioni	Capacità di rispondere ai bisogni umani
Rapidity	Tempo di inattività del sistema, tempo di recupero	Tempo di recupero delle capacità, mancati introiti	Tempo tra l'impatto e il primo recupero	Tempo per ristabilire il servizio delle infrastrutture

Fonte: O'Rourke (2007).

A partire da queste quattro dimensioni fondamentali, la ricerca negli anni si è mossa verso livelli di dettaglio maggiore, definendo metodologie, tecniche, framework utili per la valutazione delle singole dimensioni e delle loro interrelazioni.

Il framework proposto da Klein, Nicholls e Thomalla nel 2003, ad esempio, mira ad analizzare non solo le presenti condizioni di pericolo, ma anche quelle future, migliorando così l'integrazione tra le diverse fasi di prevenzione, preparazione e mitigazione dei rischi tramite strategie di resilienza e di adattamento.

Chang e Shinozuka, invece, ridefiniscono il metodo proposto da Bruneau *et al.* nel 2003, modellandolo sul caso di studio della città di Memphis e

comparando le condizioni pre-evento della rete idrica con lo scenario successivo a un terremoto, quantificandone performance  $Q$  e perdite.

La *San Francisco Planning and Research Association* (SPUR) Framework<sup>4</sup> ha come obiettivo principale quello di stimare le performance attese di edifici (suddivisi per cluster) e infrastrutture in caso di terremoto, definendo un target di tempo di recupero per uno specifico scenario sismico. Il metodo proposto, però, per come concepito è utilizzabile esclusivamente alla città di San Francisco e quindi non trasferibile ad altri contesti urbani. In più, lo stesso focalizza le sue analisi unicamente sui fenomeni sismici e quindi non fornisce una metodologia utile nei confronti degli altri tipi di rischio. La *UNISDR Disaster Resilience Scorecard for Cities*<sup>5</sup> definisce un set di verifiche che permettono alle città di comprendere quanto le stesse siano resilienti ai disastri naturali, in modo da identificare priorità di azione e di investimento e di tracciare i loro progressi nel tempo. I criteri, formalizzati sotto forma di check-list, sono suddivisi in parametri di ricerca, organizzazione, infrastrutture, capacità di risposta, ambiente e recupero. La metodologia non considera però le dimensioni economiche e sociali, indispensabili per l'acrescimento della resilienza delle comunità e non fornisce alcuna indicazione circa la stima del tempo di recupero.

Altre tecniche proposte nel corso degli anni si sono concentrate su aspetti e dimensioni specifiche della resilienza, al fine di proporre metodologie utili ai processi di *decision support*: nel 2006, per esempio, Çağnan *et al.* propongono un modello di simulazione del processo di recupero post-terremoto per la rete elettrica di Los Angeles, altri analizzano la resilienza sismica dei sistemi ospedalieri (Cimellaro *et al.*, 2010; Cimellaro & Piqué, 2016) e delle lifeline (Ouyang & Duenas-Osorio, 2011; Cimellaro *et al.*, 2014). Nel 2009 il MCEER sviluppa PEOPLES<sup>6</sup>, una piattaforma multidimensionale che mira a quantificare la resilienza urbana delle comunità, tenendo conto dell'interdipendenza tra le diverse componenti che concorrono alla sua definizione e dell'influenza del comportamento dell'uomo e della società.

Proprio per enfatizzare il ruolo primario dell'*human system*, gli autori (Renschler *et al.*, 2010) scelgono di usare il nome PEOPLES, che in inglese vuol dire *popoli*, ma che è anche l'acronimo delle sette dimensioni utilizzate per la misura della resilienza a diverse scale: *Population and demographics*, *Environmental/ecosystem*, *Organized governmental services*, *Physical infrastructures*, *Lifestyle and community competence*, *Economic development*, *Social-cultural capital* (Fig. 1.6).

---

<sup>4</sup><https://www.spur.org/>.

<sup>5</sup><https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/toolkit/article/disaster-resilience-scorecard-for-cities>.

<sup>6</sup><http://peoplesresilience.org/>.

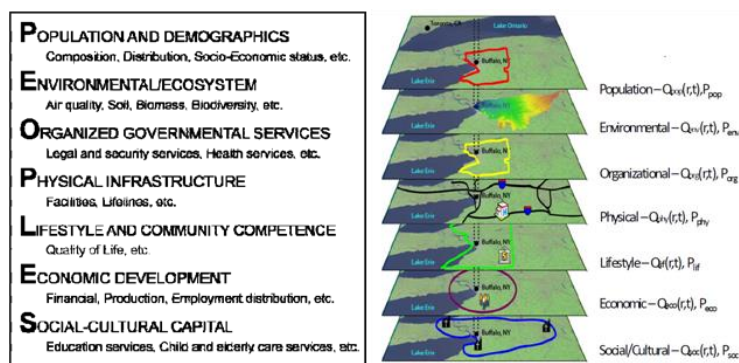


Fig. 1.6 - PEOPLES framework, dimensioni della resilienza. Fonte: Renschler et al. (2010).

In riferimento a quanto detto, si specifica che ai fini dell'incremento della resilienza urbana, proprio il contributo della comunità risulta essere di fondamentale importanza, sia in fase di pianificazione e preparazione (in termini di riconoscimento e di individuazione dei vari tipi di rischio presenti sul territorio) che di gestione e di risposta all'emergenza.

Esiste infatti uno stretto legame tra il contributo che la popolazione può offrire nelle strategie di gestione dei rischi e su come l'entità del danno provocato dagli eventi calamitosi sia influenzata da fattori legati alla società. Se gli stakeholder e i pianificatori sono abili nel conoscere la comunità in dettaglio, insieme alle sue fragilità, alla sua composizione e al suo stato socio-economico, saranno in grado di pianificare in modo più efficace opportune azioni di mitigazione del rischio e di incremento della resilienza urbana. D'altra parte, ciò è possibile solo quando la comunità stessa possiede una profonda conoscenza del territorio, accompagnata da una corretta percezione del rischio che riduce, di conseguenza, l'impreparazione e la sottovalutazione del pericolo (*community preparedness*). La società tutta, allora, dovrà allontanare il proprio pensare e agire in funzione di una prospettiva di azzeramento del rischio, sentendosi in prima persona responsabile, senza vivere nella pretesa che le istituzioni possano garantire loro l'assenza di grandi pericoli (Bertin, 2018).

Solo in questo modo la popolazione può assumere ruolo vivo e attivo nei processi di pianificazione che, se calati in un'ottica resiliente, devono prima di tutto essere partecipati. Partecipazione necessaria non solo in fase di prevenzione e preparazione per le motivazioni espresse in precedenza, ma anche negli step successivi di post-emergenza dove la ricostruzione, per esempio, troppo spesso viene vista come un problema esclusivamente edile e organizzativo che porta la comunità ad essere «privata della possibilità di vivere la propria socialità e i propri legami come base per ripartire» (Bertin, 2018).



In merito al legame tra comunità e prevenzione, studi recenti, inoltre, si stanno concentrando sull'elaborazione di modelli capaci di predire il comportamento umano all'insorgere di un evento: è il caso delle simulazioni *agent-based* grazie alle quali è possibile ottenere informazioni utili circa gli spostamenti della popolazione colpita anche al variare del disastro considerato (Pan *et al.*, 2007; Bernardini, 2015; Pluchino, 2015).

### 1.2.2. La dimensione physical infrastructures

In relazione alle sette dimensioni della resilienza individuate dalla piattaforma PEOPLES, il presente lavoro di tesi farà particolare riferimento a quella delle infrastrutture con approfondimenti tematici rispetto alla rete di trasporto delle infrastrutture viarie.

*Physical infrastructures* è una dimensione della resilienza che assume tutte le proprietà e le caratteristiche precedentemente descritte (Fig. 1.7), includendo le *lifeline* presenti all'interno del contesto analizzato, ossia tutti quei sistemi a rete che si sviluppano in superficie, in elevazione o nel sottosuolo e che mettono in relazione e collegano tra loro i vari insediamenti antropici, garantendo a questi ultimi una moltitudine di servizi.



Fig. 1.7 - Proprietà delle infrastrutture resilienti.

Tali infrastrutture possono essere classificate in base alle diverse aree di interesse come segue:

- *idriche*, cioè acquedotti, fognature, dighe, impianti di trattamento, etc.;
- *risorse energetiche*, quali linee di trasmissione elettrica, centrali, gasdotti, metanodotti, etc.;
- *trasporto*, ossia viabilità, ferrovie, porti, aeroporti, etc.;
- *comunicazione*, cioè linee telefoniche, reti informatiche, radio, televisione, etc.

È semplice comprendere l'importanza che queste rivestono all'interno dei sistemi urbani, i quali dipendono fortemente dal loro corretto funzionamento: il significato del termine inglese *lifeline*, ossia letteralmente *linee della vita*, descrive bene questo legame che, normalmente invisibile, diventa particolarmente evidente nel caso di disastri e durante i processi di recupero successivi ad essi (Chang, 2014).

Spesso i guasti infrastrutturali causano problemi di entità spropositata rispetto al loro effettivo danno fisico, specie quando sono a servizio di una vasta area geografica: tutti i servizi essenziali, come scuole o strutture sanitarie, per esempio, non sarebbero in grado di svolgere la loro funzione se la rete elettrica o quella idrica venissero danneggiate in seguito a un evento; le strade ostruite dai detriti renderebbero inaccessibili punti nevralgici del sistema urbano rallentando le operazioni di soccorso e di ricostruzione; fughe di gas genererebbero danni irreversibili a cose e persone, si pensi per esempio agli incendi provocati dalla rottura delle tubazioni urbane del gas indotte da un sisma; un'interruzione delle linee di telecomunicazione influirebbe negativamente sull'organizzazione dei soccorsi e sulla gestione dei contatti.

Le infrastrutture rappresentano allora quella che Bruneau *et al.* (2003) definiscono la "spina dorsale" della comunità, ossia l'insieme delle unità critiche e fondamentali: ogni considerazione sulla resilienza deve partire, specie in caso di evento, con un focus sul loro livello di performance che non si limita a rappresentare un problema esclusivamente tecnico ma che, per quanto già specificato, ha dimensioni sociali e urbanistiche. A tal riguardo, per esempio, Menoni *et al.* (2002) offrono un metodo di valutazione per la vulnerabilità delle lifeline in funzione di fattori di varia natura, dipendenti da caratteristiche fisiche, funzionali e organizzative.

Lo studio di tali livelli di performance, inoltre, non può limitarsi alla singola infrastruttura analizzata ma, proprio secondo un'ottica resiliente, necessita la preliminare definizione di una griglia di interrelazioni tra i diversi sistemi precedentemente descritti, che garantiscono la funzionalità del territorio e di tutte le componenti che lo costituiscono. I sistemi infrastrutturali, infatti, sono tra loro dipendenti e interdipendenti, dove per dipendenza si intende una relazione di tipo unidirezionale e per interdipendenza un'interazione bidirezionale (Cimellaro, 2016). Questo grado di interdipendenza non

è generalmente chiaro ed evidente in condizioni ordinarie, ma diventa visibile in caso di shock, causando una maggiore vulnerabilità dell'intero sistema in quanto il malfunzionamento di una rete potrebbe direttamente inficiare l'efficienza di un'altra. I cosiddetti "effetti a cascata" che si vanno a generare amplificano i danni, aumentando notevolmente i tempi di recupero e riducendo la resilienza del sistema, specie nel caso in cui risulti difficile identificare rapidamente le parti delle infrastrutture danneggiate su cui agire prioritariamente. Si può parlare in questo caso di rischi multipli che, seppur indagati e analizzati singolarmente, aggravano l'entità del danno complessivo proprio a causa della loro interrelazione generando eventi a catena spesso difficili da immaginare prima che si verifichino.

È il caso, ad esempio, di quando tubazioni idriche e cavi elettrici vengono installati all'interno di sezioni stradali: in condizioni ordinarie, tecniche del genere presentano vantaggi notevoli sia in termini di risparmio economico che di semplicità di progettazione, posa in opera e manutenzione ma in caso di evento complicano notevolmente la valutazione dei danni che può essere condotta solo da un punto di vista globale (Cafiso *et al.*, 2006). Se, ad esempio, la scossa di un terremoto interessasse un'infrastruttura stradale così realizzata, gli effetti indotti dall'eventuale danneggiamento di lifeline di tipo integrato potrebbero ripercuotersi sulla strada stessa indipendentemente dai danni direttamente subiti, aggravandone considerevolmente la condizione e complicando la possibilità di intervenire tramite azioni di manutenzione o riparazione.

Da studi di letteratura è possibile individuare sette tipologie differenti di interdipendenza tra lifeline:

- *interdipendenza fisica*, che implica un trasferimento di materiale da un'infrastruttura all'altra (Rinaldi *et al.*, 2001). La dipendenza delle centrali elettriche dalla rete idrica per il raffreddamento è un esempio di interdipendenza fisica;
- *interdipendenza informatica* (Rinaldi *et al.*, 2001), che implica scambio di informazioni tra diverse infrastrutture. È stata definita anche interdipendenza informativa (Dudenhoefter *et al.*, 2006) o funzionale (Zimmerman, 2001). Oggigiorno molte delle operazioni compiute dalle moderne infrastrutture sono computerizzate: l'interruzione dei servizi di comunicazione potrebbero allora influenzare, per esempio, il controllo dell'energia elettrica o dei sistemi idrici;
- *interdipendenza geografica* (Rinaldi *et al.*, 2001) chiamata anche interdipendenza geospaziale (Dudenhoefter *et al.*, 2006), implica che le infrastrutture considerate siano in prossimità l'una rispetto all'altra, tale che se si verificasse un evento locale, esso provocherebbe cam-

biamenti di stato a tutte le lifeline nelle vicinanze. È il caso, per esempio, delle condotte di gas naturale che a volte condividono corridoi comuni con le linee di energia elettrica o di telecomunicazione;

- *interdipendenza politica/procedurale* (Dudenhoeffer *et al.*, 2006) si riferisce a un legame esistente a causa di politiche o procedure relative a un evento o a un cambiamento di stato per una determinata infrastruttura che, di conseguenza, genera un effetto a cascata su un'altra;
- *interdipendenza sociale* (Cimellaro *et al.*, 2013), è l'influenza che un danno a una componente infrastrutturale potrebbe generare su fattori sociali come l'opinione pubblica. Anche se non esistono legami fisici o materiali, un evento che ha effetti su un'infrastruttura potrebbe impattare anche su un'altra;
- *interdipendenza di bilancio* (Zhang & Peeta, 2011), alcuni sistemi infrastrutturali necessitano di un certo livello di finanziamento pubblico, in particolar modo durante le operazioni di ripristino successive all'emergenza, causando un'interdipendenza in termini di allocazione di risorse;
- *interdipendenza economica e di mercato* (Zhang & Peeta, 2011), rappresenta il caso in cui esistano risorse di mercato condivise da più infrastrutture implica che le lifeline stiano operando nello stesso sistema economico. Ciò vuol dire che queste servono i medesimi utenti che a loro volta determinano la domanda per ogni servizio fornito. I vincoli di budget relativi alla domanda sono imposti in genere dal contesto normativo condiviso tramite cui le agenzie possono controllare e influenzare i singoli sistemi attraverso politiche o mezzi finanziari quali la tassazione o gli investimenti: un esempio è come i prezzi del carburante siano in grado di influenzare sia l'offerta che la domanda di trasporto e viceversa.

Negli ultimi anni molti studi hanno affrontato la valutazione dell'interdipendenza tra le reti infrastrutturali tramite l'implementazione di approcci empirici in cui la resilienza urbana viene valutata proprio in base al grado di dipendenza tra le diverse lifeline (Paton & Johnston, 2017) o tramite la definizione di una serie di indicatori specifici (Arcidiacono *et al.*, 2012).

### 1.2.3. Gli indicatori di resilienza

È proprio l'utilizzo degli indicatori che la letteratura individua tra i metodi più utili non solo per questioni legate alla misura della resilienza ma anche per la concettualizzazione dei sistemi urbani e delle comunità che, in

qualità di organizzazioni complesse, possono essere descritti e analizzati tramite indici applicati a diverse scale, a diversi ambiti socio-politici e a diversi tipi di shock. Grazie alla capacità di caratterizzare le unità di un sistema, gli indicatori di resilienza aiutano a incrementare la consapevolezza e la prontezza di risposta di comunità, amministrazioni, enti e stakeholder. Grazie alla possibilità di effettuare confronti e comparazioni (locali sui singoli elementi e globali sull'insieme), infatti, tramite questo tipo di strumenti è possibile individuare sui territori punti di forza, di debolezza, opportunità e minacce in grado di definire priorità di azione verso cui indirizzare fondi e risorse.

Da studi di letteratura è stato possibile suddividere gli indicatori di resilienza in tre categorie (Cimellaro, 2016):

- *indici*, ossia parametri quantificabili in grado di misurare un fenomeno in maniera più o meno diretta. Normalmente stimabili in base a un approccio statistico, sintetizzano osservazioni, studi e analisi tramite l'aggregazione di più misure;
- *checklist*, ossia elenchi normalmente basati su serie di domande collegate alla presenza/assenza di elementi e/o azioni;
- *modelli*, ossia rappresentazioni semplificate dei processi. Generalmente vengono supportati dall'utilizzo di formule matematiche in grado di approssimare e comprendere meglio le interrelazioni del sistema urbano.

È possibile distinguere tra gli indicatori che possono essere "ordinati" (es. livello di educazione) e quelli che possono essere semplicemente classificati senza alcun tipo di ranking (es. tipo di pericolo).

Esistono poi altri metodi di classificazione: nella già citata PEOPLES Framework, ad esempio, gli indicatori di resilienza vengono suddivisi in sette categorie (Cimellaro, 2016): tipo di pericolo; scala temporale; scala spaziale; tipo di costruzione; livello di sviluppo; dominio; metodo di misurazione.

Nella prima categoria gli indicatori sono diversi a seconda che si tratti di pericolo naturale o antropico. In base alla scala temporale è possibile distinguere indicatori pre-evento, di breve e di lungo termine. I primi si riferiscono alla fase antecedente al disastro e valutano in che misura il sistema sia in grado di rispondere all'evento atteso: si riferiscono, ad esempio, alla presenza di strategie di mitigazione o di misure di riduzione del rischio e delle vulnerabilità territoriali. I secondi sono legati alla vera e propria fase di emergenza e valutano l'abilità e la velocità del sistema nel rispondere e nel gestire le necessità nell'immediatezza del disastro: la presenza di squadre di soccorso organizzate o di servizi di emergenza preposti possono, per esempio, condurre verso una loro stima opportuna e affidabile. I terzi si riferiscono alla fase post-evento, quella relativa al periodo di ricostruzione e sono legati

alla capacità del sistema di recuperare la funzionalità persa grazie alla programmazione di strategie di recupero. In funzione della scala spaziale esistono indicatori riferiti al singolo edificio o alla singola infrastruttura, indicatori a livello di quartiere, a scala di città, regione o Paese. In base a questa distinzione entrano in gioco regole differenti di progettazione “resiliente”: in riferimento al singolo edificio, in caso di evento la valutazione delle uscite di emergenza per favorire l’evacuazione delle persone assumerà notevole importanza; in caso di analisi a livello di città, lo stesso ruolo sarà assunto dalla viabilità interna di collegamento con le aree di emergenza più sicure. Relativamente al tipo di costruzione è possibile identificare indicatori legati ai singoli edifici o alle singole infrastrutture. Il livello di sviluppo, invece, si riferisce principalmente alle condizioni socio-economiche dello Stato in esame, per cui è possibile distinguere Paesi sottosviluppati da quelli sviluppati o in via di sviluppo; questa classificazione è importante, ad esempio, per gli indicatori relativi alle infrastrutture che dipendono dalle condizioni strutturali, funzionali e operative delle lifeline che, chiaramente, sono diverse a seconda della situazione economica del Paese. La tipologia di dominio si riferisce, invece, alle diverse dimensioni della resilienza precedentemente descritte, mentre il metodo di misurazione alla differenza tra indicatori di tipo qualitativo e indicatori di tipo quantitativo.

Nel *Capitolo 3*, indici e modelli saranno utilizzati come metodi di valutazione e giudizio, a supporto del nuovo processo decisionale d’emergenza proposto.

### 1.3 Resilienza, rischio e strumenti urbanistici

Nel 1986 Ulrich Beck inizia a parlare di *società del rischio* (Beck, 1986), guardando alla realtà moderna come a un sistema complesso caratterizzato da pericoli indotti e introdotti dalla modernità stessa. Emerge allora chiara la domanda sempre più crescente di sicurezza che il pensiero e le pratiche urbanistiche devono prendere in carico attraverso strategie rinnovate e resilienti di governo del territorio e tramite la determinazione di nuovi equilibri tra la dimensione fisica della città (*urbs*) e i bisogni e le necessità della comunità che la vive (*civitas*) (Angelucci *et al.*, 2014).

Tra le pratiche in grado di concorrere in modo efficace e opportuno all’incremento della resilienza urbana, la strumentazione urbanistica assume un ruolo chiave per il coordinamento di analisi adeguate, indirizzi di pianificazione e gestione dei rischi. Un’efficiente sistema di strumentazione può infatti contribuire al miglioramento della qualità della vita dei cittadini e dei connotati di civiltà degli insediamenti urbani, garantendo integrità fisica e

culturale del territorio. Esser dotati di strumenti integrati che definiscano gli obiettivi cui mirare è il primo passo per mettere in atto modelli e strategie e la previsione di linee di indirizzo specifiche alle diverse scale territoriali è necessaria per favorire la concertazione tra i diversi enti e la loro sinergia in fase di azione.

Ad oggi il concetto di rischio è intrinsecamente legato alla possibilità che un qualsiasi fenomeno (naturale o indotto dall'attività dell'uomo) possa generare effetti dannosi sulla popolazione, sugli insediamenti e/o sulle infrastrutture, all'interno di un'area geografica e in un determinato periodo di tempo. In riferimento a ciò, pur esistendo in letteratura numerose interpretazioni del concetto di rischio (Lowrance, 1976; Society for Risk Analysis, 1987; Rosa, 1998; Willis, 2007) e considerando che molte sono le variabili complesse che concorrono alla sua definizione, secondo l'*United Nations Disasters Relief Organization* (UNDRO, 1980), esse sono sempre e comunque raggruppabili in tre macro fattori la cui composizione dà luogo, in termini matematici, alla seguente formulazione:

$$R = H \times V \times E \qquad \text{Eq. 1.2}$$

Nel dettaglio, si indica con:

- H* la pericolosità, intesa come probabilità che un fenomeno di una determinata intensità, *hazard*, si verifichi in un certo periodo di tempo e in una certa area;
- V* la vulnerabilità, ossia la propensione di un elemento (persone, edifici, infrastrutture) o di un intero sistema a subire danneggiamenti in conseguenza delle sollecitazioni indotte da un evento di una certa intensità;
- E* l'esposizione, intesa come numero di unità di ognuno degli elementi a rischio presenti nell'area considerata, come le vite umane, gli insediamenti, l'insieme delle infrastrutture e l'ammontare complessivo dei beni.

In linea con tale definizione, un sistema efficace di strumentazione urbanistica dovrebbe prevedere l'integrazione tra fase di valutazione, indirizzo, modelli di intervento e di gestione che, coordinate tra loro, sono in grado di fornire soluzioni per fronteggiare i rischi territoriali.

Nello specifico, la fase di valutazione si basa principalmente su processi di individuazione e previsione dei fattori di vulnerabilità presenti e futuri che incidono sul territorio. È infatti necessario definire dei modelli integrati basati su criteri oggettivi per stimare le caratteristiche tipologiche, il livello di

influenza e l'evoluzione temporale dei rischi ricordando, comunque, che l'effetto di un elemento di pericolo su un dato contesto dipende dai connotati dell'ambiente stesso e dalle sue relazioni interne, proprio come suggerisce la visione della città come ecosistema. I metodi devono quindi, sì, essere oggettivi, ma per la maggior parte delle volte accompagnati da valutazioni *case-by-case* specifiche dei contesti, capaci di identificare politiche di prevenzione e di emergenza, specie se legate a catastrofi naturali difficilmente prevedibili.

La fase di indirizzo costituisce il momento di pianificazione vero e proprio: noto lo stato di fatto del sistema urbano e le sue fragilità predominanti, la strumentazione deve stabilire gli obiettivi da conseguire per offrire un'adeguata risposta ai diversi tipi di emergenza possibili, riconoscendo diverse competenze a diversi operatori, ma mirando comunque a un governo unitario del territorio.

I modelli di intervento riguardano azioni e provvedimenti, da mettere in pratica grazie ai principi di condivisione comuni su cui gli obiettivi di pianificazione dovrebbero essere fondati, tramite operazioni di concertazione tra tutti i soggetti e i settori interessati e grazie a processi partecipativi dal basso, capaci di riflettere le esigenze fondamentali di chi il territorio lo vive in prima persona. I modelli di intervento devono essere improntati sia su strategie di prevenzione e previsione, che su operazioni di messa in sicurezza ed eventuali azioni di ricostruzione.

Il processo di gestione consiste, invece, in una verifica di adeguatezza delle previsioni e nel successivo monitoraggio degli interventi realizzati. Si assicura, così, il controllo degli impatti sull'ambiente e il riscontro nei confronti del raggiungimento degli obiettivi prefissati, in modo da individuare tempestivamente effetti negativi imprevisi e opportune misure correttive.

In relazione alle fasi descritte, la ricerca potrebbe percorrere diverse strade, tra cui quella volta a pensare e ideare nuovi strumenti capaci di offrire linee di indirizzo precise e mirate oppure quella volta a leggere, ed eventualmente concepire in modo differente, alcuni piani e programmi già presenti nel panorama urbanistico-territoriale.

Facendo riferimento a questa ultima ipotesi, ad esempio, i Contratti di Fiume (CdF), strumenti volontari di programmazione strategica e negoziata che perseguono la tutela, la corretta gestione delle risorse idriche, la valorizzazione dei territori fluviali e la salvaguardia del rischio idraulico, potrebbero dare forma ad azioni concrete volte a innalzare le soglie di resilienza dei territori interessati. In tal senso alcuni studi recenti, come quello relativo al caso studio del comune di Pescara (Angelucci, 2014), hanno elaborato metodi e modelli per ridurre le vulnerabilità derivanti dalla relazione città-fiume tramite l'integrazione tra risorse, vincoli ed esigenze ambientali e di comunità.



La fase di valutazione, attraverso rilievi e mappatura dei rischi, ha permesso di evidenziare le coerenze e le incoerenze tra le previsioni degli strumenti di pianificazione ordinaria e le dinamiche reali di trasformazione del sistema città-fiume. La fase di indirizzo ha consentito la previsione di diversi livelli di resilienza del sistema attraverso l'individuazione di obiettivi puntuali, lineari, areali per la gestione delle risorse idriche e naturali. A livello operativo sono state individuate una serie di famiglie di azioni suddivise in base alla tipologia della nuova struttura introdotta (vasche di esondazione, canali drenanti, condotte di accumulo, etc.) o all'intervento a larga scala programmato.

Un altro strumento "riadattabile" ai fini della resilienza potrebbe essere quello introdotto dal progetto europeo finanziato dal programma LIFE+, BLUE AP (*Bologna Local Urban Environment Adaptation Plan for a Resilient City*), che ha promosso per la prima volta in Italia un piano locale di adattamento ai cambiamenti climatici. Tale strumento è finalizzato a offrire un supporto pratico e operativo ai cittadini e alle amministrazioni locali (in questo caso specifico al Comune di Bologna) per fronteggiare in modo più efficace ondate di calore, siccità, inondazioni e alluvioni (adattamento reattivo) e altri effetti dei cambiamenti climatici, riducendo al tempo stesso le vulnerabilità presenti sul territorio (adattamento preventivo)<sup>7</sup>.

Ritenendo però che gli strumenti appena citati limitino il proprio campo di indagine a scale eccessivamente ridotte e a casi e condizioni troppo particolari, a seguito di un'analisi degli ulteriori piani e programmi presenti nel panorama urbanistico attuale la ricerca individua nel Piano di Emergenza comunale lo strumento che meglio può perseguire, se opportunamente concepito, criteri di resilienza in un sistema urbano, orientando la pianificazione verso approcci integrati di prevenzione e gestione delle emergenze (Francini *et al.*, 2018b). In base alla sua strutturazione e ai suoi contenuti, infatti, il Piano di Emergenza comunale rappresenta un possibile mezzo per far fronte a esigenze di *disaster resilience*, affrontando i rischi territoriali in maniera omnicomprensiva e relazionandoli in modo opportuno al contesto locale di sperimentazione.

---

<sup>7</sup> Per maggiori informazioni di merito si demanda a quanto indicato nel sito web del Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare, [www.pdc.minambiente.it](http://www.pdc.minambiente.it).

## Capitolo 2

# *Tra gli strumenti di pianificazione resiliente: i piani di emergenza*

Emergency plans are part of the process of creating resilience and must therefore promote both the robustness and the adaptability of society in the face of hazards (Alexander, 2017).

## **2.1 Il ruolo dei piani di emergenza nella pianificazione spaziale**

Uno dei temi di dibattito più attuali nell'ambito di governo del territorio è legato alla possibile definizione di un rapporto formale tra pianificazione emergenziale e pianificazione spaziale.

L'assenza di un coordinamento, normativo e operativo, tra gli strumenti urbanistici ordinari e i piani di emergenza, infatti, genera oggi conseguenze importanti non solo sul processo di gestione del disastro, ma anche e soprattutto sull'intero spazio urbano e sulla comunità che lo abita.

### *2.1.1 Gli aspetti normativi nel contesto nazionale*

In Italia l'esigenza di predisporre e approvare idonei strumenti legislativi in grado di gestire le emergenze – e le conseguenti trasformazioni dell'assetto urbano – venne a galla successivamente ad eventi calamitosi disastrosi in cui l'assenza di coordinamento e di pianificazione aggravò i danni già di per sé molto onerosi.

L'alluvione di Firenze del 1966 e il terremoto del Belice del 1968 furono tra gli emblemi di tali inadeguatezze: nel primo caso la mancanza di una rete di monitoraggio del fiume Arno e il ritardo nelle operazioni di soccorso evidenziarono i gravi deficit del non disporre di una struttura centrale con compiti di protezione civile; nel secondo caso, oltre al mancato coordinamento delle forze in campo, anche le scelte per la ricostruzione si rivelarono totalmente sbagliate e prive di una visione razionale di recupero: i centri storici colpiti vennero totalmente abbandonati, incentivando la popolazione a spostarsi verso nuovi insediamenti estranei alle tradizioni e agli stili locali.

Con il successivo terremoto del 1976 in Friuli, nonostante una prima fase caratterizzata dalla lentezza dei soccorsi, emerse la necessità di un coordinamento urgente tra le varie forze in campo: il governo nominò un Commissario straordinario che, in collaborazione con i governi locali, fu in grado di gestire al meglio la fase di soccorso e quella di recupero tramite i cosiddetti centri operativi, affidando ai sindaci il potere decisionale in modo da avere il controllo diretto sul territorio. Si assistette così a uno dei primi processi di resilienza urbana: la fase di ricostruzione del tessuto sociale e urbano fu portata avanti direttamente e in modo attivo dalla popolazione del luogo, secondo un modello del “*com'era, dov'era*” e fu terminata in poco più di 15 anni.

Solo dopo il disastroso terremoto dell'Irpinia del 1980, però, iniziò a farsi strada l'idea che le calamità andassero affrontate dopo averle “*immaginate, descritte e vissute*” e che occorresse dimensionare le strutture di intervento tenendo conto di scenari già elaborati e di misure di prevenzione già messe in atto.

Questa idea si concretizzò nel 1982 con la nascita del Dipartimento di Protezione Civile e, in modo riconosciuto e più efficace, con la legge n. 225 del 1992, ancora oggi riferimento principale in materia, che istituì il Servizio Nazionale di Protezione Civile con il compito di «*tutelare l'integrità della vita, i beni, gli insediamenti e l'ambiente dai danni o dal pericolo di danni derivanti da calamità naturali, da catastrofi e da altri eventi calamitosi*» (art. 1, comma 1) e al cui coordinamento provvedeva – e provvede ancora oggi – il Presidente del Consiglio dei Ministri attraverso il Dipartimento stesso.

Si iniziò a parlare, per la prima volta, non solo di attività di soccorso, ma anche di previsione e prevenzione delle emergenze (art.3, comma 1), tramite il coordinamento e la direzione degli interventi, la promozione della pianificazione d'emergenza, i provvedimenti atti a ripristinare la normalità a seguito di un evento. Il sistema non si limitò più alla sola assistenza alla popolazione, ma si occupò anche di definire le cause delle calamità naturali, di individuare i rischi presenti sul territorio e di mettere in campo tutte le azioni necessarie a evitare o ridurre al minimo la possibilità che le calamità naturali provocassero danni.

Sempre con la legge n. 225 del 1992 tutto il sistema di Protezione Civile iniziò a basarsi sul principio di sussidiarietà<sup>8</sup>, affidando, però, alle sole Prefetture il compito di redigere un «*piano per fronteggiare le emergenze su*

---

<sup>8</sup> La prima risposta all'emergenza doveva essere garantita a livello locale, a partire dalla struttura comunale, l'istituzione più vicina al cittadino. Il primo responsabile di Protezione Civile divenne il Sindaco: in caso di emergenza doveva essere lui ad assumere la direzione e il coordinamento dei soccorsi, assistendo la popolazione e organizzando le risorse comunali

*tutto il territorio provinciale»*, mentre i Comuni si limitavano a definire una generica possibilità di dotarsi di una non meglio ancora definita «*struttura di Protezione Civile»* (art.15, comma 1).

A differenza di quanto avviene nella maggior parte dei Paesi europei, grazie a proprio al principio di sussidiarietà, nella Protezione Civile italiana è coinvolta l'intera organizzazione statale, centrale e periferica: Regioni, Province, Comuni, Enti pubblici nazionali e territoriali ed ogni altra istituzione e organizzazione pubblica e privata, presenti sul territorio nazionale partecipano secondo le proprie competenze, fino al coinvolgimento diretto della stessa cittadinanza. Questo schema operativo da un lato segue criteri di efficacia ed efficienza attuando un modello di intervento locale in grado quindi di intervenire in modo più diretto e veloce, dall'altro spesso mostra le debolezze di un percorso svolto a metà in quanto il governo locale non sempre dispone di formazione e conoscenze specifiche.

Con la legge n. 225 del 1992 vennero inoltre introdotte le associazioni locali di volontariato organizzate e strutturate in consulte a livelli distrettuali, provinciali e regionali (art.18, comma 1) e anche gli enti di ricerca e il mondo universitario entrarono a pieno titolo all'interno del Sistema di Protezione Civile, anche se solo dopo l'evento catastrofico di Sarno nel 1998 la componente scientifica acquisì un nuovo e importante impulso portando alla nascita di una prima forma di "centri funzionali".

Il percorso verso il decentramento prese piede con il d.lgs. 112 del 1998, grazie al trasferimento di alcune competenze in materia di Protezione Civile dallo Stato centrale al territorio, attribuendo, in via definitiva, ai Comuni il compito di redigere i piani di emergenza in attuazione dei Programmi Provinciali e Regionali di Previsione e Prevenzione, senza stabilire, però, un principio di obbligatorietà.

Nel 2007 venne redatto il *Manuale operativo per la predisposizione di un piano comunale o intercomunale di protezione civile* a cura del Dipartimento Nazionale al fine di offrire «*indicazioni pratiche per l'elaborazione di piani d'emergenza speditivi a livello locale, da redigere sulla base delle conoscenze attualmente disponibili»*. Le indicazioni pratiche però risultavano ancora limitate e troppo generali: i piani di emergenza speditivi citati offrivano, infatti, informazioni sommarie sia sul territorio che sull'elaborazione degli scenari, senza alcun riferimento localizzativo o di perimetrazione delle aree a rischio. Pur essendo di carattere assai generico, inoltre, nemmeno il piano

---

per fronteggiare i rischi specifici del territorio. Quando un evento non poteva essere fronteggiato con i mezzi a disposizione del Comune, si sarebbero mobilitati i livelli superiori attraverso un'azione integrata: la Provincia, la Prefettura, la Regione, lo Stato.

speditivo risultava obbligatorio, se non per alcuni Comuni indicati nell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3606 del 2007<sup>9</sup>.

La legge n.100 del 12 luglio 2012 iniziò finalmente a definire più propriamente le attività e i compiti di Protezione Civile, introducendo per la prima volta il concetto di mitigazione dei rischi, ma non declinandone opportunamente e dettagliatamente azioni e interventi. Questa legge rese obbligatoria la redazione dei Piani di Emergenza Comunali (PEC), pur non determinandone in modo rigoroso né i contenuti né le forme di elaborazione, offrendo però una definizione più precisa di pianificazione di emergenza che, coordinata con i piani e i programmi di gestione, tutela e risanamento del territorio, si configura come un processo ciclico di previsione dei rischi e di preparazione ai disastri.

Seppur le attività di Protezione Civile siano attualmente disciplinate dal recente D. Lgs. n.1 del 2018, ad oggi non è ancora univocamente e analiticamente determinato il contenuto degli strumenti formali che rappresentano il risultato del processo di pianificazione. È possibile, comunque, in base a quanto detto e analizzando in maniera critica il percorso storico-culturale descritto, affermare che un Piano di Emergenza Comunale deve perseguire i seguenti obiettivi<sup>10</sup>:

- descrivere in maniera puntuale e dettagliata le condizioni di rischio locale, mediante la redazione di scenari in base agli indirizzi dei Programmi Provinciali e Regionali di Emergenza e Previsione, alle indicazioni di piani sovraordinati come quelli di Bacino e a studi specifici che forniscono ai comuni informazioni circa le pericolosità agenti sul territorio e i beni e le vite umane potenzialmente esposti a tali pericoli. La definizione di scenari di rischio locale permettono di formulare ipotesi realistiche in merito alle esigenze tecnico-organizzative e alle risorse che in “tempo di pace” sarà necessario programmare per fornire un'efficace e efficiente risposta in caso di evento;
- descrivere in forma tecnica e analitica il modello organizzativo, le procedure operative e le risorse che verranno adottate per fronteggiare i potenziali eventi calamitosi, al fine di ridurre al minimo i suoi effetti sul sistema urbano e sulla popolazione, per garantire un rapido ritorno alla normalità. L'assegnazione delle diverse competenze e responsabilità nei vari livelli di comando garantisce un miglior controllo nella

---

<sup>9</sup>Disposizioni urgenti di protezione civile dirette a fronteggiare lo stato di emergenza in atto nei territori delle regioni Lazio, Campania, Puglia, Calabria e della regione Siciliana in relazione ad eventi calamitosi dovuti alla diffusione di incendi e fenomeni di combustione (O.P.C.M. 3606/2007).

<sup>10</sup>Linee Guida per la pianificazione comunale o intercomunale di emergenza di Protezione Civile della Regione Lazio (2014).

gestione delle diverse fasi in cui l'evento atteso si manifesterà, permettendo di svolgere le attività operative in maniera ordinata e senza ritardi che potrebbero contribuire ad amplificare gli effetti negativi dell'evento atteso;

- definire le azioni che in tempo ordinario si metteranno in atto per garantire la necessaria preparazione sia della popolazione che dei soggetti chiamati a intervenire nella gestione dell'evento. Queste azioni sono essenzialmente di tipo formativo e informativo a cui dovrebbero sempre affiancarsi periodiche esercitazioni finalizzate a sperimentare quanto previsto nel Piano.

Secondo le linee guida del Dipartimento di Protezione Civile, il piano di emergenza è suddiviso in tre parti principali:

1. *parte generale*, raccoglie tutte le informazioni sulle caratteristiche e sulla struttura del territorio;
2. *lineamenti della pianificazione*, stabilisce gli obiettivi da conseguire per dare un'adeguata risposta di protezione civile ad una qualsiasi situazione di emergenza e le competenze dei vari operatori;
3. *modello di intervento*, assegna le responsabilità decisionali ai vari livelli di comando e controllo, utilizza le risorse in maniera razionale, definisce un sistema di comunicazione che consente uno scambio costante di informazioni.

La parte generale contiene l'inquadramento territoriale, completo di tutti i dati di base, statistici ed identificativi del comune atti a fornire a fruitori ed esperti informazioni utili per conoscere le caratteristiche altimetriche, morfologiche e idrografiche del territorio, le caratteristiche di pericolosità dei luoghi, la distribuzione dei servizi, delle vie di comunicazione e degli edifici di interesse pubblico, i riferimenti degli enti competenti e delle istituzioni locali, la localizzazione delle aree e delle strutture di emergenza.

Uno dei punti focali della parte generale sono gli scenari di rischio locale, ossia una serie di descrizioni sintetiche, generalmente e auspicabilmente accompagnati da cartografia esplicativa e indicazioni localizzative, dei possibili effetti sull'uomo o sui beni presenti nel territorio generati dagli eventi calamitosi attesi. Definire gli scenari di rischio è indispensabile per predisporre gli interventi preventivi a tutela della popolazione e per consentire la migliore organizzazione dei soccorsi in fase di emergenza. Per come già anticipato, per la costruzione di uno scenario è necessario conoscere tutte le componenti del rischio, ossia le pericolosità agenti su un territorio (frane, terremoti, alluvioni, inondazioni, erosione costiera, industrie soggette a incidente rilevante, emanazione di gas nocivi, etc.), l'esposizione, intesa come numero di unità (o valore) di ognuno degli elementi a rischio (vite umane,

beni, infrastrutture, etc.) e la loro specifica vulnerabilità.

Gli scenari di rischio locale comprendono una parte dedicata alla descrizione dell'evento e una riferita alla sintesi dei danni attesi. Nella prima è necessario descrivere in termini qualitativi e quantitativi il fenomeno che causa l'evento (intensità, evoluzione temporale, etc.), utilizzando a questo fine anche l'analisi storica di eventi pregressi. Devono essere identificate le parti di territorio che, in riferimento all'evento in esame, mostrano particolari condizioni di criticità dal punto di vista dei danni attesi, con specifico riferimento alle aree critiche e agli elementi ritenuti più vulnerabili. Uno scenario di danno ben fatto dovrebbe indicare prioritariamente i potenziali effetti sulla popolazione esposta, e in secondo luogo quelli sugli edifici strategici o con importanza rilevante ai fini di Protezione Civile, sulla rete di infrastrutture di trasporto e di servizio, sui beni storico-artistici o su quelli naturalistici. Si specifica che, in linea generale, sarebbe opportuno fare riferimento a due profili di evento che, per livello di intensità e danni attesi conseguenti, richiedono livelli di intervento diversi: uno scenario per evento ricorrente, ossia riferito a quel tipo di evento caratterizzato da una frequente ricorrenza che causa danni significativi ma gestibili, identificabile sulla base degli accadimenti pregressi, e uno scenario per evento massimo atteso, ossia riferito a un evento straordinario, di estensione e magnitudo rilevanti, per la cui gestione è richiesto il concorso di Soggetti ed Enti diversi dal Comune.

I lineamenti della pianificazione definiscono gli obiettivi indispensabili che il Sindaco, in qualità di Autorità comunale di Protezione Civile, deve conseguire per fronteggiare una situazione di emergenza, nell'ambito della direzione unitaria dei servizi di soccorso e assistenza alla popolazione. Il Piano di Emergenza dovrà garantire i collegamenti tra il Comune e la Regione o la Prefettura, per la ricezione e la tempestiva presa visione dei bollettini e degli avvisi di allertamento, da trasmettere poi alle altre componenti e strutture operative di Protezione Civile presenti sul territorio (Vigili del Fuoco, Corpo Forestale, Carabinieri, Guardia di Finanza, Polizia di Stato, Polizia provinciale, Capitanerie di Porto, ASL, etc.): il sistema di allertamento così costituito prevede che le comunicazioni giungano in tempo reale al Sindaco anche al di fuori degli orari di lavoro.

Per garantire il coordinamento delle attività di Protezione Civile, in particolare in situazioni di emergenza prevista o in atto, il Sindaco deve avvalersi di una struttura organizzativa capace di supportarlo già a partire dalle prime fasi di allertamento, il cosiddetto Centro Operativo Comunale, con il compito di gestire anche il coordinamento con eventuali enti esterni all'amministrazione comunale. Il Centro è solitamente organizzato in funzioni di

supporto, ossia in specifici ambiti di attività che richiedono l'azione congiunta e coordinata di soggetti diversi, introdotte per la prima volta dal Metodo Augustus<sup>11</sup>:

1. *funzione tecnica di valutazione e pianificazione*, raccorda le attività delle diverse componenti tecniche, segue l'evoluzione dell'evento provvedendo ad aggiornare gli scenari di rischio già presenti nel piano, organizza e coordina le attività per la ricognizione delle aree esposte a rischio, verifica l'effettiva agibilità delle aree di emergenza e degli edifici strategici, organizza sopralluoghi per la valutazione del rischio residuo e per il censimento dei danni;
2. *funzione sanità, assistenza sociale e veterinaria*, raccorda le attività delle componenti sanitarie locali, provvede al censimento della popolazione presente nelle strutture sanitarie a rischio e verifica la disponibilità delle strutture deputate ad accogliere i pazienti, assicura l'assistenza sanitaria durante la fase di soccorso ed evacuazione della popolazione e nelle aree di attesa e di accoglienza;
3. *funzione mass-media ed informazione*, stabilisce il programma e le modalità di incontri con la stampa per divulgare notizie e informazione i cittadini per mezzo dei mass-media; organizza tavole rotonde e conferenze stampa al fine di sensibilizzare le persone e renderle partecipi delle varie operazioni e attività;
4. *funzione volontariato*, effettua una ricognizione delle risorse realmente disponibili in termini di mezzi, uomini e professionalità specifiche monitorandone la dislocazione, raccorda i diversi gruppi di volontariato;
5. *funzione materiali e mezzi*, verifica la quantità di risorse di appartenenza del Comune, provvede all'acquisto di materiali e mezzi ove necessario, mette a disposizione le risorse sulla base delle richieste avanzate dalle altre funzioni;
6. *funzione trasporti, circolazione e viabilità*, verifica il piano della viabilità in funzione dell'evoluzione dello scenario, individua eventuali percorsi di viabilità alternativa;
7. *funzione telecomunicazioni*, garantisce la comunicazione in emergenza grazie al coordinamento delle attività tra enti gestori e operatori al fine di permettere l'immediato ripristino delle linee in caso di interruzione del servizio di comunicazione;
8. *funzione servizi essenziali*, coordina le attività delle aziende e società erogatrici di servizi, aggiorna in tempo reale le condizioni circa l'effi-

---

<sup>11</sup> Galanti, Elvezio. "Il metodo Augustus." DPC informa 2.4 (1997): 1-35.



- cienza delle reti di distribuzione al fine di garantire la continuità nell'erogazione e la sicurezza delle reti di servizio, specie nelle aree di emergenza e nelle strutture strategiche;
9. *funzione censimento danni a persone e cose*, ha il compito di fotografare la situazione determinatasi a seguito dell'evento calamitoso in termini di censimento dei danni a persone, edifici pubblici e privati, impianti industriali, servizi essenziali, attività produttive, opere di interesse culturale, etc.;
  10. *funzione strutture operative*, raccorda le attività delle diverse strutture operative impegnate nelle operazioni di presidio territoriale e di informazione, soccorso, assistenza, monitorandone dislocazione e interventi;
  11. *funzione enti locali*, coordina le relazioni tra i diversi enti coinvolti nell'evento calamitoso, promuovendo collaborazioni tra amministrazione limitrofe;
  12. *funzione materiali pericolosi*, censisce preventivamente materiali e attività pericolose presenti sul territorio, che potrebbero innescare ulteriori danni alla popolazione dopo un evento distruttivo di varia natura;
  13. *funzione assistenza alla popolazione*, aggiorna le informazioni circa il censimento della popolazione presente nelle aree a rischio in tempo reale, coordinando i diversi soggetti e strutture operative per l'attuazione del piano di evacuazione; verifica, inoltre, la disponibilità di alloggio presso i centri e le aree di accoglienza;
  14. *funzione coordinamento centri operativi*, garantisce l'operatività dei diversi centri operativi dislocati sul territorio, al fine di garantire nell'area di emergenza il coordinamento delle operazioni di soccorso razionalizzando risorse di uomini e materiali. I centri operativi presenti sul territorio possono essere normalmente di tre tipologie: CCS, Centro Coordinamento dei Soccorsi, organo provinciale principale per la gestione delle operazioni di soccorso in seguito a un evento calamitoso; COC, Centro Operativo Comunale, responsabile delle attività a livello comunale-locale che, per come già detto, ha come massimo punto di riferimento il Sindaco; COM, Centro Operativo Misto, costituito ad hoc per essere il più possibile vicino al luogo dell'evento. A questi si aggiunge il COR, Centro Operativo Regionale, per emergenze che coinvolgono più province e la Di.Coma.C., la Direzione di Comando e Controllo, organo decisionale di livello nazionale attivato nelle grandi calamità.

Nei lineamenti di pianificazione è necessario specificare le modalità di aggiornamento del piano, normalmente necessario a causa del mutamento dell'assetto urbanistico del territorio, della crescita delle organizzazioni di

volontariato, del rinnovamento tecnologico delle strutture operative, delle nuove disposizioni amministrative o di nuove valutazioni in merito a variazioni degli scenari di rischio.

