



# PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività A4.1 Definizione di metodi di ausilio alla valutazione della  
CLE e della operatività strutturale degli edifici.

## Linee Guida dell'Indice di Operatività strutturale del Contesto Territoriale (IOCT)

**Versione 5.1**

Pubblicato in data 24/01/2022





# PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività A4.1 Definizione di metodi di ausilio alla valutazione della  
CLE e della operatività strutturale degli edifici.

## Linee Guida dell'Indice di Operatività strutturale del Contesto Territoriale (IOCT)

**Versione 5.1**

Pubblicato in data 24/01/2022



Consiglio Nazionale delle Ricerche



## PON GOVERNANCE E CAPACITÀ ISTITUZIONALE 2014-2020

PROGRAMMA PER IL SUPPORTO AL RAFFORZAMENTO DELLA GOVERNANCE IN MATERIA DI RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO E VULCANICO AI FINI DI PROTEZIONE CIVILE

### DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE

#### Struttura responsabile dell'attuazione del Programma

Fabrizio Curcio (responsabile), Eliana Mazzaro (supporto)

Immacolata Postiglione (delega funzioni specifiche)

#### Unità di coordinamento

Fabrizio Bramerini, Angelo Corazza, Luigi D'Angelo, Fausto Guzzetti, Francesca Romana Paneforte, Paola Stefanelli

#### Unità operativa rischi

Paola Bertuccioli, Sergio Castenetto, Stefano Ciolli, Andrea Duro, Emilio De Francesco, Marco Falzacappa, Domenico Fiorito, Pietro Giordano, Antonella Gorini, Giuseppe Naso, Stefania Renzulli, Daniele Spina

#### Unità di raccordo DPC

Silvia Alessandrini, Sara Babusci, Pierluigi Cara, Patrizia Castigliengo, Valter Germani, Maria Penna

#### Unità amministrativa e finanziaria

Valentina Carabellese, Francesca De Sandro, Susanna Gregori, Maria Cristina Nardella

#### Hanno fatto parte della struttura

Angelo Borrelli, Gabriella Carunchio, Luciano Cavarra, Pietro Colicchio, Biagio Costa, Lavinia Di Meo, Gianluca Garro, Antonio Gioia, Francesca Giuliani, Italo Giulivo, Fabio Maurano, Natale Mazzei, Agostino Miozzo, Paolo Molinari, Anna Natili, Roberto Oreficini Rosi, Lucia Palermo, Simona Palmiero, Ada Paolucci, Sara Petrinelli, Biagio Prezioso, Umberto Rosini, Marco Rossitto, Sisto Russo, Chiara Salustri Galli, Maria Siclari, Maurilio Silvestri, Gianfranco Sorchetti, Vincenzo Vigorita

### REGIONI

#### Referenti

*Basilicata:* Claudio Berardi, Antonella Belgiovine, Maria Carmela Bruno, Cinzia Fabozzi, Donatella Ferrara, Cosimo Grieco, Guido Loperte (coordinatore), Alfredo Maffei, Pietro Perrone; *Calabria:* Fortunato Varone (coordinatore); *Campania:* Mauro Biafore (coordinatore), Claudia Campobasso, Luigi Cristiano, Emilio Ferrara, Luigi Gentilella, Maurizio Giannattasio, Francesca Maggiò, Celestino Rampino; *Puglia:* Tiziana Bisantino (coordinatore), Carlo Caricasole, Domenico Donvito, Franco Intini, Teresa Mungari, Fabrizio Panariello, Francesco Ronco, Zoida Tafila; *Sicilia:* Giuseppe Basile, Antonio Bruculeri, Aldo Guadagnino, Maria Nella Panebianco, Antonio Torrisi

#### Sono stati referenti

*Basilicata:* Alberto Caivano; *Calabria:* Giuseppe Iritano, Domenico Pallaria, Francesco Russo (coordinatore), Carlo Tansi, Luigi Giuseppe Zinno; *Puglia:* Giuseppe Tedeschi; *Campania:* Crescenzo Minotta; *Sicilia:* Nicola Alleruzzo

#### Affidamento di servizi del DPC al CNR-IGAG

*Responsabile Unico del Procedimento:* Mario Nicoletti

*Direttore di Esecuzione Contrattuale:* Fabrizio Bramerini

*Referenti rischio sismico:* Fabrizio Bramerini, Sergio Castenetto, Daniele Spina, Antonella Gorini, Giuseppe Naso

*Referente rischio vulcanico:* Stefano Ciolli

*Referenti pianificazione di emergenza:* Domenico Fiorito, Stefania Renzulli

#### CNR-IGAG (operatore economico rischio sismico e vulcanico)

Massimiliano Moscatelli (referente)

#### Struttura di coordinamento

Gianluca Carbone, Claudio Chiappetta, Francesco Fazio, Massimo Mari, Silvia Massaro, Federico Mori, Edoardo Peronace, Attilio Porchia, Francesco Stigliano (coordinatore operativo)