La reale efficacia del piano va verificata attraverso l'organizzazione di esercitazioni capaci di coinvolgere popolazione, enti locali e strutture operanti sul territorio. Sarà fondamentale organizzare le esercitazioni secondo diverse tipologie:

- esercitazioni senza preavviso per le strutture operative previste nel piano;
- esercitazioni congiunte tra le strutture operative e la popolazione interessata all'evento atteso (la popolazione deve conoscere e provare attraverso le esercitazioni tutte le azioni da compiere in caso di calamità);
- esercitazioni periodiche del solo sistema di comando e controllo, anche queste senza preavviso, per una puntuale verifica della reperibilità dei singoli responsabili delle funzioni di supporto e dell'efficienza dei collegamenti.

Il modello di intervento è costituito dall'insieme delle procedure che le Componenti e le Strutture Operative di Protezione Civile devono avviare al verificarsi del singolo evento calamitoso per l'attivazione del Piano.

In particolare, esso:

- individua le competenze e i responsabili nei vari livelli di comando e controllo;
- definisce le fasi nelle quali si articola l'intervento di protezione civile;
- individua le strutture operative e definisce eventuali concorsi di Enti e Amministrazioni che devono essere gradualmente attivate.

Il modello di intervento si rende operativo attraverso l'attivazione, da parte del Sindaco, del Centro Operativo Comunale (COC) ed è normalmente articolato in fasi successive che servono ad individuare temporalmente il crescere del livello di attenzione e l'incremento degli strumenti, delle funzioni da attivare e delle risorse da impiegare, compatibilmente alla prevedibilità o meno dell'evento calamitoso. Nel periodo di intervento necessario all'insorgere di un'emergenza, compatibilmente con l'evento e con il territorio interessato, è possibile distinguere le seguenti fasi:

- fase di preallerta;
- fase di attenzione;
- fase di preallarme;
- fase di allarme.

A ciascuna delle varie fasi corrispondono azioni specifiche che le diverse

funzioni di supporto e componenti compiono, specificate per ogni scenario d'evento.

Le componenti attivate possono appartenere ad uno o più dei seguenti servizi necessari per fronteggiare la calamità:

- servizio di sorveglianza, che risulta sempre attivo anche nel periodo ordinario;
- servizio di vigilanza, che viene attivato all'inizio della fase di attenzione restando attivo anche nelle fasi successive;
- servizio di allerta, che viene attivato nella fase di preallerta e resta attivo anche nelle fasi successive;
- servizio di salvaguardia delle popolazioni e delle cose, attivato nella fase di preallarme;
- servizio di soccorso, che viene attivato dopo l'inizio dell'evento, cioè nella fase di allarme.

Per eventi non prevedibili non è possibile effettuare la distinzione in periodi, ma l'unica fase che il modello deve prevedere e regolamentare è la fase di allarme con l'esecuzione della procedura di soccorso ed evacuazione.

### 2.1.2 *Gli aspetti "operativi"*

Il rischio di un piano siffatto è che, spesso e in diversi contesti, si limiti ad essere un semplice strumento di suddivisione delle responsabilità, di censimento delle risorse o di coordinamento dei soccorsi.

Ammesso che venga rispettata la struttura attuale suggerita dal Dipartimento di Protezione Civile che, come si vedrà, spesso si limita comunque a essere una semplice indicazione più che una buona pratica da realizzare, il piano di oggi è per sua natura uno strumento a sé, nella maggior parte dei casi isolato rispetto agli altri strumenti di pianificazione ordinaria e spaziale, caratterizzata, come già anticipato più volte, da una totale assenza legislativa di coordinamento con l'intero processo emergenziale e soprattutto con le strategie di pianificazione preventiva.

Occorre infatti specificare che il quadro normativo nazionale a riguardo appare ancora piuttosto confuso e che nessun documento ufficiale sancisce il legame effettivo tra gli strumenti di pianificazione di Protezione Civile e quelli finalizzati a regolare l'assetto urbano del territorio. Sebbene infatti tutte le norme che riguardano il Sistema Nazionale di Protezione Civile nel tempo (legge n. 225 del 1992, legge n. 100 del 2012, D.Lgs. n.1 del 2018) sanciscano questo rapporto, il coordinamento tra i processi di governo del territorio e la pianificazione di emergenza sembra assumere ancora oggi un carattere meramente formale. La norma, infatti, non chiarisce il concetto di

“coordinamento” previsto: non esplicita e declina in maniera opportuna i contenuti attraverso cui concretizzarlo, nè definisce se debbano essere le scelte di pianificazione ordinaria a condizionare quella di emergenza o viceversa (o ambedue le possibilità).

A titolo di esempio, si riporta il caso del Decreto Legislativo n.1 del 2018 che, al comma 1 dell’art. 18, definisce la pianificazione di Protezione Civile come attività “*non strutturale*” ossia come un insieme di procedure non strettamente legate alla pianificazione del territorio, ma che piuttosto regolano e massimizzano l’efficacia degli interventi in caso di evento. D’altro canto, sempre il medesimo decreto, al comma 3 dell’art. 18, enuncia che «*I piani e i programmi di gestione, tutela e risanamento del territorio e gli altri ambiti di pianificazione strategica territoriale devono essere coordinati con i piani di emergenza di Protezione Civile*»: ma se il Piano di emergenza è definito come uno strumento operativo a carattere “*non strutturale*”, tramite quali linee di azione può fornire indicazioni agli strumenti ordinari urbanistici e territoriali per loro natura di carattere intrinsecamente “*strutturale*”? (Ioannilli, 2014b).

Il coordinamento tra sistema operativo e strutturale, tra le altre cose, sembra essere oggi pressoché inesistente: gli attuali strumenti urbanistici, per come oggi concepiti, offrono a tutti i livelli di pianificazione nella gran parte dei casi solo linee di indirizzo generali sia per l’individuazione dei rischi che per eventuali procedure di prevenzione, gestione e mitigazione.

Con particolare riferimento ai rischi ambientali e allo stato dell’arte normativo nell’ambito urbanistico-territoriale della Regione Calabria, all’interno del Quadro Territoriale Regionale a valenza Paesaggistica (Regione Calabria, 2012), ad esempio, un intero capitolo del Quadro Conoscitivo è dedicato ai rischi territoriali. Nel paragrafo relativo a «*Tipologia e scenari specifici di rischio con riferimento alla pianificazione del territorio*» l’obiettivo principale del capitolo viene descritto come la contestualizzazione di «*ciascuna tipologia di rischio nell’ambito degli strumenti di pianificazione del territorio con finalità di analisi, indirizzo, prescrizione e intervento*».

Sebbene poi nell’Allegato n.1 del Tomo 4 vengano redatte disposizioni normative in riferimento a «*Linee Guida per le analisi e le metodologie finalizzate alla prevenzione e riduzione dei rischi territoriali, cui devono attenersi i Comuni e le Province nella redazione dei PSC/PSA e dei PTCP nonché degli strumenti sotto ordinati*», nessuna strategia di intervento è propriamente descritta ma, piuttosto, vengono proposte metodologie finalizzate all’individuazione e alla perimetrazione di aree a rischio limitandosi ad un’analisi dello stato di fatto, spesso con informazioni recepite da altri strumenti come il Piano Stralcio di Bacino per l’Assetto Idrogeologico (PAI), e non a una visione strategica per la mitigazione vera e propria.

Stessa finalità è perseguita da strumenti sotto ordinati come il Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale, il Programma di Previsione e Prevenzione dei Rischi e il Piano di Emergenza a livello provinciale (2015), che delineano in maniera generale le aree interessate da possibili fenomeni franosi, alluvionali, da incendi e da erosione costiera. È comprensibile che a livello regionale e provinciale sia difficile stimare le caratteristiche di pericolosità sismica, ma nella definizione degli scenari di rischio del Piano di Emergenza provinciale, ad esempio, sembra improprio limitarsi esclusivamente alla descrizione degli effetti dell'evento e non suggerire alcuna indicazione utile su come il sistema urbano dovrebbe rispondere o reagire.

Gli strumenti a scala comunale, in tal senso, recepiscono le indicazioni dei Piani e dei Programmi sovraordinati: essi in particolare hanno il compito di redigere studi di microzonazione sismica in modo da stabilire gerarchie di pericolosità fra le diverse zone, di localizzare le previsioni di sviluppo insediativo e di nuove opere infrastrutturali privilegiando in modo prioritario aree non soggette a rischi idrogeologici e sismici, di definire puntualmente lo stato di dissesto di concerto con gli enti provinciali nei territori a rischio "molto elevato" (PAI).

Nei Piani Strutturali Comunali (PSC) sono obbligatori studi geologici di pericolosità, analisi approfondite del sistema idrografico e studi relativi alle aree a maggiore pericolosità sismica locale e l'unico riscontro specifico sul legame che gli stessi debbano avere con i piani di emergenza si trova all'interno della Legge Urbanistica Regionale n.19 del 2002 in cui viene normata l'obbligatorietà dei PSC ad individuare, sul territorio, le aree sicure da utilizzare in caso di emergenza.

Nonostante nei suoi indirizzi non sia preponderante il tema della sicurezza territoriale (come lo è, invece, la valenza paesaggistica e la tutela ambientale), è la stessa LUR 19/2002 a sancire, seppur ancora in modo molto generale, una nuova interpretazione del Piano di Protezione Civile individuando lo stesso, all'art.24, come Piano Attuativo Unitario, ossia come strumento urbanistico di dettaglio che ha come obiettivo principale quello di attuare le previsioni del PSC. Chiaramente, però, in virtù dell'*excursus* normativo descritto in precedenza e degli esempi che si riporteranno in seguito, non è sufficiente la definizione di Piano Attuativo per trasformare un Piano di emergenza da semplice strumento operativo di gestione delle forze di soccorso quale è ora in uno in grado di possedere una visione più ampia e articolata dei rischi e del territorio.

L'obiettivo che la ricerca si propone di perseguire, allora, è proprio quello di arricchire e integrare il Piano di emergenza di elementi caratterizzanti l'approccio spaziale, urbanistico e territoriale, non snaturando la sua concezione originale, ma non limitandolo nemmeno ad essere un semplice documento

operativo o un insieme di regole e procedure da adottare per fronteggiare un evento calamitoso. A tal proposito, come già anticipato, sarà necessario porre maggiore attenzione, nei suoi contenuti, alla definizione di attività di mitigazione, previsione e prevenzione, piuttosto che ai soli interventi di gestione di eventi accaduti, considerando la pianificazione e la gestione delle emergenze non come processi separati, ma invece strettamente collegati e interdipendenti, inseriti in un più ampio processo ciclico e di sovrapposizione delle diverse fasi.

Secondo quest'ottica il Piano di emergenza può effettivamente diventare lo strumento ideale per perseguire strategie di mitigazione dei rischi volte altresì a favorire il perseguimento dello stato resiliente di specifici contesti territoriali, soprattutto se incrementato in termini di definizione di soluzioni ottimali per aree a maggiore rischio e con problematiche di gestione complesse. Sarà necessario inoltre migliorare la connessione con la disciplina degli usi e degli assetti del suolo, riconoscendo l'esigenza di delineare specifici strumenti di intervento da integrare con le attuali prassi di pianificazione, affrontando per esempio il problema del riuso dell'edificato, nonché di realizzare una maggiore integrazione con la programmazione delle risorse finanziarie orientate alla mitigazione che, in molte regioni italiane, rappresentano una cospicua parte dei fondi destinati agli investimenti sul territorio oltre che una possibilità concreta di realizzare comunità resilienti.

Seppur non in stretta correlazione con il Piano di emergenza in sé, la letteratura, in tal senso, offre già possibili scenari su cui lavorare: il progetto europeo Scenario (Esteban et al., 2011), ad esempio, classifica le misure di prevenzione in strutturali e non strutturali, specificando su quale componente del rischio vanno a incidere (pericolosità, vulnerabilità, esposizione), in che lasso di tempo (breve o lungo termine) e che ambito coinvolgono (socio-economico, sistema naturale, ambiente costruito) (Pesaro et al., 2018; Menoni, 2019).

In linea con quanto già fatto, la ricerca mira allora a sviluppare un nuovo approccio pianificatorio che si propone di utilizzare metodi e tecniche (originariamente “non strutturali”) come strumenti “strutturali” di mitigazione del rischio per comprendere, già in “tempo di pace”, quali interventi e quali modalità attuare per aumentare la resilienza di un sistema urbano. Ciò non determina esclusivamente provvedimenti riconducibili a limitate azioni di messa in sicurezza o di consolidamento di singoli manufatti (legati quindi al solo processo emergenziale), ma includono decisioni concernenti l'assetto urbanistico e l'uso del suolo che, se recepite dagli strumenti di pianificazione ordinaria, permettono di veicolare e orientare scelte e disposizioni in modo razionale.

In linea, quindi, con quanto esplicitato dal D.Lgs. n.1 del 2018 nell'art.18, la metodologia proposta può rappresentare un primo elemento di coordinamento tra la pianificazione di emergenza e la pianificazione urbanistica.

## 2.2 Gli elementi urbani strategici nel Piano di emergenza

Per perseguire gli obiettivi precedentemente descritti, il presente lavoro di tesi si è spinto verso una prima fase di prioritizzazione degli elementi urbani da indagare: noto infatti che la città è un sistema complesso e articolato, distinto a sua volta in numerosi sottosistemi ottenuti come somma di ulteriori componenti, è essenziale individuare quali elementi siano effettivamente importanti e strategici per un'implementazione efficace delle strategie che si vuol attuare. Lavorare su troppi dati senza una visione mirata e di dettaglio potrebbe essere, a lungo termine, fuorviante e dispersivo, specialmente perché la metodologia proposta mira a offrire uno strumento utile per indirizzare l'azione pubblica verso politiche di prevenzione da attuare tramite una serie di interventi di messa in sicurezza e di programmazione delle risorse finanziarie. Date le ristrettezze economiche cui normalmente i Comuni e gli enti locali sono soggetti, infatti, è chiaro come non sia possibile proteggere tutto e subito: la scelta della collettività deve essere opportunamente indirizzata una volta note, già in condizioni ordinarie, le criticità puntuali che potrebbero inficiare l'efficienza del sistema in caso di evento.

L'individuazione di questo sistema urbano strategico avviene tramite la definizione di criteri standardizzati utili alla loro localizzazione univoca sul territorio con il fine ultimo di inserirli tra i contenuti minimi obbligatori dei Piani di Protezione Civile comunali (Francini *et al*, 2018c). Le strutture e le infrastrutture individuate come elementi strategici del territorio sono:

- gli edifici strategici, ossia le strutture di particolare rilevanza presenti sul territorio e suscettibili di affollamento (strutture scolastiche, ospedaliere, ricettive, etc.);
- le aree di emergenza, ossia i luoghi definiti sicuri da raggiungere in caso di evento, ove la popolazione può attendere i primi generi di conforto e i soccorritori possono allestire eventuali strutture temporanee di ricovero a supporto della cittadinanza colpita;
- la viabilità strategica, ossia l'insieme delle infrastrutture stradali di collegamento tra edifici strategici e aree di emergenza, utili sia per indirizzare la popolazione colpita verso luoghi sicuri, sia per permettere ai soccorritori di raggiungere eventuali feriti e trasportarli nelle strutture sanitarie più vicine.

Mantenere inalterata la loro efficienza in caso di evento garantisce che

per l'intero sistema urbano sia assicurata la funzionalità minima necessaria per fronteggiare il disastro, riducendo gli effetti negativi e il tempo necessario per il ritorno alla normalità.

La scelta degli elementi da includere nel sistema urbano strategico ha seguito le indicazioni di due strumenti già presenti e utilizzati nell'ambito di Protezione Civile e di pianificazione: l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) e la Struttura Urbana Minima (SUM).

La CLE, introdotta con l'o.p.C.M. n.4007 del 2012, ha il compito di verificare i principali elementi fisici del sistema di gestione delle emergenze - già (teoricamente) definiti all'interno del piano di Protezione Civile - al fine di assicurare l'operatività del sistema stesso dopo il terremoto (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2014).

condizioni limite / sistemi urbani	funzioni strategiche emergenza	funzioni strategiche	funzioni urbane	residenza	
CLO	==	==	==	==	== mantenimento
CLD	==	==	==	==	== limitazione temporanea
CLV	==	==	==	—	— limitazione parziale
CLC	==	==	—	✕	✕ interruzione sensibile
CLE	==	✕	✕	✕	✕ interruzione a lungo termine

Fig. 2.1 - Definizione delle condizioni limite per gli insediamenti urbani<sup>12</sup>. Fonte: Bramerini et al. (2014).

Questa nuova categoria operativa, a somiglianza di quanto definito nelle norme tecniche per le costruzioni con gli “stati limite” tenta di definire un limite funzionale entro il quale, a seguito del manifestarsi di un evento sismico, pur in concomitanza con il verificarsi di danni fisici tali da condurre all'interruzione di quasi la totalità delle funzioni urbane presenti, l'insediamento conserva comunque, nel suo complesso, l'operatività della maggior

<sup>12</sup> CLO = Condizione Limite di Operatività in cui l'insediamento non risente di modifiche significative; CLD = Condizione Limite di Danno corrispondente a riduzioni di funzionalità limitate nel tempo o parziali; CLV = Condizione Limite per la salvaguardia della Vita dell'insediamento corrispondente a danneggiamenti nel complesso significativi o prolungati ma tali da non compromettere i caratteri generali dell'insediamento; CLC = Condizione Limite per il Collasso dell'insediamento quando sono in grado di resistere solo poche funzioni urbane principali, mentre molte delle altre funzioni, comprese la residenza, sono compromesse nel loro insieme nel medio periodo; CLE = Condizione Limite per l'Emergenza.



parte delle funzioni utili per la gestione dell'emergenza (Fig. 2.1).

La verifica degli elementi fisici avviene tramite l'acquisizione di informazioni minime attraverso la predisposizione di 5 schede specifiche di rilevamento relative a edifici strategici, aree di emergenza, infrastrutture di accessibilità e connessione, aggregati e unità strutturali.

La CLE non ha carattere pianificatorio, ma si limita a una valutazione dell'esistente, poiché

deve essere intesa come strumento di “verifica” di alcuni elementi fisici del sistema di gestione dell'emergenza già individuato nel piano di protezione civile e non può in alcun modo essere sostitutiva del piano stesso, in particolar modo nell'individuazione dei siti e delle strutture strategiche di gestione delle emergenze (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2014).

La SUM, invece, ha un forte contenuto progettuale e può essere definita come

l'insieme degli edifici e degli spazi, strutture, funzioni, percorsi, in grado di garantire il mantenimento e la ripresa della funzionalità, anche sotto il profilo della riconoscibilità sociale collettiva del sistema urbano durante e dopo l'evento sismico (Fabiatti, 1999).

Viene introdotta come una vera e propria categoria urbanistica da individuare all'interno della pianificazione comunale e, sempre in analogia con gli “stati limite”, può essere identificata come una condizione funzionale più “esigente” in termini prestazionali rispetto alla CLE.

Dopo un'attenta valutazione degli elementi definiti da questi due strumenti e allargando il campo di analisi non solo al rischio sismico, è stato possibile constatare che mentre appare abbastanza semplice identificare i cosiddetti edifici strategici (in Italia esiste il DPCM n.3685 del 2003 che definisce le strutture di interesse strategico) ed individuare sul territorio le aree di emergenza in base a specifici criteri definiti dal Dipartimento di Protezione Civile (che le distingue in aree di attesa<sup>13</sup>, aree di ammassamento<sup>14</sup> e

<sup>13</sup> Aree di attesa: luoghi di prima accoglienza per la popolazione; possono essere utilizzate piazze, slarghi, parcheggi, spazi pubblici o privati non soggetti a rischio (frane, alluvioni, crollo di strutture attigue, etc.), raggiungibili attraverso un percorso sicuro. Il numero delle aree da scegliere è funzione della capacità ricettiva degli spazi disponibili e del numero degli abitanti. In tali aree la popolazione riceve le prime informazioni sull'evento e i primi generi di conforto. Le Aree di Attesa della popolazione saranno utilizzate per un periodo di tempo compreso tra poche ore e qualche giorno.

<sup>14</sup> Aree di ammassamento soccorritori e risorse: zone sicure rispetto alle diverse tipologie di rischio, dove dovranno trovare sistemazione idonea i soccorritori e le risorse necessarie a

aree di ricovero<sup>15</sup>), risulta ancora piuttosto complicato stabilire la rete strategica di infrastrutture viarie all'interno di una città.

### 2.3 La pianificazione preventiva e “consuntiva” nel processo di piano

Il Piano di emergenza è definito da Alexander D. E. (2017) come

lo strumento che fornisce delle linee guida circa l'uso di risorse disponibili a risolvere problemi ed esigenze causate dall'impatto di eventi avversi.

Anche a livello internazionale, allora, ci si imbatte in una definizione di piano utile e utilizzabile esclusivamente in caso di evento, come strumento di intervento in seguito a un incidente o a un avvenimento inatteso e come elemento operativo per la gestione dei soccorsi.

Per come già anticipato, il presente lavoro di tesi, invece, associa al Piano di emergenza una valenza più ampia, combinando i suoi obiettivi con quelli propri dell'intero processo di pianificazione di emergenza, per sua natura complesso e articolato.

In merito a ciò, si trovano riscontri utili in letteratura: all'interno dell'*Encyclopedia of Natural Hazards*, per esempio, la pianificazione di emergenza viene definita come

un'attività finalizzata a preparare tutte le organizzazioni coinvolte nel fronteggiare una data crisi a fronte del sorgere di un evento catastrofico in una data area [...] che agisce sulla preparazione di un sistema sociale e delle organizzazioni di governo a rispondere a uno stress ambientale, minimizzando le conseguenze negative in termini di salute e sicurezza per le persone, evitando l'interruzione delle funzioni fondamentali della comunità (Menoni, 2013).

Secondo Drabek (2005), sociologo, è considerata

---

garantire un razionale intervento nei luoghi colpiti dall'evento. Tali aree dovranno essere ubicate nelle vicinanze di risorse idriche, elettriche e con possibilità di smaltimento delle acque reflue. Il periodo di permanenza in emergenza di tali aree è compreso tra poche settimane e qualche mese.

<sup>15</sup> Aree di accoglienza o di ricovero della popolazione: aree sicure rispetto alle diverse tipologie di rischio e poste nelle vicinanze di risorse idriche, elettriche e fognarie, in cui vengono installati i primi insediamenti abitativi per alloggiare la popolazione colpita. Dovranno essere facilmente raggiungibili anche da mezzi di grandi dimensioni per consentirne l'allestimento e la gestione. Rientrano nella definizione di aree di accoglienza o di ricovero anche le strutture ricettive (hotel, residence, camping, etc.).

un processo attraverso il quale le incertezze presenti in situazioni potenzialmente pericolose possono essere ridotte al minimo e la sicurezza pubblica massimizzata.

Alexander (2017), invece, la descrive come «*un impegno sociale che necessita del sostegno di informazioni scientifiche*».

Sociale perché deve coinvolgere azioni di concertazione e collaborazione tra diversi soggetti istituzionali, politici, pubblici e privati, necessitando comunque in egual modo del supporto di consulenze squisitamente tecniche, relative per esempio alla magnitudo o alla frequenza di determinati eventi.

È facile allora comprendere il perché la pianificazione di emergenza sia definita da tutti gli autori citati, anche in precedenti lavori (Alexander, 2002; Menoni, 1997), come un'attività multidisciplinare, capace di superare i confini dei singoli saperi, abbandonando l'autonomia disciplinare e unendo le diverse professionalità.

Proprio questo aspetto diventa particolarmente importante nell'ambito urbanistico, dove i piani ordinari disciplinano normalmente porzioni di territorio circoscritte: i rischi, però, non rispettano i confini amministrativi preordinati,

non attengono ad aspetti formali, in quanto investono soprattutto le relazioni tra le parti, e sono per loro stessa natura multicomponenti.

Anche quando vengono relegati alla sola parte analitica o descrittiva del piano, richiedono la competenza di più esperti, in merito a diversi sistemi e a diversi parametri, da quelli fisico-naturali a quelli sociali, di cui non occorre tanto comprendere i fattori caratteristici e specifici ma, appunto, i legami e le interrelazioni reciproche (Treu, 1997).

In relazione alla pianificazione intesa come percorso articolato e complesso, l'Ente americano federale per la gestione delle emergenze (FEMA) identifica quattro fasi caratterizzanti il processo: mitigazione, preparazione, risposta e recupero (Fig. 2.2).

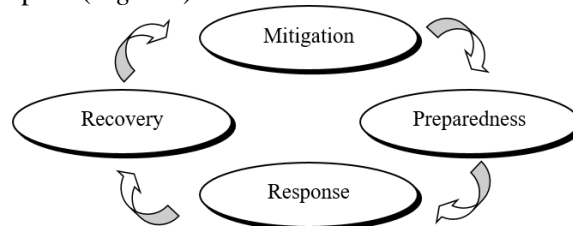


Fig. 2.2 - Fasi della pianificazione di emergenza. Fonte: Federal Emergency Management Agency<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> [https://training.fema.gov/emiweb/downloads/is10\\_unit3.doc](https://training.fema.gov/emiweb/downloads/is10_unit3.doc).

La fase di mitigazione include ogni attività utile per prevenire un'emergenza, riducendo la possibilità che essa si verifichi o gli effetti dannosi che potrebbe provocare. L'acquisto di un'assicurazione contro gli incendi per la propria abitazione è un esempio di attività di mitigazione.

La fase di preparazione coinvolge tutte le operazioni da promuovere prima che si generi un'emergenza, affinché la popolazione sia pronta ad affrontare un evento. Lo stoccaggio di cibo e risorse è un esempio di misura di preparazione. La fase di risposta è quella che entra in gioco quando l'emergenza vera e propria si verifica, trasformando in azione le misure di preparazione preventivamente pianificate. Evacuare un edificio durante un terremoto è un esempio di attività di risposta. La fase di recupero include tutti gli interventi utili per ritornare in una condizione ordinaria successiva all'emergenza. Finanziamenti per riparare danni generati da un evento calamitoso fanno parte, per esempio, delle azioni di recupero.

Appare evidente come esistano, allora, due “tempi di lavoro”, ovvero il tempo ordinario e il tempo dell'emergenza. Il primo, che coinvolge essenzialmente la fase di mitigazione e preparazione, è assimilabile a una struttura di studio e ricerca preventiva, mentre il tempo dell'emergenza è caratterizzato da una

struttura dinamica, rigidamente gerarchizzata, priva di orari e di riserve mentali, pronta ad affrontare situazioni imprevedibili [...] ma solo la pronta esecuzione di manovre già stabilite o l'esecuzione automatica di ordini per i quali non c'è tempo di spiegazioni (Moiraghi, 2002).

Dall'analisi di quanto detto è possibile ricavare una forte corrispondenza tra i fattori caratterizzanti la misura della resilienza urbana già delineati nel primo capitolo e le fasi del processo di pianificazione di emergenza.

Tale analogia è meglio rappresentata nella *Fig. 2.3* dove le fasi appena descritte sono diagrammate su un nuovo asse delle ascisse parallelo all'asse temporale presentato nella *Fig. 1.4*, secondo un processo ciclico di previsione dei rischi e preparazione all'emergenza, supportato dalla definizione di procedure attuative e operative finalizzate a garantire l'organizzazione dell'operatività dei soggetti coinvolti nella gestione degli eventi inattesi.

Da questa nuova correlazione derivano alcune considerazioni di particolare importanza ai fini del presente lavoro e della ricerca sia in ambito urbanistico, che di emergenza in generale.

Criteri resilienti utili a garantire accettabili livelli di performance in seguito a un evento possono essere perseguiti principalmente tramite due strade:

- attraverso misure di mitigazione e preparazione, riducendo la perdita di performance del sistema urbano. In tal senso, è evidente come la pianificazione preventiva abbia effetti benefici sull'intero processo emergenziale, influenzando sull'entità del danno istantaneo dovuto alla crisi e riducendo il gap tra il livello di performance iniziale e quello post-evento;
- attraverso strategie e operazioni di ricostruzione e recupero (pianificazione "consuntiva"), incidendo in modo diretto sul grado di performance del sistema relativo all'equilibrio post-evento, generalmente differente da quello legato alle condizioni pre-emergenziali.

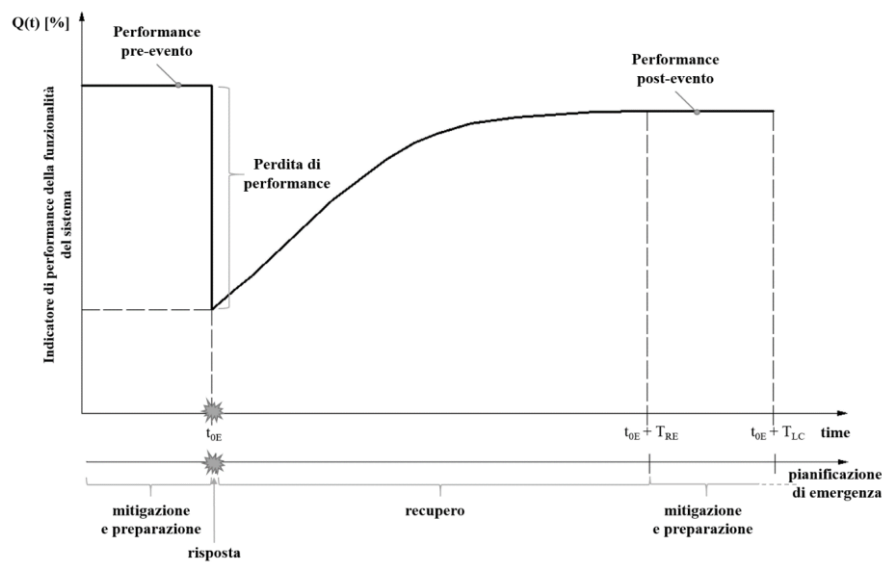


Fig. 2.3 - Corrispondenza tra misura della resilienza nel tempo (Cimellaro, 2016) e fasi della pianificazione di emergenza.

Questa doppia valenza della pianificazione *resiliente*, preventiva e “*consuntiva*”, è rappresentata nella Fig. 2.4.

La *curva A* è relativa al caso in cui siano state applicate, in modo cautelativo, buone strategie di preparazione e mitigazione del rischio che, di conseguenza, hanno generato una ridotta perdita di performance del sistema all'insorgere dell'evento. Lo stesso sistema urbano, però, non è stato in grado di reagire allo shock in modo opportuno ed efficace attraverso un recupero strutturato e ben pianificato: il livello di performance finale, allora, è risultato notevolmente inferiore rispetto a quello pre-evento.

La *curva B*, invece, è relativa al caso in cui non sia stata pianificata preventivamente alcuna misura di mitigazione e/o preparazione o, se programmata, non sia stata particolarmente efficace: la perdita di performance nella fase di emergenza risulta quindi cospicua. Il sistema urbano nel caso B, però, è stato in grado di reagire alla crisi in modo proficuo tramite azioni di ricostruzione o rigenerazione urbana capaci di sanare problemi preesistenti all'evento: la performance finale risulta maggiore di quella iniziale. Nella realtà è chiaramente difficile possa esistere un sistema urbano con comportamento paragonabile alla *curva B*: è pressoché impensabile, infatti, ritenere che un sistema privo di misure di pianificazione preventiva sia capace di reagire in modo così efficiente a una crisi, riacquistando una perdita di performance considerevole in un tempo di recupero relativamente breve e raggiungendo livelli di funzionalità finali così alti.

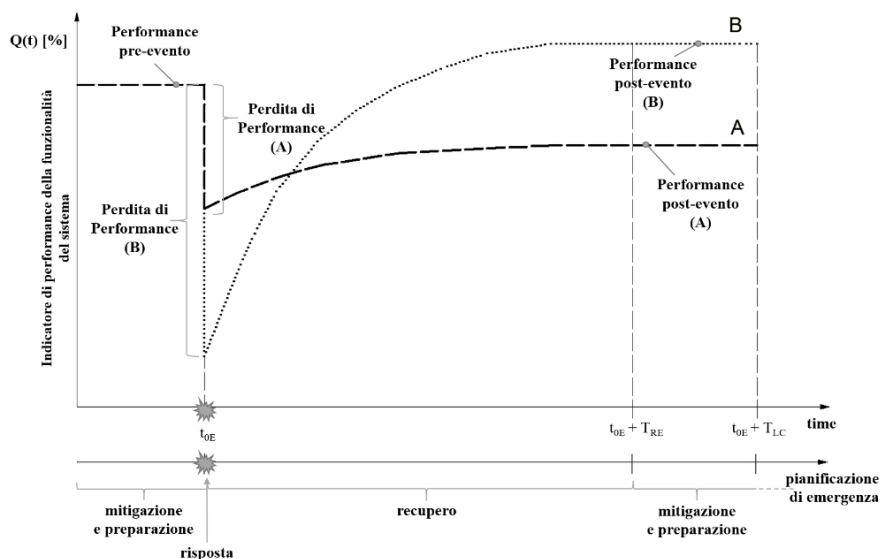


Fig. 2.4 - Ruolo della pianificazione preventiva e di quella "consuntiva".

In virtù di ciò, sebbene l'importanza del ruolo dell'urbanistica, associata a tutte le altre discipline tecnico-scientifiche e sociologiche, sia evidente in entrambe le modalità di pianificazione, ciò che questo lavoro vuole sottolineare, e da cui vuole partire, è la problematica attuale, italiana e non solo, di gestire i rischi e i disastri essenzialmente nel momento in cui essi avvengono: gli strumenti operativi messi in campo sono ancora oggi principalmente varianti o deroghe di piani esistenti che all'occasione diventano mezzi eccezionali di attuazione. Basti pensare, per esempio, alle modalità di dichiarazione dello "stato di emergenza" emanate dal Consiglio dei Ministri per cui, da

prassi, «*si provvede con ordinanze in deroga alle disposizioni di legge*»<sup>17</sup>.

La ricerca, allora, si concentrerà principalmente sull'analisi della struttura e dei contenuti dell'attuale Piano di emergenza, offrendone una rilettura – anche in termini spaziali – maggiormente resiliente, specie in termini di pianificazione preventiva attraverso, per come già specificato, strumenti originariamente “*non strutturali*”: non si focalizzerà, infatti, in modo specifico sulle strategie di recupero di cui comunque si vuole sottolineare l'importanza, soprattutto visto il forte pericolo di speculazione cui si va incontro in caso di emergenza, nel caso in cui ci siano fondi speciali erogati per il ripristino dei servizi e il ritorno alla normalità.

Nel corso degli anni le operazioni di ricostruzione sono state spesso condotte secondo la prassi del “*com'era, dov'era*”, generando talvolta risultati positivi ma senza opportune considerazioni su nuove possibili modalità di sviluppo che mirassero a standard di qualità in relazione a possibili eventi futuri: in controtendenza, i nuovi approcci di pianificazione dovrebbero far sì che anche le decisioni prese in fretta in situazioni d'urgenza tengano conto, anche all'interno della fase di ricostruzione, di strategie di prevenzione mirate, specialmente nel caso in cui il recupero interessi aree ancora a rischio.

A tal riguardo, è interessante analizzare le diverse esperienze relative ai piani di ricostruzione: sebbene in alcuni casi abbiano mostrato importanti ed evidenti criticità, se ripensati e opportunamente integrati con gli strumenti ordinari di governo del territorio, potrebbero rappresentare dal punto di vista urbanistico un valido supporto al ripensamento degli assetti dei nuclei urbani post-evento.

Da queste considerazioni emerge un aspetto interessante riguardante la non perfetta sequenzialità delle fasi del ciclo dell'emergenza descritte nel paragrafo precedente: come già anticipato da Geipel nel 1979, infatti, la fase di ricostruzione e quella di mitigazione e preparazione possono intersecarsi e sovrapporsi portando alla necessaria visione integrata di una pianificazione dei rischi ad ampio raggio, che si configuri come il giusto equilibrio tra pianificazione preventiva e “*consuntiva*”, attraverso piani, interventi e leggi che non si limitino esclusivamente al governo dell'emergenza e dei soccorsi.

In base a quanto detto, è necessaria una riflessione sull'origine etimologica del termine emergenza, che si conferma perfettamente calzante con i temi trattati. Esso, infatti, deriva dalla parola latina *emergere*, composta dal verbo “*mergere*”, cioè “*tuffare*” e dal prefisso “*ex*” ossia “*fuori*”.

---

<sup>17</sup> Per maggiori informazioni si consiglia di visitare il link [www.protezionecivile.gov.it/amministrazione-trasparente/interventi-straordinari-emergenza](http://www.protezionecivile.gov.it/amministrazione-trasparente/interventi-straordinari-emergenza) in cui è possibile approfondire le varie tipologie di stato di emergenza e visionare la rendicontazione relativa ad esse negli ultimi anni.

La percezione figurata di qualcosa che “viene a galla” associa alle emergenze trattate il significato di manifestazioni di realtà già presenti, di fenomeni ordinari che d’improvviso assumono magnitudine molto superiore alla norma e superano la normale capacità del territorio stesso (Bertin, 2018).

Proprio in quest’ottica si colloca la nuova visione che si vuole offrire al Piano di emergenza, focalizzando l’attenzione su ciò che emergerà, tramite un’opportuna conoscenza del territorio, dei suoi limiti e delle sue fragilità attraverso l’implementazione di strategie preventive atte a limitare l’entità del danno atteso, ricordando che

rischio non è sinonimo di catastrofe. Rischio significa anticipazione della catastrofe (Beck, 2008).

## **2.4 Il caso Calabria: dallo stato di fatto a una prima sperimentazione operativa**

I problemi precedentemente descritti, relativi all’attuale concezione del piano da enti locali e cittadini, alla carenza di coordinamento tra pianificazione di emergenza e pianificazione urbanistica, uniti alla difficoltà di individuare sul territorio gli elementi strategici del sistema urbano sono emersi a monte dell’avvio della presente ricerca, durante la realizzazione di una sperimentazione operativa condotta dal Laboratorio di Pianificazione dell’Ambiente e del Territorio (LabPAT) del Dipartimento di Ingegneria Civile (DINCI) dell’Università della Calabria in collaborazione con la UOA (Unità Organizzativa Autonoma) di Protezione Civile della Regione Calabria.

Occorre ricordare che, attualmente, la pianificazione di emergenza in Calabria è disciplinata da norme non adeguatamente aggiornate in funzione del campo di attività in continua evoluzione e che il coordinamento con gli strumenti urbanistici è pressoché inesistente: come già anticipato, l’unico riferimento alle attività di Protezione Civile che si trova nella Legge Urbanistica Regionale n.19 del 2002, per esempio, è l’obbligatorietà dei Piani Strutturali Comunali di individuare, sul territorio, le aree sicure da utilizzare in caso di emergenza.

La legge regionale in materia è la n. 4 del 10 febbraio 1997, aggiornata al 31 dicembre 2008, che classifica gli eventi calamitosi, definisce i compiti di Protezione Civile e le attività di volontariato, regola gli interventi di formazione, informazione, gestione dell’emergenza. In particolare, secondo la legge, sono identificabili come attività di Protezione Civile tutte quelle volte alla previsione e alla prevenzione delle varie situazioni di rischio, al soccorso



delle popolazioni sinistrate e quelle dirette a superare le emergenze connesse a calamità naturali o a eventi connessi all'attività dell'uomo. La fase di previsione viene descritta come quell'insieme di attività dirette allo studio e alla determinazione delle cause dei fenomeni calamitosi, che possono generare le diverse situazioni di rischio, e all'individuazione delle zone del territorio a esse soggette. La fase di prevenzione consiste, invece, nelle attività di intervento volte a evitare, o quanto meno a ridurre al minimo, la possibilità che si verifichino danni conseguenti agli eventi calamitosi, naturali o antropici.

La legge, inoltre, favorisce la nascita, sul territorio, di Associazioni di volontariato quali espressione di impegno sociale e suggerisce l'attuazione di attività di sensibilizzazione alla popolazione sulle tematiche proprie di protezione civile allo scopo di rendere operante l'adempimento da parte della collettività degli inderogabili doveri di solidarietà umana, realizzando attività di formazione e informazione per produrre una nuova cultura in tal senso. Con Delibera di Giunta Regionale, nel 2007 si è cercato di favorire tale connubio, mediante l'approvazione delle Linee Guida per la Pianificazione comunale di Emergenza di Protezione Civile, utili alla redazione dei PEPC, ma le stesse a oggi sembrano non definire adeguatamente i contenuti, gli standard e le procedure da attuare, rendendo di fatto poco produttiva la realizzazione di tali piani.

Al momento dell'avvio della sperimentazione in molti dei Comuni calabresi la pianificazione di emergenza era spesso intesa più come un mero adempimento burocratico che come un reale strumento operativo utile alle amministrazioni per fronteggiare il rischio, nonostante la Regione Calabria sia uno dei territori italiani a più alto rischio sismico e idrogeologico.

Il riflesso di questa carente attenzione alla gestione dell'emergenza - e a tutte le sue diverse attività di previsione, prevenzione, soccorso e recupero - è lo stato di fatto, risalente agli inizi del 2017, dei Piani di Protezione Civile comunali nei 409 Comuni calabresi (*Fig. 2.5 e Fig. 2.6*): la maggior parte di essi, tutti cartacei, risale ai primi anni 2000 e nel tempo non sono stati mai aggiornati adeguatamente in riferimento alle normative più recenti.

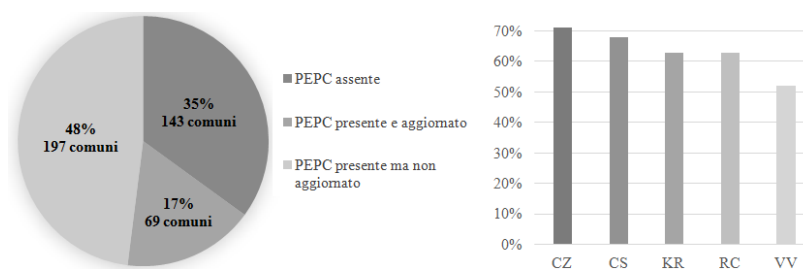


Fig. 2.5 - Presenza dei Piani di Protezione Civile nei comuni calabresi e distribuzione per Provincia.

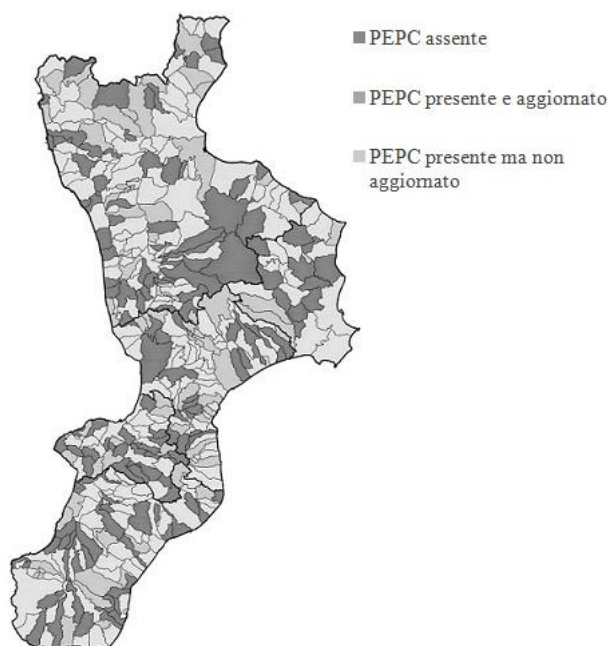


Fig. 2.6 - Distribuzione dei Piani di Protezione Civile sul territorio calabrese.

Tra i 197 Piani non aggiornati emergono numerosi casi speditivi, in cui le informazioni sono esclusivamente annotative e nessun dato è geolocalizzato o cartografato, mentre i 69 Piani aggiornati non risultano essere sufficientemente adeguati ai diversi contesti territoriali, sia in riferimento alla valutazione degli scenari di rischio che alla descrizione delle attività di allarme e di soccorso.

In questo panorama piuttosto critico ha preso piede l'elaborazione del cosiddetto Livello Base, atto a fornire un primo livello di ricognizione dei dati e a mettere a sistema preliminari informazioni di merito utili a poter fronteggiare un eventuale evento calamitoso nel breve periodo, in attesa di predisporre i veri e propri Piani di Emergenza.

L'obiettivo principale è stato quello di popolare un WebGIS completo dei dati relativi al Livello Base di ogni comune, consultabile online anche da soggetti non istituzionali ed editabile in maniera rapida e veloce dai soggetti competenti.

La sostituzione del materiale cartaceo, mediante la predisposizione di una piattaforma interattiva caratterizzata da carte tematiche, costituite da strati informativi opportunamente codificati, è molto importante in un piano che come quello della Protezione Civile si prefigura debba lavorare in condizioni

di emergenza. A supporto di ciò, dunque, nasce la necessità di mettere a sistema dati già presenti in altre banche dati a scala provinciale, regionale, nazionale con le indicazioni imposte dal Dipartimento Nazionale di Protezione Civile.

Le informazioni sono state opportunamente identificate attraverso standard, procedure rigorose e codifiche dettagliate (es. strato-tema-classe-elemento) e la Protezione Civile regionale si è trasformata da soggetto passivo, solitamente in attesa di ricevere i piani da istruire, a soggetto attivo, coinvolto direttamente nel reperimento dei dati e nel coordinamento degli aggiornamenti.

L'acquisizione delle informazioni è avvenuta tramite la predisposizione di Schede Tecniche contenenti i dati di base del Comune, riservando particolare attenzione ai diversi nuclei urbani presenti, alle sedi e ai riferimenti istituzionali, alle caratteristiche del territorio comunale, con riferimento ai sistemi di monitoraggio presenti, ai servizi ospedalieri, sanitari, scolastici e sportivi, ai servizi a rete e agli edifici e alle strutture rilevanti (beni monumentali, strutture ricettive, carceri, etc.).

Tra le informazioni sono state riportate quelle inerenti gli edifici già censiti nel Rapporto Barberi<sup>18</sup> che nel 1999 ha valutato la vulnerabilità sismica di più di 10.000 edifici calabresi, pubblici e strategici.

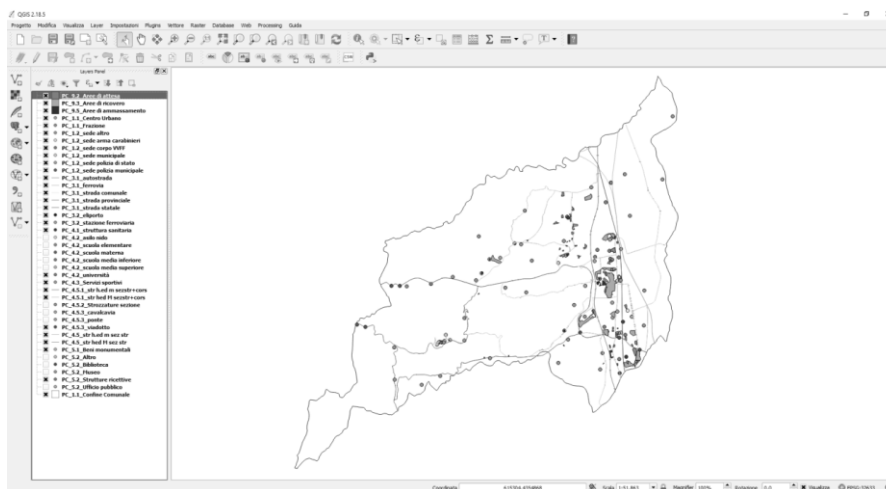


Fig. 2.7 - Livello Base: esempio informazioni cartografate.

<sup>18</sup>Martinelli, A., Corazza, L., Cherubini, A., Dolce, M., Di Pasquale, G., & Petrini, V. (1999). Censimento di vulnerabilità degli edifici pubblici, strategici e speciali nelle regioni Abruzzo, Basilicata, Calabria, Campania, Molise Puglia e Sicilia. *Dipartimento della Protezione Civile, Rome*.

	ID_Element	Indirizzo	N_Alunni	Telefono	E-mail	Proprietà	Nom_Ref	Qual_Ref
1	H235-4.2-S3-09	VIA CADUTI DI N...	539	0984/4639...	csic8ak00c@is...	pubblico	BORRELLI ROS...	DIRIGENTE SCOL...
2	H235-4.2-S3-08	C.DA SANTO STE...	127	0984/4467...	csic87900v@i...	pubblico	PERRI FRANCA	DIRIGENTE SCOL...
3	H235-4.2-S3-07	C.DA ARCAVACA...	84	0984/4467...	csic87900v@i...	pubblico	PERRI FRANCA	DIRIGENTE SCOL...
4	H235-4.2-S3-06	LOC. PISCINE - ...	321	0984/8374...	csic87900v@i...	pubblico	PERRI FRANCA	DIRIGENTE SCOL...
5	H235-4.2-S3-05	VIA BUENOS AIRES	247	0984/4016...	csic87900v@i...	pubblico	PERRI FRANCA	DIRIGENTE SCOL...
6	H235-4.2-S3-04	VIA LINZE	88	0984/4655...	csic89000n@i...	pubblico	BARBUSCIO M...	DIRIGENTE SCOL...
7	H235-4.2-S3-03	VIA GIOTTO	309	0984/4821...	csic89000n@i...	pubblico	BARBUSCIO M...	DIRIGENTE SCOL...
8	H235-4.2-S3-02	VIA M. MOLINARO	108	0984/4439...	csic89000n@i...	pubblico	BARBUSCIO M...	DIRIGENTE SCOL...
9	H235-4.2-S3-01	VIA D. VANINI, 43	19	0984/4430...	csic89000n@i...	pubblico	BARBUSCIO M...	DIRIGENTE SCOL...

Fig. 2.8 - Livello Base: esempio di attributi relativi alle informazioni reperite.

In riferimento a ciò, sono state raccolte diverse informazioni che mirano a un aggiornamento puntuale delle caratteristiche degli stessi, come eventuali cambi di destinazione d'uso o interventi strutturali effettuati negli anni (adeguamenti sismici, sopraelevazioni, realizzazione di nuove aperture, etc.).

Ogni edificio e struttura rilevante è stata georeferenziata e caratterizzata da alcune informazioni relative alla proprietà (pubblica/privata) e ai contatti dei referenti operativi (Fig. 2.7 e Fig. 2.8).

Inoltre è stato necessario acquisire informazioni dettagliate in riferimento alle risorse umane e strumentali a disposizione, indicando lo stato di fatto della strumentazione vigente (assenza o presenza di un piano, con relative date di redazione e aggiornamento) e descrivendo le caratteristiche delle aree di attesa e di ammassamento e delle aree e delle strutture di ricovero.

Per ciascuna di queste sono stati specificati: estensione, tipologia, proprietà (pubblica/privata), numero di persone ospitabili, numero di servizi annessi, elisuperficie presenti nelle vicinanze, allacci al gas, all'energia elettrica e all'acqua.

Uno degli elementi di analisi, che ricopre sicuramente un ruolo prioritario nelle fasi di gestione dell'emergenza, è quello della viabilità, in riferimento a cui il Livello Base ha identificato alcune informazioni strategicamente indispensabili per la conoscenza preliminare del territorio:

- le principali vie di accesso (distinte in autostrade, strade statali, strade provinciali, strade comunali e rete ferroviaria) al Comune e alle varie frazioni: informazione indispensabile, in caso di emergenza o calamità naturale, per valutare immediatamente come raggiungere i vari nuclei urbani;
- la viabilità interna strategica, dove per strategiche, per come già anticipato, si intendono le principali strade di collegamento tra i diversi servizi (sanitari, scolastici, etc.) e le aree di emergenza, luoghi definiti

sicuri durante e immediatamente dopo il verificarsi di un evento calamitoso. Per gestire al meglio la fase di soccorso è risultato utile, fin da questa fase iniziale, specificare quali tratti di strada sono caratterizzati da una larghezza della sezione stradale inferiore all'altezza degli edifici prospicienti quel medesimo tratto (in caso di emergenza è bene conoscere a priori le strade che potrebbero essere interessate da crolli di strutture), quali vie di collegamento intersecano corsi d'acqua tombati, quali sono caratterizzate da strozzature di sezione, ponti, cavalcavia, viadotti e gallerie.

Proprio in funzione della difficoltà emersa nell'individuare sul territorio la viabilità interna strategica il presente lavoro di tesi ha preso forma. Non avendo infatti a disposizione alcun criterio o linea guida da seguire per stabilire l'opzione migliore tra le diverse alternative, le decisioni dei rilevatori non sempre sono state frutto di scelte razionali e consapevoli.

Per la valutazione degli scenari di rischio, trattandosi della ricognizione di informazioni di base e avendo come fine prioritario il reperimento dei dati in tempi brevi, sono state acquisite esclusivamente le indicazioni del Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI) della Regione Calabria, finalizzate alla valutazione del rischio frana, del rischio alluvione e del rischio erosione costiera per ciascun Comune, demandando altresì la valutazione del rischio sismico alla elaborazione definitiva dei piani. Anche per il rischio maremoto o tsunami ci si è limitati all'acquisizione di dati relativi alla localizzazione dei vulcani sottomarini e alla redazione di una serie storica di eventi simili accaduti in passato.

Ciascuna delle informazioni precedentemente descritte è stata opportunamente standardizzata tramite un preciso codice alfanumerico progressivo e grazie all'appartenenza ad uno specifico strato informativo caratterizzato da determinate proprietà (tratteggio, retino, colore, etc.).

Il codice alfanumerico progressivo presenta la struttura-tipo CCC-A.A-aa-XX dove:

- CCC rappresenta il codice catastale del singolo Comune. È composto da una lettera e da tre cifre che identificano in modo univoco il sistema urbano sul territorio;
- A.A rappresenta la classe di appartenenza dell'elemento (es. 3.1 – Principali vie di accesso);
- aa rappresenta la tipologia dell'elemento (es. SP – Strada Provinciale);
- XX rappresenta, a partire da 01, il numero identificativo di quel singolo elemento.

Così facendo le informazioni acquisite, oltre a essere presenti all'interno di un database informatizzato, sono codificate univocamente e omogenea-

mente sull'intero territorio regionale e i dati, una volta completi, non necessitano più di un'interpretazione soggettiva, facilitando così la lettura e il confronto dei risultati di studi appartenenti, eventualmente, ad aree differenti.

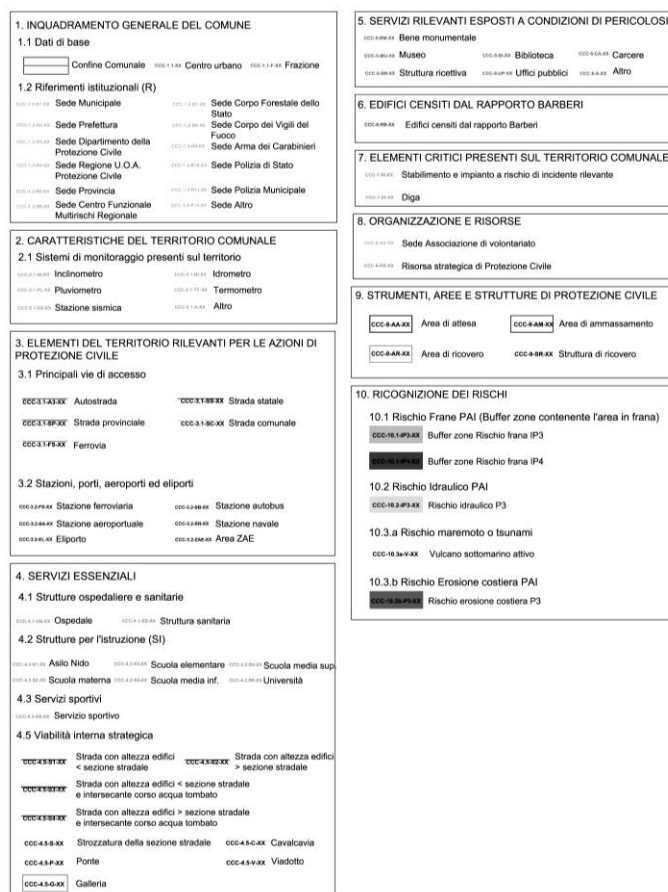


Fig. 2.9 - Livello Base: strati informativi presenti.

Per il rilevamento dei dati è stato necessario, partendo dalla definizione dei Centri Operativi Misti di Protezione Civile (COM), suddividere il territorio calabrese in 39 Comparti in modo da raggruppare i Comuni e rendere più rapide le operazioni di rilevamento.

Inoltre, sono stati individuati 12 “Comuni Pilota” – 5 Comuni capoluoghi di provincia (Catanzaro, Cosenza, Crotona, Reggio Calabria e Vibo Valentia) e 7 Comuni calabresi con una popolazione superiore ai 20.000 abitanti (Acri, Castrovillari, Corigliano Calabro, Gioia Tauro, Lamezia Terme,

Rende e Rossano) – considerati di importanza strategica, per i quali si è deciso di seguire un iter particolare.

Per questi Comuni il completamento degli strati informativi è stato il risultato della collaborazione sinergica tra i tecnici comunali, i progettisti incaricati dalle diverse amministrazioni per la redazione dei PEC e i ricercatori del LabPAT. La collaborazione tra questi diversi soggetti ha permesso di terminare la fase di acquisizione delle informazioni in tempi brevissimi, ottenendo le informazioni di base di 12 Comuni che, nel loro complesso, rappresentano circa 1/3 dell'intera popolazione calabrese.

---

---

### Capitolo 3

## *Viabilità strategica: l'Indice di Rischio e le sue componenti*

On a day when something out of the ordinary radically affects entire communities and beyond, transportation comes into sharp focus because it is so essential [...] Planning for disasters, emergencies, and significant events is a whole community planning effort; emergency management organizations often head up this work, but transportation managers and planners must take leadership roles if communities are to be ready and resilient (Matherly *et al.*, 2014).

### **3.1 Il framework del metodo**

Quanto emerso dalla sperimentazione condotta attraverso il Livello Base ha permesso alla presente ricerca di prender forma, nel tentativo di elaborare soluzioni utili e razionali in risposta a criticità più o meno evidenti. Nell'ambito della fase di reperimento dati, le principali difficoltà sono sorte durante il processo di individuazione delle infrastrutture stradali di collegamento tra edifici strategici e aree di attesa: come già anticipato, infatti, non esistendo alcuna norma o linea guida per stabilire l'opzione migliore tra diverse alternative, le scelte dei rilevatori incaricati di acquisire le informazioni sono state indirizzate esclusivamente da consigli degli amministratori locali, seguendo per il più delle volte il criterio standard della minima distanza. Come verrà dimostrato in seguito, però, buon senso e interpretazione personale delle caratteristiche fisico-ambientali del sistema urbano non sono sufficienti a garantire estrema razionalità nei processi decisionali: criteri ben definiti e modelli opportunamente testati sono invece indispensabili per pianificare e individuare opportunamente gli elementi del sistema urbano strategico.

In virtù di ciò, la ricerca si pone come obiettivo l'elaborazione di un framework di metodo utile a determinare quale tra le diverse alternative possibili debba rientrare nel sistema di infrastrutture strategiche e mantenere inalterata la sua funzionalità in caso di emergenza per permettere ai soccorsi di raggiungere nel più breve tempo possibile le zone colpite e, contemporaneamente, alla popolazione di mettersi in salvo giungendo nelle aree più sicure. Si fa notare, tra le altre cose, che l'interruzione anche temporanea delle infrastrutture di trasporto può determinare gravi conseguenze, non solo nel



breve ma anche nel medio e nel lungo periodo, causando, ad esempio, l'isolamento di interi nuclei urbani o conseguenze negative in ambito economico dovute alle difficoltà di ripresa delle attività anche dopo il ripristino della funzionalità del sistema di trasporto. Inoltre, nei rami delle infrastrutture di mobilità, in particolari ore del giorno si concentrano flussi considerevoli di utenti: questo fenomeno, che soprattutto in grandi realtà urbane può assumere dimensioni considerevoli, deve necessariamente essere considerato nella valutazione dei rischi di una determinata area.

La versatilità di un prodotto siffatto permette di ottenere utili informazioni a partire da contesti territoriali differenti, che siano piccoli centri o città metropolitane, ed è frutto di analisi condotte indagando settori disciplinari diversi, grazie anche a proficue collaborazioni con gruppi di ricerca con background eterogenei.

Gli studi di letteratura hanno spaziato da approfondimenti di pianificazione territoriale ad analisi di ingegneria strutturale, dalla consultazione di piani di settore a normative antisismiche. Le ricerche hanno abbracciato l'idea di città come insieme e di infrastrutture come sottoinsieme, analizzando i tradizionali indicatori di funzionalità, per poi proporre nuovi criteri di "performance di emergenza".

I benefici della metodologia risiedono principalmente nell'utilizzo che un ente come la Protezione Civile può farne per migliorare le operazioni di gestione di eventi inattesi: per come già analizzato, ad oggi le reali condizioni di affidabilità delle strade non vengono opportunamente indagate e il loro livello di rischio, sia a livello di rete che di dettaglio del singolo tronco, potrebbe costituire uno strumento di integrazione dei piani di emergenza. La conoscenza a priori delle strade più esposte a pericoli di vario genere e maggiormente suscettibili a interruzioni in caso di evento, consente lo sviluppo di sistemi speciali di risposta, come, per esempio, dispositivi di *Early Warning* quali semafori dinamici capaci di adeguare segnale al variare della condizione di pericolo.

La metodologia proposta, inoltre, potrebbe essere utilizzata anche dagli Enti gestori delle strade: l'identificazione dei tratti maggiormente a rischio, infatti, potrebbe fornire un ordine di priorità per l'allocazione delle risorse finanziarie destinate ad interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria. Nell'ottica di un programma di riassetto della rete stradale, in più, la valutazione del rischio potrebbe e dovrebbe essere inserita trasversalmente agli obiettivi tradizionalmente utilizzati per pianificare l'adeguamento delle infrastrutture esistenti: normalmente, infatti, nella realizzazione di interventi di riassetto si tiene conto principalmente di criteri legati alla sicurezza della circolazione e alla funzionalità operativa, senza alcun riferimento al livello di rischio rispetto ai pericoli naturali cui l'infrastruttura è soggetta e che, invece,

potrebbe rientrare tra le buone pratiche di mitigazione e prevenzione. In tal senso lo sviluppo di metodologie come quella qui presentata potrebbe rappresentare un valido supporto alle attività di gestione e manutenzione del patrimonio stradale sfruttando il confronto diretto tra gli stakeholder coinvolti nell'ambito delle emergenze e i tecnici operanti nel settore delle infrastrutture.

Chiaramente un discorso analogo può anche esser fatto a monte della pianificazione e del disegno di una nuova strada, per cui la presente metodologia, supportata da altri strumenti come le mappe del rischio e gli studi di impatto ambientale, può essere utile al fine di valutare e sfruttare i siti dove il rischio potenziale risulta essere sufficientemente basso: la determinazione della migliore localizzazione territoriale e l'applicazione di tecnologie costruttive finalizzate alla riduzione della vulnerabilità dovrebbero senza dubbio rientrare tra i criteri e le regole di progettazione di qualsiasi sistema a rete.

### 3.2 Il modello proposto e gli strumenti utilizzati

Appurato che le città sono sistemi urbani complessi e che la loro complessità cresce sia all'aumentare dell'estensione territoriale che in funzione della molteplicità dei sottosistemi presenti e delle loro mutue dipendenze, l'utilizzo della metodologia proposta necessita di un trasferimento dati dal reale al virtuale. In virtù di questo, il modello utilizzato per le applicazioni qui presentate sarà una cosiddetta *virtual city*, ossia un contesto urbano digitalizzato e georiferito con caratteristiche fisiche, funzionali e strutturali verosimilmente assimilabili a quelle del sistema urbano reale di riferimento. Modelli virtuali a larga scala sono oggi impiegati in modo diffuso poiché possiedono diversi vantaggi tra i quali:

- possibilità di implementare, in maniera dettagliata, differenti tipi di infrastrutture fisiche nel rispetto di predeterminate regole costruttive rappresentative della zona geografica in oggetto;
- opportunità di testare algoritmi e metodologie con la massima flessibilità, al fine di evidenziarne già in fase preliminare sia i punti di forza che quelli di debolezza;
- modellare i dati come entità singole ma suddivisi per categorie e possibilità di gestirli, aggiornarli e visualizzarli in tempo reale.

La *virtual city* è correntemente utilizzata per applicazioni in diversi campi: modelli virtuali per la valutazione della vulnerabilità sismica del costruito sono stati implementati dal *Center of Excellence for Risk-Based Community Resilience Planning* (McAllister, 2015): uno dei più importanti è

senza dubbio quello battezzato come *Centerville*, nome di fantasia associato a un sistema urbano virtuale progettato per rappresentare una generica città tipica del Midwest degli Stati Uniti (Ellingwood *et al.*, 2016).

Il riferimento principale per la presente ricerca è stato, invece, il modello virtuale implementato dal Politecnico di Torino nell'ambito del progetto H2020 *IDEal reSCUE* (*Integrated DEsign and control of Sustainable Communities during Emergency*): il sistema urbano digitale, ispirato alla città di Torino (Piemonte, Italia), ha come obiettivo principale quello di sviluppare un nuovo sistema di soccorso in caso di emergenza, attraverso la combinazione di modelli tradizionali di sistemi a rete, uniti alle più innovative simulazioni Agent-based, utili per ottenere informazioni e previsioni sul comportamento della popolazione in caso di evento. Una prima applicazione del framework di metodo proposto è implementata proprio sulla *virtual city* di Torino (*par. 4.1*), mentre il secondo caso studio utilizzerà un modello progettato a partire dal sistema urbano strategico della città di Rende, in provincia di Cosenza, in Calabria (*par. 4.2*).

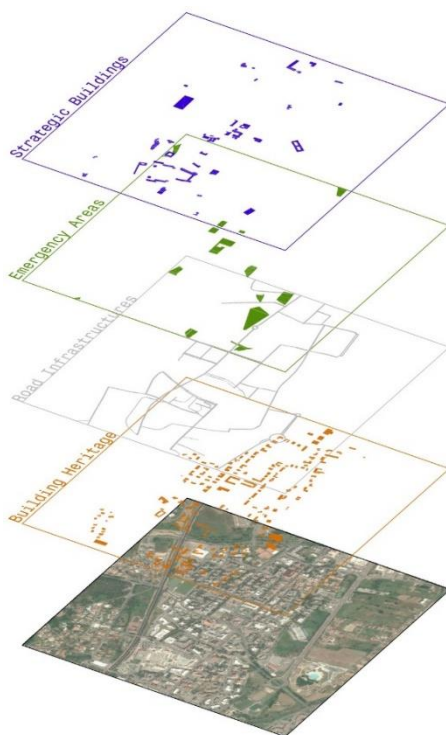


Fig. 3.1 - Schema di virtual city ottenuto mediante l'interdipendenza di quattro layer fondamentali.

La costruzione delle *virtual city* analizzate è avvenuta in ambiente GIS (Geographic Information System), mediante l'utilizzo di un software open-source, QGIS, visto il fine ultimo di creare un prodotto utilizzabile da pianificatori, tecnici e cittadini.

Il modello QGIS è costituito da tre layer principali, riferiti agli elementi strategici del territorio (*par. 2.2*), e da un quarto indispensabile per le valutazioni relative al pericolo sismico (*par. 3.4.1*) (*Fig. 3.1*):

- gli edifici strategici, modellati in pianta come elementi poligonali e dotati di una serie di attributi relativi principalmente al tipo di struttura e alla sua localizzazione sul territorio (*Fig. 3.2*). Tutte le caratteristiche puramente “annotative” sono di semplice integrabilità: potrebbero essere aggiunte, ad esempio, informazioni circa i contatti di riferimento dei singoli edifici, gli orari di apertura, un link al sito web, etc. che, però, ai fini delle analisi del presente lavoro sono ad oggi superflue;

ID	Edificio	Indirizzo	Tipologia
1	1 sede municipale-sede COC-polizia municipale	Piazza San Carlo ...	rif. istituzionale
2	2 vigili del fuoco	Via Parigi (Distac...	rif. istituzionale
3	3 arma dei carabinieri	Via V. Alfieri, 3	rif. istituzionale
4	4 polizia di stato	Via Marconi Svinc...	rif. istituzionale
5	5 CNR	Via Cavour	rif. istituzionale
6	6 sede COM e biblioteca commenda	Piazza Matteotti	rif. istituzionale e biblioteca
7	7 Poliambulatorio	Via Meucci, Quat...	struttura sanitaria
8	8 Guardia Medica ASP	Corso Mazzini, 18	struttura sanitaria
9	9 Guardia Medica ASP	Via Pietro Bucci (...)	struttura sanitaria
10	10 Guardia Medica ASP	Via Corrado Alva...	struttura sanitaria
11	11 ASL	Via Kennedy, 27	struttura sanitaria
12	12 asilo nido Sacri Cuori	Via Panagulis	struttura scolastica
13	13 asilo nido Mary Poppins	Via Carlo Carra'	struttura scolastica
14	14 asilo nido	Via Michelangelo ...	struttura scolastica
15	15 asilo nido privato e Poste Italiane-Ritiro Racco...	Via Kennedy 1^ ...	struttura scolastica e ufficio pubblico
16	16 asilo nido madorno	Via Brodolini, 35	struttura scolastica
17	17 asilo nido il mondo di Lilli	Via Tallin, 3	struttura scolastica
18	18 asilo nido luna park	Via Londra, 14	struttura scolastica
19	19 asilo nido pubblico	Via Londra	struttura scolastica
20	20 asilo nido universita	Piazza Vermicelli -...	strutture scolastiche

Fig. 3.2 - Esempio attributi del layer “edifici strategici”.

- le aree di emergenza, con riferimento alla diversa tipologia (attesa, ricovero, ammassamento) anch'esse modellate in pianta come elementi poligonali e complete di tutte le informazioni circa la localizzazione, la superficie, la tipologia di suolo, la capacità e i servizi offerti (Fig. 3.3);

ID	Indirizzo	Proprietà	Tipo_Area	S_Area(m2)	Tipo_suolo	N_persone	En_Eletr	Gas	Serv_Igien	Acqua
1	1 Commenda ...	pubblica	Attesa	2000.00	asfalto	1000	no	no	no	no
2	2 Centro stori...	pubblica	Attesa	500.00	pavimentazione	250	no	no	no	no
3	3 Rocchi (Roc...	pubblica	Attesa	7350.00	asfalto-suolo	3675	no	no	no	no
4	4 Chiodo2 (C...	pubblica	Attesa	4860.00	asfalto-suolo	2430	no	no	no	no
5	5 Martensson...	pubblica	Attesa	5650.00	suolo	2825	no	no	no	no
6	6 Aula Magna...	pubblica	Attesa	510.00	asfalto	255	no	no	no	no
7	7 Aula Magna...	pubblica	Attesa	780.00	suolo	390	no	no	no	no
8	8 Maisonnett...	pubblica	Attesa	915.00	asfalto	457	no	no	no	no
9	9 Maisonnett...	pubblica	Attesa	1910.00	suolo	955	no	no	no	no
10	10 Maisonnett...	pubblica	Attesa	1375.00	suolo	687	no	no	no	no
11	11 San Gennar...	pubblica	Attesa	2200.00	asfalto	1100	no	no	no	no
12	12 San Gennar...	pubblica	Attesa	920.00	asfalto	460	no	no	no	no
13	13 Polifunziona...	pubblica	Attesa	7290.00	suolo-asfalto	3645	no	no	no	no
14	14 Polifunziona...	pubblica	Attesa	2135.00	asfalto	1067	no	no	no	no
15	15 Aula Magna...	pubblica	Attesa	925.00	asfalto	462	no	no	no	no
16	16 Aula 17 (Au...	pubblica	Attesa	3850.00	asfalto	1925	no	no	no	no
17	17 Materia (Ma...	pubblica	Attesa	3600.00	asfalto	1800	no	no	no	no
18	18 Materia (Ma...	pubblica	Attesa	3800.00	asfalto	1900	no	no	no	no
19	19 Quattromigl...	pubblica	Attesa	2400.00	suolo-asfalto	1200	no	no	no	no
20	20 Quattromigl...	pubblica	Attesa	13200.00	suolo-pavime...	6600	no	no	no	no

Fig. 3.3 - Esempio attributi del layer "aree di emergenza".

- il sistema di infrastrutture viarie, layer poligonale ottenuto da operazioni di *buffer* a partire da elementi lineari a grafo rappresentanti gli assi stradali, in funzione della larghezza della carreggiata di ogni tratto (Fig. 3.4).

Ogni strada è costituita da più tratti, aventi per estremi i nodi della rete.

Il popolamento di questi primi tre strati informativi è avvenuto grazie al supporto di Carte Tecniche Regionali e Comunali e a banche dati fruibili online da Sistemi Informativi Territoriali.

	ID /	Denominazi	Largh_Carr
1	1	Via Buenos Aires	5.00000
2	2	Via Gioacchino Rossini	7.00000
3	3	Via Leonardo Da Vinci	5.00000
4	4	Via Buenos Aires	5.50000
5	5	Via Parigi	5.50000
6	6	Via Parigi	4.40000
7	7	Via Vittorio Alfieri	9.00000
8	8	Via Guglielmo Marconi	5.00000
9	9	Via Guglielmo Marconi	5.00000
10	10	Via Guglielmo Marconi	6.00000
11	11	Via F. De Pisis	6.00000
12	12	Via Guglielmo Marconi	5.00000
13	13	Via Guglielmo Marconi	6.00000
14	14	Via Guglielmo Marconi	6.00000
15	15	Via Guglielmo Marconi	6.00000
16	16	Via Guglielmo Marconi	7.00000
17	17	Via Guglielmo Marconi	7.00000
18	18	Via E. de Amicis	6.00000
19	19	Via Vittorio Alfieri	9.00000
20	20	Via Giuseppe Verdi	5.00000

Fig. 3.4 - Esempio attributi del layer "infrastrutture viarie".

Il quarto layer è relativo al patrimonio edilizio residenziale con particolare riferimento a:

- gli edifici prospicienti le infrastrutture viarie considerate di importanza strategica; essi appartengono a un layer di tipo poligonale e, analogamente allo strato informativo relativo agli edifici strategici, sono geometricamente rappresentati in pianta. Gli attributi sono essenzialmente di due tipi: (1) attributi geometrici relativi alle caratteristiche in pianta, come perimetro, area, coordinate del baricentro e momenti di inerzia principali (Fig. 3.5); (2) attributi strutturali e meccanici (Fig. 3.6).

La digitalizzazione delle geometrie e la determinazione dei parametri di tipo (1), anche in questo caso, sono avvenute tramite la consultazione delle Carte Tecniche Regionali e Comunali. Le principali difficoltà sono state riscontrate, invece, nella fase di reperimento dati relativi alle proprietà meccaniche e strutturali degli edifici. Ad oggi, infatti, le amministrazioni comunali

non hanno a disposizione informazioni di dettaglio circa l'intero patrimonio edilizio e non sempre esistono banche dati da cui attingere che siano sufficientemente complete, aggiornate e fruibili da cittadini, università e centri di ricerca.

	ID /	Perimet[m]	Area [m2]	CX [m]	CY [m]	Ixx[m4]	Iyy[m4]
1	1	57.00	208.15	60639...	43591...	3143.7...	4118.24...
2	2	48.25	126.92	60639...	43591...	710.51...	2755.11...
3	3	36.88	85.24	60735...	43543...	592.62...	610.936...
4	4	88.93	366.71	60729...	43537...	15968....	9094.52...
5	5	88.30	309.92	60691...	43540...	31591....	2652.82...
6	6	51.29	123.89	60736...	43544...	3098.7...	817.0840...
7	7	34.93	68.91	60737...	43544...	672.43...	285.963...
8	8	30.42	48.14	60737...	43544...	269.35...	169.03438
9	9	59.39	209.08	60736...	43550...	2418.1...	5648.28...
10	10	73.71	267.03	60722...	43555...	6774.8...	6307.993...
11	11	72.24	269.57	60680...	43558...	10204....	6961.53...
12	12	56.82	155.12	60615...	43592...	1677.9...	3788.33...
13	13	64.15	207.83	60741...	43549...	1890.6...	8705.89...
14	14	127.17	751.83	60739...	43548...	134836...	23931.9...
15	15	57.24	143.46	60742...	43548...	888.49...	5457.722...
16	16	62.21	237.81	60742...	43548...	3733.2...	6001.98...
17	17	66.55	249.61	60744...	43549...	3161.7...	9462.22...
18	18	54.16	178.10	60590...	43545...	3741.3...	1848.17...
19	19	52.01	166.94	60589...	43545...	2949.0...	1807.209...
20	20	53.90	177.00	60589...	43544...	3625.6...	1859.94...

Fig. 3.5 - Esempio attributi geometrici del layer "edifici prospicienti".

Tutti gli studi esistenti applicati alla scala territoriale riconoscono le difficoltà in merito alla disponibilità dei dati e, anche nel caso in esame, un'importante e dispendiosa fase della ricerca è stata impiegata per la creazione del database relativo alle *virtual city*.

Nonostante la consistente mole di dati, lavorare in un'ottica urbanistica e a scala territoriale ha permesso di ottenere risultati sufficientemente affidabili, nella misura in cui l'idea di insieme vince sulle valutazioni dei singoli elementi.

A tal riguardo, l'applicazione di strumenti e metodi differenti associata all'analisi di criteri multipli, ha garantito la valutazione appropriata delle incertezze legate ai singoli aspetti considerati.

ID	n_storey	h_building[m]	ConstrYear	ConstType	Mass Type	Wall Type	Open_geom	Open_perc	Malta_qual	Trans_conf	Consolidat	Reinforcem	Span Type
1	1	3	9.00	5 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	5
2	2	3	9.00	5 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	2
3	3	2	6.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
4	4	7	21.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
5	5	1	3.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
6	6	8	24.00	5 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	2
7	7	8	24.00	5 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	2
8	8	8	24.00	5 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	2
9	9	2	6.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
10	10	7	21.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
11	11	3	9.00	3 Reinforce...	1	2	0	0	0	0	0	1	2
12	12	1	3.00	3 Masonry ...	1	4	2	2	2	2	1	0	2
13	13	1	3.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
14	14	1	3.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
15	15	1	3.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
16	16	3	9.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
17	17	2	6.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
18	18	3	9.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
19	19	3	9.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3
20	20	3	9.00	4 Reinforce...	2	3	0	0	0	0	0	2	3

Fig. 3.6 - Esempio attributi meccanico-strutturali del layer "edifici prospicienti".

Circoscrivendo l'analisi alle strutture in cemento armato e muratura (rispettivamente associate alla denominazione "Reinforced concrete building" e "Masonry building" in relazione all'attributo "ConstType"), indagini in situ, mappe storiche e consultazione di dati ISTAT e delle poche banche date a disposizione hanno permesso di valutare in modo razionale tutti i parametri di tipo (2), attraverso un'associazione diretta con l'anno di costruzione.

Tenendo conto successivamente delle incertezze derivanti da questo tipo di formulazione, le proprietà meccaniche e i sistemi costruttivi adottati nella modellazione della singola struttura sono definiti proprio in accordo con il periodo storico di realizzazione dell'edificio, classificando il patrimonio edilizio in funzione dell'anno di costruzione (attributo "ConstYear" dei parametri (2) - Tab. 3.1), e associando a ciascuna classe così definita i più probabili sistemi adottati e le regole progettuali utilizzate in accordo con l'evoluzione storica della normativa sismica italiana.



Tab. 3.1 - Periodi storici di costruzione associati all'attributo "ConstrYear".

ConstrYear	1	2	3	4	5	6
Periodo di costruzione	<1916	1916-1937	1938-1974	1975-1996	1996-2008	>2008

In particolare, gli elementi costruttivi sono assegnati coerentemente con quanto contenuto nel report "Typical Italian building construction elements depending on year of construction" (Corrado *et al.*, 2012) in base al periodo storico di riferimento. A titolo di esempio, si riporta la corrispondenza tra l'età di costruzione e gli attributi "Mass Type" (Fig. 3.7), riferito alla tipologia di solaio adottato, "Wall Type" riferito alla tipologia di muro portante in caso di struttura in muratura (Fig. 3.8) o alla tipologia di tamponatura esterna in caso di struttura in cemento armato (Fig. 3.9).

La gestione dei dati territoriali così ottenuti è stata notevolmente semplificata dall'utilizzo del GIS che, oltre alla creazione del database relativo a *virtual city*, è stato impiegato come vero e proprio strumento di supporto all'analisi e alle decisioni.








Type ID	Description	Year
1	 Floor with reinforced brick-concrete slab	> 1930
2	 Concrete floor on soil, low insulation	> 1976
3	 Floor with reinforced concrete	1901 - 1930
4	 Vault floor with solid bricks	< 1900
5	 Floor with hollow bricks and steel beams	1920 - 1945
6	 Vault floor with bricks and steel beams	< 1900
7	 Floor with wood beams and hollow bricks	< 1930

Fig. 3.7 - Valutazione dell'attributo "MassType" in funzione del periodo storico di costruzione.




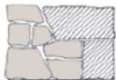


Type ID	Description		Year
1		Solid brick masonry	1900 - 1950
2		Masonry with lists of stones and bricks	< 1930
3		Masonry with regular stones	< 1930
4		Masonry with hewn stones	< 1920
5		Masonry with concrete or loose stone interior	< 1930
6		Masonry in load-bearing brick with reinforcement	> 1974

Fig. 3.8 - Valutazione dell'attributo "WallType" per le strutture con "ConstType"="Masonry building".




Type ID	Description		Year
1		Solid brick masonry (25 cm)	1900 - 1950
2		Hollow wall brick masonry with solid and hollow bricks (40 cm)	1930 - 1975
3		Hollow wall brick masonry (40 cm)	> 1930

Fig. 3.9 - Valutazione dell'attributo "WallType" per le strutture con "ConstType"="Reinforced concrete building".

Operazioni di categorizzazione e di selezione per attributi o caratteristiche hanno consentito di plottare a video sia specifici dati in input (es. gli edifici differenziati per tipo di materiale (Fig. 3.10) o in base al numero di piani (Fig. 3.11); strade selezionate per larghezza della carreggiata; edifici

strategici diversificati in base al servizio offerto), che determinati risultati in output (es. visualizzare in rosso le strade non percorribili in caso di terremoto e in verde quelle che permettono ancora il passaggio).

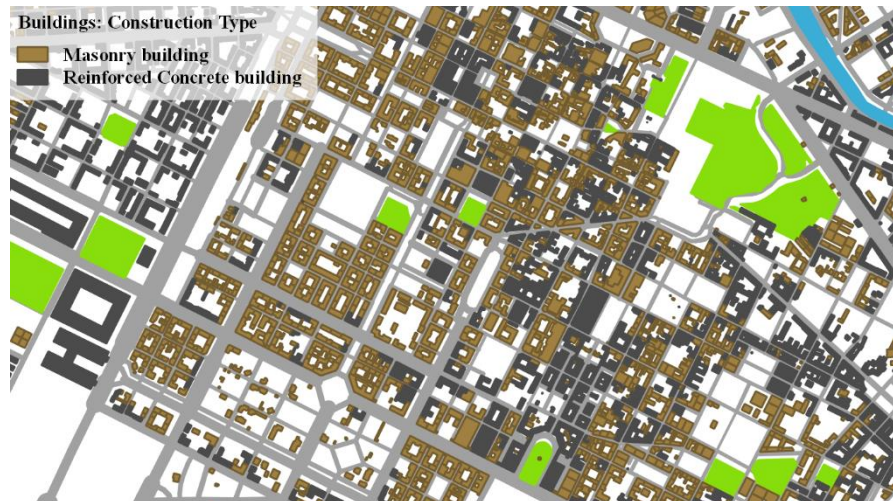


Fig. 3.10 - Visualizzazione categorizzata su QGIS (in base al materiale di costruzione).



Fig. 3.11 - Visualizzazione categorizzata su QGIS (in base al n° di piani).

Operazioni di *overlapping* tra informazioni inerenti a diversi piani di settore (es. Piani di Assetto Idrogeologico) hanno consentito il semplice confronto con prescrizioni e disposizioni più o meno vincolanti.

Tramite operazioni di *buffer* è stato possibile valutare la possibile area di

detriti generati dal collasso di edifici in caso di sisma (Fig. 3.12) e grazie a operazioni di *difference* determinare la larghezza della carreggiata libera da ingombri (Fig. 3.13).



Fig. 3.12 - Esempio di operazione buffer per ottenere il layer "Debris Area".



Fig. 3.13 - Esempio di operazione difference per ottenere i layer "No-Practicable Roads" e "Practicable Roads".

Nel caso specifico di Torino, l'aggiunta di ulteriori layer relativi ai diversi tipi di servizi a rete (Fig. 3.14), ha consentito lo sviluppo di studi e verifiche specifiche nei settori dell'ingegneria idraulica ed energetica (Cardoni *et al.*,

2019).



Fig. 3.14 - Layer relativo al sistema di distribuzione e trasmissione elettrica della virtual city di Torino. Fonte: Cardoni et al. (2019).

In più, grazie alla presenza di una console aggiuntiva all'interno del software QGIS, è stato possibile implementare algoritmi in linguaggio Python, capaci di fornire in maniera del tutto automatizzata risultati prefissati.

La messa a sistema di tutto questo, sommato all'integrazione con risultati derivanti da verifiche strutturali, analisi multicriterio e applicazioni con logica *fuzzy* – approfondite in seguito – rende il GIS un potente strumento per offrire una visione globale degli effetti potenziali dei diversi tipi di rischio sul sistema urbano – e su quello delle infrastrutture viarie in particolare. La visualizzazione aiuta a individuare in maniera immediata gli elementi critici presenti e a facilitare l'elaborazione di future azioni e strategie di mitigazione.

Il framework proposto, allora, si pone come obiettivo trasversale il superamento della vecchia concezione secondo cui il GIS era considerato esclusivamente come strumento per la gestione di dati territoriali georiferiti, associandogli, se opportunamente integrato con un'ulteriore serie di strumenti, una nuova funzione dinamica di modellazione di problemi spaziali e di creazione di sistemi cartografici ad hoc.

Per ciò che concerne gli altri strumenti utilizzati, specifici riferimenti saranno offerti all'interno dei paragrafi successivi perché applicati alla valuta-

zione di singoli parametri. In particolare, l'impiego del SAP2000 e del linguaggio MATLAB (2018) è risultato utile per le analisi strutturali e per le verifiche di danno relative agli edifici in caso di sisma, mentre l'utilizzo di analisi multicriterio AHP e della logica fuzzy è risultato indispensabile per la valutazione delle condizioni puntuali di vulnerabilità delle infrastrutture e il loro livello di esposizione.

L'utilizzo di indici come mezzo di sintesi tra tutti gli strumenti adottati, in accordo anche con quanto già realizzato attraverso la definizione degli Indici di Operatività relativi alla Condizione Limite di Emergenza (Dolce *et al.*, 2013), rientra tra le tecniche resilienti di valutazione, per come già specificato nel *par. 1.2.3*: un'analisi comparativa siffatta è di più semplice e di immediata comprensione sia per stakeholder e per addetti ai lavori che per la comunità stessa a cui viene permesso, in questo modo, di aumentare la propria consapevolezza in relazione a problemi di loro natura, altrimenti, molto più complessi.

### 3.3 L'Indice di Rischio nella valutazione delle diverse alternative

In molte decisioni sui grandi rischi non è in gioco la scelta tra opzioni sicure e opzioni rischiose, ma quella tra diverse alternative rischiose (Beck, 2008).

Per come anticipato, questa scelta, anche nel caso della viabilità strategica va opportunamente indirizzata e motivata.

A tal riguardo, la definizione del sistema strategico di infrastrutture viarie qui proposta parte dalla comparazione del livello di rischio di diverse strade alternative che collegano la medesima origine (edificio strategico) alla medesima destinazione (area di attesa) o ad un'area di attesa diversa ma più conveniente per una serie di criteri descritti in seguito.

Si specifica che, ad oggi, i principali riferimenti di letteratura si concentrano maggiormente su misure di accessibilità e su valutazioni di infrastrutture extraurbane (Berdica & Eliasson, 2004; Taylor *et al.*, 2006), a differenza dell'ambito relativo alla viabilità interna urbana qui trattato.

La metodologia prevede di assegnare a ciascun percorso considerato un indice, detto Indice di Rischio  $I_R$ , funzione di molteplici variabili: l'infrastruttura stradale con  $I_R$  inferiore (corrispondente a un più alto livello di performance) rispetto a tutte le diverse alternative possibili (*Fig. 3.15*), sarà individuata come elemento del sistema urbano strategico, in qualità di percorso migliore da attraversare in condizioni di emergenza.

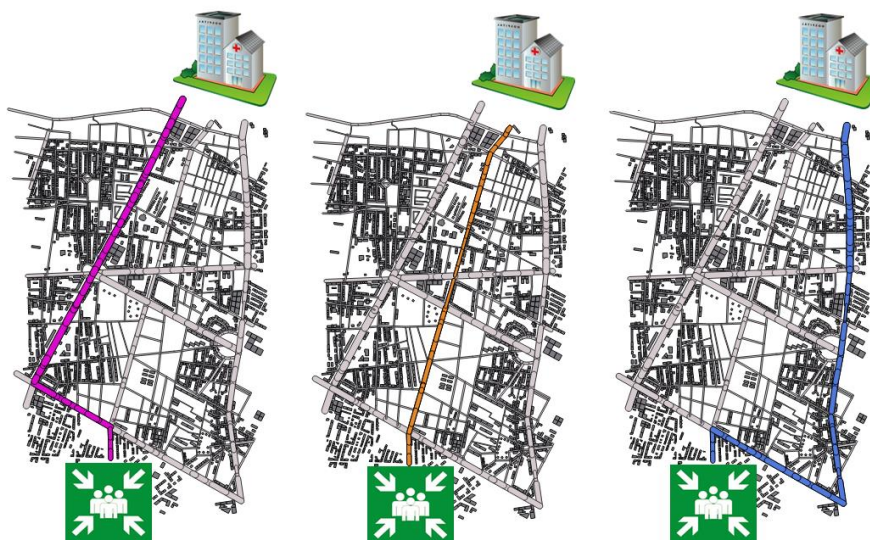


Fig. 3.15 - Percorsi alternativi possibile tra i quali individuare l'infrastruttura strategica.

La definizione di  $I_R$  nasce dalla formulazione universalmente riconosciuta di rischio e già introdotta nel Capitolo 1 con l'Eq. 1.2 per come segue:

$$I_R = I_H \times I_V \times I_E \quad \text{Eq. 2.1}$$

Nel dettaglio, si indica con:

$I_P$  l'indice di pericolosità, legato strettamente alla probabilità che un fenomeno (naturale o antropico) si verifichi; la sua definizione valuta in modo appropriato l'effetto generato sulla strada alternativa in esame dall'interdipendenza tra i vari tipi di pericolo e tra le diverse componenti del territorio;

$I_V$  l'indice di vulnerabilità, che dipende dalle caratteristiche proprie dell'infrastruttura considerata; la sua definizione permette di stimare la predisposizione della stessa ad essere danneggiata;

$I_E$  l'indice di esposizione, valutabile in funzione della stima dei fruitori della strada che sarebbero coinvolti nell'evento (esposizione diretta) e della popolazione residente che subirebbe un danno dal mancato funzionamento dell'infrastruttura (esposizione indiretta).

Per come già anticipato, la ricerca propone una strategia di integrazione tra analisi multicriterio e l'utilizzo dei Sistemi Informativi Geografici che, associata a tecniche sperimentali innovative, permetta di valutare adeguatamente il livello di rischio a cui è soggetta un'infrastruttura stradale, tenendo

in questo modo conto della complessità propria di un qualsiasi sistema urbano e delle relazioni che intercorrono tra le sue componenti fisiche e sociali.

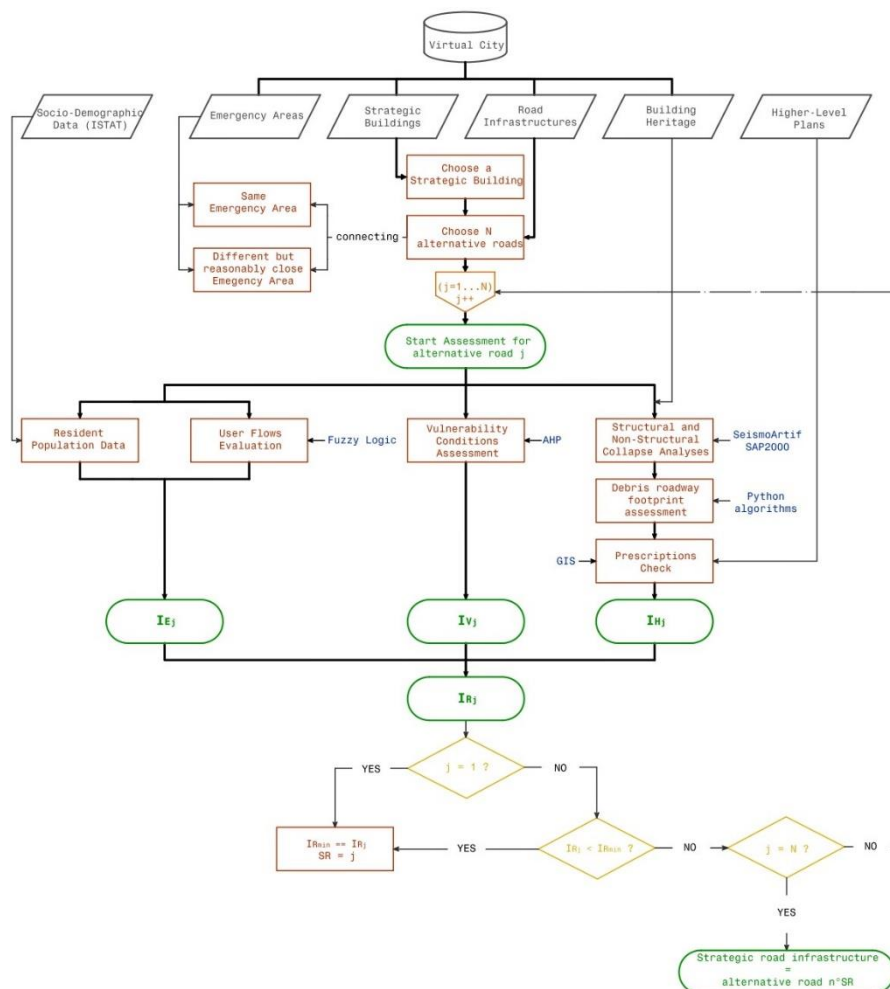


Fig. 3.16 - Flow chart relativo al processo di valutazione delle infrastrutture viarie strategiche.

La definizione dei singoli indici è il risultato di una pluralità di approcci (Fig. 3.16) convergenti tutti nell'obiettivo finale di supporto alle fasi di pianificazione dell'emergenza. Ogni indice proposto assumerà un valore variabile tra 0 e 1.

Una framework siffatto può essere definito *performance-based*, in quanto tutti i fattori che concorrono alla sua definizione sono rappresentativi delle



performance della strada in condizioni di emergenza: non si farà riferimento a parametri prestazionali tradizionali, a indicatori di stato relativi a specifiche classi di funzionalità o alle caratteristiche funzionali (es. aderenza, fessurazioni, difetti superficiali, etc.) su cui solitamente si basa la stima del livello di efficienza di un'infrastruttura viaria. In condizioni di emergenza, infatti, non assume importanza vincolante la perfetta regolarità del manto stradale o il basso livello di rumorosità che esso genera al passaggio dei mezzi di trasporto, ma piuttosto la capacità di un'infrastruttura di essere percorribile in sicurezza dagli utenti che devono giungere dall'edificio strategico all'area di emergenza e viceversa.

Si tenga conto, inoltre, che l'approccio adottato è un approccio di tipo territoriale: facendo eccezione per l'analisi del rischio sismico per cui la metodologia necessita di elaborazioni che richiedono dati e informazioni aggiuntive, in generale la ricerca tenta sì di offrire valutazioni specifiche e dettagliate, ma che allo stesso tempo siano di facile reperibilità, per permettere ai pianificatori una celere stima degli indici derivanti da informazioni normalmente già a disposizione di amministrazioni ed enti pubblici.

### 3.4 La Pericolosità nell'Indice di Rischio

La valutazione dell'indice di pericolosità è condotta facendo riferimento esclusivamente a eventi naturali, ossia ai disastri di tipo atmosferico e geologico, quali terremoti, frane, alluvioni, fenomeni di erosione costiera, etc. La trattazione, quindi, non tiene in considerazione ulteriori rischi antropici ritenuti di importanza secondaria, almeno in questa prima fase di implementazione della metodologia.

Contrariamente a ciò che avviene per le analisi *single-hazard*, è in continua crescita la promozione di studi che valutino gli effetti combinati che più tipi di pericolo possono generare sul territorio: l'implementazione di efficaci strategie di riduzione del rischio è possibile solo attraverso l'analisi di tutte le possibili minacce.

Valutazioni *multi-hazard*, però, non sono sempre semplici da sviluppare: il principale problema di tali approcci, infatti, è che i pericoli «*differiscono per natura, intensità, tempo di ritorno e le conseguenze che possono generare sugli elementi esposti*» (Carpignano *et al.*, 2009): in virtù di ciò è, per esempio, piuttosto complesso confrontare pericoli diversi perché diverse sono le loro unità di misura (es. normalmente l'intensità di un terremoto è valutata in termini di picco di accelerazione al suolo [ $m/s^2$ ] in funzione di quella di gravità, l'entità di un'alluvione è espressa come altezza massima del livello idrico [m], mentre per una frana o un incendio boschivo l'intensità

dipende dall'estensione dell'area coinvolta [m<sup>2</sup>]).

Nel tentativo di superare queste difficoltà, Kappes *et al.* (2012) identificano due filoni di studio presenti in letteratura:

1. gli approcci di tipo qualitativo che si basano su una classificazione dei diversi pericoli: il confronto tra le diverse tipologie di evento è consentito grazie alla definizione di soglie limite relative all'intensità e alla frequenza che, a loro volta, permettono di classificare i pericoli secondo un numero prefissato di categorie. Moran *et al.* (2004), il progetto ARMONIA (Delmonaco *et al.*, 2006; Menoni, 2006) e Heiniemann *et al.* (1998) hanno presentato nei loro studi diverse tipologie di classificazione *multi-hazard*;
2. gli approcci di tipo continuo e semiquantitativo che si basano sullo sviluppo di opportuni indici (Dilley *et al.*, 2005; El Morjani *et al.*, 2007).

Seguendo la seconda famiglia di approcci, la ricerca mira ad individuare, in caso di diverse tipologie di evento, quale strada alternativa mantiene inalterata la sua funzionalità e risulta essere, in maniera più probabile, percorribile e non interrotta.