#### Struttura tecnica

Angelo Anelli, Massimo Cesarano, Eleonora Cianci, Stefania Fabozzi, Gaetano Falcone, Cora Fontana, Angelo Gigliotti, Michele Livani, Amerigo Mendicelli, Giuseppe Occhipinti, Federica Polpetta, Alessandro Settimi, Rose Line Spacagna, Daniel Tentori, Valentina Tomassoni

#### Struttura gestionale

Lucia Paciucci (coordinatrice gestionale), Francesca Argiolas (supporto gestionale), Federica Polpetta (supporto gestionale), Francesco Petracchini

#### Revisori

Emilio Bilotta, Paolo Boncio, Paolo Clemente, Maria Ioannilli, Massimo Mazzanti, Roberto Santacroce, Carlo Viggiani

#### Supporto tecnico-amministrativo

Francesca Argiolas, Patrizia Capparella, Martina De Angelis, Marco Gozzi, Alessandro Leli, Patrizia Mirelli, Simona Rosselli

#### Hanno fatto parte della struttura

Raffaella Ciuffreda, Giuseppe Cosentino, Melissa Di Salvo, Giovanni Di Trapani, Rosa Marina Donolo, Carolina Fortunato, Biagio Giaccio, Marco Modica, Marco Nocentini, Andrea Rampa, Laura Ragazzi, Gino Romagnoli, Paolo Tommasi, Vitantonio Vacca

#### Attività A4.1 - Definizione di metodi di ausilio alla valutazione della CLE e della operatività strutturale degli edifici

**Responsabile DPC:** Daniele Spina

**Responsabile CNR-IGAG:** Federico Mori

#### A cura di

Gianluca Acunzo, Angelo Anelli, Claudio Chiappetta, Gaetano Falcone, Andrea Gena, Amerigo Mendicelli, Giuseppe Occhipinti, Vitantonio Vacca

versione colophon 06/12/2021

# Sommario

---

<b>1</b>	<b>Premessa</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Definizioni</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Obiettivi</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>11</b>
4.1	<i>FASE I: Grafo Ottimale del CT (GOCT)</i>	13
4.1.1	Importazione dei nodi strategici	13
4.1.2	Importazione delle CLE comunali e dei raster di impedenza	14
4.1.3	Generazione della matrice di connessione e dei percorsi con grado di ridondanza $k$	15
4.1.4	Selezione dei percorsi che ottimizzano le impedenze selezionate	17
<b>5</b>	<b>FASE II. Indice di Operatività strutturale del Contesto Territoriale (IOCT) e Classi di Operatività (COCT)</b>	<b>18</b>
5.1.1	Pericolosità stocastica specifica per sistemi a rete	21
5.1.2	Valutazione del danneggiamento degli edifici	22
5.1.3	La valutazione delle interferenze su strade e aree di emergenza	24
5.1.4	Indice di Operatività del CT (IOCT) e Classi di Operatività (COCT)	24
5.1.5	Valutazioni per il miglioramento dell'operatività	28
<b>6</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>31</b>

# 1 Premessa

Le attività di conoscenza e valutazione dei rischi naturali e dei loro impatti sull'ambiente costituiscono una linea strategica individuata in ambito internazionale, nel campo della ricerca e, più in generale, come componente essenziale delle strategie di sviluppo. La conoscenza dei pericoli naturali è da porre in relazione agli altri fattori che contribuiscono al rischio, innanzitutto la vulnerabilità e l'esposizione, la cui conoscenza – assieme alla capacità di risposta delle comunità- è indispensabile per individuare le azioni più efficaci di mitigazione degli effetti e di prevenzione.

Nel Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (UN 2015) si ritrovano i principali riferimenti e criteri per la riduzione del rischio che, nella loro articolazione in obiettivi, risultati attesi, azioni prioritarie e principi guida, costituiscono una cornice generale in cui è indispensabile inserire anche le strategie nazionali in merito alla conoscenza, valutazione e prevenzione dei rischi. Le azioni prioritarie definite nel Sendai Framework illustrano le principali questioni cui dover riferire le azioni dei Governi e, non meno importante, poter indirizzare le attività di ricerca: 1) approfondire la conoscenza dei fattori di rischio; 2) rafforzare le capacità di governo assicurando la coerenza tra settori, soggetti e azioni; 3) investire nella riduzione del rischio rafforzando la resilienza delle comunità e dei sistemi, invece di concentrare le azioni nelle risposte post-evento; 4) migliorare la preparazione tramite l'implementazione di misure specifiche ed integrate. Nel Sendai Framework si ritrova inoltre un'indicazione rilevante, quella dell'approccio multi-rischio, che – sia inteso come considerazione contemporanea di diversi rischi, sia come effetti a catena indotti da uno specifico evento calamitoso - impone uno sguardo intersettoriale in termini analitici e di azioni di mitigazione. L'integrazione tra settori è, in questo senso, presupposto indispensabile per favorire l'integrazione tra misure di diverso tipo (ambientali, economiche, sociali, produttive) necessarie per fornire risposte efficaci in direzione del rafforzamento della resilienza dei territori e delle comunità.