In base a queste considerazioni, l'indice di pericolosità relativo ad ogni strada alternativa *j*-esima è valutato come combinazione lineare dei contributi di ogni singolo pericolo analizzato (Carpignano *et al.*, 2009):

$$I_{H_j} = \sum_{i=1}^n \alpha_i I_{H_{j_i}} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Avendo indicato con:

$I_{H_j}$ , l'indice di pericolosità della strada alternativa *j*-esima;

$n$ , il numero dei pericoli analizzati;

$I_{H_{j_i}}$ , l'indice di pericolosità della strada alternativa *j*-esima in riferimento al pericolo *i*-esimo;

$\alpha_i$ , un coefficiente che rappresenta il peso da attribuire al pericolo *i*-esimo in funzione dell'accuratezza delle analisi ad esso associate.

Contrariamente a quanto previsto nella metodologia proposta da Carpignano *et al.* (2009) dove  $\alpha_i$  è considerato un peso "politico", in questo caso può essere considerato un fattore "metodologico".

Trattandosi, infatti, di una metodologia che offre analisi più approfondite circa gli effetti di eventi sismici, sarà assunto un peso  $\alpha$  maggiore per questo tipo di pericolo rispetto ad altri, eventualmente da integrare in fasi successive

e sviluppi futuri.

Per la definizione di  $I_{Hj_i}$  la ricerca parte da alcune formulazioni già presenti in letteratura (Thierry *et al.*, 2008; Odeh, 2002), anche se non direttamente connesse al tema dell'identificazione della viabilità strategica. I contributi citati definiscono un indice di pericolosità come combinazione di un indice di frequenza, un indice di intensità e uno di estensione. In modo similare, la presente ricerca definisce  $I_{Hj_i}$  come prodotto di tre fattori:

$$I_{Hj_i} = P_i \times EX_{j_i} \times I_i \quad \text{Eq. 3.3}$$

Indicando con:

- $P_i$ , la probabilità di accadimento del pericolo i-esimo;
- $EX_{j_i}$ , l'estensione della strada alternativa j-esima potenzialmente interessata dal pericolo i-esimo;
- $I_i$ , il livello di intensità del pericolo i-esimo.

Nel caso specifico:

- $P_i$  è valutata in funzione del periodo di ritorno del pericolo i-esimo. La sua formulazione varia in accordo con il tipo di pericolo e con la tipologia di scenario considerati.
- $EX_{j_i}$  è valutata come percentuale di lunghezza della strada interessata dall'i-esimo pericolo, per come segue:

$$EX_{j_i} = \frac{\sum_{hs=1}^{n_h} L_{h_{si}}}{L_j} \quad \text{Eq. 3.4}$$

Indicando con:

- $L_{h_{si}}$ , la lunghezza del tratto interessato dall'i-esimo pericolo (*hazardous stretch*);
- $n_h$ , il numero degli *hazardous stretch*;
- $L_j$ , la lunghezza totale della strada alternativa j-esima.
- La metodologia proposta utilizza uno scenario *worst-case*, atto a valutare la condizione peggiore che possa verificarsi sulla j-esima strada alternativa. Lavorando in quest'ottica, il livello di intensità considerato per ogni tipo di pericolo è molto alto: per il caso sismico, ad esempio, lo scenario di riferimento è valutato agli Stati Limite Ultimi; i dati relativi al pericolo idraulico, invece, si riferiscono a mappe di pericolosità note dalle quali è possibile estrarre solo le aree interessate da alta pericolosità, etc.

In virtù di ciò, il livello di intensità  $I_i$  non influenza in modo considerevole la presente trattazione. Per le applicazioni relative ai casi studio, la formula di riferimento, in parziale sostituzione della Eq. 3.3, è:

$$I_{Hj_i} = P_i \times \frac{\sum_{hs=1}^{n_h} L_{hs_i}}{L_j} \quad \text{Eq. 3.5}$$

La valutazione dei tratti più suscettibili a interruzioni è condotta tramite un approccio deterministico in riferimento al rischio sismico (terremoto di progetto) e in relazione alle indicazioni di piani di settore e sovraordinati (come il Piano di Assetto Idrogeologico, il Piano di Emergenza di Protezione Civile comunale o provinciale, etc.) relativamente agli altri tipi di pericolo.

### 3.4.1 Pericolo sismico

Ogni giorno l'intera superficie terrestre è scossa da un'ottantina di terremoti. Fortunatamente nove su dieci sono di entità talmente lieve da non essere nemmeno avvertiti dall'uomo e solo cinque su mille hanno conseguenze rovinose su popolazione e sistemi antropici, tanto da poter essere considerati veri e propri disastri naturali.

Da diversi anni la ricerca scientifica ha tentato di opporsi alle distruzioni provocate dai terremoti, specialmente attraverso metodologie di valutazione del rischio sismico sugli edifici al fine di definire il danno atteso a seguito di una scossa. Anche gli Enti pubblici si sono mossi in tal senso, promuovendo normative ad hoc ed emanando provvedimenti atti a considerare opportunamente l'azione sismica sulle costruzioni, sia in fase di progettazione e realizzazione di strutture ex novo, che per eventuali interventi di adeguamento o miglioramento sull'esistente<sup>19</sup>.

Sebbene tanto ancora ci sarebbe da fare al fine di promuovere maggiormente politiche di messa in sicurezza e prevenzione sulle costruzioni e sugli edifici, nell'ambito della valutazione del rischio sismico ancor meno è stato fatto nei riguardi di una componente che abbiamo visto essere essenziale per

<sup>19</sup> In Italia, per esempio, si può far riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008, aggiornate nel 2018 (per le Costruzioni, N. T., 2008) per i criteri antisismici da attuare in fase di progettazione e adeguamento, o a provvedimenti come il cosiddetto Sisma Bonus per usufruire di agevolazioni fiscali previste per la realizzazione di interventi e per l'adozione di misure antisismiche sugli edifici.

la gestione dell'emergenza: il sistema delle infrastrutture viarie.

In merito a quanto analizzato nei precedenti capitoli, infatti, è possibile affermare che una valutazione completa ed esauriente del rischio sismico su un territorio non possa limitarsi esclusivamente allo studio dell'edificato, prescindendo dall'analisi del sistema dei trasporti, ma deve quanto meno valutarne gli effetti negativi dovuti alla loro interdipendenza in caso di evento. Come già anticipato, infatti, ogni componente del sistema urbano possiede una propria predisposizione al danneggiamento in conseguenza di un evento che, talvolta, potrebbe essere amplificata dai cosiddetti "effetti a cascata": l'analisi dell'interdipendenza tra danni subiti dal costruito e guasti alle infrastrutture, unita a considerazioni sulle loro mutue fragilità, contribuisce alla definizione di un nuovo approccio di pianificazione urbana maggiormente resiliente. A tal riguardo, la percorribilità delle infrastrutture viarie (e quindi la stima dei tratti interrotti) è valutata in funzione dei possibili ingombri di detriti generati dal crollo degli edifici, o di parti di strutture, ad esse prospicienti.



Fig. 3.17 - Strade interrotte per il collasso di alcune strutture in seguito a terremoti (Norcia (PG), agosto 2016 e Macerata, aprile 2018).

In riferimento a ciò, l'indice di pericolosità sismico,  $I_{Hj_1}$  può essere a sua volta espresso come somma di due aliquote separate:

$$I_{Hj_1} = I_{Hj_{1s}} + I_{Hj_{1ns}} \quad \text{Eq. 3.6}$$

Avendo indicato con:

$I_{Hj_{1s}}$ , la componente relativa a valutazioni sulle componenti strutturali degli edifici prospicienti (valida per strutture in muratura e per strutture in c.a.) in caso di sisma;

$I_{Hj_{1ns}}$ , la componente relativa a valutazioni sulle componenti non strutturali degli edifici prospicienti (valida per strutture in c.a.) in caso di sisma.

Le componenti strutturali di una costruzione ricadono nella cosiddetta struttura portante di un edificio, ossia l'insieme degli elementi strutturali (es. travi e pilastri per strutture in c.a.; muri portanti per strutture in muratura) atti a sostenere i carichi agenti (pesi propri degli elementi, carichi accidentali, azioni orizzontali come vento e/o sismi, etc.) in modo che l'edificio stesso possa essere utilizzato garantendo le prestazioni attese e il livello di sicurezza previsto dalle norme vigenti.

Sebbene nel tempo le regole di progettazione si siano evolute verso criteri di maggiore duttilità strutturale<sup>20</sup>, grazie anche all'utilizzo di materiali innovativi e sempre più efficienti capaci di garantire performance elevate, è necessario considerare che molti dei contesti urbani italiani sono caratterizzati dalla presenza di strutture piuttosto datate e, specie in prossimità dei nuclei storici, quasi totalmente in muratura.

Gli edifici siffatti possono essere paragonati a strutture "scatolari", in cui gli orizzontamenti (es. solai) funzionano come elementi flessionali che trasferiscono i carichi agli elementi verticali (muri portanti e non) i quali, a loro volta, compressi, li trasferiscono alle fondazioni. Finché i carichi sono verticali, il sistema funziona perfettamente; le cose si complicano quando è necessario assorbire anche carichi orizzontali, come, ad esempio, proprio in caso di sisma. L'osservazione di casi reali ha evidenziato che le murature offrono meno resistenza alle azioni perpendicolari al loro piano (azioni fuori piano) e che, essendo dotate di collegamenti di malte di calce o di cemento nel tempo soggetti a deterioramento, sono molto più facilmente danneggiabili in caso di terremoto rispetto ai più moderni edifici in cemento armato.

Per questi ultimi, un discorso a parte, però, va fatto per le componenti

---

<sup>20</sup> Per duttilità strutturale si intende la capacità di un sistema, in caso di sollecitazione, di deformarsi oltre il campo elastico senza sostanziali riduzioni della resistenza. In questi termini, la duttilità strutturale può essere considerata un sinonimo della resilienza ingegneristica introdotta nel Capitolo 1.

secondarie non strutturali: la ricerca, a tal riguardo, analizza il comportamento delle tamponature esterne che presentano spesso danneggiamenti anticipati rispetto a quelli delle parti strutturali, anche per terremoti di lieve e media intensità. Il collasso di questi elementi, in seguito a un sisma, può generare problemi di evacuazione importanti diventando fattore di rischio diretto per le vite umane (a causa della caduta di detriti) e indiretto per l'operatività di strutture e infrastrutture strategiche.

In base a queste considerazioni e alle formulazioni precedentemente definite (Eq. 3.3 e Eq. 3.5), è possibile associare le singole aliquote dell'indice  $I_{H_{j_1}}$  al prodotto tra le singole probabilità di accadimento dell'evento di riferimento e ai relativi indici di estensione, per come segue:

$$I_{H_{j_1}} = P_{1_s} \times EX_{j_{1_s}} + P_{1_{ns}} \times EX_{j_{1_{ns}}} \quad \text{Eq. 3.7}$$

Considerando lo stesso scenario sismico di riferimento sia per la valutazione relativa alle componenti strutturali che per quella relativa alle componenti non strutturali, la probabilità di accadimento è la medesima ( $P_{1_s} = P_{1_{ns}}$ ), per cui risulta:

$$I_{H_{j_1}} = \frac{P_1}{L_j} \left( \sum_{hs=1}^{n_{h_s}} L_{hs_{1_s}} + \sum_{hs=1}^{n_{h_{ns}}} L_{hs_{1_{ns}}} \right) \quad \text{Eq. 3.8}$$

Avendo indicato con:

- $P_1$ , la probabilità di accadimento dell'evento sismico di progetto;
- $L_j$ , la lunghezza totale della strada alternativa j-esima;
- $L_{hs_{1_s}}$ , la lunghezza del tratto interrotto (*hazardous stretch*) relativo a valutazioni sulle componenti strutturali degli edifici prospicienti in caso di sisma;
- $L_{hs_{1_{ns}}}$ , la lunghezza del tratto interrotto (*hazardous stretch*) relativo a valutazioni sulle componenti non strutturali degli edifici prospicienti in caso di sisma;
- $n_{h_s}$ , il numero degli *hazardous stretch* relativo a valutazioni sulle componenti strutturali;
- $n_{h_{ns}}$ , il numero degli *hazardous stretch* relativo a valutazioni sulle componenti non strutturali.

Si precisa che, se gli scenari sismici di riferimento fossero diversi per i due tipi di valutazione, oltre a variare la probabilità di accadimento ( $P_{1_s} \neq P_{1_{ns}}$ ), entrerebbe in gioco il fattore intensità considerato nella Eq. 3.3.

In particolare, specialmente per le analisi di vulnerabilità sismica delle componenti non strutturali degli edifici, considerazioni relative a terremoti di più bassa intensità ma con frequenza maggiore (e di conseguenza con una più elevata probabilità di accadimento) si rimandano ad applicazioni future risultando molto utili in quanto, per come già detto, elementi come le tamponature esterne sono spesso le componenti degli edifici a collassare prima.

#### 3.4.1.1 Lo scenario sismico di riferimento

La scelta dello scenario sismico è un passo fondamentale per l'implementazione dell'intera metodologia.

Scegliere in modo razionale e opportuno un evento di riferimento rispetto cui implementare lo scenario di danno globale, infatti, permette di mettere in relazione il virtuale al possibile e il possibile al reale: si potrebbe, allora, stimare l'evento di riferimento "migliore" in relazione agli eventi storici o, come nel caso in esame, ipotizzarlo in funzione delle caratteristiche di pericolosità dell'area.

A tal riguardo, la metodologia prevede l'utilizzo del software SeismoArtif, in grado di generare accelerogrammi artificiali, da cui poi ottenere i parametri utili per implementare le analisi dinamiche, a partire da uno specifico spettro in input.

La valutazione dello spettro di risposta è condotta secondo le prescrizioni delle NTC18, attraverso il programma sperimentale "Spettri di risposta" fornito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, grazie al quale è possibile ottenere gli spettri rappresentativi delle componenti delle azioni sismiche di progetto per ogni generico sito del territorio italiano.

All'interno dell'applicazione è necessario fornire dati circa l'individuazione della pericolosità del sito, informazioni circa la scelta della strategia di progettazione (in relazione principalmente alla vita nominale delle costruzioni oggetto di analisi e al loro coefficiente d'uso) e i parametri riferiti allo stato limite da utilizzare e alla risposta sismica locale (Fig. 3.18).

In riferimento allo stato limite considerato, tutte le applicazioni attuali della metodologia sono state valutate secondo uno Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV).



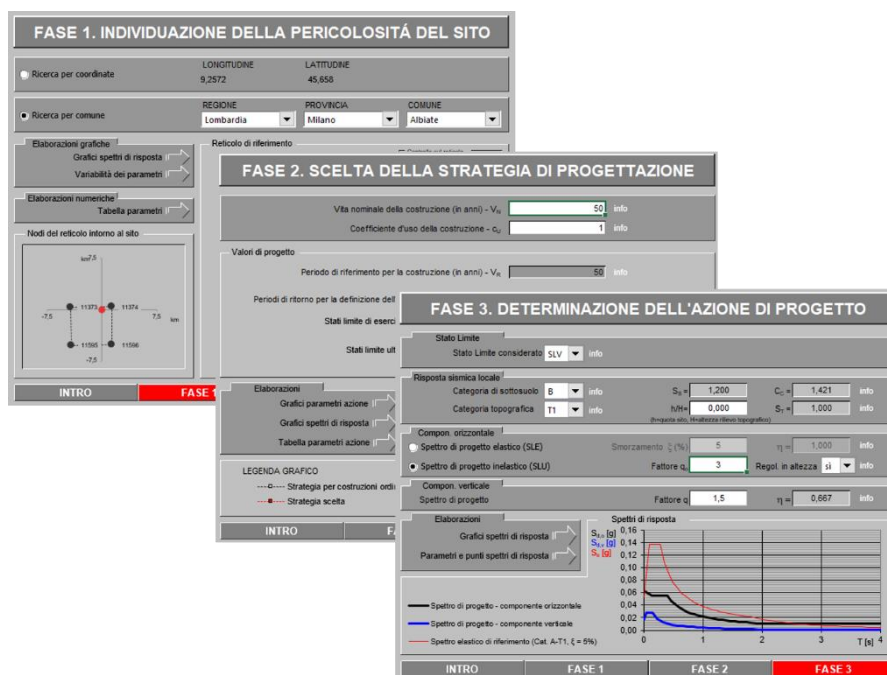


Fig. 3.18 - Dati in input nel programma "Spettri di risposta" – Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Ciò vuol dire che, dopo un evento sismico, le costruzioni sono soggette a crolli di elementi non strutturali e a considerevoli danni delle componenti strutturali, in seguito a una significativa riduzione della rigidezza e della resistenza rispetto alle forze orizzontali; le costruzioni mantengono ancora una rilevante resistenza nei confronti delle sollecitazioni verticali e garantiscono, nell'insieme, un rilevante margine di sicurezza rispetto al collasso globale.

Un terremoto di progetto valutato secondo lo stato limite SLV è assimilabile a un evento sismico di forte intensità, ma con probabilità di accadimento relativamente bassa.

In accordo con le prescrizioni delle NTC18, è possibile considerare per le strutture oggetto di analisi una vita nominale pari a 50 anni e, per lo stato limite prescelto, ottenere la relativa probabilità di accadimento  $P_1$  (Tab. 3.2).

Nei casi in esame, trattandosi di edifici residenziali e valutando lo scena-

rio sismico allo SLV, la probabilità di accadimento  $P_1$  è pari al 10% in riferimento a un periodo di ritorno di 474 anni<sup>21</sup>.

Tab. 3.2 - Probabilità di accadimento  $P_1$ .

Stati Limite		$P_1$
Stati Limite di Esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati Limite Ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Fonte: NTC18.

Determinato lo spettro e settate le impostazioni desiderate all'interno di SeismoArtif è possibile, per come richiesto, ottenere l'accelerogramma da utilizzare come scenario sismico di riferimento.

#### 3.4.1.2 Valutazione percorribilità in base al collasso degli edifici

La stima della componente  $I_{H_{j_{1s}}}$  dell'indice di pericolosità si basa sulla valutazione della percorribilità delle strade in caso di evento sismico, in funzione dei possibili ingombri di detriti generati dal crollo degli edifici ad esse prospicienti.

Questa fase della metodologia, fondamentale per l'implementazione dell'intero framework di metodo proposto, nasce dalla collaborazione tra il Laboratorio di Pianificazione dell'Ambiente e del Territorio dell'Università della Calabria e il *Disaster Resilience Simulation Laboratory* del Politecnico di Torino e può essere riassunta in due step principali:

1. la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici residenziali di un dato contesto urbano, tramite la previsione del danno potenziale di ciascuno di essi in riferimento a un particolare evento sismico di progetto;
2. la determinazione dell'area di ingombro dei detriti generati dal possibile collasso degli edifici una volta noto il livello di danno di ciascuno, in modo da valutare la percorribilità dell'infrastruttura considerata.

Il primo step è relativo all'applicazione del metodo proposto da Marasco

<sup>21</sup> Il tempo di ritorno  $T_R$ , la vita nominale  $V_N$  e la probabilità di accadimento  $P_1$  sono collegati dalla relazione matematica (NTC18, 2018):  $T_R = -\frac{V_N}{\ln(1-P_1)}$

et al. (2017), implementato attraverso analisi strutturali condotte con il supporto di strumenti come il software SAP2000 e algoritmi in Matlab.

L'algoritmo utilizzato si basa sulla definizione di una curva globale di capacità a taglio per ciascuna struttura analizzata (inizialmente modellata come sistema a più gradi di libertà MDOF).

Le analisi a collasso sono eseguite considerando un meccanismo di collasso globale di un telaio soggetto a una distribuzione orizzontale di forze proporzionali a una determinata forma modale (Fig. 3.19).

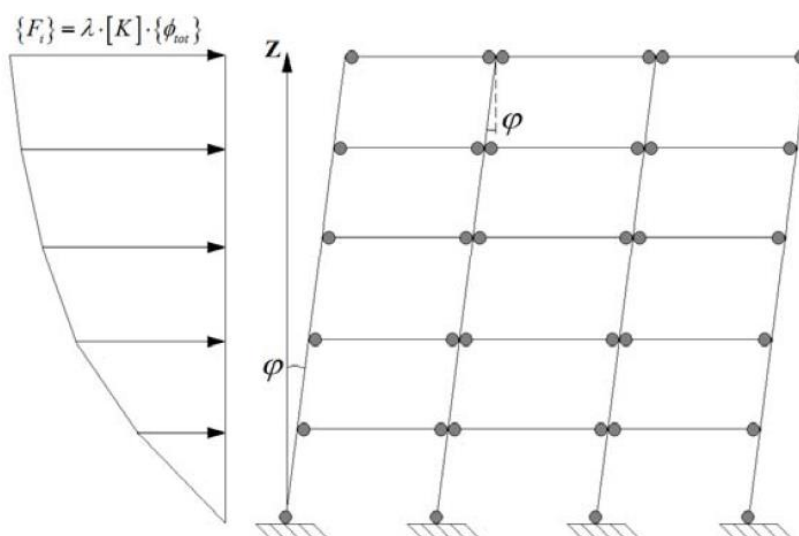


Fig. 3.19 - Meccanismo di collasso globale. Fonte: Marasco et al. (2017).

Per come già anticipato nel par. 3.2 relativamente alla fase di acquisizione delle informazioni e di costruzione della *virtual city*, i dati relativi alle caratteristiche strutturali e meccaniche degli edifici sono affetti da incertezze: la valutazione della capacità globale del singolo edificio, allora, non può prescindere da un approccio statistico.

A tal riguardo, i parametri geometrici, meccanici e costruttivi di ogni edificio sono considerati come variabili aleatorie, i cui valori possono variare all'interno di limiti prestabiliti.

Nel tentativo di limitare l'influenza di tali incertezze, la formulazione prevede l'applicazione del cosiddetto Metodo Monte Carlo (MCS) che include una serie di simulazioni capaci di riprodurre e studiare sistemi empirici in forma controllata (Merriam-Webster, Inc. 1994).

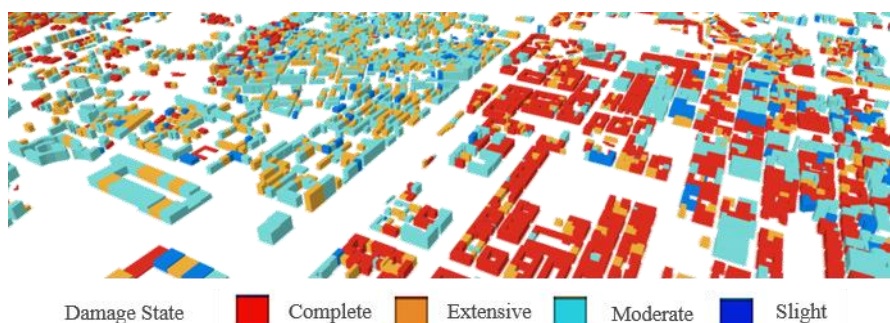
Dalle simulazioni implementate, conducendo più di cento iterazioni, si ottiene un insieme di curve di capacità associate a ogni predefinito dataset di

parametri, dalle quali è possibile stimare la curva di capacità mediana, assunta come rappresentativa dell'edificio analizzato.

I parametri inerenti le curve di capacità mediane sono ottenuti tramite un algoritmo Matlab e automaticamente trasferiti in SAP2000, usufruendo delle Application Programming Interface (API), al fine di definire diversi modelli strutturali di edifici localizzati all'interno della *virtual city*.

Assimilare la risposta dinamica nonlineare del modello strutturale a un'unica curva di capacità, consente di analizzare l'edificio come un sistema equivalente a un grado di libertà SDOF e quindi di ridurre notevolmente il costo computazionale necessario per calcolare la risposta di un grande numero di strutture come quelle presenti in un sistema urbano.

Considerato uno scenario sismico (*par. 3.4.1.1*), calibrato per essere rappresentativo dello specifico contesto territoriale, al fine di valutare la risposta dinamica di ogni struttura, sono state condotte analisi dinamiche non lineari. In accordo con il massimo spostamento in testa così ottenuto, in *Fig. 3.20* è possibile osservare la stima del il più probabile livello di danno (*slight, moderate, extensive, complete*) in riferimento a specifiche soglie definite da Ghobarah (2004).



*Fig. 3.20 - Categorizzazione del patrimonio edilizio in base al livello di danno.*

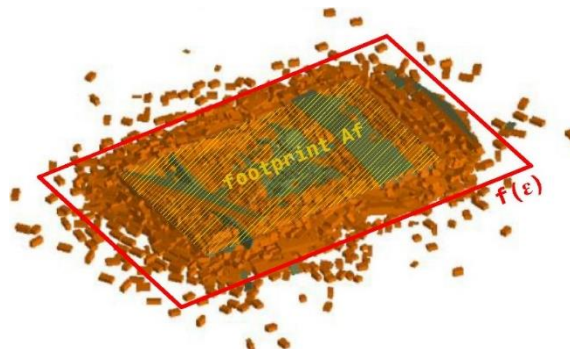
Per ogni edificio, il livello di danno così determinato assume la forma di attributo nel relativo shapefile della *virtual city*, insieme alle caratteristiche geometriche e meccaniche introdotte nel *par. 3.2* (*Fig. 3.21*).

Il secondo step della metodologia mira a valutare l'area di ingombro dei detriti generati dal collasso degli edifici prospicienti le strade e la conseguente possibile interruzione di queste ultime.

	ID	Perimet[m]	Area [m2]	CX [m]	CY [m]	Ixx[m4]	Iyy[m4]	Damage_Lev
1	1	57.00	208.15	60639...	43591...	3143.7...	4118.24...	Extensive
2	2	48.25	126.92	60639...	43591...	710.51...	2755.11...	Extensive
3	3	36.88	85.24	60735...	43543...	592.62...	610.936...	Complete
4	4	88.93	366.71	60729...	43537...	15968...	9094.52...	Extensive
5	5	88.30	309.92	60691...	43540...	31591...	2652.82...	Complete
6	6	51.29	123.89	60736...	43544...	3098.7...	817.0840...	Complete
7	7	34.93	68.91	60737...	43544...	672.43...	285.963...	Extensive
8	8	30.42	48.14	60737...	43544...	269.35...	169.03438	Extensive
9	9	59.39	209.08	60736...	43550...	2418.1...	5648.28...	Extensive
10	10	73.71	267.03	60722...	43555...	6774.8...	6307.993...	Extensive
11	11	72.24	269.57	60680...	43558...	10204...	6961.53...	Complete
12	12	56.82	155.12	60615...	43592...	1677.9...	3788.33...	Extensive
13	13	64.15	207.83	60741...	43549...	1890.6...	8705.89...	Complete
14	14	127.17	751.83	60739...	43548...	134836...	23931.9...	Complete
15	15	57.24	143.46	60742...	43548...	888.49...	5457.722...	Extensive
16	16	62.21	237.81	60742...	43548...	3733.2...	6001.98...	Extensive
17	17	66.55	249.61	60744...	43549...	3161.7...	9462.22...	Extensive
18	18	54.16	178.10	60590...	43545...	3741.3...	1848.17...	Extensive
19	19	52.01	166.94	60589...	43545...	2949.0...	1807.209...	Extensive
20	20	53.90	177.00	60589...	43544...	3625.6...	1859.94...	Extensive

Fig. 3.21 - Nuovo attributo per lo shapefile relativo agli edifici.

Per la valutazione delle aree di ingombro nel caso di collasso di edifici in muratura è utilizzato il metodo semplificato proposto da Domaneschi *et al.* (2019) che determina l'area di detriti in funzione delle dimensioni geometriche in pianta dell'edificio.

Fig. 3.22 - Valutazione dell'area di detriti generata dal collasso di strutture in muratura. Fonte: Domaneschi *et al.* (2019).

In particolare, nell'ipotesi di strutture rettangolari regolari in pianta, il

metodo prevede di amplificare l'area di base della struttura di un fattore di scala  $\varepsilon$ , per come segue:

$$\varepsilon = 1.228 + 0.07869 \cdot \frac{a}{b} + 0.05626 \cdot \left( \frac{A_f}{V_b} \cdot \frac{h_b^2}{a} \right) \quad \text{Eq. 3.9}$$

Avendo indicato con:

- $a$ , la dimensione minima della pianta dell'edificio;
- $b$ , la dimensione massima della pianta dell'edificio;
- $A_f$ , l'area di base dell'edificio;
- $V_b$ , il volume totale di muratura dell'edificio;
- $h_b$ , l'altezza totale dell'edificio.

Nel caso di strutture a L, si procede nello scomporre l'area di base in rettangoli semplici e operare il fattore di scala per ciascuno di essi. Per ulteriori strutture non regolari in pianta, si assume come area di base di riferimento il rettangolo (o i più rettangoli) capace di circoscrivere la pianta effettiva.

Per gli edifici in cemento armato, invece, l'area di ingombro è calcolata in funzione della distanza massima raggiungibile dai detriti durante la caduta. Questo moto, descritto sinteticamente nella Fig. 3.23, è composto da due aliquote: la prima, assimilabile al moto del proiettile e dipendente dalla misura  $d_1$ , e la seconda  $d_2$  che, da studi empirici (Lu *et al.*, 2019) è stata dimostrata essere circa il doppio di  $d_1$ .

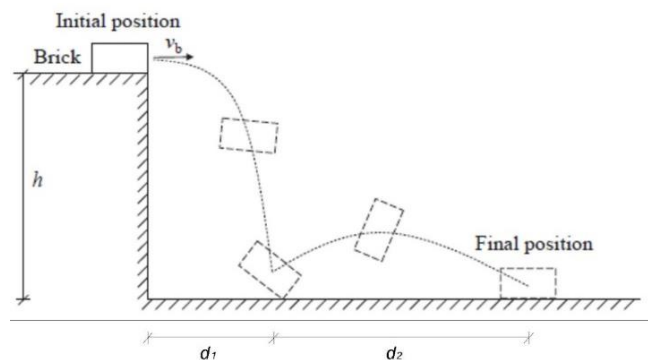


Fig. 3.23 - Diagramma schematico del moto dei detriti. Fonte: Lu *et al.* (2019).

In base a tali osservazioni, l'area di ingombro dei detriti generati dal collasso degli edifici in cemento armato è calcolata considerando la gittata del

moto del proiettile, ipotizzando che la velocità di espulsione sia orizzontale ( $v_b = v_{b_x}; v_{b_y} = 0$ ). Da ciò risulta che:

$$d = d_1 + d_2 = 3 \cdot d_1 = 3 \cdot v_b \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{Eq. 3.10}$$

Una volta note le aree generate dai detriti, è possibile determinare l'ingombro sulla carreggiata e verificare se la strada considerata sia interrotta o meno.

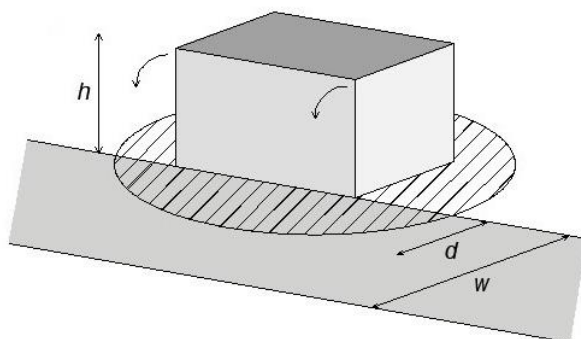


Fig. 3.24 - Schema relativo alla condizione di percorribilità.

In particolare, tramite il confronto tra la larghezza della carreggiata  $w$  e l'ingombro generato  $d$  (Fig. 3.24) si ottiene la condizione di percorribilità seguente:

- (1) se  $w - d \leq 2 m$ , il tratto è considerato non percorribile;
- (2) se  $w - d > 2 m$ , il tratto è considerato percorribile.

La larghezza pari a  $2 m$  è considerata rappresentativa di un generico mezzo di soccorso che, quindi, in caso di evento, a seconda della situazione (1) o (2) potrebbe raggiungere o meno la popolazione colpita attraversando quella determinata arteria stradale.

Si fa notare che è sufficiente che la condizione di percorribilità non sia verificata anche solo in corrispondenza di una sola sezione stradale, affinché l'intero tratto venga considerato non percorribile.

Dal punto di vista computazionale, sia il calcolo dell'area di detriti che la condizione di percorribilità sono operazioni automatizzate dall'utilizzo di algoritmi in Python supportati da una speciale console presente in QGIS.

La potenza del metodo sta, quindi, nell'unire e sfruttare il potere di algoritmi codificati e automatici e le potenzialità dei GIS. Tramite questa sintesi,

infatti, è possibile comparare rapidamente elementi fisici di differente forma e natura che normalmente, attraverso le tradizionali relazioni alfanumeriche, non sarebbero confrontabili tra loro.

Il prodotto finale prevede di ottenere in output, dopo il lancio del codice, nuovi shapefile in cui ogni geometria rappresenta rispettivamente:

1. l'area totale dei detriti generati dal collasso delle strutture con livello di danno *complete*;
2. l'area di ingombro dei detriti sulle carreggiate;
3. di colore rosso, le strade non più percorribili perché interessate da ingombri tali da non permettere il passaggio di mezzi di soccorso;
4. di colore verde, le strade ancora libere e attraversabili perché non ostruite (o ostruite in minima parte) da detriti.

Oltre alla visualizzazione per colore, è possibile conoscere singolarmente, per ogni infrastruttura stradale, se la condizione di percorribilità non è verificata a causa del collasso di edifici in c.a., di edifici in muratura, o in entrambi i casi (Fig. 3.25).

ID	NOME	width	buffer	Lenght [m]	PERCORR_mu	PERCORR_ca
206	Via Salvador Alle...	6.00000	3.00000	84.30	tratto percorribile	tratto non percor...
207	Via Giacomo Brod...	3.50000	1.75000	83.27	tratto percorribile	tratto non percor...
157	Contrada Profeta	5.00000	2.50000	153.14	tratto percorribile	tratto percorribile
209	Piazza della Liberta	4.50000	2.25000	145.97	tratto percorribile	tratto non percor...
60	Via Giacomo Brod...	4.50000	2.25000	210.10	tratto percorribile	tratto non percor...
11	Via F. De Pisis	6.00000	3.00000	143.52	tratto percorribile	tratto non percor...

Fig. 3.25 - Esempio output strade con attributi relativi alle condizioni di percorribilità.

Una volta note le strade interrotte, è possibile calcolare la lunghezza  $L_{hs_{1s}}$  degli *hazardous stretch* e procedere con il calcolo dell'indice di pericolosità  $I_{H_{j_{1s}}}$  per come stabilito dalla relazione Eq. 3.8

### 3.4.1.3 Valutazione percorribilità in base al collasso delle tamponature esterne

La stima della componente  $I_{H_{j_{1ns}}}$  dell'indice di pericolosità si basa sulla valutazione della percorribilità delle strade in caso di evento sismico, in funzione dei possibili ingombri di detriti generati dall'espulsione delle tamponature



nature esterne degli edifici in c.a. prospicienti le infrastrutture stradali di interesse.

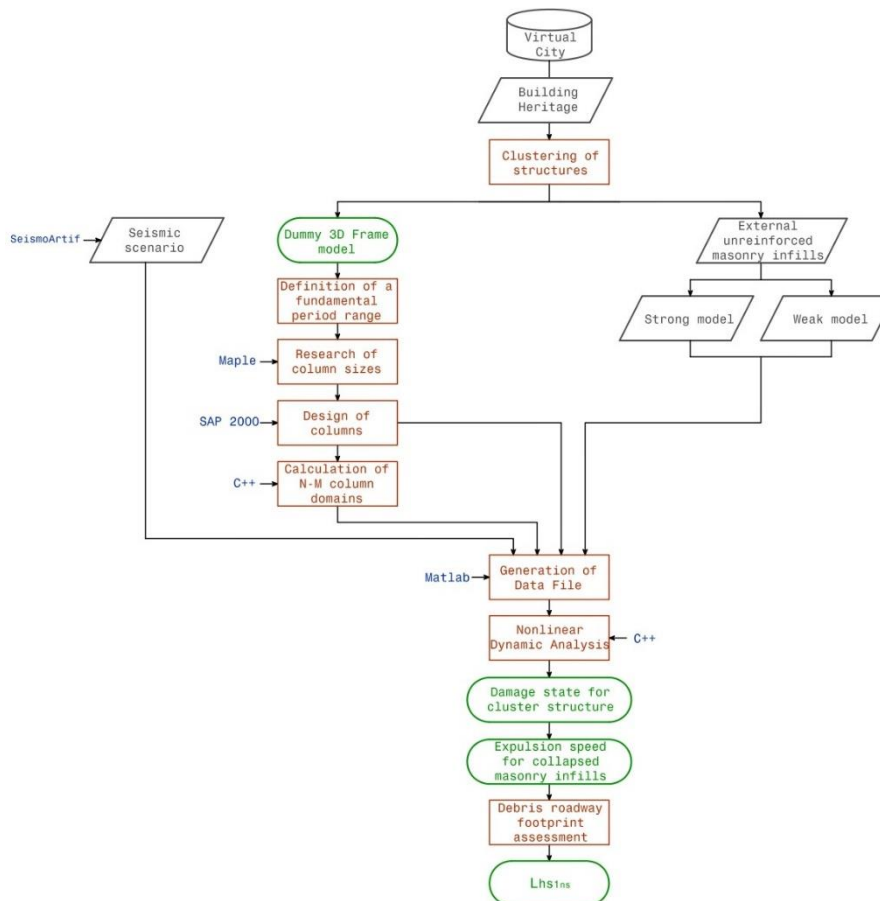


Fig. 3.26 - Flow chart relative alla valutazione della percorribilità in funzione del collasso delle tamponature esterne.

Per come anticipato, valutazioni relative agli elementi secondari rivestono grande importanza per la predisposizione di strategie di prevenzione e mitigazione del rischio sismico, in quanto il collasso di tali componenti è spesso anticipato rispetto al cedimento dell'intera struttura.

In particolare, il comportamento fuori piano (OOP) dei pannelli non è attualmente opportunamente trattato né in termini normativi all'interno di direttive e regolamenti sismici italiani ed europei, né attraverso macro-modelli presenti in letteratura che, nella maggior parte dei casi, si basano ancora su un comportamento fuori piano di tipo elastico lineare. Ciò comporta,

spesso, errori di stima nei fattori di sicurezza, ignorando fenomeni importanti di danneggiamento o di collasso anticipato.

Questa fase della metodologia nasce dalla collaborazione tra due gruppi di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università della Calabria, afferenti a due settori diversi: il Laboratorio di Pianificazione dell'Ambiente e del Territorio (ICAR/20 – Tecnica e Pianificazione Urbanistica) e il Laboratorio di Ingegneria dei Materiali e delle Strutture (ICAR/09 – Tecnica delle Costruzioni). Il metodo proposto, rappresentato in modo schematico nel flow chart in Fig. 3.26, può essere considerato di carattere semplificato per l'applicazione a contesti a larga scala, e prevede il *clustering* degli edifici prospicienti le strade considerate in base al numero di piani  $n_p$ .

Per le categorie così identificate è individuato un set di parametri capaci di riprodurre, in modo sintetico ma appropriato, le specifiche variabilità strutturali e non strutturali. In particolare, per ogni cluster con fissato numero di piani, sono condotte più analisi al variare:

- del periodo fondamentale della struttura, valutato all'interno di un range compreso tra un  $T_{p_{min}}$  e un  $T_{p_{max}}$ ;
- della lunghezza della campata, valutata in corrispondenza del valore massimo pari a  $L_{c_{max}}$  e del valore minimo  $L_{c_{min}}$  assunti per il prefissato numero di piani;

della tipologia della tamponatura, nel caso di tamponatura “debole” e tamponatura “forte” (Fig. 3.27). Per “debole” si intende una tamponatura a doppio strato con blocchi a fori orizzontali da 12 cm, strato isolante e 1 cm di intonaco per lato. Per “forte” si intende una tamponatura monostrato con blocchi a fori verticali da 30 cm e 1 cm di intonaco per lato.

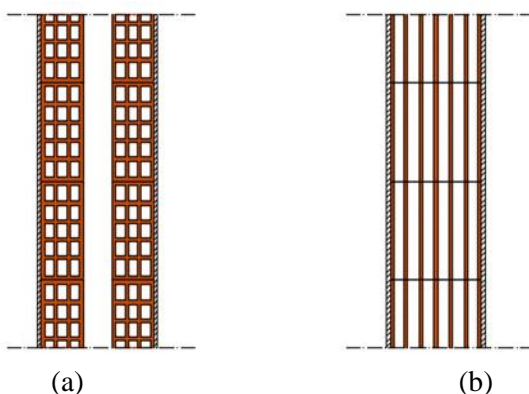


Fig. 3.27 - Tipologia di tamponature analizzate: tamponatura debole (a) e tamponatura forte (b).

Una struttura intelaiata rappresenta il modello di riferimento semplificato (Fig. 3.28), costituito da:

- telaio 3D monocampata di lunghezza  $L_c$  variabile per come stabilito nelle ipotesi;
- impalcato rigido di massa  $m$ ;
- struttura regolare in pianta e in altezza;
- pianta a maglia quadrata;
- pilastri quadrati;
- variazione lineare della rigidezza  $K$  di piano, fissata al 20%;
- altezza di interpiano costante, pari a  $h_p = 3 m$ .

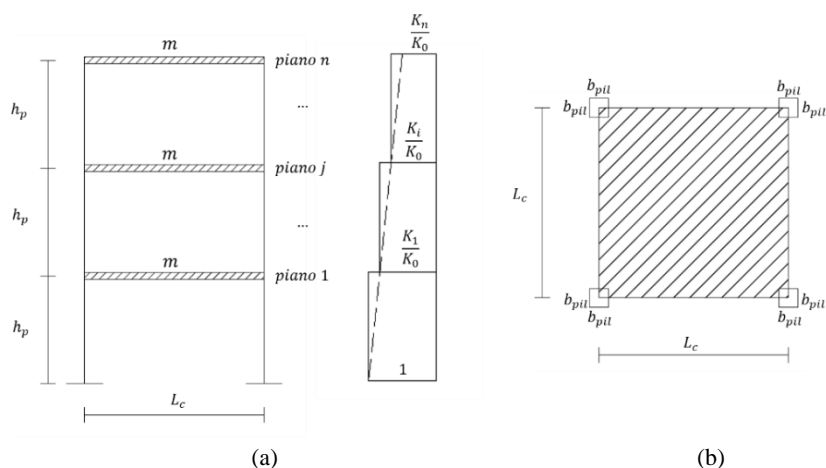


Fig. 3.28 - Modello strutturale semplificato rappresentato in elevazione (a) e in pianta (b).

I parametri fissati, invece, sono quelli relativi ai materiali, per cui si ipotizza calcestruzzo di classe C20/25 ( $R_{ck} = 25 MPa$ ) e acciaio di classe B450C ( $f_{y_{nom}} = 450 MPa$ ).

Si specifica che tali ipotesi semplificate relative allo scheletro strutturale sono ragionevoli in quanto gli elementi portanti sono, in questo caso, componenti fittizie e che la metodologia ha come obiettivo finale la valutazione del comportamento delle sole tamponature.

La modellazione delle tamponature fa riferimento agli studi di Furtado *et al.* (2016), secondo i quali il comportamento nel piano (IP) e fuori piano (OOP) del pannello possono essere assimilati a quelli di due bielle diagonali e un elemento centrale (Fig. 3.29).

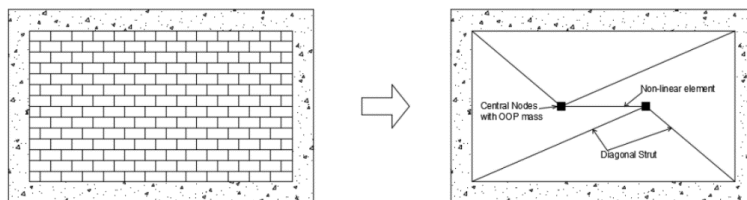


Fig. 3.29 - Dalla tamponatura reale alla schematizzazione prevista dal modello di Furtado. Fonte: Furtado *et al.* (2016).

In particolare, la massa è ripartita fra i due nodi centrali e la rigidità fra le bielle diagonali per come segue:

- ogni nodo dell'elemento centrale riceve una massa  $M_1 = M_2 = 0,5 M_{EM}$ , cioè pari a metà della massa eccitata dal primo modo OOP;
- l'elemento centrale è rigido per ogni sollecitazione, eccetto quella assiale;
- le due bielle diagonali sono caratterizzate ognuna da una rigidità  $I_1 = I_2 = I_{eq}$ ;
- la connessione biella-elemento centrale permette soltanto la rotazione nel piano così da trasferire il momento flettente da un tratto di biella all'altro.

Le due bielle diagonali, spezzate centralmente dall'elemento lineare, sono modellate come elementi trave con rigidità infinita per le azioni nel piano. Il loro scopo non si esaurisce però alla semplice trasmissione di forze di trazione/compressione (per come disposte geometricamente). Ognuna di esse lavora come trave appoggiata fra gli estremi di una diagonale del pannello (Fig. 3.30), dotata di massa distribuita nulla e massa concentrata centrale pari a metà della massa eccitata dal primo modo OOP. Assegnando alle bielle un'inerzia OOP finita, queste si infletteranno, resistendo alle forze inerziali concentrate nelle relative masse. Il vantaggio consiste nel poter simulare la resistenza fuori piano senza ricorrere a modelli con elementi a fibre discrete.

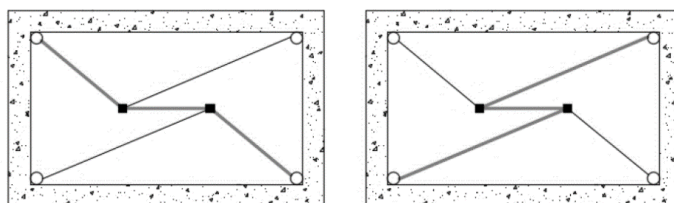


Fig. 3.30 - Schematizzazione delle due bielle diagonali. Fonte: Furtado *et al.* (2016).

Il comportamento nel piano e quello fuori piano sono schematicamente

riassunti nelle Fig. 3.31 e Fig. 3.32: l'utilizzo di legami non lineari e la valutazione dell'interazione IP-OOP permettono di tenere in considerazione l'effetto del danneggiamento nel piano sulla risposta fuori piano, fornendo così previsioni più realistiche circa i diversi tipi di collasso.

Per maggiori informazioni circa le caratteristiche di modellazione delle tamponature, si può fare riferimento al modello di Mazza & Donnici (2018; 2019).

Il primo step consiste nel definire il range di periodi propri della struttura cluster, da cui deriva una nuova serie di modelli da analizzare. In particolare, il periodo proprio della struttura  $T_p$  varia tra un valore minimo  $T_{p_{min}}$  e un valore massimo  $T_{p_{max}}$ .

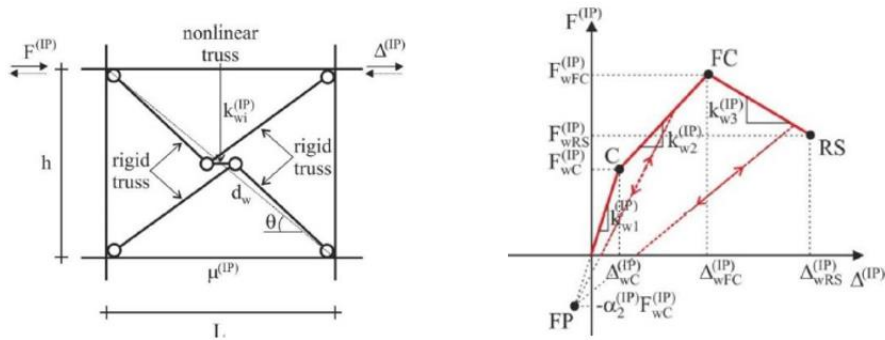


Fig. 3.31 - Comportamento e legame modello tamponatura nel piano (IP). Fonte: Mazza & Donnici (2018).

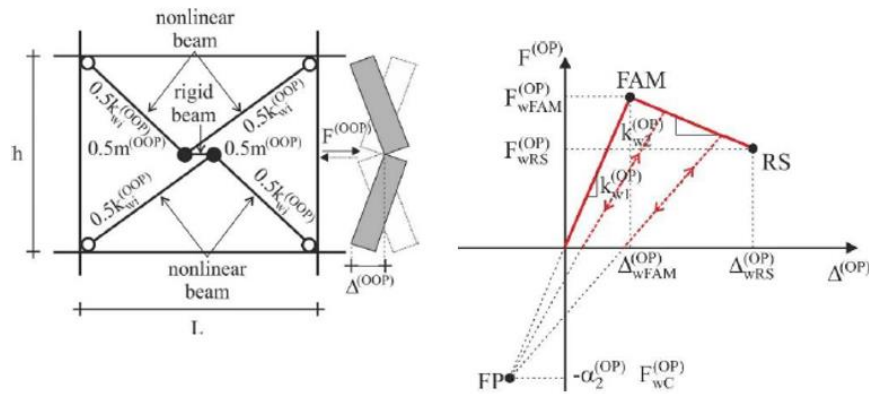


Fig. 3.32 - Comportamento e legame modello tamponatura fuori piano (OOP). Fonte: Mazza & Donnici (2018).

La valutazione dei valori limite è funzione delle dimensioni in pianta delle

strutture, in accordo con il Decreto Ministeriale 1996:

$$T_p = 0,1 \frac{H}{\sqrt{B_{min}}} \quad \text{Eq. 3.11}$$

Avendo indicato con:

$H$ , l'altezza totale della struttura, valutata come  $H = h_p \times n_p$ ;

$B_{min}$ , la dimensione minima del rettangolo che circoscrive la struttura in pianta (Fig. 3.33).

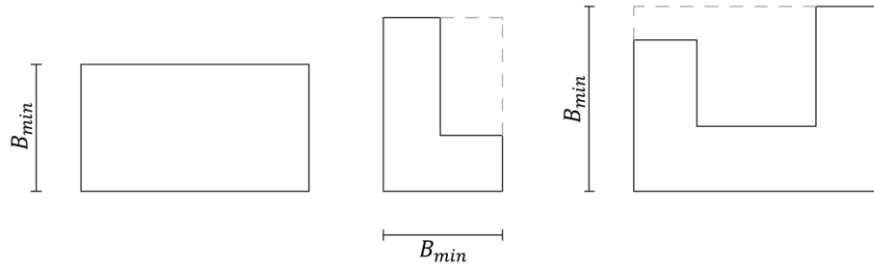


Fig. 3.33 - Valutazione di  $B_{min}$ .

Nel set delle strutture cluster con fissato numero di piani, si valuta  $B_{min}$  per ogni edificio e si considera il valore massimo  $B_{min_{max}}$  e il valore minimo  $B_{min_{min}}$  ottenuti.

Per ogni cluster risulta, allora:

$$T_{p_{min}} = 0,1 \frac{H}{\sqrt{B_{min_{max}}}} \quad \text{Eq. 3.12}$$

$$T_{p_{max}} = 0,1 \frac{H}{\sqrt{B_{min_{min}}}}$$

Discretizzando secondo un  $\Delta T = 0,05 \text{ s}$  l'intervallo  $T_{p_{min}} \leq T_p \leq T_{p_{max}}$ , la caratterizzazione modale dei modelli avviene tramite l'implementazione di un codice Maple (Fig. 3.34) in grado di:

- determinare con processo iterativo la dimensione di base del pilastro del primo piano  $b_{pil_1}$ , in funzione del periodo proprio  $T_{p_i}$  fissato;

- calcolare le dimensioni dei pilastri  $b_{pil_{2...n_{p_i}}}$  per i piani successivi, in funzione della legge lineare di variazione della rigidezza;
- reiterare il processo per  $T_{p_{i+1}} = T_{p_i} + \Delta T$  partendo da  $T_{p_{min}}$  e fino al raggiungimento di  $T_{p_{max}}$ .

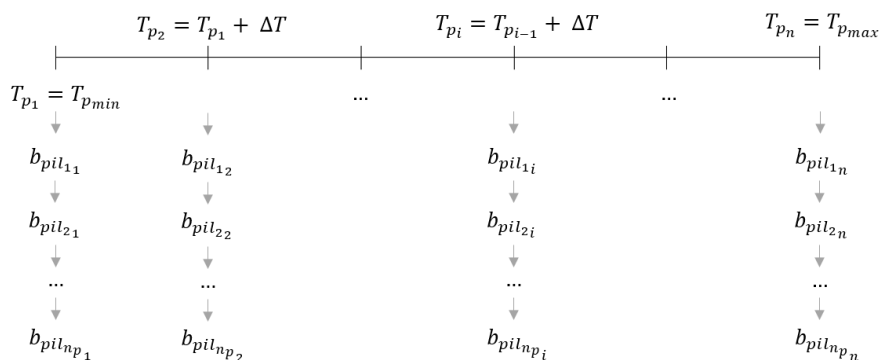


Fig. 3.34 - Processo implementato tramite codice Maple.

Il secondo step della metodologia ha come obiettivo la progettazione dei pilastri e il calcolo della loro armatura.

Tramite il software SAP2000 si crea il modello di telaio 3D monocampata (Fig. 3.35):

- i pilastri sono infinitamente rigidi assialmente e le dimensioni di base variano al variare del  $T_{p_i}$  fissato, in base ai valori ottenuti dal codice Maple;
- le travi hanno dimensioni 30x60 e sono assunte infinitamente rigide;
- vincoli a incastro sono previsti alla base della struttura e diaframmi di piano costruiti tramite vincoli “*constraint*” cui vengono associate masse concentrate in corrispondenza di nodi baricentrici;
- la lunghezza della campata assume valore pari a  $L_{c_{min}}$  o pari a  $L_{c_{max}}$  a seconda del caso considerato.

Determinati gli scarichi sulle travi con calcolo agli Stati Limite Ultimi, è possibile definire su SAP2000 i *Load Pattern*, ossia le tipologie di distribuzioni spaziali dei carichi (es. carichi permanenti, carichi da neve, carichi sismici, etc.).

Nel caso in esame sono stati assegnati quattro *Load Pattern*, in funzione dei carichi permanenti, di quelli accidentali e per le due diverse direzioni del sisma, tutti valutati secondo le prescrizioni delle NTC18.

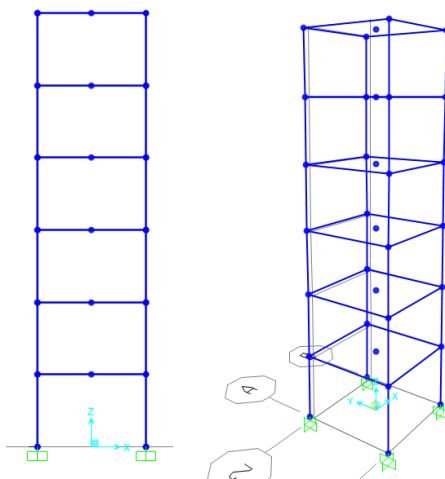


Fig. 3.35 - Modello di telaio 3D monocampata.

Lanciando le analisi in funzione delle combinazioni agli Stati Limite Ultimi e operando secondo Progetto e non Verifica, si ottengono informazioni relative alle armature longitudinali dei pilastri (Fig. 3.36), utili per le fasi seguenti della metodologia, tra cui il successivo calcolo dei domini N-M dei pilastri per ciascun caso attraverso un codice C++ ad hoc.

Le informazioni ottenute come output degli step precedenti contribuiscono alla realizzazione del file da utilizzare come input per le analisi dinamiche nonlineari atte a valutare il danneggiamento delle tamponature per ogni cluster di edifici.

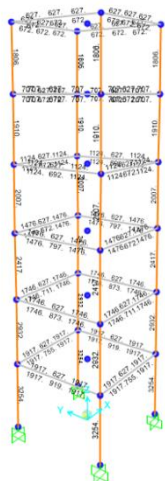


TABLE: Concrete Design 1 - Column Summary Data - Italian NTC 2008

Frame	DesignSect	DesignType	PMMCombo	PMMArea	VMajCombo	VMajRebar	VMinRebar
Text	Text	Text	Text	m2	Text	m2/m	m2/m
1	PIL1	Column	Ex+0.3Ey	0.003254	-0.3Ex-Ey (Sp)	0.00157	0.00157
2	PIL2	Column	Ex+0.3Ey	0.002932	Ex-0.3Ey (Sp)	0.001057	0.001057
3	PIL3	Column	Ex+0.3Ey	0.002417	Ex+0.3Ey (Sp)	0.000956	0.000956
4	PIL4	Column	Fondamental	0.002007	0.3Ex+Ey (Sp)	0.000794	0.000794
5	PIL5	Column	Fondamental	0.00191	0.3Ex-Ey (Sp)	0	0
6	PIL6	Column	Fondamental	0.001806	0.3Ex-Ey (Sp)	0	0

Fig. 3.36 - Output SAP2000: Armature longitudinali dei pilastri.



Un codice Matlab in grado di leggere automaticamente i dati utili derivanti dagli output di singoli step precedenti e dall'accelerogramma ottenuto da *SeismoArtif* (vedi par. 3.4.1.1) crea il file testo relativo al singolo modello da analizzare rinominandolo in modo automatico con un codice alfanumerico siffatto:

$$JT_{p_i}X_1X_2$$

Avendo indicato con:

- $J$ , il numero di piani che varia nell'intervallo compreso tra 1 e  $n_p$ ;
- $T_{p_i}$ , il periodo proprio fissato, compreso nell'intervallo discretizzato  $[T_{p_{min}}; T_{p_{max}}]$ ;
- $X_1$ , il codice numerico relativo alla lunghezza della campata considerata: assume valore 1 nel caso di  $L_{c_{min}}$  e valore 0 nel caso di  $L_{c_{max}}$ <sup>22</sup>;
- $X_2$ , il codice numerico relativo alla tipologia di tamponatura considerata: assume valore 1 nel caso di tamponatura "debole" e valore 0 nel caso di tamponatura "forte".

Un file testo finale con nomenclatura 6T201 è, per esempio, relativo a un modello di edificio appartenente al cluster delle strutture a 6 piani, con periodo proprio pari al secondo passo interno all'intervallo  $[T_{p_{min}}; T_{p_{max}}]$ , con lunghezza di campata massima e tipologia di tamponatura "debole".

In particolare tale file, che sarà utilizzato poi come input della fase finale, è composto da matrici contenenti informazioni generali (es. numero di nodi, di pilastri, di travi, di bielle rappresentative delle tamponature, etc.), dati sull'accelerogramma di riferimento, le coordinate e i gradi di libertà dei singoli nodi, informazioni circa le forze, le masse concentrate e l'identificazione degli elementi. Si fa notare che la numerazione di nodi ed elementi avviene secondo criteri fissati di direzione e verso (Fig. 3.37).

Le analisi dinamiche non lineari sono implementate attraverso un codice C++ (Mazza, 2014; Mazza & Donnici, 2018): l'algoritmo proposto affronta il problema dell'interazione non lineare tra struttura intelaiata e pannelli in muratura attraverso un modello di plasticità aggregata e modifica i valori di rigidezza e resistenza della tamponatura nella direzione fuori piano in funzione del danno, precedente o contemporaneo, nel piano. I risultati ottenuti

<sup>22</sup> Si fa notare che i valori di  $L_{c_{min}}$  e  $L_{c_{max}}$  variano in funzione del set cluster considerato.

dalle analisi non lineari permettono di valutare il danneggiamento delle tamponature in termini di drift  $e$ , in caso di collasso, di calcolare la velocità di espulsione.

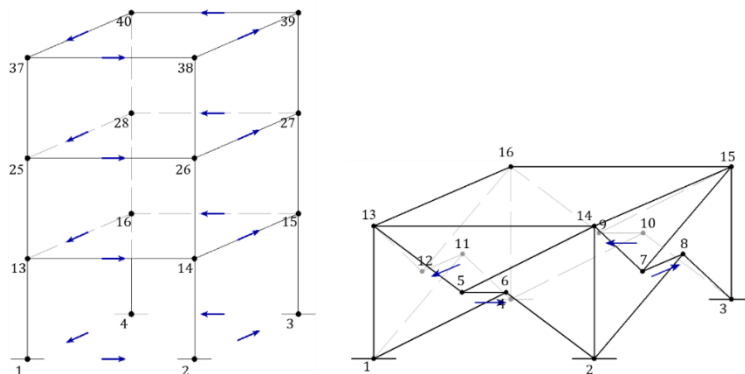


Fig. 3.37 - Criteri di numerazione dei nodi nel modello.

In base a quest'ultima, facendo riferimento all'Eq. 3.10 è possibile calcolare la distanza  $d$  di ingombro dei detriti. Per ogni cluster è poi considerata come distanza di *buffer*, da operare con algoritmo Python in QGIS, la maggiore tra quelle ottenute come risultato dei diversi modelli con fissato numero di piani.

Al contrario del metodo utilizzato nel par. 3.4.1.2, allora, in questo caso non si avranno informazioni legate al collasso dei singoli elementi, ma verrà presa in considerazione l'ipotesi più sfavorevole per ciascuna categoria cluster di edifici. Analogamente al paragrafo precedente, comunque, in base a quanto detto, è possibile anche in questo caso visualizzare in ambiente GIS in rosso le strade non più percorribili perché interessate da ingombri considerevoli di detriti e in verde le strade ancora attraversabili. Per i nuovi shapefile ottenuti come output del codice automatizzato, si aggiunge un nuovo attributo rispetto a quelli già presenti in Fig. 3.25, relativo alla condizione di percorribilità qui analizzata (Fig. 3.38).

ID	NOME	width	buffer	Lenght [m]	PERCORR_mu	PERCORR_ca	PERCORR_ns
206	Via Salvador Alle...	6.00000	3.00000	84.30	tratto percorribile	tratto non percor...	tratto non percor...
207	Via Giacomo Brod...	3.50000	1.75000	83.27	tratto percorribile	tratto non percor...	tratto non percor...
157	Contrada Profeta	5.00000	2.50000	153.14	tratto percorribile	tratto percorribile	tratto non percor...
209	Piazza della Liberta	4.50000	2.25000	145.97	tratto percorribile	tratto non percor...	tratto non percor...
60	Via Giacomo Brod...	4.50000	2.25000	210.10	tratto percorribile	tratto non percor...	tratto non percor...
11	Via F. De Pisis	6.00000	3.00000	143.52	tratto percorribile	tratto non percor...	tratto non percor...

Fig. 3.38 - Esempio output strade con attributi relativi alla nuova condizione di percorribilità.

Una volta note le strade non più percorribili, è possibile calcolare la lunghezza  $L_{hs1ns}$  degli *hazardous stretch* e procedere con il calcolo dell'indice di pericolosità  $I_{Hj_{1ns}}$  per come stabilito dalla relazione. Eq. 3.8

### 3.4.2 Pericolo idrogeologico

Il pericolo idrogeologico è connesso a valutazioni relative all'instabilità dei versanti o di corsi fluviali, in conseguenza a particolari condizioni ambientali, meteorologiche e climatiche.

I fenomeni naturali riconosciuti come responsabili di questa tipologia di pericolo sono principalmente alluvioni e frane: la superficie delle aree italiane classificate a pericolosità da frana medio-alta e/o da alluvione di media intensità ammonta complessivamente a 50.117 chilometri quadri ed è pari a circa il 16,6% del territorio nazionale. È semplice intuire, allora, come il dissesto idrogeologico rappresenti un tema di particolare rilevanza per l'Italia: il forte incremento delle aree urbanizzate, verificatosi a partire dal secondo dopoguerra e spesso causato dall'assenza di una corretta pianificazione territoriale, ha portato a un considerevole aumento degli elementi esposti a frane e alluvioni e, di conseguenza, del rischio (ISPRA, 2018).

Nel tentativo di promuovere una prima integrazione tra diversi strumenti di pianificazione e programmazione, la trattazione dei fenomeni connessi al pericolo idrogeologico si basa sul confronto tra le indicazioni fornite da piani di settore come il Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) e le prescrizioni presenti all'interno di rapporti specifici come quelli redatti, per esempio, dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). In particolare, i PAI, redatti ai sensi della L. 183/89, del D. Lgs. 180/98 e s.m.i. (Atto di indirizzo e coordinamento 29/09/98, L. 267/98, L. 226/99 e L. 365/00) e del D.Lgs. 152/06, costituiscono uno strumento fondamentale per una corretta pianificazione territoriale, soprattutto attraverso l'applicazione di vincoli e regolamentazioni d'uso del territorio (es. vincolo di inedificabilità nelle aree a pericolosità molto elevata).

I PAI sono strumenti dinamici, negli anni soggetti a integrazioni e modifiche da parte delle Autorità di Bacino (ora Autorità di Bacino Distrettuali), a seguito di nuovi studi e indagini, nuovi eventi idrogeologici, a completamento di interventi strutturali di mitigazione del rischio o su richiesta degli Enti locali. Gli stessi suddividono il territorio in categorie di pericolosità: analogamente a quanto fatto per il pericolo sismico, anche in questo caso la

trattazione riguarderà le porzioni di territorio interessate da categoria di pericolosità alta e le infrastrutture stradali valutate come *hazardous stretch* corrisponderanno a quelle ricadenti nelle aree così identificate.

La valutazione è condotta tramite il software QGIS, attraverso operazioni di *overlapping* tra il layer relativo alle infrastrutture stradali e un nuovo layer contenente la mosaicatura territoriale del pericolo idrogeologico per scenari di pericolosità e le relative informazioni.

### 3.4.2.1 Pericolo alluvioni

Un'alluvione è l'allagamento temporaneo di aree abitualmente asciutte, generato da un'inondazione provocata da fiumi, correnti, canali, laghi e, per le zone costiere, dal mare (ISPRA, 2018).



Fig. 3.39 - Strade non percorribili in seguito ad alluvioni. (Rossano (CS), agosto 2015 e Lamezia (CZ), ottobre 2018).

L'ISPRA, al fine di aggiornare la mappa della pericolosità idraulica sull'intero territorio nazionale, ha proceduto nel 2017 alla nuova Mosaicatura nazionale delle aree a pericolosità idraulica, perimetrata dalle singole Autorità di Bacino Distrettuali (Fig. 3.40).

La mosaicatura è stata realizzata secondo i tre scenari di pericolosità del D. Lgs. 49/2010: P3, classe di pericolosità elevata (alluvioni frequenti); P2 classe di pericolosità media (alluvioni poco frequenti); P1, classe di pericolosità bassa (scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi).

La mosaicatura è stata realizzata secondo i tre scenari di pericolosità del

D. Lgs. 49/2010: P3, classe di pericolosità elevata (alluvioni frequenti); P2 classe di pericolosità media (alluvioni poco frequenti); P1, classe di pericolosità bassa (scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi).

I tre scenari così perimetrati possono essere identificati come scenari di probabilità, legati quindi alla frequenza degli eventi alluvione.

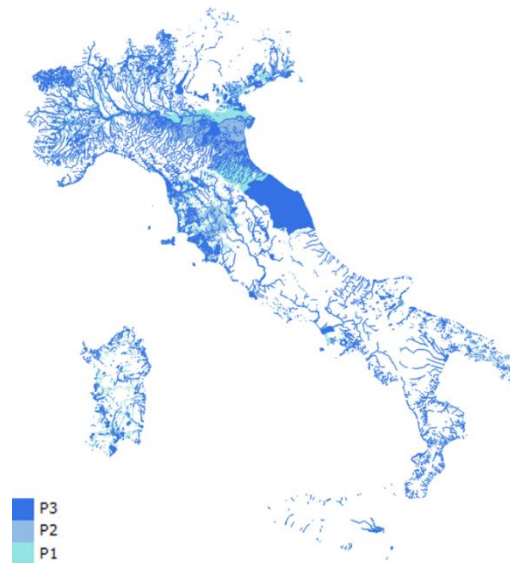


Fig. 3.40 - Aree a pericolosità idraulica. Fonte: ISPRA (2018).

In particolare, a ogni scenario è associato un tempo di ritorno, valutato in anni (Tab. 3.3).

Tab. 3.3 - Tempo di ritorno associato agli scenari di pericolosità idraulica.

Scenario di pericolosità	$T_R$ (anni)
P1	> 500
P2	100÷200
P3	20÷50

Fonte: ISPRA, (2018).

Noto il tempo di ritorno, è possibile calcolare la probabilità di accadimento  $P_2$ <sup>23</sup> associata al pericolo alluvione:

<sup>23</sup>  $P_2$  perché è la seconda tipologia di pericolo valutata.

$$P_2 = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^{V_N} \quad \text{Eq. 3.13}$$

Dove  $V_N$  è la vita nominale riferita, in questo caso, all'infrastruttura stradale. Trattandosi di infrastrutture urbane, secondo le prescrizioni delle NTC18 ricadono nella categoria "Costruzioni con livelli di prestazione ordinari", cui è associata una vita nominale pari a 50 anni.

### 3.4.2.2 Pericolo frane

Secondo l'ISPRA, l'Italia è uno dei paesi europei maggiormente interessato da fenomeni franosi, con 620.808 frane che interessano un'area di 23.700 km<sup>2</sup>, pari al 7,9% del territorio nazionale. I fattori più importanti per l'innescarsi dei fenomeni franosi sono le precipitazioni brevi e intense, quelle persistenti e i terremoti. Negli ultimi decenni, però, anche fattori antropici come tagli stradali, scarichi, sovraccarichi dovuti a edifici o rilevati, hanno assunto un ruolo sempre più determinante tra le cause predisponenti le frane.



Fig. 3.41 - Strada di accesso al comune di Prato allo Stelvio (BZ) non percorribile a causa di uno smottamento (maggio 2018) e autostrada A6 Torino-Savona interrotta per crollo di un viadotto in seguito a una frana (novembre 2019).

La maggiore criticità nell'analisi della pericolosità da frana deriva dalla mancanza di informazioni relative alle date di attivazione delle frane, e

quindi dalla difficoltà di determinare il tempo di ricorrenza. A tal riguardo, le aree a pericolosità da frana individuate dai Piani di Assetto Idrogeologico includono, oltre alle frane già verificatesi, anche le zone di possibile evoluzione dei fenomeni e le zone potenzialmente suscettibili a nuovi fenomeni franosi.

Le Autorità di Bacino italiane utilizzano differenti metodologie per la valutazione e la mappatura della pericolosità da frana (es. metodo quantitativo a matrice, metodo qualitativo geomorfologico, metodo quantitativo statistico, etc.): tutte, comunque, si basano su inventari contenenti informazioni circa ogni fenomeno franoso (es. estensione, tipologia di movimento, stato di attività). In base ai dati presenti nei vari PAI, l'ISPRA ha omogeneizzato e mosaicato tutte le informazioni, ottenendo un'analisi relativa a tutto il territorio nazionale, che viene mappato secondo quattro scenari di pericolosità: P4, classe di pericolosità molto elevata, P3 classe di pericolosità elevata, P2 classe di pericolosità media, P1 classe di pericolosità moderata. Oltre a queste quattro categorie, in mappa sono evidenziate le cosiddette Aree di attenzione (AA), che corrispondono generalmente a porzioni di territorio ove vi sono informazioni circa possibili situazione di dissesto a cui non è ancora stata associata alcuna classe di pericolosità (Fig. 3.42).

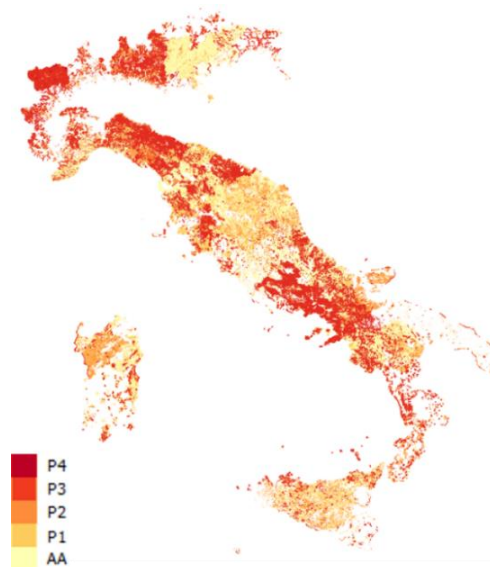


Fig. 3.42 - Aree a pericolosità da frana. Fonte: ISPRA (2018).

Sempre dal Rapporto sul Dissesto Idrogeologico redatto dall'ISPRA è possibile analizzare gli interventi edilizi e urbanistici consentiti nelle diverse

aree così individuate. In particolare:

- nelle aree classificate a pericolosità da frana molto elevata (P4) sono consentiti esclusivamente: gli interventi di demolizione senza ricostruzione; gli interventi strettamente necessari a ridurre la vulnerabilità degli edifici esistenti e a migliorare la tutela della pubblica incolumità, senza aumenti di superficie o di volume e senza cambiamenti di destinazione d'uso; le opere di bonifica e sistemazione dei movimenti franosi; gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria; la realizzazione di nuove infrastrutture lineari e a rete previste da normative di legge, dichiarate essenziali, non delocalizzabili e prive di alternative progettuali tecnicamente ed economicamente sostenibili; le pratiche per la corretta attività agricola e forestale con esclusione di ogni intervento che aumenti il livello di rischio; gli interventi volti alla bonifica dei siti contaminati; gli interventi di consolidamento e restauro conservativo dei beni culturali tutelati ai sensi della normativa vigente;
- nelle aree classificate a pericolosità da frana elevata (P3) sono generalmente consentiti, oltre agli interventi ammessi nelle aree a pericolosità molto elevata, anche gli interventi di ampliamento di edifici esistenti per l'adeguamento igienico-sanitario e la realizzazione di nuovi impianti di trattamento delle acque reflue e l'ampliamento di quelli esistenti, previo studio di compatibilità dell'opera con lo stato di dissesto esistente;
- nelle aree classificate a pericolosità da frana media (P2) gli interventi ammissibili sono quelli previsti dagli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica. Tali azioni sono generalmente soggette ad uno studio di compatibilità finalizzato a verificare che l'intervento garantisca la sicurezza, non determini condizioni di instabilità e non modifichi negativamente i processi geomorfologici nell'area interessata dall'opera e dalle sue pertinenze;
- nelle aree classificate a pericolosità da frana moderata (P1) è generalmente consentita ogni tipologia di intervento prevista dagli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica;
- per le Aree di Attenzione (AA) ogni determinazione relativa ad eventuali interventi è subordinata alla redazione di un adeguato studio geomorfologico volto ad accertare il livello di pericolosità sussistente nell'area. In sede di redazione degli strumenti urbanistici devono essere valutate le condizioni di dissesto evidenziate e la relativa compatibilità delle previsioni urbanistiche.

Anche nel caso di pericolosità da frana, è possibile associare a ogni categoria un tempo di ritorno (*Tab. 3.4*) e calcolare, analogamente al caso precedente, la probabilità di accadimento  $P_3$  come da *Eq. 3.13*



Tab. 3.4 - Tempo di ritorno associato agli scenari di pericolosità da frana.

Scenario di pericolosità	$T_R$ (anni)
P1	> 300
P2	100÷300
P3	30÷100
P4	1÷30

Fonte: ISPRA (2018).

Ai fini applicativi e normativi, comunque, per come suggerito nel pre-detto Rapporto, è necessario far riferimento ai documenti e alla cartografia ufficiali redatti dalle Autorità di Bacino Distrettuali. In relazione a ciò, i casi studio presentati utilizzeranno le perimetrazioni e le indicazioni presenti nel Piano di Assetto Idrogeologico di riferimento.

### 3.4.3 Altri pericoli naturali

La trattazione degli altri tipi di pericolo, analogamente a quanto fatto per il caso idrogeologico, è condotta attraverso la consultazione di piani operativi e di settore in grado di definire estensione e caratteristiche di aree soggette a specifiche condizioni di pericolosità.

Il primo riferimento è senza dubbio il Piano di Emergenza comunale in cui sono (o quanto meno dovrebbero essere) riportati tutti gli scenari di rischio cui il territorio comunale è soggetto. A tal riguardo si specifica che, ad esempio, la Protezione Civile è l'ente responsabile per la definizione dei diversi livelli di allerta per il pericolo vulcanico e, nel 2017, entra a pieno titolo tra i coordinatori principali del Sistema Nazionale di Allerta per maremoti indotti da sisma, al fine di monitorare il pericolo tsunami sulle aree costiere. Proprio in relazione a tali aree, è necessario considerare l'ambiente costiero come un ecosistema dinamico, soggetto a continue alterazioni e cambiamenti, e dove i fenomeni di erosione o avanzamento della linea di costa dipendono da numerosi fattori meteorologici, geologici, biologici e antropici. Studi specialistici sono necessari, allora, in riferimento al pericolo erosione costiera, specie per un territorio peninsulare come quello italiano. Le diverse Autorità di Bacino Distrettuali, a tal fine, sono gli enti incaricati alla redazione di strumenti ad hoc, i Piani Stralci per l'Erosione Costiera, con l'obiettivo di individuare sul territorio le diverse zone di pericolosità P1, P2 e P3, analogamente a quanto fatto nei Piani di Assetto Idrogeologico (Fig. 3.43).



Fig. 3.43 - Esempio aree a pericolosità da erosione costiera. Fonte: Piano di Bacino Stralcio di Erosione Costiera, Autorità di Bacino Regione Calabria (2016).

Sono in corso diversi studi circa la perimetrazione del pericolo incendi (Paone, 2008), specialmente se connessi a zone di importanza rilevanti, come i parchi nazionali<sup>24</sup>.

Nelle aree montane è necessaria una valutazione approfondita del pericolo valanghe, normalmente di competenza della Protezione Civile e del Corpo Forestale dello Stato (Crescenzi & Corsini, 2016): tali enti fungono da supporto a centri funzionali e a tecnici incaricati nell'elaborazione di specifici piani di emergenza, indispensabili specialmente nel periodo invernale. La consultazione di mappe specifiche di pericolosità connesse a ogni singolo fenomeno, consente il calcolo dei parametri necessari all'individuazione sul territorio dei potenziali *hazardous stretch*.

### 3.5 La Vulnerabilità nell'Indice di Rischio

La valutazione dell'indice di vulnerabilità è funzione diretta delle caratteristiche intrinseche dell'infrastruttura stradale considerata e indipendente, invece, da ogni tipo di fattore esterno.

Si evidenzia che il concetto di vulnerabilità è attualmente tema di dibattito e confronto, non esistendo ancora oggi una sua definizione univoca ma variabile a seconda dei contesti. In letteratura diversi autori trattano il tema e

<sup>24</sup> <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/progetto-incendi/>

offrono differenti visioni del concetto, dettagliando ogni sua possibile declinazione. In riferimento al sistema di infrastrutture viarie, si potrà parlare allora di vulnerabilità diretta o indotta (Cafiso *et al.*, 2001; D'Andrea & Condorelli, 2006), di vulnerabilità intrinseca o estrinseca (Tesoriere *et al.*, 2001), di vulnerabilità socio-economica (Cutter *et al.*, 2000), etc. È giusto precisare, inoltre, che nel panorama urbanistico-territoriale esistono ad oggi ricerche e progetti (solo per citarne alcuni, i progetti europei ARMONIA, Ensure, Move), grazie a cui è stato possibile ottenere griglie teorico-metodologiche in grado di esaminare le diverse dimensioni del concetto di vulnerabilità anche a livello urbano (Atun e Menoni, 2014). Dagli output attualmente ricavati, emerge la necessità di indagare la vulnerabilità urbana sotto diversi aspetti, sia in termini di approcci temporali differenti che rispetto alla scala geografica di intervento (dalla globale alla locale) (Menoni *et al.*, 2012).

La presente ricerca, nella definizione dell'indice di vulnerabilità, fa riferimento esclusivamente a una vulnerabilità di tipo strutturale (Husdal, 2006), ossia riferita all'infrastruttura in sé, e quindi alle sue caratteristiche costruttive, geometriche e di progetto, in funzione anche alla presenza delle opere d'arte e delle possibili alternative al tronco in oggetto individuabili nella rete.

Partendo dalle precedenti considerazioni, la ricerca individua quattro parametri descrittivi dell'indice di vulnerabilità:

1. lunghezza dell'infrastruttura stradale considerata, un parametro utile per la definizione di massima del tempo di percorrenza (*travel time*): una strada più corta permette agli utenti di raggiungere più velocemente la destinazione desiderata;
2. larghezza dell'infrastruttura stradale considerata, utile al fine di definire la capacità di una strada: un'infrastruttura dotata di carreggiate più larghe permette a più utenti di circolare in sicurezza;
3. elementi critici: dipende dal numero di componenti fisiche e strutturali presenti sulla strada che potrebbero essere fonte di fragilità per il sistema (ponti, gallerie, strettoie, sottopassi, etc.);
4. ridondanza: è un parametro legato alla possibilità della strada di avere percorsi alternativi. Qualora l'infrastruttura considerata subisse delle interruzioni, la destinazione fissata può essere comunque raggiunta, nonostante una parte della rete sia in condizioni non operative. Si fa presente, inoltre, che la ridondanza è una delle dimensioni universalmente riconosciute in letterature ai fini dell'incremento della resilienza urbana di un sistema territoriale, per come già specificato nel Capitolo 1.

La necessità di dover formalizzare e confrontare tra loro i parametri precedentemente descritti porta la ricerca a muoversi verso approcci multicriteriali (*Multi Criteria Decision Analysis*, MCDA) capaci di offrire la giusta

sintesi tra informazioni complesse e di natura eterogenea. Le MCDA sono quadri metodologici, normalmente atti a classificare e valutare scenari alternativi sulla base della loro performance e in funzione di fissati criteri decisionali, fornendo un contributo rilevante nell'ambito della trattazione di problemi di pianificazione territoriale, di valutazione di sostenibilità, di programmazione di scelte attuative relative a interventi e progetti.

Nel caso specifico, l'approccio non viene utilizzato al fine di stilare priorità di azione, ma per valutare l'influenza che i diversi parametri hanno sulla definizione dell'indice di vulnerabilità  $I_{V_j}$ , calcolabile come segue:

$$I_{V_j} = \sum_{i=1}^n w_i Pa_i \quad \text{Eq. 3.14}$$

Avendo indicato con:

$I_{V_j}$ , l'indice di vulnerabilità della strada alternativa j-esima;

$Pa_i$ , l'i-esimo parametro considerate;

$w_i$ , il peso associato all'i-esimo parametro;

$n$ , il numero dei parametri.

### 3.5.1 Definizione dei parametri

Il numero dei parametri varia a seconda del tipo di vulnerabilità analizzata e del contesto considerato: nel caso specifico  $n = 4$ .

La loro valutazione dipende dalla tipologia di criterio adottato: per  $P_L$  e  $P_W$ , relativi rispettivamente alla lunghezza e alla larghezza della strada, si forniscono misure quantitative, mentre per la determinazione di  $P_{CE}$  e  $P_R$ , relativi alla presenza di elementi critici e al livello di ridondanza, si offrono stime qualitative.

In particolare:

$$P_{L_j} = 1 - \frac{L_{min}}{L_j} \quad \text{Eq. 3.15}$$

Avendo indicato con:

$P_{L_j}$ , il parametro relativo alla lunghezza della strada alternativa j-esima;

$L_{min}$ , la lunghezza minore tra le diverse alternative considerate;

$L_j$ , la lunghezza totale della strada alternativa j-esima, data dalla somma delle lunghezze dei singoli tratti che la compongono.

Si fa notare che l'alternativa con percorso più breve avrà un  $P_{L_j} = 0$ , essendo, in riferimento a tale parametro, la scelta meno vulnerabile.

$$P_{W_j} = 1 - \frac{W_{min_j}}{\max(W_{min})} \quad \text{Eq. 3.16}$$

Avendo indicato con:

$P_{W_j}$ , il parametro relativo alla larghezza della strada alternativa j-esima;

$W_{min_j}$ , la larghezza della carreggiata considerata nella sezione trasversale più stretta lungo la strada alternativa j-esima;

$\max(W_{min})$ , la massima tra le larghezze  $W_{min_j}$  delle strade alternative in esame.

Si fa notare che, nel caso di tale parametro, l'alternativa considerata come meno vulnerabile sarà quella che lungo il suo tragitto presenta una sezione trasversale minima più larga rispetto alle altre, per cui risulterà  $P_{W_j} = 0$ .

Per la valutazione dei restanti due parametri si utilizza un metodo di stima qualitativo. Ulteriori analisi di dettaglio, per esempio relative allo stato di vulnerabilità delle singole opere d'arte, aprono a nuovi possibili filoni di ricerca per sviluppi futuri di cui, ad oggi, si propone una trattazione a larga scala. In questa fase della ricerca, infatti, si sceglie di tener conto di tali elementi basandosi principalmente su criteri di presenza/assenza di punti di fragilità (ponti, viadotti, gallerie, sottopassi e strettoie) e di strade alternative a quella considerata.

Tab. 3.5 - Stima del parametro  $P_{CE}$  in funzione della presenza di elementi critici lungo la strada alternativa j-esima.

Presenza di elementi critici	HIGH	MEDIUM	LOW
$P_{CE_j}$	1	0,50	0

L'assegnazione delle categorie riportate in Tab. 3.5 dipende principalmente dal contesto territoriale di riferimento.

In contesti medio-piccoli (come quello che si descriverà in uno dei casi studio), si considera appartenente alla categoria "LOW" una strada che non presenta lungo il suo tragitto alcun elemento di fragilità, alla categoria "ME-

*DIUM*” un percorso lungo il quale è possibile trovare un solo punto di fragilità, alla categoria “*HIGH*” uno che presenta più punti di fragilità.

Come già precisato, studi di dettaglio renderebbero la metodologia più precisa (effettuando stime di vulnerabilità per ogni elemento puntuale o stabilendo un peso diverso ad ogni tipologia di opera d’arte, considerate invece nella presente ricerca aventi tutti la stessa importanza), ma si ritiene che per l’approccio territoriale proposto le assunzioni espone siano sufficientemente adatte.

Tab. 3.6 - Stima del parametro  $P_R$  in funzione del livello di ridondanza della strada alternativa  $j$ -esima.

Livello di ridondanza	HIGH	MEDIUM	LOW
$P_{R_j}$	0	0,15	0,25

Anche nel caso della stima del parametro  $P_R$  associato al livello di ridondanza (Tab. 3.6), l’appartenenza di un’infrastruttura ad una categoria rispetto che ad un’altra dipende dal sistema urbano di riferimento. Per contesti medio-piccoli, nel caso in cui la strada considerata non abbia percorsi alternativi di collegamento tra il punto di origine e quello di destinazione fissati,  $P_{R_j}$  sarà considerato di livello “*LOW*”, se è presente un solo percorso alternativo la categoria di appartenenza sarà “*MEDIUM*”, se esistono più alternative possibili, il livello di ridondanza sarà “*HIGH*”. Chiaramente la vulnerabilità aumenterà se l’infrastruttura  $j$ -esima considerata non possiede percorsi alternativi e diminuirà nel caso contrario.

Per contesti territoriali più ampi, per esempio nel caso di città metropolitane, l’assegnazione delle categorie potrebbe variare vista la presenza di reti stradali più fitte ed efficienti.

### 3.5.2 Definizione dei pesi attraverso un’analisi multicriterio AHP

La completa valutazione della vulnerabilità in esame rende necessaria la contemporanea adozione di misure quantitative espresse con differenti unità di misura (es. lunghezza e larghezza della strada) e giudizi di tipo qualitativo (es. presenza di elementi critici e livello di ridondanza) la cui integrazione spesso risulta essere difficoltosa.

Per come anticipato, allora, l’assegnazione dei diversi pesi  $w_i$  viene condotta tramite un’analisi multicriteriale del tipo *Analytic Hierarchy Process*

(AHP) che permette di mettere una diretta relazione giudizi qualitativi e parametri quantitativi altrimenti non direttamente confrontabili (Fei *et al.*, 2008).

Il metodo, ideato negli anni Settanta dal matematico Thomas L. Saaty (1980), si basa su una serie di confronti a coppie tra i diversi parametri, attribuendo ad essi un punteggio di importanza relativa, e termina con l'assegnazione di un peso percentuale, che si concretizza nella traduzione in termini quantitativi dell'influenza di ciascun parametro rispetto all'indice generale.

Il punteggio da utilizzare ad ogni confronto è in genere arbitrario: nel caso trattato si utilizzerà una scala di punteggi che va da 1/9 a 9 e che determina un fissato livello qualitativo (Fig. 3.44).

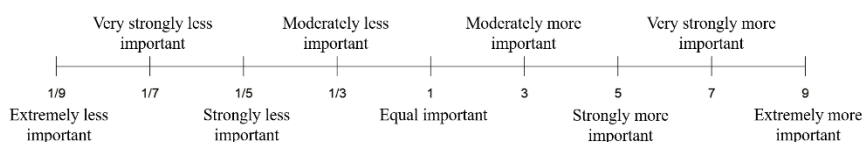


Fig. 3.44 - Scala di valutazione analisi AHP.

Per l'assegnazione di tali punteggi viene utilizzata la Matrice di confronto a coppie  $n \times n$  (Tab. 3.7), tramite la quale, appunto, si stima l'importanza del singolo parametro rispetto agli altri. In particolare, vengono effettuati i confronti tra i parametri della regione triangolare superiore della matrice (arancione scuro), utilizzando poi i reciproci per la parte inferiore (arancione chiaro) e mantenendo sulla diagonale principale valori unitari.

Tab. 3.7 - Matrice di confronto a coppie  $M [n \times n]$ .

	Lunghezza strada	Larghezza carreggiata	Elementi critici	Livello ridondanza
Lunghezza strada	1	2	1/3	2
Larghezza carreggiata	1/2	1	1/3	1/2
Elementi critici	3	3	1	2
Livello ridondanza	1/2	2	1/2	1

Nella Tab. 3.7 è possibile osservare i punteggi stimati, nel caso in esame, per ciascun confronto.

Il parametro più influente nella valutazione dell'indice di vulnerabilità  $I_V$

è quello relativo alla presenza di elementi critici; il meno importante, invece, quello relativo alla larghezza della carreggiata. In riferimento a ciò si fa notare che, nell'elaborazione della presente ricerca, l'importanza assegnata a quest'ultimo elemento è relativamente bassa poiché si è già tenuto implicitamente conto del suo contributo ai fini della valutazione globale del rischio, nella determinazione dell'indice di pericolosità  $I_H$ : tanto più una strada è stretta, infatti, tanto più sarà probabile che essa subisca ostruzioni in caso di crollo degli edifici prospicienti.

Si propone quindi agli utenti di variare i punteggi assegnati in funzione dell'ambito in cui l'indice di vulnerabilità  $I_V$  viene calcolato: se, infatti, la sua valutazione si limitasse a considerazioni relative alla sola vulnerabilità strutturale della strada ed esulasse quindi dalla determinazione più complessa dell'indice di rischio  $I_R$ , sarebbe necessario attribuire un'importanza maggiore al parametro in questione e, eventualmente, aggiungere ulteriori elementi che potrebbero influire sulla stima di  $I_V$ , come, per esempio, l'altezza massima degli edifici prospicienti la strada stessa.

Per la determinazione dei pesi percentuali  $w_i$  da assegnare a ogni parametro è necessario risolvere un problema agli autovalori<sup>25</sup> (Teknomo, 2006): determinato il massimo autovalore  $\lambda$  e il relativo autovettore  $v_\lambda$  di  $M$ , normalizzato l'autovettore  $v_\lambda$  tale che la somma dei suoi elementi sia pari a 1, è possibile ottenere il vettore dei pesi percentuali relativi ai parametri  $M_i$ .

$$w = \frac{v_\lambda}{\sum_{i=1}^n v_\lambda(i)} = \begin{bmatrix} 24,20 \% \\ 11,07 \% \\ 45,00\% \\ 19,10 \% \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 3.17}$$

Condizione necessaria da verificare, a questo punto, è la consistenza<sup>26</sup>

<sup>25</sup> Un numero  $a$  e un vettore non nullo  $v_a$  sono chiamati rispettivamente autovalore e autovettore (associato ad  $a$ ) della matrice  $A$  (di ordine  $n \times n$ ) se soddisfano la relazione:  $A v_a = a v_a$ .

<sup>26</sup> Una matrice  $A$  è consistente se sono rispettate le condizioni di reciprocità  $a_{ij} = 1/a_{ji}$  e di transitività  $a_{ij} = a_{ik} \times a_{kj}$ . È necessario verificare la consistenza della matrice in esame per valutare se i confronti derivanti da giudizi soggettivi del decisore siano appropriati (consistenti) o meno. Supponiamo per esempio di avere tre persone di età differenti e di ordinarle in ordine crescente per anno di nascita, da cui ne deriva che:  $A < B < C$ . Da ciò risulta ovvio (consistente) dire che se  $A$  è più grande di  $B$  e  $B$  è più grande di  $C$ , allora  $A$  è più grande di  $C$ . Ma a volte non è sempre possibile ottenere confronti perfettamente consistenti e da qui nasce la necessità di determinare indici di consistenza per considerare casi meno semplici e immediati. Per comprendere quando un confronto non è consistente, per esempio, supponiamo di avere 3 pugili che si sfidano in un torneo e di voler determinare quale sia l'atleta più forte.



della matrice  $M$ .

Definito secondo l'Eq. 3.18 il *Consistency Index* ( $CI$ ) e determinando il *Random Consistency Index* ( $RI$ ) da valori di letteratura in base al variare della dimensione della matrice  $M$  (Tab. 3.8), è possibile calcolare il rapporto di consistenza (*Consistency Ratio*  $CR$ ) (Eq. 3.19).

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = 0,057 \quad \text{Eq. 3.18}$$

Tab. 3.8 - Valori del *Random Consistency Index* in funzione della dimensione  $n$  della matrice  $M$ .

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$RI$	0	0	0.58	<b>0.9</b>	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0,063 \quad \text{Eq. 3.19}$$

Per poter considerare la matrice consistente, da letteratura viene posto come vincolo  $CR < 0,1$ . La verifica di consistenza, allora, nel caso in esame è verificata.

Stabiliti quindi i pesi  $w_i$  relativi ai singoli parametri  $Pa_i$  è possibile determinare l'indice di vulnerabilità attraverso l'Eq. 3.14 per ogni strada alternativa che congiunge punto di origine e punto di destinazione fissati, tramite una nuova formulazione (Eq. 3.20).

$$I_{V_j} = 0,242 \times P_{L_j} + 0,117 \times P_{W_j} + 0,450 \times P_{CE_j} + 0,191 \times P_{R_j} \quad \text{Eq. 3.20}$$

### 3.6 L'Esposizione nell'Indice di Rischio

L'analisi dell'esposizione, e quindi del suo relativo indice  $I_E$ , permette di individuare i percorsi particolarmente sensibili vista la presenza di persone, strutture, beni, manufatti di pregio, etc..

Considerato l'alto grado di priorità che ricopre la popolazione in tale valutazione, nella presente trattazione l'indice di esposizione  $I_E$  dipenderà esclusivamente dal numero delle persone coinvolte, in quanto la salvaguardia

---

Ipotizziamo che il pugile A abbia battuto il pugile B (A è più forte di B) e che il pugile B abbia battuto il pugile C (B è più forte di C): questo non implica necessariamente che l'atleta A possa battere l'atleta C, creando così una condizione di inconsistenza.

della vita assume importanza nettamente maggiore rispetto al resto.

In virtù di ciò e anche attraverso lo studio dello stato dell'arte in materia (Cafiso *et al.*, 2005), l'indice di esposizione  $I_E$  relativo alla  $j$ -esima strada alternativa considerata è dato dalla somma di due contributi:

$$I_{Ej} = I_{DEj} + I_{IEj} \quad \text{Eq. 3.21}$$

Avendo indicato con:

$I_{DEj}$ , l'indice di esposizione diretta, che tiene conto del numero di utenti della strada che potrebbero essere interessati da un evento calamitoso;

$I_{IEj}$ , l'indice di esposizione indiretta, che tiene conto del numero di persone che potrebbero subire danni o problemi dal malfunzionamento della strada considerata.

### 3.6.1 Analisi dell'esposizione diretta

L'esposizione diretta mira a quantificare l'entità della popolazione potenzialmente circolante su una determinata strada all'insorgere di un evento calamitoso.

Per una stima precisa del numero di utenti della strada si dovrebbe far riferimento al Traffico Giornaliero Medio (TGM), dato capace di rappresentare le condizioni ordinarie della circolazione che potrebbe essere considerato direttamente proporzionale all'indice di esposizione della strada considerata.

Mentre, però, tale informazione risulta essere di facile reperibilità per autostrade e strade extraurbane, la valutazione del TGM per strade urbane come la viabilità strategica in esame, necessiterebbe di analisi di dettaglio non disponibili in maniera immediata.

In considerazione di ciò la ricerca mira a valutare l'indice di esposizione diretta tramite una formulazione del tipo *fuzzy*, capace di associare il livello di esposizione della strada al grado di affollamento dei punti nevralgici del sistema che la stessa collega, ossia gli edifici strategici, e alla distanza dell'infrastruttura stradale rispetto a questi.

È lecito assumere, infatti, che una strada possiede esposizione maggiore se molto vicino e/o a servizio di un edificio strategico particolarmente affollamento.

Nel campo della ricerca scientifica, negli ultimi anni, si sta diffondendo l'utilizzo di logiche "non standard", capaci di impostare procedure coerenti

con le assunzioni adottate da stakeholder o da esperti, al fine di offrire agli operatori un supporto logico-formale mediante il quale formulare modelli trattabili analiticamente (Morano, 2000). La logica *fuzzy* venne introdotta da Zadeh nel 1965 contrapponendosi alla logica aristotelica nell'assegnazione del valore alle diverse variabili: mentre nella prima, infatti, una proposizione può assumere valore pari a 1 se vera o a 0 se falsa (logica binaria), nella formulazione *fuzzy* una qualsiasi alternativa può essere vera o falsa in "certa misura" (grado di appartenenza), assumendo quindi un valore compreso tra 0 e 1 (logica "sfumata").

Utilizzando variabili linguistiche ed espressioni del linguaggio comune, poi, lo schema segue il modo naturale di ragionare del decisore, consentendo quindi di tenere in considerazione sia problemi di scelta che di ordinamento multicriteriale.

Il modello proposto mira, allora, a fornire criteri decisionali di immediata comprensione per i soggetti interessati e gestire i processi decisionali in maniera flessibile e dinamica, tenendo conto in modo opportuno dei possibili e repentini cambiamenti che il contesto territoriale di riferimento può subire. Seguendo questo approccio, il metodo utilizzato nella ricerca prevede la definizione di due variabili in input che, tramite l'applicazione di specifiche regole, vengono associate ad un'unica variabile output.

Il processo può essere così riassunto:

1. definizione delle variabili, delle funzioni di appartenenza e delle espressioni linguistiche;
2. assegnazione dei punteggi e definizione delle regole;
3. fuzzificazione, inferenza/composizione e defuzzificazione.

### 3.6.1.1 *Fuzzy logic: definizione delle variabili, delle funzioni di appartenenza e delle espressioni linguistiche*

Le variabili input individuate dalla strategia sono due: il grado di affollamento degli edifici strategici che sorgono nelle vicinanze (*overcrowding*) e la distanza della strada considerata rispetto a tali edifici (*distance*).

In particolare, si considerano nell'analisi gli edifici strategici che ricadono nell'intorno di 500 m rispetto all'infrastruttura stradale in esame.

La variabile output è, invece, relativa alla valutazione dell'esposizione della strada considerata (*exposure*).

Per ciascuna variabile è necessario definire un set *fuzzy*, ossia un insieme di coppie ordinate del tipo [dato reale, grado di appartenenza] e una funzione di appartenenza, ossia quella particolare funzione che, ad ogni dato reale, associa un livello di appartenenza relativo al set *fuzzy* considerato.

Per le funzioni di appartenenza proprie di ogni variabile è necessario specificare dominio e codominio) di definizione, la forma e le espressioni linguistiche. In particolare:

- il dominio di definizione coincide con l'estensione dei dati reali, definiti da una sorta di "punteggi" che il decisore può assegnare a ciascuna variabile. Nel caso delle variabili input il dominio è definito da un intervallo [0; 10], nel caso della variabile output da un intervallo [0; 1]. In tutti i casi il codominio è definito da un intervallo [0; 1];
- le funzioni di appartenenza scelte sono di tipo triangolare, di semplice trattazione analitica ma comunque in grado di offrire una buona approssimazione dell'andamento del fenomeno;
- le espressioni linguistiche scelte differiscono in base alla variabile considerata e sono:
  - 3 per la variabile input *overcrowding*: "LOW", "MEDIUM", "HIGH";
  - 4 per la variabile input *distance*: "VERY NEAR", "NEAR", "FAR", "VERY FAR";
  - 4 per la variabile output *exposure*: "POORLY EXPOSED", "LITTLE EXPOSED", "EXPOSED", "VERY EXPOSED".

Nelle Fig. 3.45, Fig. 3.46 e Fig. 3.47 è possibile osservare quanto precedentemente descritto.

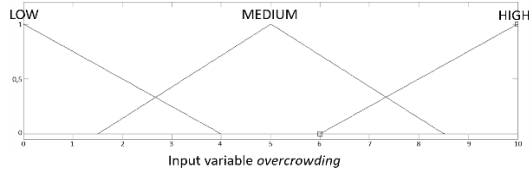


Fig. 3.45 - Prima variabile input: overcrowding.

$$f_{LOW} = \begin{cases} 1 - 0.25x & 0 \leq x \leq 4 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_{MEDIUM} = \begin{cases} 0.29x - 0.43 & 1.5 \leq x < 5 \\ 1 & x = 5 \\ -0.29x + 2.43 & 5 < x \leq 8.5 \end{cases}$$

$$f_{HIGH} = \begin{cases} 0.25x - 1.5 & 6 \leq x \leq 10 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

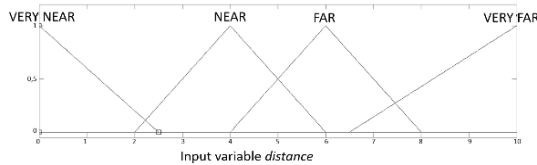


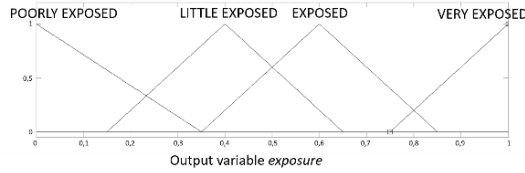
Fig. 3.46 - Seconda variabile input: distance.

$$f_{V\_NEAR} = \begin{cases} 1 - 0.4x & 0 \leq x \leq 2.5 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_{NEAR} = \begin{cases} 0.5x - 1 & 2 \leq x < 4 \\ 1 & x = 4 \\ -0.5x + 3 & 4 < x \leq 6 \end{cases}$$

$$f_{FAR} = \begin{cases} 0.5x - 2 & 4 \leq x < 6 \\ 1 & x = 6 \\ -0.5x + 4 & 6 < x \leq 8 \end{cases}$$

$$f_{V\_FAR} = \begin{cases} 0.29x - 1.86 & 6.5 \leq x \leq 10 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



$$f_{P\_EXPOSED} = \begin{cases} -2.86x + 1 & 0 \leq x \leq 0.35 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_{L\_EXPOSED} = \begin{cases} 4x - 0.6 & 0.15 \leq x < 0.4 \\ 1 & x = 0.4 \\ -4x + 2.6 & 0.4 < x \leq 0.65 \end{cases}$$

$$f_{EXPOSED} = \begin{cases} 4x - 1.4 & 0.35 \leq x < 0.6 \\ 1 & x = 0.6 \\ -4x + 3.4 & 0.6 < x \leq 0.85 \end{cases}$$

$$f_{V\_EXPOSED} = \begin{cases} 4x - 3 & 0.75 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Fig. 3.47 - Variabile output: exposure.

### 3.6.1.2 Fuzzy logic: assegnazione dei punteggi e definizione delle regole

È necessario definire in modo chiaro, attraverso espressioni linguistiche, le regole logiche di associazione tra le variabili input per ottenere il valore finale dell'esposizione quale variabile output.

Prima di tale passaggio, appare indispensabile fare alcune osservazioni relative all'assegnazione dei punteggi per ciascuna variabile in input.

Si fa notare, infatti, che la definizione delle regole dipende strettamente dai criteri di valutazione assunti dalla persona che esprime il giudizio e, tra le altre cose, dal sistema urbano di riferimento.

Per esempio, infatti, in un contesto territoriale medio-piccolo, un istituto scolastico con 300 studenti è valutato come "molto affollato", mentre in riferimento a una città metropolitana, una struttura scolastica con lo stesso numero di iscritti è considerata mediamente affollata. Stesso discorso può essere fatto per tutti gli altri edifici strategici.

Analogamente, in un contesto territoriale medio-piccolo, una struttura strategica distante circa 300 m dalla strada considerata rientrerebbe nella categoria "FAR" per la variabile *distance*. Un edificio strategico che sorge alla medesima distanza dalla strada in una grande città, invece, potrebbe rientrare nella categoria "NEAR".

Le regole logiche di combinazione delle variabili, poi, potrebbero essere innumerevoli. Per il carattere di ricerca metodologica del presente lavoro, si è ipotizzata serie di regole linguistiche riportate in Tab. 3.9.

Tab. 3.9 - Regole logiche adottate.

Rule 1:	if (overcrowding is low) and (distance is very far) then (exposure is poorly exposed);
Rule 2:	if (overcrowding is low) and (distance is far) then (exposure is little exposed);
Rule 3:	if (overcrowding is low) and (distance is near) then (exposure is little exposed);

Rule 4:	if (overcrowding is low) and (distance is very near) then (exposure is exposed);
Rule 5:	if (overcrowding is medium) and (distance is very far) then (exposure is poorly exposed);
Rule 6:	if (overcrowding is medium) and (distance is far) then (exposure is little exposed);
Rule 7:	if (overcrowding is medium) and (distance is near) then (exposure is exposed);
Rule 8:	if (overcrowding is medium) and (distance is very near) then (exposure is very exposed);
Rule 9:	if (overcrowding is high) and (distance is very far) then (exposure is little exposed);
Rule 10:	if (overcrowding is high) and (distance is far) then (exposure is exposed);
Rule 11:	if (overcrowding is high) and (distance is near) then (exposure is very exposed);
Rule 12:	if (overcrowding is high) and (distance is very near) then (exposure is very exposed)

### 3.6.1.3 Fuzzy logic: fuzzificazione, inferenza/composizione e defuzzificazione

La fuzzificazione è quel processo che permette di trasformare in valori sfocati i dati e le informazioni in input.

Nella logica fuzzy, infatti, a ciascun punteggio stabilito in input corrisponde uno o più valori di attivazione” delle funzioni di appartenenza. A titolo di esempio, si preveda l’assegnazione del punteggio 2 alla variabile input *overcrowding*: ciò comporta contemporaneamente l’attivazione della funzione di appartenenza “*LOW*” con grado 0,5 e della funzione di appartenenza “*MEDIUM*” con grado 0,15.

Con il processo successivo, detto di inferenza, ad ogni coppia di valori sfocati ottenuti con la fuzzificazione si associano i corrispondenti valori della variabile output, in riferimento alle funzioni di appartenenza attivate e alle regole logiche precedentemente definite. Si utilizza l’operatore logico MIN per determinare il grado di appartenenza dell’insieme output.

Dalla fase di inferenza, quindi, si ottengono diversi insiemi sfocati output, ciascuno col proprio grado di attivazione: il processo di composizione combina questi risultati in un unico insieme sfocato, stabilendo tramite l’opera-

tore logico MAX quale delle regole implementate determinerà il risultato finale.

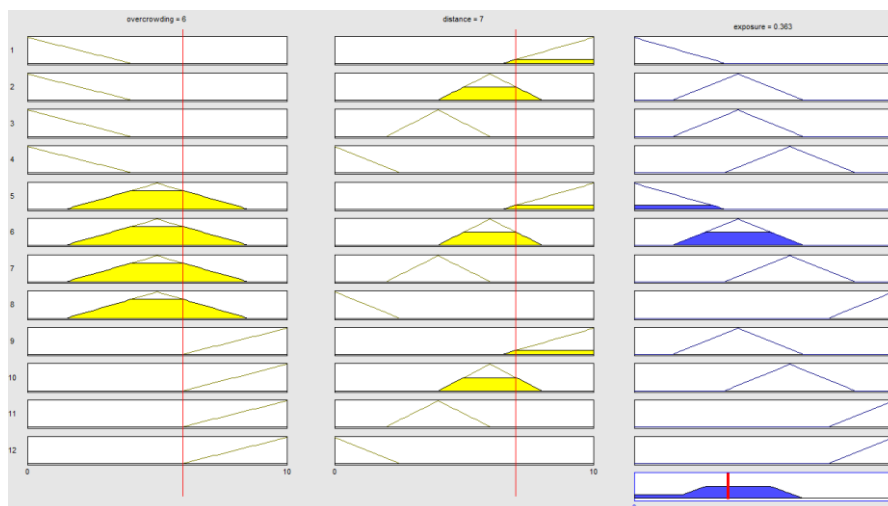


Fig. 3.48 - Determinazione dell'output exposure.

La gestione dell'intero processo basato su logica fuzzy è stata condotta tramite un toolbox di Matlab. Nella Fig. 3.48, a titolo di esempio, si riporta la determinazione dell'esposizione  $EXP_{SB}$  di una strada a servizio di un edificio strategico con grado di affollamento 6 e distanza 7.

È necessario applicare dei fattori correttivi alla valutazione dell'esposizione diretta così ottenuta.

In particolare, appare indispensabile comprendere se la strada considerata sia effettivamente a servizio degli edifici strategici posti nelle sue vicinanze o se, invece, si tratti di una strada poco distante ma che, per condizioni geomorfologiche del territorio o altro, non sia di collegamento diretto all'edificio strategico considerato (Tab. 3.10).

Tab. 3.10 - Fattore correttivo  $\gamma_{1SB}$ .

EDIFICIO STRATEGICO SERVITO DIRETTAMENTE DALLA STRADA		
	Si	No
$\gamma_{1SB}$	1	0,6

La seconda considerazione da fare è relativa all'uso urbano degli edifici strategici oggetto di analisi (Palermo & Francini, 2013).

Nella valutazione dell'esposizione diretta di una strada, un collegamento con una struttura sanitaria o scolastica assume maggiore importanza rispetto, per esempio, a quello con un cinema o con un museo. Questo perché differenti usi urbani di spazi e strutture determinano diversi flussi veicolari e, in alcuni casi, diverse concentrazioni di utenti deboli della strada (bambini, anziani, persone diversamente abili, etc.). In termini di localizzazione degli usi, numerose sono le categorie determinabili. La ricerca sintetizza tutte le possibili differenziazioni tipologiche e funzionali in tre macro categorie: servizi (strutture sanitarie, strutture scolastiche, impianti sportivi, verdi pubblici attrezzati, etc.), settore terziario-produttivo (commercio all'ingrosso, commercio al dettaglio, centri commerciali, insediamenti produttivi, uffici pubblici, etc.), settore turistico-culturale (strutture ricettive, campeggi, chiese, edifici di pregio, musei, biblioteche, aree archeologiche, etc.). Differenziando allora gli usi urbani degli edifici in riferimento alla loro funzione principale, è possibile associare ad ogni categoria un fattore correttivo  $\gamma_{2SB}$  come riportato nella Tab. 3.11.

Tab. 3.11 - Fattore correttivo  $\gamma_{2SB}$ .

USO URBANO			
	1. Servizi	2. Settore terziario-produttivo	3. Settore turistico-culturale
$\gamma_{2SB}$	1	0,8	0,6

Il calcolo dell'indice di esposizione della strada alternativa j-esima è dato dalla somma dei singoli contributi relativi ai tratti che la compongono:

$$I_{DEj} = \frac{\sum_{s=1}^{n_s} I_{DES} \times L_s}{L_j} \quad \text{Eq. 3.22}$$

Avendo indicato con:

$I_{DES}$ , l'indice di esposizione diretta del tratto s-esimo relativo alla strada j-esima;

$L_s$ , la lunghezza del tratto s-esimo relativo alla strada j-esima;

$n_s$ , il numero dei tratti appartenenti alla strada j-esima;

$L_j$ , la lunghezza della strada alternativa j-esima.

In base agli assunti precedenti e considerando che nell'analisi di esposizione di una determinata strada possono ricadere più edifici strategici, risulta:



$$I_{DEj} = \frac{\sum_{s=1}^{n_s} (\sum_{SB=1}^{n_{SB}} I_{DE_{SB}}) \times L_s}{L_j} = \frac{\sum_{s=1}^{n_s} (\sum_{SB=1}^{n_{SB}} EXP_{SB} \gamma_{1SB} \gamma_{2SB}) \times L_s}{L_j} \quad \text{Eq. 3.23}$$

Avendo indicato con:

$I_{DE_{SB}}$ , l'indice di esposizione diretta dell'edificio strategico considerato, che ricade nell'intorno del tratto s-esimo;

$n_{SB}$ , il numero degli edifici strategici ricadenti nell'intorno del tratto s-esimo;

$EXP_{SB}$ , la valutazione dell'esposizione ottenuta dal metodo *fuzzy logic*;

$\gamma_{1SB}$  e  $\gamma_{2SB}$ , i fattori correttivi precedentemente descritti.

### 3.6.2 Analisi dell'esposizione indiretta

L'analisi dell'esposizione indiretta mira a stimare, secondo un'ottica urbana resiliente, gli effetti generati sul sistema urbano non durante, ma dopo l'evento. È necessario, infatti, valutare le possibili conseguenze sociali ed economiche nella fase di post-emergenza dovute al malfunzionamento della rete stradale (Cafiso *et al.*, 2005). L'isolamento di una zona industriale a seguito di un evento, ad esempio, genera una perdita economica in termini di fatturato delle aziende; il mancato collegamento principale a un edificio strategico trasferisce flussi veicolari su strade secondarie di capacità inferiore, causando ingorghi e rallentamenti.

La ricerca, in particolare, valuta l'esposizione indiretta come funzione della popolazione residente nell'intorno dell'infrastruttura considerata e che, potenzialmente, potrebbe subire un danno dall'interruzione della stessa. A tal fine, è necessario ricorrere a dati socio-economici (es. elaborazioni ISTAT – Istituto Nazionale di Statistica in Italia) capaci di fornire una stima della popolazione residente in riferimento alle zone censuarie, alle località e ai singoli nuclei urbani presenti all'interno dei contesti comunali.

In particolare:

$$I_{IEj} = \frac{\sum_{s=1}^{n_s} I_{IE_s} \times L_s}{L_j} = \frac{\sum_{s=1}^{n_s} \left( \frac{pop_{cs}}{pop_{uc'_s}} \right) \times L_s}{L_j} \quad \text{Eq. 3.24}$$

Avendo indicato con:

$I_{IE_s}$ , l'indice di esposizione indiretta del tratto s-esimo relativo alla strada j-esima;

$L_s$ , la lunghezza del tratto s-esimo relativo alla strada j-esima;

- $n_s$ , il numero dei tratti appartenenti alla strada j-esima;
- $pop_{cs}$ , la popolazione residente nelle sezioni censuarie ricadenti in un intorno pari a 500 m rispetto all'asse stradale del tratto s-esimo considerato;
- $pop_{uc}$ , la popolazione residente nel nucleo urbano (la località, la frazione) di appartenenza del tratto s-esimo considerato;
- $L_j$  è la lunghezza della strada alternativa j-esima.

---

---

## Capitolo 4

### *La verifica dei risultati: due casi studio a confronto*

Solo scontrandosi con le difficoltà reali si potrà affinare il quadro abbozzato (Menoni, 1997).

In accordo con quanto definito nel par. 3.2, il modello di applicazione dei casi studio è la *virtual city*, costruita e dettagliata in funzione di due sistemi urbani reali, quello di Torino e quello di Rende, Comune in Provincia di Cosenza, in Calabria.

Il modello virtuale della città di Torino comprende l'intero sistema viario urbano e l'intero patrimonio edilizio ad uso residenziale.

La verifica di performance sulle infrastrutture stradali è condotta con riferimento al solo rischio sismico e la condizione di percorribilità valutata in funzione del collasso delle strutture prospicienti tutte le strade comunali.

Il caso studio relativo al Comune di Rende, invece, è implementato su una *virtual city* completa delle informazioni circa le aree di emergenza, gli edifici strategici e tutte le infrastrutture viarie di collegamento tra queste due categorie di elementi: il database relativo al patrimonio edilizio è stato costruito in un secondo momento, comprendendo le sole strutture prospicienti le strade considerate, già in fase preliminare, come possibili alternative di collegamento tra edifici strategici e aree di emergenza.

La verifica di performance sulle infrastrutture stradali è condotta in riferimento all'intera metodologia proposta nel precedente capitolo con la determinazione dell'Indice di Rischio per ogni strada alternativa e la successiva identificazione dell'intero sistema di viabilità strategica.

#### **4.1 Per la valutazione delle componenti strutturali: la *virtual city* di Torino**

La costruzione del primo modello su cui testare uno degli aspetti della metodologia proposta, nasce da un progetto più ampio coordinato dal Poli-

tecnico di Torino (*IDEal reSCUE – Integrated DEsign and control of Sustainable CommUnities during Emergencies H2020*), che ha come obiettivo finale la verifica di performance di tutte le *lifeline* di una città, tenendo conto anche dell'influenza del comportamento umano, specie nella fase decisionale. *IDEal reSCUE* si basa, quindi, sulla combinazione di “Modelli di rete” e di “Modelli *Agent-based*” (ABM).

I primi sono utilizzati per modellare le infrastrutture fisiche (come strade, sistema idrico, rete elettrica), mentre i secondi permettono di tenere conto dell'interazione simultanea sul territorio della popolazione colpita, ma anche del personale medico, dei Vigili del fuoco, e così via, simulando in toto la complessità della gestione di un'emergenza.

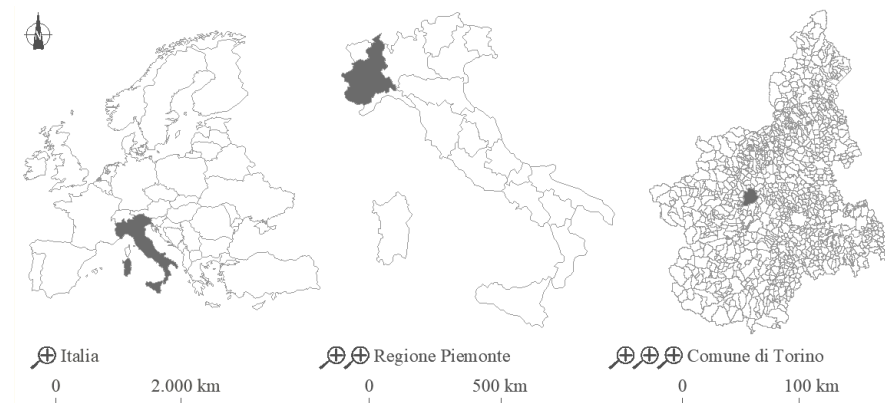


Fig. 4.1 - Inquadramento territoriale del primo caso di studio.

La *virtual city* di Torino, capoluogo della Regione Piemonte, comprende circa 23.000 edifici a uso residenziale e quasi 19.000 tratti stradali che attraversano l'intero territorio comunale (Fig. 4.2).

Considerato come scenario sismico il terremoto registrato nella stazione di Norcia (NRC) a 5 km dall'epicentro, il 30 ottobre 2016 (magnitudo pari a 6,5 e PGA pari a 0,42g), attraverso le analisi dinamiche nonlineari introdotte nel par. 3.4.1.2, il patrimonio edilizio è categorizzato in base al livello di danno stimato secondo le soglie limite definite da Ghobarah (2004) (Fig. 4.3).

Si evidenzia che, in questo specifico caso, la zona centrale della *virtual city* risulta essere la più vulnerabile. Il risultato ottenuto è in linea con l'evoluzione storica della città, caratterizzata proprio in quell'area da edifici più datati, pressoché tutti in muratura e probabilmente non interessati recentemente da interventi di miglioramento o di adeguamento.

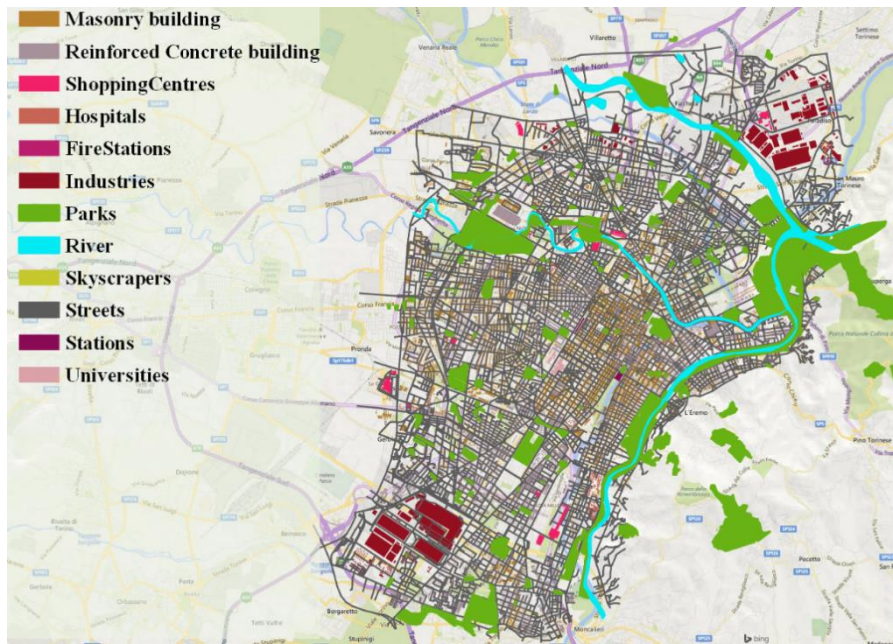


Fig. 4.2 - Modello della virtual city di Torino in ambiente GIS.

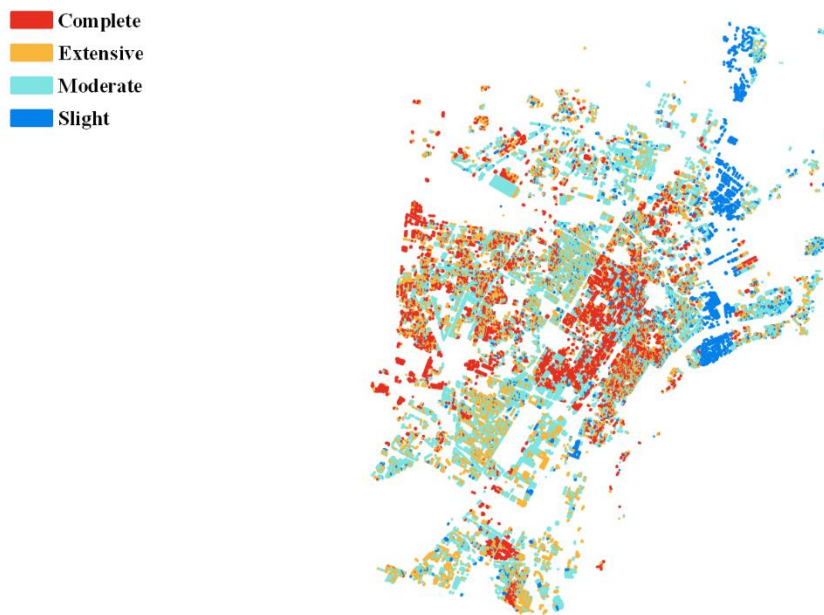


Fig. 4.3 - Patrimonio edilizio della virtual city di Torino categorizzato secondo il livello di danno.

Attraverso gli algoritmi di percorribilità codificati in Python, è possibile riscontrare che proprio nella medesima zona si potrebbero avere, in caso di sisma, i principali problemi di ostruzione stradale a causa dei detriti generati dal collasso delle strutture. A titolo di esempio e per una lettura più dettagliata dei risultati ottenuti, si riporta l'esito relativo a una porzione di città ridotta (Fig. 4.4).



Fig. 4.4 - Verifica della percorribilità delle infrastrutture stradali della virtual city di Torino.

I risultati ottenuti dal test sulla *virtual city* di Torino hanno rappresentato, ai fini della ricerca, il driver per l'implementazione delle fasi successive della metodologia, indirizzando il presente lavoro di tesi verso un approccio *multi-hazard* per le verifiche di percorribilità e restringendo il campo di studio ai soli elementi urbani strategici, con l'obiettivo, da un lato, di velocizzare la fase di costruzione del modello vista la scarsa disponibilità di dati estesi a tutto il territorio e, dall'altro, di offrire un ordine di priorità per pianificare in modo più efficace ed efficiente interventi di messa in sicurezza e disciplinare in modo opportuno e coerente i processi di disciplina degli usi del suolo e degli assetti urbani.

## 4.2 Per la metodologia performance-based: il Comune di Rende (CS)

Il Comune di Rende, limitrofo alla città di Cosenza e con una popolazione di circa 35.500 abitanti, è caratterizzato da diversi nuclei urbani: il centro storico, posto su un'altura, risulta ad oggi quasi distaccato dal resto della città che, invece, ha subito nel tempo un'espansione fisica e sociale grazie alla presenza dell'Università della Calabria, fondata negli anni Settanta e divenuta in breve tempo il principale polo attrattivo del Comune, essendo uno dei campus universitari più grandi di Italia. È proprio nei pressi dell'Università, infatti, che sorge uno dei nuclei urbani più fiorenti, quello di Quattromiglia, che presenta moltissime residenze per studenti e attività commerciali di vario tipo.



Fig. 4.5 - Inquadramento territoriale del secondo caso di studio.

Il Comune è attraversato da diversi torrenti ed è caratterizzato, secondo il Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Calabria (Autorità di Bacino Regione Calabria, 2016), da zone a rischio alluvione intermedio classificate come P3 e aree in frana a rischio medio P3 ed elevato P4 (Fig. 4.6). La città appartiene alla zona 1 di classificazione sismica ( $PGA > 0,25g$ ), riconosciuta come aree a sismicità alta.

Come già anticipato, la fase di reperimento dati per la realizzazione del modello virtuale in ambiente GIS ha riguardato, al contrario del caso di Torino, esclusivamente gli elementi di particolare rilevanza per il territorio: la localizzazione degli edifici strategici (SB) e delle aree di attesa (EA) è avvenuta grazie al supporto dei dati raccolti durante la sperimentazione operativa

del Livello Base, già introdotta nel par. 2.4.

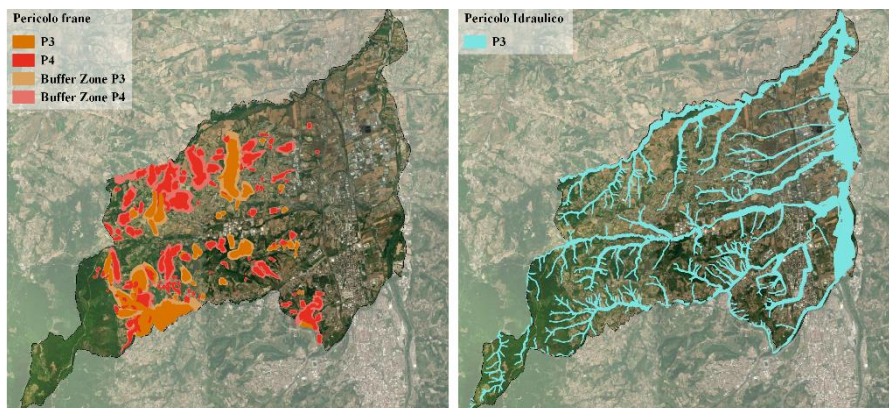


Fig. 4.6 - Aree a rischio alluvione e a rischio frana nel comune di Rendone. Fonte: PAI Calabria (2001).

Sono stati individuati 116 edifici strategici, distinti per tipologia (riferimento istituzionale, struttura sanitaria, struttura scolastica, ufficio pubblico, struttura sportiva, struttura ricettiva, museo, biblioteca, centro commerciale, bene monumentale, associazione), indirizzo e denominazione (Fig. 4.7).

ID	Denominazioni	Indirizzo	Tipologia
1	scde municipale-sede CO	Piazza San Carlo Borron	rif. istituzionale
2	vigili del fuoco	Via Parigi (Distaccament	rif. istituzionale
3	arma dei carabinieri	Via V. Alfieri, 3	rif. istituzionale
4	polizia di stato	Via Marconi Svincolo A3	rif. istituzionale
5	CNR	Via Cavour	rif. istituzionale
6	sede COM e biblioteca ec	Piazza Matteotti	rif. istituzionale e bibliot
7	Poliambulatorio	Via Meucci, Quattromigl	struttura sanitaria
8	Guardia Medica ASP	Corso Mazzini, 18	struttura sanitaria
9	Guardia Medica ASP	Via Pietro Bucci (Cubo 3	struttura sanitaria
10	Guardia Medica ASP	Via Corrado Alvaro, 12	struttura sanitaria
11	ASL	Via Kennedy,27	struttura sanitaria
20	asilo nido universita - ull	Piazza Vermicelli - Unica	strutture scolastiche
12	asilo nido Sacri Cuori	Via Panagulis	struttura scolastica
13	asilo nido Mary Poppins	Via Carlo Carra'	struttura scolastica
14	asilo nido	Via Michelangelo Buonai	struttura scolastica
15	asilo nido privato e Poste	Via Kennedy 1° TRAV. N	struttura scolastica e uffici
16	asilo nido madame	Via Brodolini, 35	struttura scolastica
17	asilo nido il mondo di Lo	Via Tallin, 3	struttura scolastica
18	asilo nido luna park	Via Londra, 14	struttura scolastica
19	asilo nido pubblico	Via Londra	struttura scolastica
21	scuola materna	Via D. Vanni	struttura scolastica
22	scuola materna P. Robins	Loc. Parco Robinson	struttura scolastica
23	scuola materna sapovito	Via G. De Chirico	struttura scolastica
24	scuola materna statale Re	Via Bari	struttura scolastica
25	scuola materna statale Ot	Contrada Tocci	struttura scolastica
26	scuola materna	Via Todaro	struttura scolastica
27	scuola materna arcavacat	Via Bertoni	struttura scolastica
28	scuola materna santo stef	Via Ungheria	struttura scolastica
29	scuola materna silvio pell	Via Silvio Pellico	struttura scolastica
30	scuola materna	Via Papa Giovanni XXII	struttura scolastica
31	scuola elementare D. Van	Via D. Vanni, 43	struttura scolastica
32	scuola elementare	Via Michele Molinaro	struttura scolastica



Fig. 4.7 - Alcuni degli edifici strategici (SB) modellati.



Le aree di emergenza riportate nel modello sono esclusivamente quelle di attesa, ossia i luoghi di prima accoglienza.

Nella fase di Livello Base sono state individuate 48 aree di attesa (Fig. 4.8), per ognuna delle quali sono state specificate diverse caratteristiche tra cui, ad esempio, l'estensione superficiale, la presenza di allacci ai servizi e la capacità in termini di numero di persone ospitabili, ottenuta come rapporto tra la superficie totale e  $2 \text{ m}^2$ , fattore rappresentativo dell'area occupata da una singola persona.

ID	Indirizzo	S_Area(m2)	Tipo_suolo	N_persone
14	Commenda (Via Repe)	2000.00	asfalto	1000
31	Centro storico (Chies)	500.00	pavimentazione	250
3	Rocchi (Rocchi 1)	7350.00	asfalto-suolo	3675
45	Chiodo2 (Chiodo 1)	4860.00	asfalto-suolo	2430
44	Martensson (Martens)	5650.00	suolo	2825
40	Aula Magna (Aula M)	510.00	asfalto	255
41	Aula Magna (Aula M)	780.00	suolo	390
39	Maisonnettes (Maison)	915.00	asfalto	457
38	Maisonnettes (Maison)	1910.00	suolo	955
37	Maisonnettes (Maison)	1375.00	suolo	687
33	San Gennaro (San Ge)	2200.00	asfalto	1100
34	San Gennaro (San Ge)	920.00	asfalto	460
35	Polifunzionale (Polifu)	7290.00	suolo-asfalto	3645
36	Polifunzionale (Polifu)	2135.00	asfalto	1067
42	Aula Magna (Aula M)	925.00	asfalto	462
43	Aula 17 (Aula 17-1)	3850.00	asfalto	1925
46	Materia (Materia 1)	3600.00	asfalto	1800
47	Materia (Materia 2)	3800.00	asfalto	1900
25	Quattromiglia (Via Vc)	2400.00	suolo-asfalto	1200
24	Quattromiglia (Parco)	13200.00	suolo-pavimentazione	6600
23	Quattromiglia (Via D)	3100.00	asfalto	1550
22	Villaggio Europa (Vic)	4900.00	asfalto	2450
21	Villaggio Europa (Vic)	3800.00	asfalto-suolo	1900
20	Villaggio Europa (Vic)	7900.00	asfalto	3950
19	Villaggio Europa (Vic)	6300.00	asfalto	3150
18	Via A. De Amicis (Pa)	6000.00	asfalto	3000
13	Via Matteotti (Villet)	800.00	pavimentazione-suolo	400
12	Via Fratelli Bandiera	1900.00	pavimentazione-suolo	950
11	Commenda (Piazza U)	2200.00	pavimentazione	1100
10	Commenda (Piazza N)	8500.00	pavimentazione	4250
17	Commenda (Viale dei)	4200.00	asfalto-suolo	2100
16	Commenda (Viale dei)	3000.00	asfalto-suolo	1500



Fig. 4.8 - Alcune delle aree di attesa (EA) modellate.

Note le due precedenti categorie di elementi, si è proceduto con l'identificazione di tutti i percorsi alternativi di collegamento tra la medesima origine (ES) e la medesima destinazione (EA<sub>1</sub>) o tra la medesima origine (ES) e un'area di attesa diversa (EA<sub>2</sub>) ma più conveniente in termini di prefissati criteri.

Tale processo ha dato vita a un sistema costituito da 241 tratti stradali modellati (Fig. 4.9) mediante cui è possibile identificare una serie di direttrici principali, la più importante ed estesa concentrata nella zona di Quattromiglia-Commenda e altre meno ampie in corrispondenza, ad esempio, della zona universitaria e del centro storico.

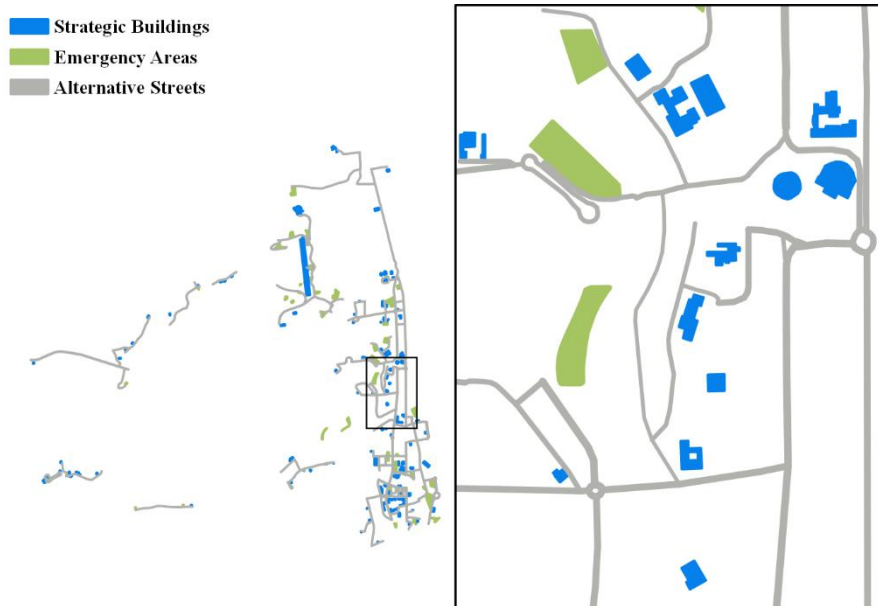


Fig. 4.9 - Valutazione di tutti i percorsi di collegamento possibili tra edifici strategici e aree di emergenza.

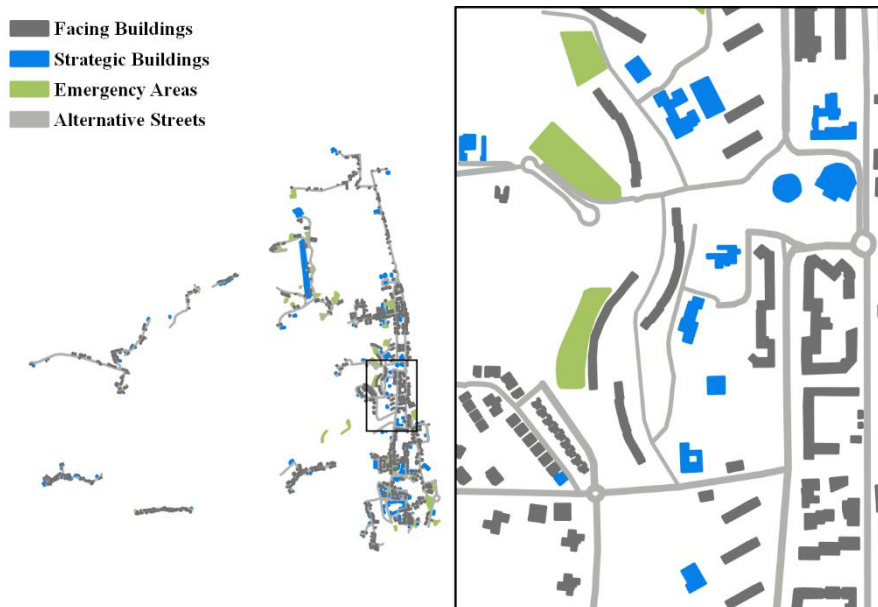


Fig. 4.10 - Valutazione degli edifici prospicienti.

La fase successiva alla valutazione di tutte le infrastrutture di collegamento ha riguardato rilevamento di tutti gli edifici prospicienti le strade individuate e la successiva costruzione del layer (Fig. 4.10) con i relativi attributi rispetto le caratteristiche geometriche, meccaniche e strutturali degli stessi, per come specificato nel par. 3.2.

Ai fini della determinazione dell'Indice di Rischio, per offrire una lettura sufficientemente comprensibile delle informazioni e un'interpretazione corretta dei risultati, si presenta l'applicazione della metodologia circoscritta a una singola porzione della *virtual city*, replicabile sull'intero territorio comunale.

In particolare, l'area di studio comprende diversi edifici strategici e aree di emergenza, con le relative infrastrutture stradali di collegamento (Fig. 4.11).

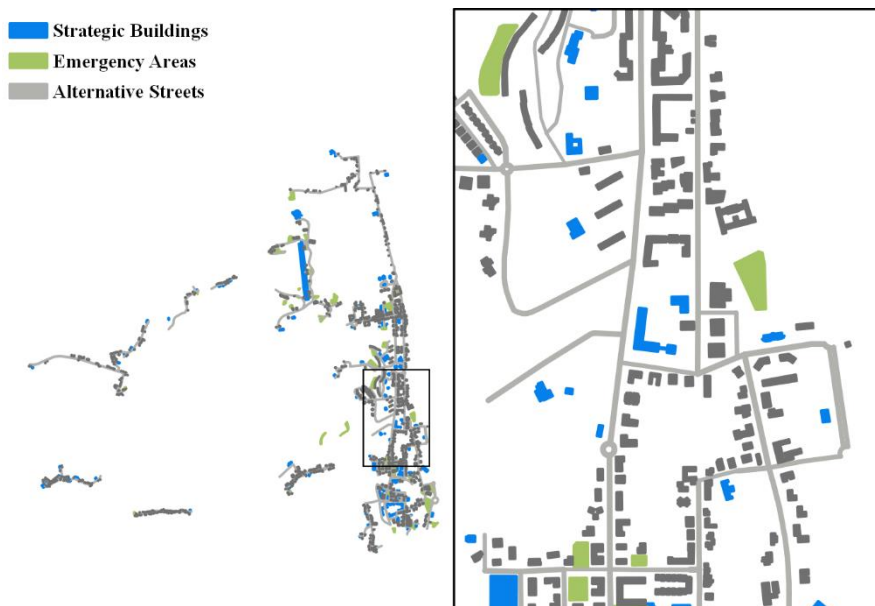


Fig. 4.11 - Area di studio.

L'elaborazione del Livello Base della città di Rende prevede attualmente il collegamento tra l'edificio strategico SB 5, sede del Centro Nazionale delle Ricerche, e l'area di attesa più vicina EA 18, tramite la strada composta dai tratti 243, 18, 221 e 218 (Fig. 4.12-1), seguendo il criterio della minima distanza.

La ricerca propone come ulteriori strade alternative:

- quella di collegamento tra l'edificio strategico SB 5 e le aree di emergenza EA 11 e EA 12, composta dai tratti 243, 235, 234, 223, e 29 (Fig. 4.12-2). Si fa notare che questo collegamento comprende due aree con superficie utile circa pari a quella dell'area di attesa EA 18;
- quella di collegamento tra l'edificio strategico SB 5 e l'area di emergenza EA 19, composta dai tratti 242, 122, 61, 241, 224 e 62 (Fig. 4.12-3).

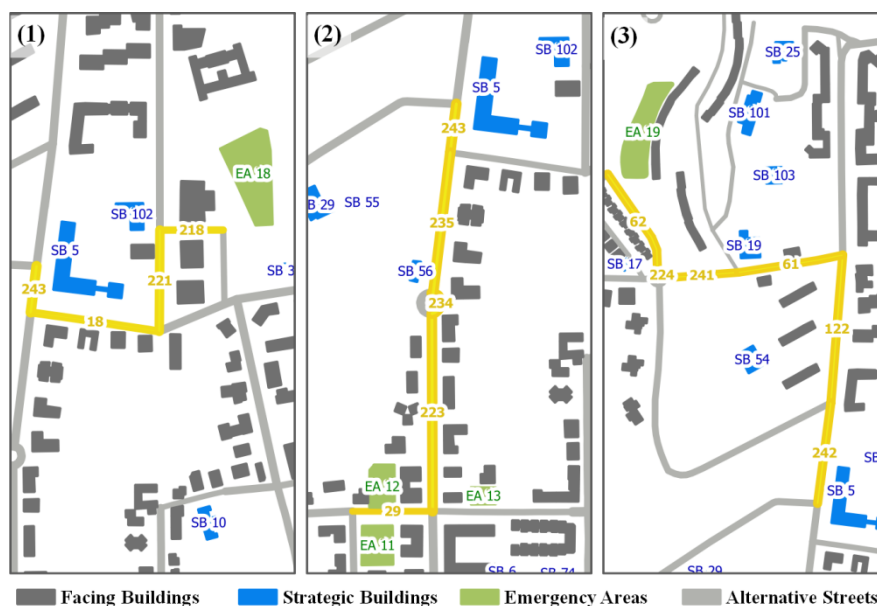


Fig. 4.12 - Strade alternative oggetto di analisi.

Di seguito si riassumono i risultati relativi al calcolo dell'Indice di Rischio per tutte e tre infrastrutture stradali.

#### 4.2.1 Calcolo dell'Indice di Pericolosità $I_{Hj}$

In riferimento al pericolo sismico, è stato definito un accelerogramma artificiale per come specificato nel par. 3.4.1.1 in accordo con le caratteristiche di pericolosità del Comune di Rende, ipotizzando una categoria di sottosuolo B e uno smorzamento  $\xi$  pari al 5% (Fig. 4.13).

Una volta noti lo scenario sismico di riferimento e le caratteristiche degli edifici è stato possibile classificare il patrimonio edilizio in base al più probabile livello di danno (Fig. 4.14), in accordo con le analisi di vulnerabilità

descritte nel par. 3.4.1.2.

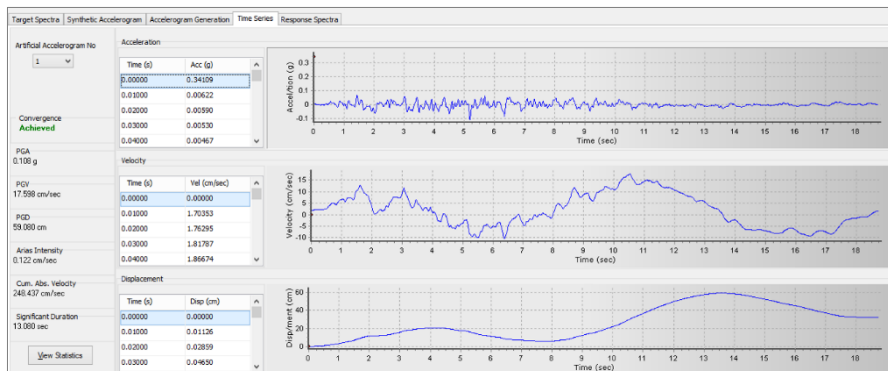


Fig. 4.13 - Accelerogramma riferito allo scenario sismico considerato.

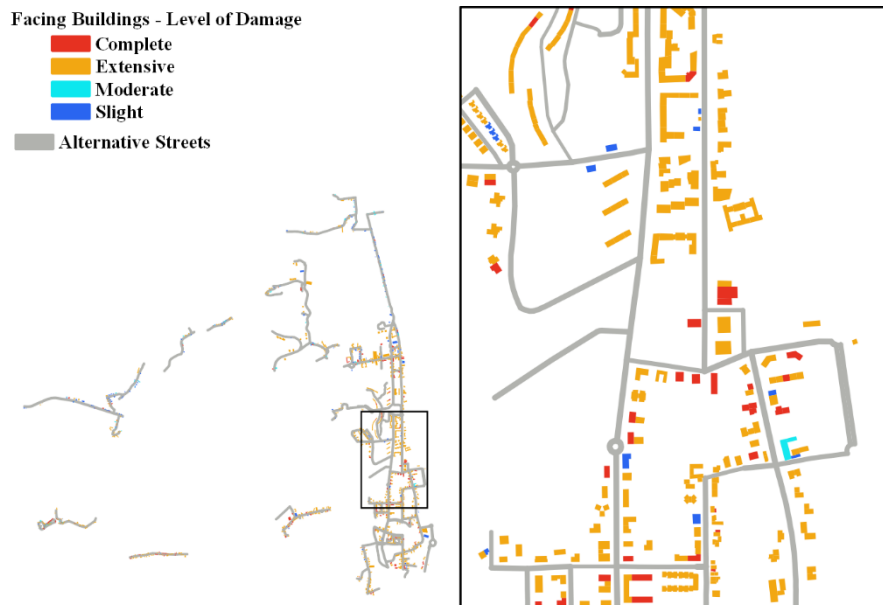


Fig. 4.14 - Patrimonio edilizio categorizzato secondo il livello di danno.

Valutata l'area di ingombro generata dall'espulsione dei detriti derivanti dal possibile crollo degli edifici con livello di danno "complete" (Fig. 4.15), è stato possibile determinare quali tratti stradali risulterebbero essere interrotti in caso di evento e quali, invece, permetterebbero il passaggio dei soccorsi e della popolazione in modo sicuro (Fig. 4.16).

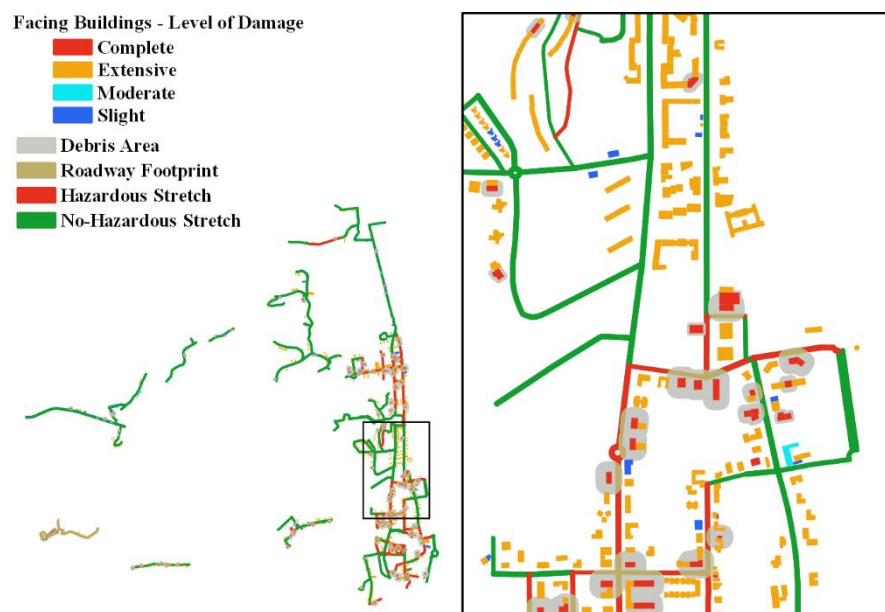


Fig. 4.15 - Valutazione dell'ingombro detriti generati dal collasso degli edifici.

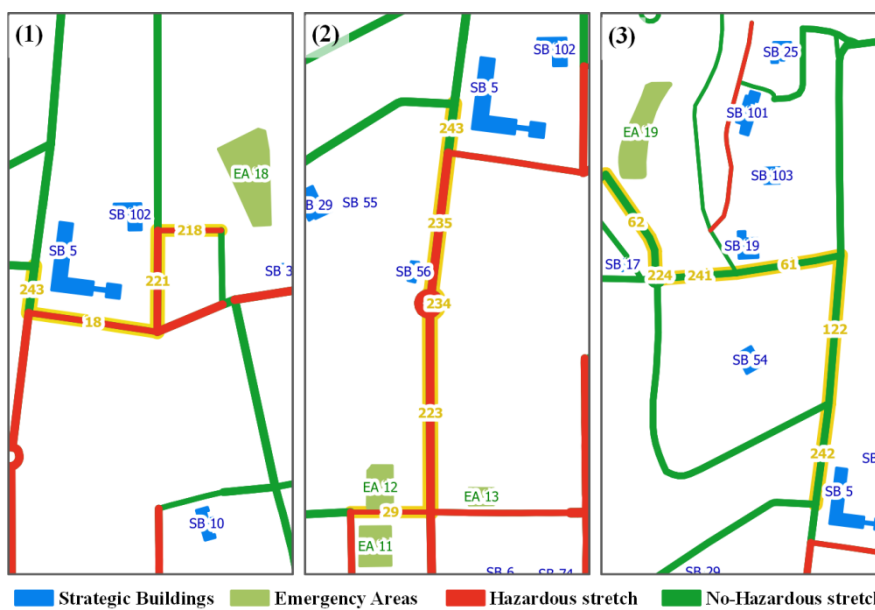


Fig. 4.16 - Percorribilità delle strade alternative in riferimento al pericolo sismico per collasso di edifici prospicienti.

Grazie a queste prime analisi relative a valutazioni sulle componenti strutturali degli edifici, attraverso l'Eq. 3.4 è stato possibile calcolare l'estensione di ciascuna strada alternativa potenzialmente soggetta al pericolo sismico (Tab. 4.1).

Tab. 4.1 - Calcolo di  $EX_{j,s}$  per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	$L_j$ [m]	ID Stretch	$L_s$ [m]	Hazardous Stretch	$EX_{j,s}$
1	SB 5	EA 18	475,05	243	64,99	✓	1,000
				18	181,13	✓	
				221	140,71	✓	
				218	88,22	✓	
2	SB 5	EA 11 EA 12	959,96	243	64,99	✗	0,932
				235	187,67	✓	
				234	39,39	✓	
				223	561,63	✓	
				29	106,28	✓	
3	SB 5	EA 19	1023,27	242	259,75	✗	0,000
				122	250,47	✗	
				61	178,77	✗	
				241	125,39	✗	
				224	16,44	✗	
				62	192,45	✗	

Per le analisi relative al collasso delle tamponature esterne, si è proceduto con la prima fase di *clustering*, categorizzando gli edifici in base al numero di piani.

Nel caso in esame, le categorie sono state 7 (da 2 a 8 piani), escludendo dall'analisi gli edifici a un piano, per cui considerazioni sulle tamponature

non assumono particolare rilievo in quanto l'espulsione genererebbe un ingombro limitato, e l'unico edificio a 11 piani presente sul territorio (Fig. 4.17).



Fig. 4.17 - Patrimonio edilizio della virtual city di Rende categorizzato secondo il numero di piani.

Seguendo gli step descritti nel par. 3.4.1.3 e modellando le tamponature esterne secondo il modello di Mazza & Donnici (2018), dalle analisi dinamiche nonlineari è stato possibile ricavare i valori massimi di spostamento, velocità e accelerazione relativi al collasso fuori piano dei pannelli, per ogni cluster di edifici (da Fig. 4.18 a Fig. 4.24).

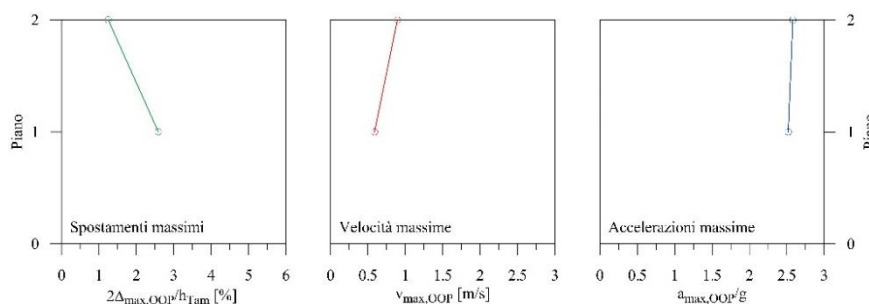


Fig. 4.18 - Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 2 piani.



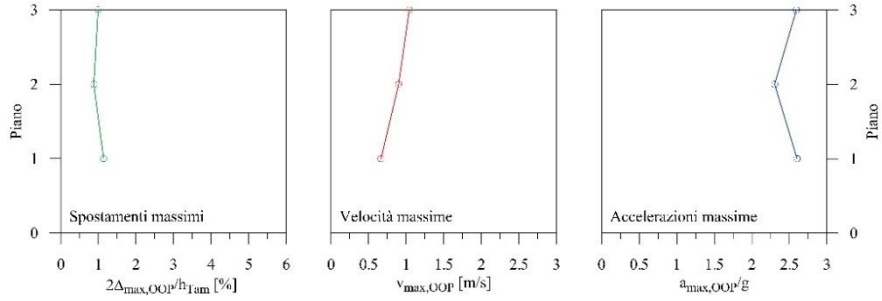


Fig. 4.19 - Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 3 piani.

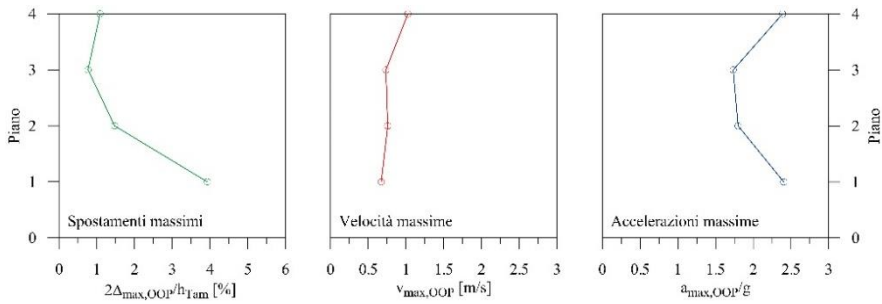


Fig. 4.20 - Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 4 piani.

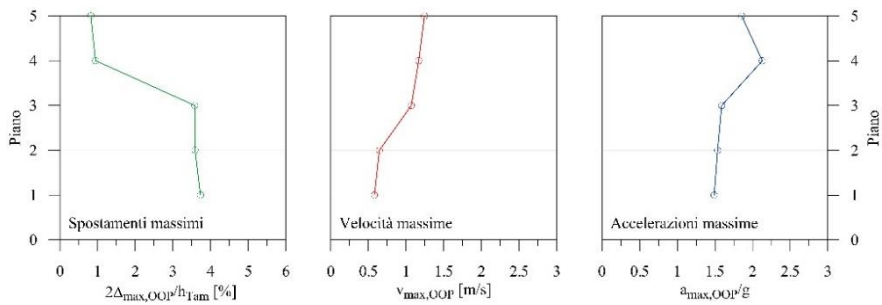


Fig. 4.21 - Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 5 piani.

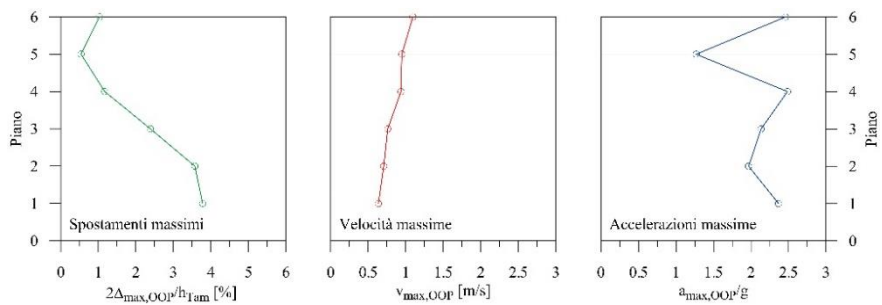


Fig. 4.22 - Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 6 piani.

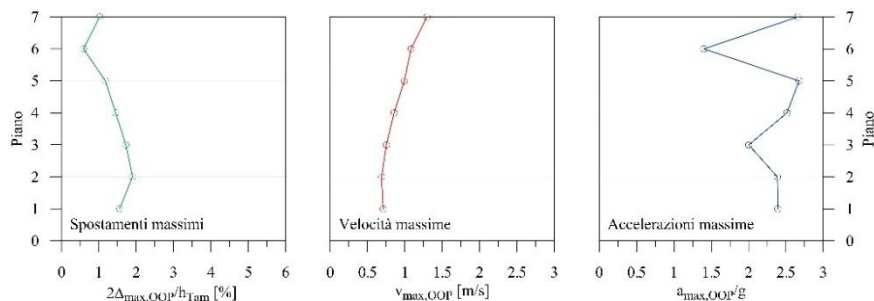


Fig. 4.23 - Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 7 piani.

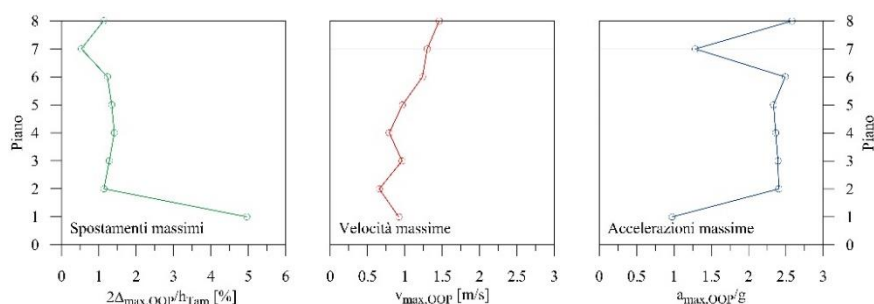


Fig. 4.24 - Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 8 piani.

Note le velocità, è stato possibile determinare la distanza di espulsione dei detriti, attraverso la relazione Eq. 3.10. Scelta come riferimento per il *buffer* la distanza maggiore tra quelle ottenute come risultato dei diversi modelli per fissato numero di piani (Tab. 4.2), la condizione di percorribilità è stata valutata, anche in questo caso, grazie al supporto di un codice automatizzato (Fig. 4.25).

Tab. 4.2 - Distanza massima di espulsione delle tamponature per collasso fuori piano in funzione del numero di piani.

n° piani	$d_{max}$ [m]	Modello di riferimento
2	2,50	2T311
3	3,86	3T211
4	4,50	4T211
5	3,97	5T111
6	4,40	6T111
7	5,02	7T211
8	9,49	8T111

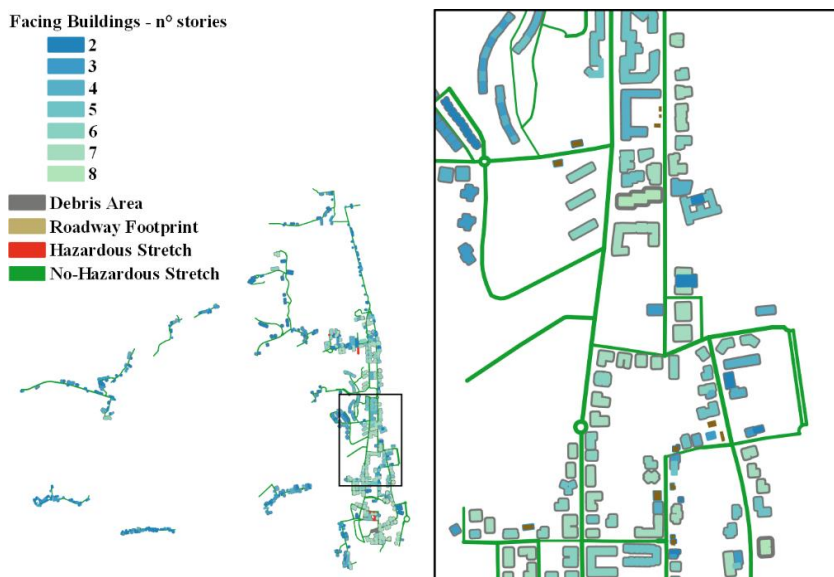


Fig. 4.25 - Valutazione dell'ingombro detriti generati dal collasso delle tamponature.

Nessuna alternativa è interessata da interruzioni causate dal collasso fuori piano di tamponature esterne (Fig. 4.26), per cui l'estensione di ogni singola strada potenzialmente soggetta a pericolo è nulla (Tab. 4.3).

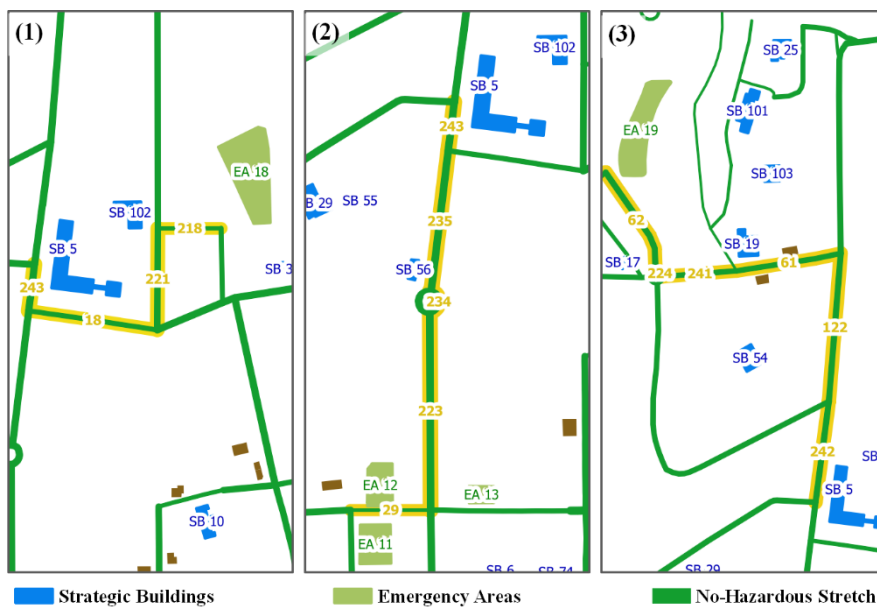


Fig. 4.26 - Percorribilità delle strade alternative in riferimento al pericolo sismico per collasso delle tamponature esterne.

Tab. 4.3 - Calcolo di  $EX_{j_{1ns}}$  per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	$L_j$ [m]	ID Stretch	$L_s$ [m]	Hazardous Stretch	$EX_{j_{1ns}}$
1	SB 5	EA 18	475,05	243	64,99	×	0,000
				18	181,13	×	
				221	140,71	×	
				218	88,22	×	
2	SB 5	EA 11 EA 12	959,96	243	64,99	×	0,000
				235	187,67	×	
				234	39,39	×	
				223	561,63	×	
				29	106,28	×	
3	SB 5	EA 19	1023,27	242	259,75	×	0,000
				122	250,47	×	
				61	178,77	×	
				241	125,39	×	
				224	16,44	×	
				62	192,45	×	

Assumendo  $P_1 = 0,100$ , in accordo con le considerazioni del par. 3.4.1.1, è possibile determinare, per ciascuna strada alternativa, il valore della prima componente  $I_{Hj_1}$  dell'Indice di Pericolosità relativo al pericolo sismico (Tab. 4.4).

Tab. 4.4 - Calcolo di  $I_{Hj_1}$  (pericolo sismico) per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	$L_j$ [m]	$EX_{j_{1s}}$	$EX_{j_{1ns}}$	$P_1$	$I_{Hj_1}$
1	SB 5	EA 18	475,05	1,000	0,000	0,100	0,100
2	SB 5	EA 11 EA 12	959,96	0,932	0,000	0,100	0,093
3	SB 5	EA 19	1023,27	0,000	0,000	0,100	0,000

Dalla consultazione con il Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico della Regione Calabria (Autorità di Bacino Regione Calabria, 2016) emerge che

l'area considerata è soggetta a una classe di pericolosità alta in relazione al pericolo alluvioni (Fig. 4.27 e Fig. 4.28).

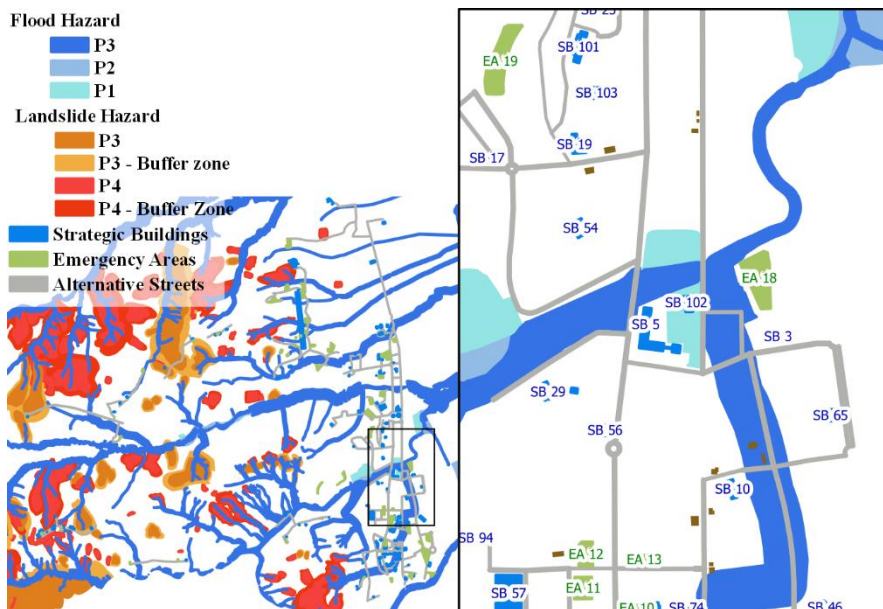


Fig. 4.27 - Valutazione del pericolo idrogeologico.

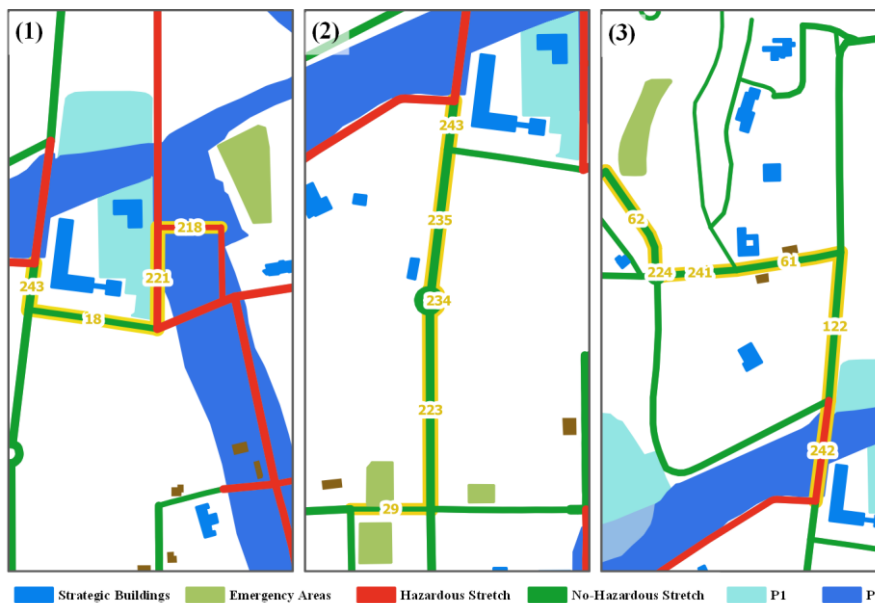


Fig. 4.28 - Percorribilità delle strade alternative in riferimento al pericolo idraulico.

In virtù di ciò, è possibile calcolare l'estensione di ogni strada alternativa potenzialmente soggetta a pericolo idraulico (Tab. 4.5).

Tab. 4.5 - Calcolo di  $EX_{j_2}$  per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	$L_j$ [m]	ID Stretch	$L_s$ [m]	Hazardous Stretch	$EX_{j_2}$
1	SB 5	EA 18	475,05	243	64,99	✗	0,482
				18	181,13	✗	
				221	140,71	✓	
				218	88,22	✓	
2	SB 5	EA 11 EA 12	959,96	243	64,99	✗	0,000
				235	187,67	✗	
				234	39,39	✗	
				223	561,63	✗	
				29	106,28	✗	
3	SB 5	EA 19	1023,27	242	259,75	✓	0,250
				122	250,47	✗	
				61	178,77	✗	
				241	125,39	✗	
				224	16,44	✗	
				62	192,45	✗	

In accordo con la Tab. 3.3, si assume un tempo di ritorno pari a 50 anni per classe di pericolosità alta, da cui deriva, in virtù dell'Eq. 3.13

, una probabilità  $P_2 = 0,635$ . In base all'Eq. 3.5 è possibile determinare il valore della seconda componente  $I_{Hj_2}$  dell'Indice di Pericolosità relativo al pericolo idraulico (Tab. 4.6).

Tab. 4.6 - Calcolo di  $I_{Hj_2}$  (pericolo idraulico) per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	$L_j$ [m]	$EX_{j_2}$	$P_2$	$I_{Hj_2}$
1	SB 5	EA 18	475,05	0,482	0,635	0,306
2	SB 5	EA 11 EA 12	959,96	0,000	0,635	0,000
3	SB 5	EA 19	1023,27	0,250	0,635	0,161

Dalla consultazione con il Piano di Emergenza comunale di Protezione Civile risulta che l'intero territorio comunale è soggetto a pericoli connessi a fenomeni meteorologici come nevicate e gelate, ondate di calore, nebbia, forti venti e temporali: questo tipo di pericolo, però, è descritto in modo generale e senza specifici riferimenti a zone ben definite, corredato solo da una breve descrizione che riguarda l'intero Comune.

Da ulteriori verifiche con piani e programmi nessun'altra tipologia di pericolo naturale risulta essere presente sul territorio in esame.

In considerazione del fatto che lo stato attuale della ricerca prevede analisi di simulazione più dettagliate in riferimento al rischio sismico rispetto agli altri tipi di pericolo, il peso metodologico assunto per le due componenti relative all'Indice di Pericolosità è rispettivamente  $\alpha_1 = 0,70$  per il pericolo terremoti e  $\alpha_2 = 0,30$  per il pericolo alluvioni. In virtù di ciò è possibile determinare l'Indice di Pericolosità per le tre strade alternative (Tab. 4.7), in accordo con la relazione Eq. 3.2

Tab. 4.7 - Calcolo di  $I_{Hj}$  per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	$I_{Hj}$
1	SB 5	EA 18	0,162
2	SB 5	EA 11 EA 12	0,065
3	SB 5	EA 19	0,048

#### 4.2.2 Calcolo dell'Indice di Vulnerabilità $I_{Vj}$

In accordo con le considerazioni del par. 3.5.1, nelle Tab. 4.8 e Tab. 4.9 sono sintetizzati i risultati ottenuti per la determinazione dei parametri  $P_L$  e  $P_W$ .

Tab. 4.8 - Calcolo del parametro  $P_L$  per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	$L_j$ [m]	$L_{min}$ [m]	$P_{Lj}$
1	SB 5	EA 18	475,05		0,000
2	SB 5	EA 11 EA 12	959,96	475,05	0,505
3	SB 5	EA 19	1023,27		0,536

Tab. 4.9 - Calcolo del parametro  $P_W$  per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	$W_{minj}$ [m]	$max(W_{minj})$ [m]	$P_{Wj}$
1	SB 5	EA 18	4,00		0,500
2	SB 5	EA 11 EA 12	5,00	8,00	0,375
3	SB 5	EA 19	8,00		0,000

Si osserva che solo la strada n°3 presenta un elemento critico lungo il suo percorso (Fig. 4.29), per cui viene assegnato solo ad essa un livello “*MEDIUM*” associato al parametro  $P_{CEj}$ .

Inoltre, tutte e tre le infrastrutture sono dotate di strade alternative per giungere alle aree di emergenza designate come destinazione. In particolare è assegnato un livello “*MEDIUM*” di ridondanza per la strada alternativa n°1 e per la n°2 e uno “*HIGH*” per la n°3.



Fig. 4.29 - Valutazione degli elementi critici presenti.

Nella Tab. 4.10 sono riassunti i risultati ottenuti dalle precedenti considerazioni.

Nell'ultima colonna è determinato il valore dell'Indice di Vulnerabilità



per ciascuna strada alternativa, in accordo con l'Eq. 3.20.

Tab. 4.10 - Calcolo di  $I_{V_j}$  per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	$P_{L_j}$	$P_{W_j}$	$P_{CE_j}$	$P_{R_j}$	$I_{V_j}$
1	SB 5	EA 18	0,000	0,500	0,000	0,500	0,154
2	SB 5	EA 11 EA 12	0,505	0,375	0,000	0,500	0,261
3	SB 5	EA 19	0,536	0,000	0,500	0,000	0,355

#### 4.2.3 Calcolo dell'Indice di Esposizione $I_{E_j}$

L'Indice di Esposizione è calcolato attraverso le fasi descritte nel par. 3.6.

A titolo di esempio si riportano in Tab. 4.11 i risultati ottenuti dal calcolo dell'Indice di Esposizione Diretta  $I_{DE_j}$  per il primo tratto (ID Stretch 243) appartenente alla strada alternativa n°1 (Fig. 4.30).

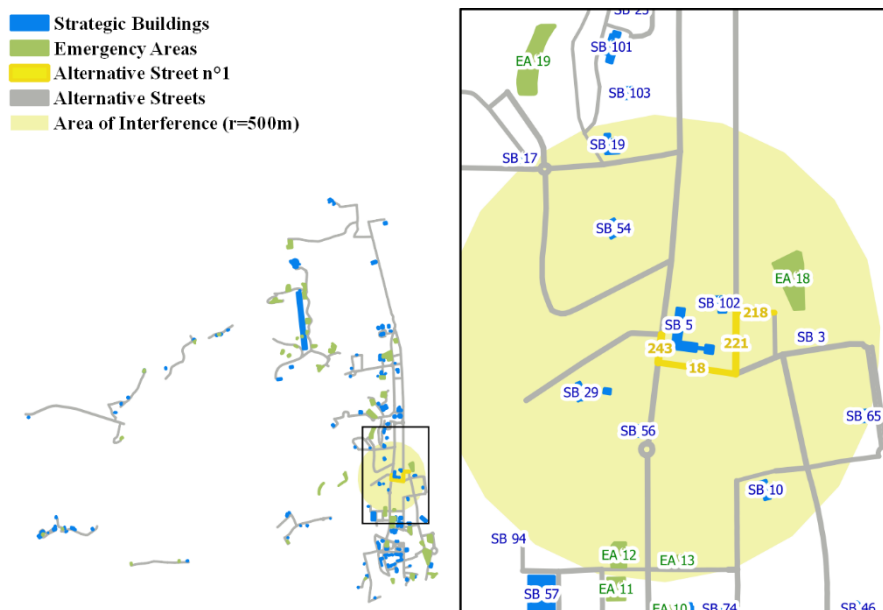


Fig. 4.30 - Valutazione dell'esposizione diretta in funzione degli edifici strategici ricadenti in un intorno di 500 m rispetto all'asse del tratto considerato (es. ID Stretch 243).

È necessario specificare che, laddove il valore dell'indice fosse maggiore dell'unità, si assume un valore effettivo pari a 1.

Tab. 4.11 - Valutazione del contributo  $I_{DE_{str}}$  (relativo al primo tratto della strada alternativa n°1) al calcolo di  $I_{DE_j}$ .

Strada alternativa j	ID Stretch	$L_s$ [m]	ID Edificio Strategico	Denominazione	Overcrowding	Distance	$EXP_{SB}$	$\gamma_{1,SB}$	$\gamma_{2,SB}$	$I_{DE_{SB_s}}$	$I_{DE_{s_{teo}}}$	$I_{DE_s}$	
1	243	64,99	SB 5	CNR	7	1	0,902	1	1	0,902			
			SB 102	Fondazione R. Lanzino	3	1	0,730	1	0,6	0,438			
			SB 3	Arma dei carabinieri	5	2	0,890	1	1	0,890			
			SB 10	Guardia medica	5	6	0,400	1	1	0,400			
			SB 29	Scuola mat. Pellico	7	3	0,667	1	1	0,667			
			SB 55	Circolo Tennis	3	3	0,527	1	1	0,527		5,296	1
			SB 56	Campi calcetto	3	4	0,527	1	1	0,527			
			SB 19	Asilo nido	5	7	0,363	1	1	0,363			
			SB 54	Bocciodromo	2	4	0,444	1	1	0,444			
			SB 65	Tennis Club	3	8	0,138	1	1	0,138			

La Tab. 4.12, invece, sintetizza i risultati ottenuti per ciascuna strada alternativa considerata.

Tab. 4.12 - Calcolo di  $I_{DEj}$  per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	ID Stretch	$L_s$ [m]	$I_{DESB_{jteo}}$	$I_{DESB_j}$	$I_{DEj}$
1	SB 5	EA 18	243	64,99	5,296	1	1
			18	181,13	4,786	1	
			221	140,71	4,755	1	
			218	88,22	4,892	1	
2	SB 5	EA 11 EA 12	243	64,99	5,296	1	1
			235	187,67	6,994	1	
			234	39,39	6,982	1	
			223	561,63	10,717	1	
			29	106,28	8,924	1	
3	SB 5	EA 19	242	259,75	5,701	1	1
			122	250,47	7,897	1	
			61	178,77	5,027	1	
			241	125,39	5,027	1	
			224	16,44	5,027	1	
			62	192,45	5,305	1	

Il calcolo dell'Indice di Esposizione Indiretta  $I_{IEj}$  è condotto attraverso valutazioni sui dati ISTAT relativi al 15° Censimento della popolazione e delle abitazioni del 2011. In particolare, essi si riferiscono alla popolazione residente suddivisa per zone censuarie e località di appartenenza. Il Comune di Rende è suddiviso in circa 170 zone censuarie: quelle che ricadono nell'area di studio, considerando un intorno di 500 m rispetto l'asse stradale del tratto) variano da 21 a 27, a seconda del tratto in esame.

Le località, invece, sono 26 per l'intero territorio comunale (Fig. 4.31) ma, nell'applicazione considerata, ne ricadono solo tre, quella di Quattromiglia e due nuclei di Case Sparse (Tab. 4.13).

In Tab. 4.14 sono riportati i risultati relativi al calcolo dell'Indice di Espozione Indiretta  $I_{IE_j}$  per ciascuna strada alternativa.

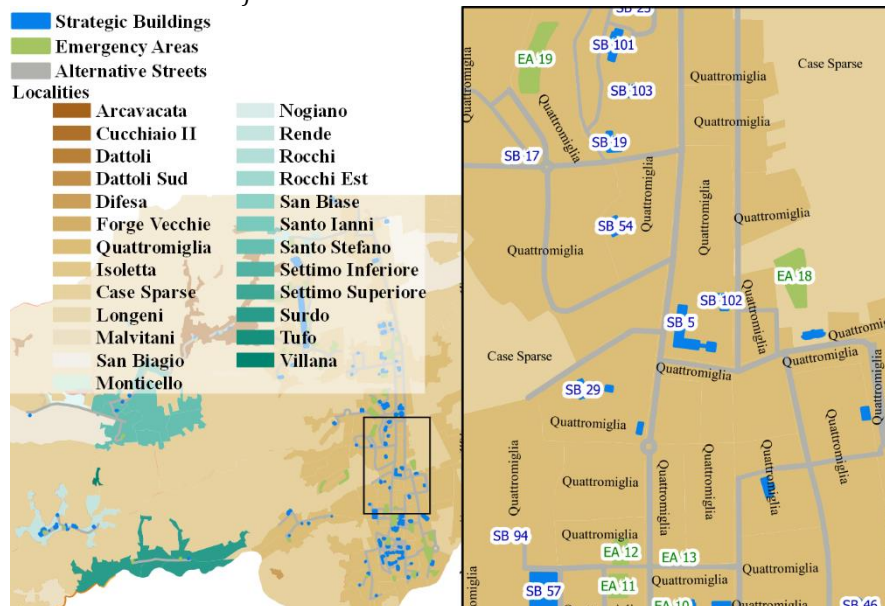


Fig. 4.31 - Suddivisione del territorio comunale in località e zone censuarie. Fonte: ISTAT, 2011.

Tab. 4.13 - Località del Comune di Rende interne all'area di studio con la relativa popolazione residente. Fonte: ISTAT (2011).

Nome Località	CODLOC	Popolazione residente (ab)
Quattromiglia	10004	22.884
Case sparse	40001	1.293
Case sparse	40002	147

Tab. 4.14 - Calcolo di  $I_{IE_j}$  per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa j	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	ID Stretch	$L_s$ [m]	$pop_{cs}$ [ab]	$pop_{uc}$ [ab]	$I_{IE_s}$	$I_{IE_j}$
1	SB 5	EA 18	243	64,99	5.035	24.324	0,207	0,210
			18	181,13	4.670	24.324	0,192	
			221	140,71	5.853	24.324	0,241	
			218	88,22	4.876	24.324	0,200	

			243	64,99	5.035	24.324	0,207	
			235	187,67	8.622	24.324	0,354	
2	SB 5	EA 11	234	39,39	8.622	24.324	0,354	0,335
		EA 12	223	561,63	8.622	24.324	0,354	
			29	106,28	6.582	24.177	0,272	
			242	259,75	5.035	24.324	0,207	
			122	250,47	6.024	24.324	0,248	
3	SB 5	EA 19	61	178,77	4.194	24.324	0,172	0,199
			241	125,39	4.194	24.324	0,172	
			224	16,44	4.194	24.324	0,172	
			62	192,45	4.117	24.177	0,170	

Note le due aliquote  $I_{DEj}$  e  $I_{IEj}$  è possibile calcolare l'indice di esposizione per le due strade alternative (Tab. 4.15).

Tab. 4.15 - Calcolo di  $I_{Ej}$  per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	$I_{DEj}$	$I_{IEj}$	$I_{Ej_{teo}}$	$I_{Ej}$
1	SB 5	EA 18	1,000	0,210	1,210	1,000
2	SB 5	EA 11 EA 12	1,000	0,335	1,335	1,000
3	SB 5	EA 19	1,000	0,199	1,199	1,000

Si fa notare che, anche in questo caso, laddove l'indice  $I_{Ej}$  assume valori superiori all'unità, lo stesso è assunto pari a 1.

#### 4.2.4 L'analisi dei risultati in funzione dell'Indice di Rischio $I_{Rj}$

In seguito alla determinazione degli indici di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione è possibile calcolare l'Indice di Rischio  $I_{Rj}$  per come stabilito dall'Eq. 2.1.

In Tab. 4.16 sono riportati i risultati ottenuti dal per ciascuna strada alternativa.

Tab. 4.16 - Calcolo di  $I_{R_j}$  per ciascuna strada alternativa.

Strada alternativa $j$	ID Edificio Strategico	ID Area di Emergenza	$I_{H_j}$	$I_{V_j}$	$I_{E_j}$	$I_{R_j}$
1	SB 5	EA 18	0,162	0,154	1,000	0,0249
2	SB 5	EA 11 EA 12	0,065	0,261	1,000	0,0169
3	SB 5	EA 19	0,048	0,355	1,000	0,0171

I risultati ottenuti stabiliscono che la strada alternativa da individuare come infrastruttura strategica è la n°2, essendo caratterizzata dall'Indice di Rischio inferiore.

È possibile dimostrare, allora, come la metodologia proposta sia in contrasto con la pianificazione di emergenza tradizionale che definiva l'alternativa n°1 come strada strategica e che, invece, dai risultati ottenuti risulta essere l'infrastruttura con livello di rischio più alto: il solo criterio della minima distanza non è sufficientemente adatto per garantire un'identificazione efficace della viabilità strategica.

Come altri campi di ricerca, anche la pianificazione di emergenza necessita di nuovi approcci basati su valutazioni relative alle performance delle componenti dei sistemi urbani: utilizzare metodologie in grado di considerare una vasta gamma di fattori – intrinseci come le caratteristiche strutturali ed estrinseci come scenari di evento o flussi di utenti – evidenzia la necessità di pianificare il sistema urbano come insieme e le infrastrutture come reti.

I risultati, inoltre, dimostrano che l'Indice di Esposizione  $I_{E_j}$  nel caso di confronto tra strade alternative, risulta essere poco influente nella determinazione globale dell'Indice di Rischio. Ciò appare logico e giustificato in quanto strade di collegamento tra diverse aree di emergenza e il medesimo edificio strategico ricadono in un'area di territorio piuttosto limitata: il numero di utenti e i flussi veicolari saranno allora confrontabili tra loro (esposizione diretta) e anche la stima della popolazione residente nell'intorno sarà molto simile in entrambi i casi (esposizione indiretta). Per applicazioni future, allora, la formulazione Eq. 2.1 verrà sostituita dalla Eq. 4.1 dove il calcolo dell'Indice di Rischio sarà relativo al prodotto delle sole aliquote di Pericolosità e Vulnerabilità.

$$I_{R_j} = I_{H_j} \times I_{V_j} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Qualora una delle due aliquote ( $I_{H_j}$  e  $I_{V_j}$ ) risultasse essere nulla, è comunque necessario verificare la seconda, pur essendo noto a priori che l'indice

finale di rischio  $I_{R_j}$  sarà nullo. Questo perché, nel caso in cui dal confronto tra più strade alternative l'indice di rischio risultasse per tutte essere nullo perché nulle le medesime componenti (es. per tutte le strade alternative  $I_{H_j} = 0$ ), la valutazione del livello di rischio avverrà confrontando esclusivamente le componenti non nulle (es. solo l'aliquota  $I_{V_j}$ ). Nel caso in cui, invece, risultassero nulle alternativamente componenti  $I_{H_j}$  e  $I_{V_j}$ , la scelta della strada da inserire nel sistema viario strategico ricadrà sull'alternativa "0", ossia quella associata allo stato di fatto, alla pianificazione vigente al momento dell'analisi.

#### 4.2.5 Confronto con la Condizione Limite di Emergenza

Negli ultimi anni la valutazione dell'interruzione delle infrastrutture stradali, specialmente in caso di eventi sismici, è stato oggetto di diversi studi e ricerche scientifiche (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2014; Ferlito & Pizza, 2011; Francini *et al.*, 2018a; Quagliarini *et al.*, 2016; Santarelli *et al.*, 2018).

A titolo di esempio, si presenta una verifica della percorribilità della rete stradale condotta attraverso la già citata Condizione Limite di Emergenza (CLE) e un successivo confronto con i risultati ottenuti dalla metodologia proposta. Per come già anticipato nel par. 2.2, la CLE rappresenta uno strumento di valutazione del sistema di gestione dell'emergenza esistente, utile a verificare la correttezza e la completezza delle informazioni già contenute nei piani operativi, ma non attualmente applicabile in modo vero e proprio come formale strategia di pianificazione.

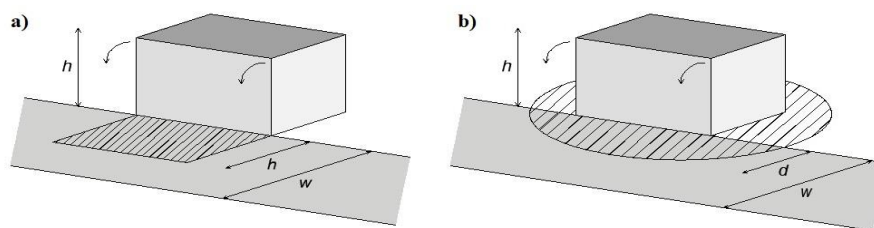


Fig. 4.32 - Differenza tra (a) condizione di non-interferenza  $h < w$  (CLE) e (b) condizione di percorribilità  $d < w - 2m$  (metodologia proposta)<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> $h$  è l'altezza dell'edificio,  $w$  è la larghezza della carreggiata,  $d$  rappresenta l'ingombro dei detriti calcolato per come specificato nel par. 3.4.1.2, 2 m è la larghezza considerata per un generico mezzo di soccorso.

In contrasto con la condizione di percorribilità proposta dal presente lavoro, secondo cui un tratto è definito “*hazardous*” se in una sua qualsiasi sezione stradale l’ingombro dei detriti è tale da impedire il passaggio di un generico mezzo di soccorso, la condizione imposta dalla CLE che regola il legame tra rete viaria ed edifici prospicienti è quella di “interferenza”: un edificio e un’infrastruttura stradale sono interferenti se l’altezza del primo è maggiore della larghezza della carreggiata (Fig. 4.32) e la larghezza dell’ingombro dei detriti corrisponde proprio con l’altezza dell’edificio considerato.

In Fig. 4.33 sono evidenziati gli edifici considerati interferenti e le interruzioni generate considerando l’intera altezza dell’edificio come ingombro dei detriti.



Fig. 4.33 - Interruzioni generate dall’applicazione della condizione di interferenza (CLE).

È importante specificare che la CLE si riferisce esclusivamente a valutazioni relative al rischio sismico, quindi l’unico confronto possibile è quello con i risultati ottenuti con la verifica dell’Indice di Pericolosità relativo ai terremoti (Fig. 4.34).

In particolar modo, è possibile constatare che l’applicazione della CLE sovrastima la reale condizione di percorribilità della rete viaria: tale risultato è comprensibile perché essa si riferisce solo alle caratteristiche geometriche



dell'edificio e dell'infrastruttura senza alcuna considerazione circa le caratteristiche sismiche del Comune o le condizioni di vulnerabilità sismica delle strutture analizzate.

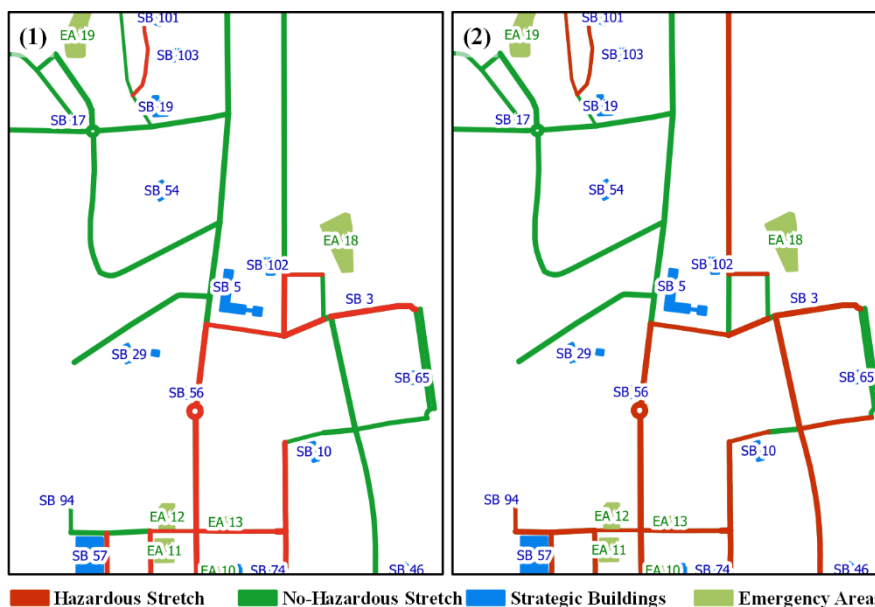


Fig. 4.34 - Confronto tra le verifiche di percorribilità relative (1) alla metodologia proposta con riferimento al pericolo sismico e (2) alla CLE.

È possibile concludere, allora, che attualmente la CLE rappresenta un utile strumento di verifica di Piano (proprio per come originariamente concepito), ma che per una stima più accurata in fase di pianificazione è senza dubbio necessario utilizzare approcci differenti, capaci di considerare ulteriori parametri di giudizio che non si limitino alle sole caratteristiche geometriche di strade ed edifici.

In un'ottica di integrazione tra i diversi strumenti a disposizione dei pianificatori, ricerche e studi simili potrebbero essere, a tal riguardo, sistematizzati: analisi della CLE già condotte all'interno del territorio comunale potrebbero, per esempio, offrire informazioni più dettagliate circa le condizioni strutturali e meccaniche degli edifici, incrementando il database di supporto alla costruzione della *virtual city* e a future sperimentazioni come quella proposta in questo lavoro di tesi.

## Conclusioni

L'urbanista non deve proporre delle mete prefissate, perché il suo compito consiste piuttosto nello scoprirle e soprattutto nell'aiutare la comunità a darsi uno scopo, per cui egli sarà, piuttosto che il dittatore, l'interprete e l'ordinatore (Olivetti, 2001).

### *Assunti riepilogativi della ricerca*

Il presente lavoro di tesi nasce dall'esigenza di mettere chiarezza circa alcune prassi caratterizzanti le fasi di elaborazione dei Piani di Emergenza comunali ed è conseguenza di una sperimentazione operativa avviata dal Laboratorio di Pianificazione dell'Ambiente e del Territorio dell'Università della Calabria in collaborazione con la Protezione Civile calabrese.

In seguito a ciò, la ricerca ha trovato una sua spontanea evoluzione: offrire alla pianificazione di emergenza linee di indirizzo rivolte a qualificare maggiormente il suo già preesistente carattere di pianificazione spaziale. Tali linee di indirizzo si sostanziano in un "*modus operandi*" per la messa in sicurezza dei sistemi urbani da concretizzare secondo un'ottica preventiva che, trasformandosi in vera e propria strategia di resilienza, è da realizzare già in "tempo di pace".

Nello specifico, il lavoro sposta il focus dell'emergenza da un approccio puntuale, tipicamente operativo e "*non strutturale*" (la valutazione del singolo rischio, la previsione del singolo intervento di messa in sicurezza relativo al singolo manufatto, etc.) ad un approccio maggiormente "*strutturale*" includendo l'analisi delle relazioni fisiche e funzionali che intercorrono tra i diversi elementi strategici del sistema urbano capaci poi di indirizzare decisioni relative all'assetto urbanistico del territorio, proprie della pianificazione spaziale, e prevedere prioritarie politiche di messa in sicurezza.

Solo la programmazione mirata di tali azioni può tramutarle in interventi concretamente fattibili, perché la determinazione di priorità consente un più efficace utilizzo delle – sempre limitate – risorse economiche a disposizione, secondo un'operazione integrata di miglioramento del sistema degli incentivi pubblici capace di diventare driver reale per l'investimento dei privati attraverso, per esempio, l'introduzione di misure sistematizzate e non solo di

provvedimenti straordinari “a tempo” come avviene attualmente.

In particolare, la ricerca rappresenta un punto di partenza per il miglioramento globale delle prestazioni dell'intero sistema di gestione dell'emergenza; il focus tematico relativo all'identificazione della viabilità strategica, infatti, mira a (a) semplificare le modalità di evacuazione in quanto la popolazione colpita conoscerebbe a priori i percorsi più sicuri per raggiungere le aree di attesa, (b) fungere da supporto alle operazioni di soccorso permettendo il più semplice collegamento agli edifici strategici, normalmente soggetti a particolari condizioni di affollamento e quindi maggiormente esposti, (c) rappresentare il dato in input per lo sviluppo di ulteriori sistemi di prevenzione, come eventuali dispositivi *Early Warning* di segnalamento semaforico dinamico capaci di modificare segnale in funzione del livello di pericolo.

In sintesi, l'approccio proposto fonda le basi sul carattere imprescindibile della multidisciplinarietà e sul concetto di integrazione: a partire dall'idea di città come insieme di componenti interdipendenti e quindi dalla necessità di prevedere azioni e interventi che interessino l'intero sistema e non il singolo elemento, a finire all'esigenza di simulare scenari di evento per differenti e molteplici tipologie di pericolo (approccio *multi-hazard*).

Il *framework* di metodo, dunque, non si limita a possedere la *struttura* di strumento tecnico per l'individuazione della viabilità strategica sul territorio, ma assume *sostanza* di attività intersettoriale nel tentativo di promuovere la collaborazione tra mondo accademico, stakeholder ed enti locali (vedi sperimentazione operativa condotta con la Protezione Civile) e unire diverse professionalità (vedi la collaborazione con il DISEG del Politecnico di Torino e quella con il Laboratorio di Ingegneria dei Materiali e delle Strutture dell'Università della Calabria). A tal riguardo, il medesimo potrebbe essere incorporato negli esistenti Piani di Emergenza comunali per offrire a pianificatori, autorità locali e stakeholder una valutazione critica delle scelte di piano attuali con la possibilità di modificarle in accordo con i risultati ottenuti. Introducendo poi la viabilità strategica come contenuto obbligatorio del Piano di Protezione Civile, la metodologia rappresenta la procedura formale per la sua individuazione, integrando e arricchendo le finalità di strumenti già esistenti come la CLE o la SUM.

Nel contempo, al fine di garantire una maggiore integrazione con gli altri strumenti della pianificazione urbana e territoriale e la predisposizione di più opportuni sistemi cartografici, da un punto di vista tecnico, il *framework* proposto si avvale delle applicazioni GIS che permettono una semplice e immediata visualizzazione dei risultati derivanti da software strutturali, dell'utilizzo degli indici, della logica *fuzzy* e delle analisi multicriterio, consentendo il confronto tra fattori di diversa natura normalmente non comparabili tra

loro.

La specifica tematica della viabilità strategica, poi, avvalendosi di un approccio *performance-based* come quello proposto, potrebbe aggiungere obiettivi trasversali a quelli tradizionalmente utilizzati da amministrazioni ed enti gestori delle reti per la pianificazione di misure di adattamento delle infrastrutture esistenti: normalmente, infatti, nelle operazioni di manutenzione e di gestione del patrimonio stradale sono considerati esclusivamente criteri di intervento basati su fattori operativi e funzionali, senza alcun riferimento specifico circa il livello di rischio cui un'infrastruttura è soggetta e che invece, per come dimostrato, potrebbe rappresentare un nuovo tipo di indicatore di performance in caso di emergenza.

### *Prefigurazioni future per l'integrazione della pianificazione di emergenza nelle pratiche urbane*

Così come un piano rappresenta il singolo prodotto di un lungo processo di pianificazione, dinamico e continuo, questo lavoro di tesi è il risultato di un percorso di ricerca che non trova conclusione e termine nell'elaborazione di questo scritto, ma che tenta fin da subito di evolvere verso nuove applicazioni, specie in riferimento ad alcune questioni di particolare interesse per l'intera disciplina urbanistica.

In virtù del quadro normativo ancora confuso che raccomanda un coordinamento tra strumenti della pianificazione spaziale e di emergenza (vedi *par. 2.1.2*), il presente lavoro può rappresentare un importante volano per le previsioni urbanistiche future.

Attraverso la metodologia, infatti, è possibile individuare nuclei urbani che, specie dopo un terremoto, rimarrebbero isolati: è il caso, per esempio, di molti centri storici, ove non esistono alternative di strade non interrotte. Le politiche di messa in sicurezza dovrebbero prevedere azioni prioritarie in queste zone che, soprattutto nel caso italiano, rappresentano contesti molto vulnerabili ma di grande pregio, veicolando le risorse finanziarie verso specifiche fragilità territoriali.

Sempre nell'ottica secondo cui la materia della sicurezza territoriale dovrebbe diventare tema da trattare in maniera unitaria e organica, l'approccio multi-hazard proposto permette di evidenziare la condizione secondo cui alcune aree, definite dagli strumenti urbanistici come "di espansione", in caso di evento risulterebbero essere inaccessibili. La disciplina del suolo, allora, dovrebbe tener conto di tali problematiche nella riformulazione di indirizzi e

previsioni, con specifici riferimenti anche nei riguardi della regolamentazione dell'edificazione.

D'altro canto, il coordinamento tra i due livelli di pianificazione non dovrebbe limitarsi a un passivo recepimento di indirizzi, ma dovrebbe concretizzarsi in un dialogo bidirezionale tra strumenti e processi, attraverso per esempio, la condivisione di quadri conoscitivi unici e integrati e la verifica delle destinazioni d'uso delle aree con funzioni emergenziali.

Inoltre, partendo dal tema specifico della viabilità strategica, ma spostando il focus dell'applicazione dai sistemi urbani a contesti medio-piccoli, come la maggior parte dei Comuni italiani<sup>28</sup>, emerge la necessità di ridiscutere sia la funzione essenziale degli elementi strategici fino ad ora descritti, sia la scala di indagine riferita alla loro localizzazione e definizione.

In tal senso, già l'assunto secondo cui i rischi non rispettino confini prefissati apre a considerazioni necessarie circa l'eventualità di prevedere una dimensione sovracomunale di coordinamento tra pianificazione ordinaria e di emergenza, anche in relazione alla semplice individuazione delle aree di attesa o ricovero che, per loro definizione, devono ricadere in zone non soggette a pericolo. A livello comunale ciò non è sempre possibile: nel caso di Vibo Valentia, in Calabria, ad esempio, la località marina ricade interamente in un'area a pericolosità idraulica alta (Autorità di Bacino Regione Calabria, 2016) e, sebbene il Piano di Protezione Civile individui nella suddetta località alcune aree di attesa, è facilmente comprensibile come solo un coordinamento sovracomunale sia capace di previsioni coerenti in riferimento della localizzazione di aree "realmente" sicure.

Allargando poi la discussione ai cosiddetti territori pluricomunali (Pontrandolfi & Pontrandolfi, P. & Cartolano, 2019) tipici di contesti come le aree interne, la funzione della viabilità strategica non risiede più nel semplice collegamento interno al comune, ma supera, sia dal punto di vista fisico che concettuale, i limiti amministrativi preordinati per permettere l'interconnessione, necessaria e indispensabile, di aree sicure e strutture rilevanti a servizio di geografie più ampie. Basti pensare ai casi frequenti dei cosiddetti "ospedali unici" a servizio di numerosi ma piccoli Comuni, di cruciale importanza per la gestione delle operazioni di soccorso in caso di evento.

In relazione a ciò, prefigurazioni future dovranno allora garantire alla pianificazione di emergenza non solo il passaggio di scala dalle singole strutture e infrastrutture alla visione di sistema urbano strategico, ma un ulteriore ampliamento territoriale secondo cui le relazioni fisiche e funzionali tra gli elementi – e i sistemi – vanno ridiscusse e reinterpretate.

---

<sup>28</sup> Più del 70% dei Comuni italiani ha popolazione residente inferiore ai 5.000 abitanti.

Proprio l'apertura nei confronti delle aree fragili spinge le pratiche urbane a promuovere un dialogo tra gli strumenti di pianificazione di emergenza e quelli relativi alla programmazione economica, da cui poter attingere risorse da investire. Con particolare riferimento alle aree a vocazione rurale, per esempio, sarebbe necessario prevedere un coordinamento non solo con gli strumenti ordinari di pianificazione, ma anche con le strategie straordinarie presenti, come quella nazionale per le Aree Interne, prevedendo la possibilità di erogare fondi anche ai fini della sicurezza territoriale, declinata secondo tutti gli aspetti trattati.

In conclusione, l'integrazione, ovvero lo stretto collegamento tra i diversi livelli di pianificazione, in particolare spaziale e di emergenza, ma anche di programmazione economica, nonché il carattere multidisciplinare, spingono la ricerca ad aprirsi verso nuovi fronti importanti già dichiarati, al fine di meglio perseguire obiettivi resilienti ovvero:

- colmare il deficit in termini di disponibilità di dati e promuovere la predisposizione di mappe e cartografie ad hoc e il coordinamento tra i quadri conoscitivi degli strumenti di pianificazione ordinaria a diverse scale: popolare opportuni database attraverso la sistematizzazione di studi e ricerche inerenti il tema trattato, infatti, favorirà la creazione di sistemi integrati capaci di indirizzare meglio sia l'elaborazione dei Piani di Emergenza, che i processi di disciplina degli usi del suolo e degli assetti urbani, regolamentando in modo coerente le previsioni future sulle città in continuo cambiamento, in funzione delle specifiche vulnerabilità territoriali;
- allargare la scala di indagine dal contesto urbano a quello territoriale per la promozione di una pianificazione di emergenza sovracomunale e una rivalutazione delle funzioni e delle destinazioni d'uso degli elementi strategici in contesti pluricomunali;
- arricchire la ricerca di studi relativi ai pericoli antropici, includendo nuove considerazioni circa i diversi livelli di intensità dei fenomeni trattati: è necessario, infatti, oltre allo scenario *worst-case* simulato, prevedere future implementazioni relative a eventi con più bassa magnitudo ma con più alta probabilità di accadimento. Va considerato, inoltre, che se dal punto di vista metodologico analisi *multi-hazard* risultano essere più complete e omnicomprendenti, dal punto di vista urbanistico ogni pericolo comporta approcci e conseguenze differenti sull'assetto del territorio: a tal riguardo, il *framework*, anche nella veste attuale, si presta bene a valutazioni in merito, vista la possibilità di affrontare l'analisi di un pericolo alla volta;

- offrire uno strumento interattivo a servizio sia di amministrazioni e tecnici, che della popolazione, al fine di fornire una maggiore consapevolezza del livello di rischio, e di conseguenza anche del livello di sicurezza, a chi il territorio lo abita;
- aprirsi a nuove strategie resilienti, anche in termini di pianificazione “consuntiva”, riconoscendo l'importanza fondamentale della fase di recupero nel prevedere modifiche negli usi urbani, nonché di quella di ricostruzione nella progettazione integrata ai fini del ri-insediamento.

Approfondimenti successivi dovranno, allora, essere in grado, per come sosteneva il già citato Olivetti, di scoprire, ordinare e interpretare i nuovi obiettivi, riconoscendo nei percorsi di ricerca gli strumenti migliori per trasformare ipotetici sviluppi futuri in progetti concreti del presente più prossimo.

---



---

## Indice delle figure

Fig. 1.1	<i>Misure della resilienza ingegneristica (a), intesa come tempo di recupero necessario affinché il sistema ritorni alla condizione preesistente e della resilienza ecologica (b), intesa come la quantità di perturbazione che il sistema può subire prima di cambiare stato. Elaborazione da: Adger (2000).</i>	pag. 6
Fig. 1.2	<i>Rappresentazione in campo tridimensionale delle diverse fasi di un ciclo adattivo. Le tre dimensioni sono: il potenziale, ossia il capitale di risorse disponibili che determina le future opzioni di cambiamento; la connessione, ossia il grado di "controllabilità" del sistema, inteso come legame tra le variabili che entrano in gioco durante il processo; la resilienza che si accresce nelle fasi di riorganizzazione e di crescita. Fonte: Holling (2001).</i>	» 7
Fig. 1.3	<i>Dati relativi agli effetti dei disastri naturali nel mondo. Fonte: Annual Disaster Statistical Review (2017).</i>	» 12
Fig. 1.4	<i>Misura di disaster resilience (MCEER). Elaborazione da: Cimellaro (2016).</i>	» 17
Fig. 1.5	<i>Rappresentazione schematica di disaster resilience. Fonte: Cimellaro (2016).</i>	» 17
Fig. 1.6	<i>PEOPLES framework, dimensioni della resilienza. Fonte: Renschler et al. (2010).</i>	» 21
Fig. 1.7	<i>Proprietà delle infrastrutture resilienti.</i>	» 22
Fig. 2.1	<i>Definizione delle condizioni limite per gli insediamenti urbani. Fonte: Brammerini et al. (2014).</i>	» 45
Fig. 2.2	<i>Fasi della pianificazione di emergenza. Fonte: Federal Emergency Management Agency.</i>	» 48
Fig. 2.3	<i>Corrispondenza tra misura della resilienza nel tempo (Cimellaro, 2016) e fasi della pianificazione di emergenza.</i>	» 50



Fig. 2.4	<i>Ruolo della pianificazione preventiva e di quella “consuntiva”.</i>	pag.	51
Fig. 2.5	<i>Presenza dei Piani di Protezione Civile nei comuni calabresi e distribuzione per provincia.</i>	»	54
Fig. 2.6	<i>Distribuzione dei Piani di Protezione Civile sul territorio calabrese.</i>	»	55
Fig. 2.7	<i>Livello Base: esempio informazioni cartografate.</i>	»	56
Fig. 2.8	<i>Livello Base: esempio di attributi relativi alle informazioni reperite.</i>	»	57
Fig. 2.9	<i>Livello Base: strati informativi presenti.</i>	»	59
Fig. 3.1	<i>Schema di virtual city ottenuto mediante l'interdipendenza di quattro layer fondamentali.</i>	»	64
Fig. 3.2	<i>Esempio attributi del layer “edifici strategici”.</i>	»	65
Fig. 3.3	<i>Esempio attributi del layer “aree di emergenza”.</i>	»	66
Fig. 3.4	<i>Esempio attributi del layer “infrastrutture viarie”.</i>	»	67
Fig. 3.5	<i>Esempio attributi geometrici del layer “edifici prospicienti”.</i>	»	68
Fig. 3.6	<i>Esempio attributi meccanico-strutturali del layer “edifici prospicienti”.</i>	»	69
Fig. 3.7	<i>Valutazione dell'attributo “MassType” in funzione del periodo storico di costruzione.</i>	»	70
Fig. 3.8	<i>Valutazione dell'attributo “WallType” per le strutture con “ConstType”=“Reinforced concrete building”.</i>	»	71
Fig. 3.9	<i>Valutazione dell'attributo “WallType” per le strutture con “ConstType”=“Reinforced concrete building”.</i>	»	71
Fig. 3.10	<i>Visualizzazione categorizzata su QGIS (in base al materiale di costruzione).</i>	»	72
Fig. 3.11	<i>Visualizzazione categorizzata su QGIS (in base al n° di piani).</i>	»	72
Fig. 3.12	<i>Esempio di operazione buffer per ottenere il layer “Debris Area”.</i>	»	73
Fig. 3.13	<i>Esempio di operazione difference per ottenere i layer “No-Practicable Roads” e “Practicable Roads”.</i>	»	73
Fig. 3.14	<i>Layer relativo al sistema di distribuzione e trasmissione elettrica della virtual city di Torino. Fonte: Cardoni et al. (2019).</i>	»	74
Fig. 3.15	<i>Percorsi alternativi possibile tra i quali individuare l'infrastruttura strategica.</i>	»	76
Fig. 3.16	<i>Flow chart relativo al processo di valutazione delle infrastrutture viarie strategiche.</i>	»	77
Fig. 3.17	<i>Strade interrotte per il collasso di alcune strutture in seguito a terremoti. (Norcia (PG), agosto 2016 e Macerata, aprile 2018).</i>	»	82

Fig. 3.18	<i>Dati in input nel programma “Spettri di risposta” – Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.</i>	pag.	86
Fig. 3.19	<i>Meccanismo di collasso globale. Fonte: Marasco et al. (2017).</i>	»	88
Fig. 3.20	<i>Categorizzazione del patrimonio edilizio in base al livello di danno.</i>	»	89
Fig. 3.21	<i>Nuovo attributo per lo shapefile relativo agli edifici.</i>	»	90
Fig. 3.22	<i>Valutazione dell’area di detriti generata dal collasso di strutture in muratura. Fonte: Domaneschi et al. (2019).</i>	»	90
Fig. 3.23	<i>Diagramma schematico del moto dei detriti. Fonte: Lu et al. (2019).</i>	»	91
Fig. 3.24	<i>Schema relativo alla condizione di percorribilità.</i>	»	92
Fig. 3.25	<i>Esempio output strade con attributi relativi alle condizioni di percorribilità.</i>	»	93
Fig. 3.26	<i>Flow chart relativo alla valutazione della percorribilità in funzione del collasso delle tamponature esterne.</i>	»	94
Fig. 3.27	<i>Tipologia di tamponature analizzate: tamponatura debole (a) e tamponatura forte (b).</i>	»	95
Fig. 3.28	<i>Modello strutturale semplificato rappresentato in elevazione (a) e in pianta (b).</i>	»	96
Fig. 3.29	<i>Dalla tamponatura reale alla schematizzazione prevista dal modello di Furtado. Fonte: Furtado et al. (2016).</i>	»	97
Fig. 3.30	<i>Schematizzazione delle due bielle diagonali. Fonte: Furtado et al. (2016).</i>	»	97
Fig. 3.31	<i>Comportamento e legame modello tamponatura nel piano (IP). Fonte: Mazza &amp; Donnici (2018).</i>	»	98
Fig. 3.32	<i>Comportamento e legame modello tamponatura fuori piano (OOP). Fonte: Mazza &amp; Donnici (2018).</i>	»	98
Fig. 3.33	<i>Valutazione di <math>B_{min}</math>.</i>	»	99
Fig. 3.34	<i>Processo implementato tramite codice Maple.</i>	»	100
Fig. 3.35	<i>Modello di telaio 3D monocampata.</i>	»	101
Fig. 3.36	<i>Output SAP2000: Armature longitudinali dei pilastri.</i>	»	101
Fig. 3.37	<i>Criteri di numerazione dei nodi nel modello.</i>	»	103
Fig. 3.38	<i>Esempio output strade con attributi relativi alla nuova condizione di percorribilità.</i>	»	103
Fig. 3.39	<i>Strade non percorribili in seguito ad alluvioni. (Rossano (CS), agosto 2015 e Lamezia (CZ), ottobre 2018).</i>	»	105
Fig. 3.40	<i>Aree a pericolosità idraulica. Fonte: ISPRA (2018).</i>	»	106

Fig. 3.41	<i>Strada di accesso al comune di Prato allo Stelvio (BZ) non percorribile a causa di uno smottamento (maggio 2018) e autostrada A6 Torino-Savona interrotta per crollo di un viadotto in seguito a una frana (novembre 2019).</i>	pag. 107
Fig. 3.42	<i>Aree a pericolosità da frana. Fonte: ISPRA (2018).</i>	» 108
Fig. 3.43	<i>Esempio aree a pericolosità da erosione costiera. Fonte: Piano di Bacino Stralcio di Erosione Costiera, Autorità di Bacino Regione Calabria (2016).</i>	» 111
Fig. 3.44	<i>Scala di valutazione analisi AHP.</i>	» 116
Fig. 3.45	<i>Prima variabile input: overcrowding.</i>	» 121
Fig. 3.46	<i>Seconda variabile input: distance.</i>	» 121
Fig. 3.47	<i>Variabile output: exposure.</i>	» 122
Fig. 3.48	<i>Determinazione dell'output exposure.</i>	» 124
Fig. 4.1	<i>Inquadramento territoriale del primo caso di studio.</i>	» 129
Fig. 4.2	<i>Modello della virtual city di Torino in ambiente GIS.</i>	» 130
Fig. 4.3	<i>Patrimonio edilizio della virtual city di Torino categorizzato secondo il livello di danno.</i>	» 130
Fig. 4.4	<i>Verifica della percorribilità delle infrastrutture stradali della virtual city di Torino.</i>	» 131
Fig. 4.5	<i>Inquadramento territoriale del secondo caso di studio.</i>	» 132
Fig. 4.6	<i>Aree a rischio alluvione e a rischio frana nel comune di Rende. Fonte: PAI Calabria (2001).</i>	» 133
Fig. 4.7	<i>Alcuni degli edifici strategici (SB) modellati.</i>	» 133
Fig. 4.8	<i>Alcune delle aree di attesa (EA) modellate.</i>	» 134
Fig. 4.9	<i>Valutazione di tutti i percorsi di collegamento possibili tra edifici strategici e aree di emergenza.</i>	» 135
Fig. 4.10	<i>Valutazione degli edifici prospicienti.</i>	» 135
Fig. 4.11	<i>Area di studio.</i>	» 136
Fig. 4.12	<i>Strade alternative oggetto di analisi.</i>	» 137
Fig. 4.13	<i>Accelerogramma riferito allo scenario sismico considerato.</i>	» 138
Fig. 4.14	<i>Patrimonio edilizio categorizzato secondo il livello di danno.</i>	» 138
Fig. 4.15	<i>Valutazione dell'ingombro detriti generati dal collasso degli edifici.</i>	» 139
Fig. 4.16	<i>Percorribilità delle strade alternative in riferimento al pericolo sismico per collasso di edifici prospicienti.</i>	» 139

Fig. 4.17	<i>Patrimonio edilizio della virtual city di Rende categorizzato secondo il numero di piani.</i>	pag. 141
Fig. 4.18	<i>Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 2 piani.</i>	» 141
Fig. 4.19	<i>Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 3 piani.</i>	» 142
Fig. 4.20	<i>Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 4 piani.</i>	» 142
Fig. 4.21	<i>Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 5 piani.</i>	» 142
Fig. 4.22	<i>Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 6 piani.</i>	» 142
Fig. 4.23	<i>Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 7 piani.</i>	» 143
Fig. 4.24	<i>Collasso fuori piano delle tamponature esterne per il cluster di edifici a 8 piani.</i>	» 143
Fig. 4.25	<i>Valutazione dell'ingombro detriti generati dal collasso delle tamponature.</i>	» 144
Fig. 4.26	<i>Percorribilità delle strade alternative in riferimento al pericolo sismico per collasso delle tamponature esterne.</i>	» 144
Fig. 4.27	<i>Valutazione del pericolo idrogeologico.</i>	» 146
Fig. 4.28	<i>Percorribilità delle strade alternative in riferimento al pericolo idraulico.</i>	» 146
Fig. 4.29	<i>Valutazione degli elementi critici presenti.</i>	» 149
Fig. 4.30	<i>Valutazione dell'esposizione diretta in funzione degli edifici strategici ricadenti in un intorno di 500 m rispetto all'asse del tratto considerato (es. ID Stretch 243).</i>	» 150
Fig. 4.31	<i>Suddivisione del territorio comunale in località e zone censuarie. Fonte: ISTAT (2011).</i>	» 153
Fig. 4.32	<i>Differenza tra (a) condizione di non-interferenza <math>h &lt; w</math> (CLE) e (b) condizione di percorribilità <math>d &lt; w - 2m</math> (metodologia proposta).</i>	» 156
Fig. 4.33	<i>Interruzioni generate dall'applicazione della condizione di interferenza (CLE).</i>	» 157
Fig. 4.34	<i>Confronto tra le verifiche di percorribilità relative (1) alla metodologia proposta con riferimento al pericolo sismico e (2) alla CLE.</i>	» 158







---



---

## Indice delle tabelle

Tab. 1.1	<i>Top 10 dei disastri naturali per numero di morti nel 2016. Fonte: Annual Disaster Statistical Review (2016).</i>	pag.	12
Tab. 1.2	<i>Top 10 dei disastri naturali per danni economici. Fonte: Annual Disaster Statistical Review (2016).</i>	»	13
Tab. 1.3	<i>Top 10 dei Paesi in termini di mortalità dovuta ad eventi calamitosi. Fonte: Annual Disaster Statistical Review (2016).</i>	»	13
Tab. 1.4	<i>Matrici delle dimensioni della resilienza con esempi relativi alle infrastrutture. Fonte: O'Rourke (2007).</i>	»	19
Tab. 3.1	<i>Periodi storici di costruzione associati all'attributo "ConstrYear".</i>	»	70
Tab. 3.2	<i>Probabilità di accadimento <math>P_1</math>. Fonte: NTC18.</i>	»	87
Tab. 3.3	<i>Tempo di ritorno associato agli scenari di pericolosità idraulica. Fonte: ISPRA, (2018).</i>	»	106
Tab. 3.4	<i>Tempo di ritorno associato agli scenari di pericolosità da frana. Fonte: ISPRA, (2018).</i>	»	110
Tab. 3.5	<i>Stima del parametro <math>P_{CE}</math> in funzione della presenza di elementi critici lungo la strada alternativa <math>j</math>-esima.</i>	»	114
Tab. 3.6	<i>Stima del parametro <math>P_R</math> in funzione del livello di ridondanza della strada alternativa <math>j</math>-esima.</i>	»	115
Tab. 3.7	<i>Matrice di confronto a coppie <math>M [n \times n]</math>.</i>	»	116
Tab. 3.8	<i>Valori del Random Consistency Index in funzione della dimensione <math>n</math> della matrice <math>M</math>.</i>	»	118
Tab. 3.9	<i>Regole logiche adottate.</i>	»	122
Tab. 3.10	<i>Fattore correttivo <math>\gamma_{1SB}</math>.</i>	»	124
Tab. 3.11	<i>Fattore correttivo <math>\gamma_{2SB}</math>.</i>	»	125



Tab. 4.1	<i>Calcolo di <math>EX_{j_{15}}</math> per ciascuna strada alternativa.</i>	pag. 140
Tab. 4.2	<i>Distanza massima di espulsione delle tamponature per collasso fuori piano in funzione del numero di piani.</i>	» 143
Tab. 4.3	<i>Calcolo di <math>EX_{j_{1ns}}</math> per ciascuna strada alternativa.</i>	» 145
Tab. 4.4	<i>Calcolo di <math>I_{Hj_1}</math> (pericolo sismico) per ciascuna strada alternativa.</i>	» 145
Tab. 4.5	<i>Calcolo di <math>EX_{j_2}</math> per ciascuna strada alternativa.</i>	» 147
Tab. 4.6	<i>Calcolo di <math>I_{Hj_2}</math> (pericolo idraulico) per ciascuna strada alternativa</i>	» 147
Tab. 4.7	<i>Calcolo di <math>I_{Hj}</math> per ciascuna strada alternativa.</i>	» 148
Tab. 4.8	<i>Calcolo del parametro <math>P_L</math> per ciascuna strada alternativa.</i>	» 148
Tab. 4.9	<i>Calcolo del parametro <math>P_W</math> per ciascuna strada alternativa.</i>	» 149
Tab. 4.10	<i>Calcolo di <math>I_{Vj}</math> per ciascuna strada alternativa.</i>	» 150
Tab. 4.11	<i>Valutazione del contributo <math>I_{DE_{str}}</math> (relativo al primo tratto della strada alternativa n°1) al calcolo di <math>I_{DEj}</math>.</i>	» 151
Tab. 4.12	<i>Calcolo di <math>I_{DEj}</math> per ciascuna strada alternativa.</i>	» 152
Tab. 4.13	<i>Località del Comune di Rende interne all'area di studio con la relativa popolazione residente. Fonte: ISTAT (2011).</i>	» 153
Tab. 4.14	<i>Calcolo di <math>I_{IEj}</math> per ciascuna strada alternativa.</i>	» 153
Tab. 4.15	<i>Calcolo di <math>I_{Ej}</math> per ciascuna strada alternativa.</i>	» 154
Tab. 4.16	<i>Calcolo di <math>I_{Rj}</math> per ciascuna strada alternativa.</i>	» 155

---

---

## Bibliografia

Acierno, A. (2015). La visione sistemica complessa e il milieu locale per affrontare le sfide della resilienza. *Territorio della Ricerca su Insediamenti. Rivista internazionale di cultura urbanistica*, (15), 7-20.

Adger, W. N. (2000). Social and ecological resilience: are they related?. *Progress in human geography*, 24(3), 347-364.

Adger, W. N., Hughes, T. P., Folke, C., Carpenter, S. R., & Rockström, J. (2005). Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science*, 309(5737), 1036-1039.

Alexander, D. E. (2002). *Principles of emergency planning and management*. Oxford University Press on Demand.

Alexander, D. E. (2017). *How to write an emergency plan*. Dunedin Academic Press Ltd.

Angelucci, F., Di Sivo, M., & Ladiana, D. (2014). Between the river and the city. resilience VS vulnerability in settlement systems of fluvial environment. *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, (7), 94-100.

Annual Disaster Statistical Review 2016 (2016), Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Institute of Health and Society (IRSS), Université catholique de Louvain, Brussels, Belgium.

Annual Disaster Statistical Review 2017 (2017), Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), United States Agency for International Development (USAID), Université catholique de Louvain, Brussels, Belgium

Arcidiacono, V., Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2012). Community resilience evaluation including interdependencies. In *15th world conference on earthquake engineering (15WCEE)* (pp. 24-28).

Atun, F., e Menoni, S. (2014). Vulnerability to earthquake in Istanbul: An application of the ENSURE methodology. *A|Z ITU Journal of the Faculty of Architecture*, 11(1), 99-116.

Autorità di Bacino Regione Calabria. (2016). Piano Stralcio Assetto Idrogeologico.

Autorità di Bacino Regione Calabria. (2016). Piano di Bacino Stralcio di Erosione Costiera.

Balamir, M. (2007). Presentation to the Association of European Schools of Planning congress "Planning for the Risk Society. Dealing with uncertainty, challenging the future", Naples 11 to 14 July 2007.

Beck, U. (1986). *Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne. La società del rischio. Verso una seconda modernità.*

Beck, U. (2008). *Conditio humana: il rischio nell'età globale.* Laterza.

Berdica, K., & Eliasson, J. (2004). Regional accessibility analysis from a vulnerability perspective. In *The Second International Symposium on Transportation Network Reliability*. INSTR.

Bernardini, G. (2015). An agent-based simulation model for earthquake pedestrians' evacuation in historical urban fabric. *Tema: Technology, Engineering, Materials and Architecture*, 1(1), 1-6.

Bertin, M. (2018). *Per esser pronti: ripensare la gestione dell'emergenza in città.* FrancoAngeli.

Bramerini F., Fazio F., Parotto R. (2014). Pianificazione dell'emergenza e prevenzione strutturale del rischio: il ruolo della CLE. *URBANISTICA DOSSIER*, no. 130, pp. 22-29.

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., ... & Von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733-752.

Bruneau, M., & Reinhorn, A. (2007). Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities. *Earthquake Spectra*, 23(1), 41-62.

Cafiso, S., Colombrita, F., Colombrita, R., Condorelli, A., D'Andrea, A., Mussumeci, G. (A cura di). (2006). In "Metodologie di valutazione del rischio sismico sulle infrastrutture viarie. *World road association*, pagg. 15-19

Cafiso, S., Colombrita, R., D'Andrea, A., Mussumeci, G., Colombrita, F., & Condorelli, A. (2001). Un modello di GIS per la valutazione del rischio sulle infrastrutture stradali nelle emergenze della protezione civile. *XI Convegno Nazionale SIV. Verona.*

Cafiso, S., Condorelli, A., & Mussumeci, G. (2005). Functional analysis of the urban road network in seismic emergencies: a GIS application on Catania city. *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering*, 8.

Çağnan, Z., Davidson, R. A., & Guikema, S. D. (2006). Post-earthquake restoration planning for Los Angeles electric power. *Earthquake Spectra*, 22(3), 589-608.

Cardoni, A., Cimellaro, G. P., Domaneschi, M., Sordo, S., & Mazza, A. (2019). Modeling the interdependency between buildings and the electrical distribution system for seismic resilience assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 101315.

Carpignano, A., Golia, E., Di Mauro, C., Bouchon, S., & Nordvik, J. P. (2009). A methodological approach for the definition of multi - risk maps at regional level: First application. *Journal of risk research*, 12(3-4), 513-534.

Chamberlin, S. (2009). *The Transition Timeline for a local, resilient future.* Chelsea Green Publishing.

- Chang, S. E., & Shinozuka, M. (2004). Measuring improvements in the disaster resilience of communities. *Earthquake spectra*, 20(3), 739-755.
- Chang, S. E. (2014). Infrastructure resilience to disasters. *The Bridge*, 44(3).
- Cimellaro, G. P., & Piqué, M. (2016). Resilience of a hospital emergency department under seismic event. *Advances in Structural Engineering*, 19(5), 825-836.
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). Seismic resilience of a hospital system. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), 127-144.
- Cimellaro, G. P., Solari, D., & Bruneau, M. (2014). Physical infrastructure interdependency and regional resilience index after the 2011 Tohoku Earthquake in Japan. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(12), 1763-1784.
- Cimellaro, G. P., Solari, D., Renschler, C. S., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2013, May). Community resilience index integrating network interdependencies. In *Structures congress* (pp. 1789-1799).
- Cimellaro, G.P. (2016). Urban resilience for emergency response and recovery. *Fundamental Concepts and Applications*.
- Colucci, A. (2012). *Le città resilienti: approcci e strategie*. Università, Polo interregionale di eccellenza Jean Monnet.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica. (2014). Manuale per l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza dell'insediamento urbano.
- Corrado, V., Ballarini, I., & Corgnati, S. P. (2012). National scientific report on the TABULA activities in Italy. *Dipartimento di Energetica, Gruppo di Ricerca TEBE, Politecnico di Torino, Torino, Italy*.
- Crescenzi E., Corsini R. (2016). *Bollettini di pericolo, esperienze in Emilia-Romagna, Ecoscienza 2/2016*, arpa emilia-romagna, ISSN 2039-0432.
- Cresti, S. (A cura di). (2014). *L'elasticità della resilienza*. Tratto da Accademia della Crusca: <http://www.academiadellacrusca.it/it/lingua-italiana/consulenza-linguistica/domande-risposte/1-elasticita-resilienza>
- Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., & Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global environmental change*, 18(4), 598-606.
- Cutter, S. L., Mitchell, J. T., & Scott, M. S. (2000). Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the association of American Geographers*, 90(4), 713-737.
- D'Andrea A., Condorelli A., a cura di (2006). Metodologie di valutazione del rischio sismico sulle infrastrutture viarie – Comitato Tecnico 3.2 “Gestione dei rischi legati alle strade” Associazione Nazionale della Strada – AIPCR – Comitato Nazionale Italiano – XXV Convegno Nazionale Stradale, Napoli, Italy.
- Davoudi, S. (2012). The politics of resilience for planning: A cautionary note. *Planning Theory and Practice*, 13(2), 303-304.
- Decreto Ministeriale (DM) 9 Gennaio 1996 (1996). Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche—Italian code.
- Delmonaco G., Margottini C., Spizzichino D. (2006) Report on new methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural

risk maps. Deliverable 3.1, *ARMONIA*.

DFID. (2011). Defining disaster resilience: A DFID approach paper.

Dilley M., Chen U. RS Deichmann, Lerner-Lam A., Arnold M. (2005) Natural disaster hotspots: a global risk analysis. In: *Disaster Risk Management Series, 5*, The World Bank.

Dolce, M., Speranza, E., Di Pasquale, G., Giordano, F., & Bocchi, F. (2013). Indici di operatività per la valutazione della condizione limite di emergenza (CLE). In *Proceedings of XXXII GNGTS National Congress. Trieste* (pp. 382-389).

Domaneschi, M., Cimellaro, G.P., Scutiero, G., (2019). A simplified method to assess generation of seismic debris for masonry, *Engineering Structures 186* (2019) 306-320, Elsevier, DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.092.

Drabek, T. E. (2005). Sociology, disasters and emergency management: History, contributions, and future agenda. *Disciplines, Disasters and Emergency Management: The Convergence of Concepts Issues and Trends From the Research Literature*.

Dudenhofer, D. D., Permann, M. R., & Manic, M. (2006, December). CIMS: A framework for infrastructure interdependency modeling and analysis. In *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation* (pp. 478-485). Winter Simulation Conference.

Ellingwood, B.R., Cutler H., Gardoni P., Peacock W.G., van de Lindt J.W., and Wang N. (2016). The Centerville virtual community: a fully integrated decision model of interacting physical and social infrastructure systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure. Vol 1, Issue 3-4.* 95-107, DOI: 10.1080/23789689.2016.1255000.

El Morjani Z., Ebner .S, Boos J., Abdel Ghaffar E., Musani A. (2007) Modelling the spatial distribution of five natural hazards in the context of the WHO/EMRO *Atlas of Disaster Risk as a step towards the reduction of the health impact related to disasters. Int J Health Geogr* 6:1–28.

Esteban, F. , Izquierdo, B., Lopez, J., Menoni, S., Molinari, D. (2011), Current mitigation practices in the EU, in S. Menoni, C. Margottini. *Inside Risk: a strategy for sustainable risk mitigation.* p. 1-22, SpringerVerlag.

Fabietti, W. (Ed.). (1999). *Vulnerabilità sismica e trasformazione dello spazio urbano* (Vol. 8). Alinea Editrice.

Fei, M., Giovannoni, E., Mocenni, C., & Sparacino, E. (2008). Metodi di analisi multicriterio per la balanced scorecard. *Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Siena. Cerca con Google.*

Ferlito, R., & Pizza, A. G. (2011). Modello di vulnerabilità di un centro urbano. Metodologia per la valutazione speditiva della vulnerabilità della viabilità d'emergenza. *Ingegneria Sismica*, 28(4), 31–43.

Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C. S., & Walker, B. (2002). Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. *AMBIO: A journal of the human environment*, 31(5), 437-441.

Francini, M., Artese, S., Gaudio, S., Palermo, A., & Viapiana, M. F. (2018a). To support urban emergency planning: a GIS instrument for the choice of optimal routes

- based on seismic hazards. *International journal of disaster risk reduction*, 31, 121-134.
- Francini, M., Gaudio, S., Palermo, A., & Viapiana, M. F. (2018b). Pianificare la resilienza urbana mediante i Piani di emergenza di Protezione civile. *TERRITORIO*.
- Francini, M., Gaudio, S., Palermo, A., Viapiana, M.F. (2018c). Resilient criteria for strategic road network. In A. Leone & C. Gargiulo (Eds.), *Environmental and territorial modelling for planning and design*. (pp. 543 - 549). Naples: FedOAPress. ISBN: 978-88-6887-048-5, doi: 10.6093/978-88-6887-048-5.
- Furtado, A., Rodrigues, H., Arêde, A., & Varum, H. (2016). Simplified macro-model for infill masonry walls considering the out-of-plane behaviour. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(4), 507-524.
- Galderisi, A. (2013). Un modello interpretativo della resilienza urbana. *PLANUM*, 2(27), 1-9.
- Gasparini, C. (2015). *In the city On the cities*. Nella città Sulle città, LISt Lab, Trento.
- Geipel, R., Valussi, G., & Meneghel, C. (1979). *Friuli: aspetti sociogeografici di una catastrofe sismica*. Franco Angeli Editore.
- Gissara, S., Cerillo, M., & Ragonesi, A. (2013). La nuova protezione civile. Guida pratica per i Sindaci e gli operatori di protezione civile.
- Glare, P. (Ed.). (1980). *Oxford latin Dictionary* (Vol. VII). Oxford University Press.
- Ghobarah, A. (2004), On Drift Limits Associated with Different Damage Levels. International Workshop on Performance-Based Seismic Design, *Department of Civil Engineering, McMaster University*, June 28 July, 2004.
- Gunderson, L. H. (2001). *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Island press.
- Heinimann H., Hollenstein K., Kienholz H., Krummenacher B., Mani P. (1998) Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. *Umwelt-Materialien Nr. 85*.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4(1), 1-23.
- Holling, C. S. (1996). Engineering resilience versus ecological resilience. *Engineering within ecological constraints*, 31, 32.
- Holling, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 4(5), 390-405.
- Hopkins, R. (2008). *The transition handbook* (pp. 29-42). Totnes: Green Books.
- Husdal, J. (2006). Transport network vulnerability—which terminology and metrics should we use. In *NECTAR Cluster 1 Seminar* (pp. 12-13).
- Ioannilli, M. (2014a). Governo del territorio e prevenzione strutturale del rischio: la sfida prossima ventura. In *Regioni&Ambiente, anno XV – n.3*.
- Ioannilli, M. (2014b). Pianificazione dell'emergenza e prevenzione strutturale del rischio: il ruolo della CLE. *URBANISTICA DOSSIER, no. 130*, pp. 31-34.
- ISPRA. (2018). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio*. Rapporto, 287, ISBN 978-88-448-0901-0, 2018.
- ISTAT, (2011) Popolazione residente - Censimento 2011 - Istat. Italian National

Institute of Statistics. Available online: <http://daticensimentopopolazione.istat.it/> (accessed on 28 October 2019).

Lowrance, W.W. (1976). *Of Acceptable Risk*. Los Altos, CA: William Kaufmann.

Lu, X., Yang, Z., Cimellaro, G. P., & Xu, Z. (2019). Pedestrian evacuation simulation under the scenario with earthquake-induced falling debris. *Safety science*, 114, 61-71.

Kappes, M. S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., & Glade, T. (2012). Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. *Natural hazards*, 64(2), 1925-1958.

King, D. (2006). Planning for hazard resilient communities. *Disaster Resilience: An Integrated Approach*, 288-304.

Klein, R. J., Nicholls, R. J., & Thomalla, F. (2003). The resilience of coastal megacities to weather-related hazards. *Building safer cities*, 101-120.

Mallak, L. (1998) 'Resilience in the Healthcare Industry'. Paper presented at the *Seventh Annual Engineering Research Conference*, Banff, Alberta, Canada, 9–10 May.

Manyena, S. B. (2006). The concept of resilience revisited. *Disasters*, 30(4), 434-450.

Manyena, S.B., G. O'Brien, P. O'Keefe, and J. Rose. 2011. Disaster resilience: A bounce back or bounce forward ability? *Local Environment* 16(5): 417–424.

Marasco S., Noori A. Z., Cimellaro G. P. (2017), Resilience assessment for the built environment of a virtual city, in *COMPADYN 2017 – Proceedings*.

Matherly, D., Langdon, N., Wolshon, P. B., Murray-Tuite, P. M., Thomas, R., Mobley, J., & Reinhardt, K. (2014). *A guide to regional transportation planning for disasters, emergencies, and significant events*. Transportation Research Board.

MATLAB, 2018, *MATLAB Version 2018b, Version 2012b Edition*. Natick, MA: The MathWorks Inc.

Mazza, F. (2014). Modelling and nonlinear static analysis of reinforced concrete framed buildings irregular in plan. *Engineering structures*, 80, 98-108.

Mazza, F., & Donnici, A. (2018). Nonlinear modelling of the in-plane-out-of-plane interaction in the seismic analysis of masonry infills in rc framed buildings. *Procedia Structural Integrity*, 11, 218-225.

Mazza, F. & Donnici, D. (2019). *Effects of In- and Out-Of-Plane nonlinear modelling of masonry infills on the seismic response of r.c. framed buildings*, AIMETA 2019, XXIV Conference of Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics, Rome, 15-19 September 2019.

McAllister, T. (2015). Research needs for developing a risk-informed methodology for community resilience. *Journal of Structural Engineering*, 142(8), C4015008.

Menoni, S. (1997). *Pianificazione e incertezza. Elementi per la valutazione e la gestione dei rischi territoriali* (pp. 1-256). Franco Angeli.

Menoni, S., Pergalani, F., Boni, M. P., & Petrini, V. (2002). Lifelines earthquake vulnerability assessment: a systemic approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9-12), 1199-1208.

Menoni, S. (2006) Integration of harmonized risk maps with spatial planning decision processes. Deliverable 5.1, *ARMONIA*.

- Menoni, S., Molinari, D., Parker, D., Ballio, F., Tapsell, S. (2012) Assessing multifaceted vulnerability and resilience in order to design risk-mitigation strategies. *Nat Hazards* 64:2057–208.
- Menoni, S. (2013). Emergency planning. *Encyclopedia of Natural Hazards*, 276-280.
- Menoni, S. (2019). Per un nuovo approccio alle strategie e agli interventi di prevenzione e riduzione dei rischi naturali. Applicazione al caso della ricostruzione post-terremoto. In *Confini, movimenti, luoghi. Politiche e progetti per città e territori in transizione* (pp. 1-7). Planum.
- Moiraghi, M. (2002). *Protezione civile: origine, sviluppi e metodi*. Libreria Clup.
- Moran, A., Wastl, M., Geitner, C., Sto' tter, J. (2004) A regional scale risk analysis in the community of O' lafsfjo' ur, Iceland. In: *Internationales Symposium—INTERPRAEVENT*, Riva, Trient.
- Merriam-Webster, Inc. (1994). Merriam-Webster's Collegiate Dictionary. 10th ed. Springfield, MA: Merriam-Webster, Inc.
- Morano, P. (2000). Un modello multicriterio «fuzzy» per la valutazione degli interventi di riqualificazione urbana. *Aestimum*, (39).
- NTC18. (2018). Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni (No.8). Decreto 17-1-2018, Gazzetta Ufficiale 42, 20-02-2018, Ordinary Suppl.
- Odeh, D. J. (2002). Natural hazards vulnerability assessment for statewide mitigation planning in Rhode Island. *Natural Hazards Review*, 3(4), 177-187.
- Oliva, J. S. (2015). Resilienza e adattamento: definizioni, modelli e sfide progettuali. In *XVIII Conferenza Nazionale SIU. Italia'45-'45. Radici, condizioni, prospettive*. (pp. 610-615). Planum Publisher.
- Olivetti, A. (2001). Città dell'uomo. *Milano, Edizioni di Comunità*.
- O'Rourke, T. D. (2007). Critical infrastructure, interdependencies, and resilience. *BRIDGE-Washington-National Academy of Engineering-*, 37(1), 22.
- Ouyang, M., & Dueñas-Osorio, L. (2011). An approach to design interface topologies across interdependent urban infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(11), 1462-1473.
- Palermo, A., & Francini, M. (2013). The impact of urban uses in road safety. In *XX Conferenza Internazionale Vivere e camminare in città-La sicurezza degli utenti deboli della strada*. Brescia.
- Pan, X., Han, C. S., Dauber, K., & Law, K. H. (2007). A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations. *Ai & Society*, 22(2), 113-132.
- Paone R. (2008). Carta del Rischio di incendio boschivo, Diavoli Rossi, Gruppo Volontari Antincendio e Protezione Civile.
- Paton, D., & Johnston, D. (2017). *Disaster resilience: an integrated approach*. Charles C Thomas Publisher.
- Pelizzaro, P. (2016). Le città che resistono. Da Rotterdam a Copenhagen, ecco le strategie per gestire gli effetti del cambiamento climatico. Anche in Italia.
- Pesaro, G., Mendoza, M., Minucci, G., Menoni, S. (2018), Cost-Benefit Analysis for non-structural flood risk mitigation measures: Insights and lessons learnt from a real case study, *ESREL Proceedings*.



Pluchino, S., Tribulato, C., Caverzan, A., Quillan, A. M., Cimellaro, G. P., & Mahin, S. (2015, April). Agent-based model for pedestrians' evacuation after a blast integrated with a human behavior model. In *Proc. Struct. Congr.* (pp. 1506-1517).

Pontrandolfi, P. & Cartolano, A. (2019). *Territori pluricomunali. Nuovi assetti istituzionali e strumenti per il governo del territorio e la promozione dello sviluppo locale*. Melfi: Libria.

Quagliarini, E., Bernardini, G., Wazinski, C., Spalazzi, L., & D'Orazio, M. (2016). Urban scenarios modifications due to the earthquake: ruins formation criteria and interactions with pedestrians' evacuation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(4), 1071-1101.

Rapporto sulla promozione della sicurezza dai rischi naturali del patrimonio abitativo. (2017). Presidenza del Consiglio dei Ministri, Struttura di Missione Casa Italia.

Regione Calabria (2012), *Quadro Territoriale Regionale a Valenza Paesaggistica*.

Regione Calabria (2002), *Legge Urbanistica Regionale n.19/2002*, Bur Calabria.

Renschler, C. S., Frazier, A. E., Arendt, L. A., Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). *A framework for defining and measuring resilience at the community scale: The PEOPLES resilience framework* (pp. 10-0006). Buffalo: MCEER.

Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE control systems magazine*, 21(6), 11-25.

Rosa, E.A. (1998). Metatheoretical foundations for post-normal risk. *Journal of Risk Research* 1: 15-44.

Rose, A., & Liao, S. Y. (2005). Modeling regional economic resilience to disasters: A computable general equilibrium analysis of water service disruptions. *Journal of Regional Science*, 45(1), 75-112.

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process* McGraw-Hill. *New York*, 324.

Santarelli, S., Bernardini, G., & Quagliarini, E. (2018). Earthquake building debris estimation in historic city centres: From real world data to experimental-based criteria. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 281-291

SAP2000, Computer and Infrastructure Inc., Version 17.3, Berkeley, CA.

Society for Risk Analysis. (1987). Risk Definition Committee; *Risk Newsletter*; 7(3):5.

Taylor, M. A., Sekhar, S. V., & D'Este, G. M. (2006). Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Networks and Spatial Economics*, 6(3-4), 267-291.

Teknomo, K. (2006). Analytic hierarchy process (AHP) tutorial. *Revoledu. com*, 1-20.

Tesoriere, G., Marinella, G., & Russello, M. (2001). Analisi della vulnerabilità delle reti stradali in aree soggette a rischio sismico. *XI SIV*, 12.

Thierry, P., Stieltjes, L., Kouokam, E., Ngue'ya, P., Salley, P.M. (2008) Multi-hazard risk mapping and assessment on an active volcano: the GRINP project at

---

Mount Cameroon. *Natural Hazards* 45:429–456.

Treu, M. C., (1997). Introduzione a *Pianificazione e incertezza. Elementi per la valutazione e la gestione dei rischi territoriali* (pp. 1-256), di Menoni S. Franco Angeli.

UNDRO, (1980). Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report of Experts Group Meeting of 9-12 July 1979, Geneva, Switzerland.

UNISDR, U. (2005). Hyogo framework for action 2005–2015: Building the resilience of nations and communities to disasters. *In Extract from the final report of the World Conference on Disaster Reduction (A/CONF. 206/6)* (Vol. 380). Geneva: The United Nations International Strategy for Disaster Reduction.

WCED (1987). Our common future – Brundtland report United Nations World Commission on Environment and Development (WCED), Oxford

Willis, H.H. (2007). Guiding resource allocations based on terrorism risk. *Risk Analysis* 27: 597–606.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.

Zhang, X., & Li, H. (2018). Urban resilience and urban sustainability: What we know and what do not know?. *Cities*, 72, 141-148.

Zhang, P., & Peeta, S. (2011). A generalized modeling framework to analyze interdependencies among infrastructure systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(3), 553-579.

Zimmerman, R. (2001). Social implications of infrastructure network interactions. *Journal of Urban Technology*, 8(3), 97-119.