Più in generale, quantomeno in termini di enunciati generali di riferimento, a livello internazionale si cerca di orientare gli sforzi nel passaggio dalla valutazione di danni e perdite alla individuazione e comprensione degli impatti dei rischi in termini sistemici; obiettivo espresso con chiarezza nel Global Assessment Report in Disaster Risk Reduction 2019 dell'United Nations Office for Disaster Risk Reduction, per promuovere uno sviluppo sostenibile nella consapevolezza dell'inevitabile impatto dei rischi naturali e antropici, nella cui interrelazione i cambiamenti climatici sono la manifestazione più evidente (UNDRR 2019; IPCC 2014).

Anche in ambito europeo e, di conseguenza, nel quadro programmatico di più diretta influenza per il panorama scientifico e tecnico italiano, si ritrovano indicazioni almeno in linea di principio coerenti con queste impostazioni. Ad esempio, l'Allegato D al Country report sull'Italia 2019 delinea le priorità di investimento che l'Italia è chiamata ad affrontare e su cui si dovrebbe concentrare la spesa dei fondi strutturali europei 2021-2027. In materia di clima ed energia sono considerati prioritari gli investimenti volti ad aumentare resilienza idrogeologica e sismica nonché a realizzare infrastrutture verdi finalizzate al ripristino dell'ecosistema nelle aree urbane più vulnerabili a cambiamenti climatici e all'inquinamento atmosferico. Vista l'ampia diversità geografica che contraddistingue l'Italia, inoltre, si definiscono necessarie strategie territoriali da attuare in sinergia con gli altri obiettivi più generali di promozione dello sviluppo economico e sociale. Nell'ambito di ricerca e innovazione si richiede all'Italia, tra le altre cose, di promuovere gli scambi di conoscenze tra Enti di ricerca e settori produttivi, attraverso la promozione di partnership e la formazione. La comunità scientifica è chiamata a costruire una rete di comunicazione e sensibilizzazione, in grado di rafforzare il coinvolgimento della popolazione per sviluppare un'adeguata consapevolezza dei rischi naturali.

Ulteriore riferimento è costituito dal Regolamento UE 1313/2013 sull'utilizzo dei Fondi strutturali. Il Regolamento specifica che all'interno degli Accordi di Partenariato e dei Programmi "siano promossi gli obblighi in materia di tutela dell'ambiente, l'impiego efficiente delle risorse, la mitigazione dei cambiamenti climatici e l'adattamento ai medesimi, la protezione della biodiversità, la resilienza alle catastrofi, nonché la prevenzione e la gestione dei rischi". Inoltre, all'art. 9 indica tra gli obiettivi tematici dei Fondi quelli di "promuovere l'adattamento al cambiamento climatico, la prevenzione e la gestione dei rischi" e "rafforzare la capacità istituzionale delle autorità pubbliche e delle parti interessate e un'amministrazione pubblica efficiente".

Il Dipartimento della Protezione Civile, nell'ambito delle iniziative delle Nazioni Unite per la Riduzione del Rischio da Disastri (UNISDR) - con direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri del 6 aprile 2013 - è stato individuato quale *focal point* nazionale per l'attuazione della Strategia Internazionale di Sendai DRR (*Disaster Risk Reduction*) 2015-2030. Le Nazioni Unite, a Sendai, sancirono ufficialmente il passaggio dalla "gestione delle catastrofi" alla "gestione del rischio di catastrofi", attraverso il ruolo di primo piano riconosciuto alle attività di prevenzione, ed attraverso una strategia basata su 7 *target* globali, 4 di riduzione della mortalità, della popolazione colpita, delle perdite economiche, dei danni alle infrastrutture ed ai servizi essenziali; 3 di incremento del numero dei Paesi con strategie nazionali e locali di DRR, della cooperazione internazionale, della disponibilità e accesso a sistemi multi hazard di *early warning* e d'informazioni/valutazione su DRR.

Nella dichiarazione finale della "Carta di Roma", tra l'altro, si riconosce espressamente l'esigenza di implementare le politiche nazionali di "Build Back Better", ricostruendo meglio e in modo resiliente le città e le comunità colpite da un disastro, nonché la necessità di assicurare la coerenza tra i diversi quadri di riferimento globali, quali l'Agenda 2030, l'accordo di Parigi sui cambiamenti climatici, il Sendai Framework 2015-2030, la nuova Agenda Urbana, e la normativa dell'Unione Europea, come pure delle altre iniziative relative alla resilienza. Ed in effetti, le iniziative legislative in argomento risultano anche coerenti con la Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile - approvata in Italia con la Delibera CIPE 22 dicembre 2017 - ove, tra gli altri, sono presenti l'obiettivo strategico rivolto alle "Persone" di "Diminuire l'esposizione della popolazione ai fattori di rischio ambientale e antropico" e l'obiettivo strategico rivolto al "Pianeta" di "Prevenire i rischi naturali e antropici e rafforzare le capacità di resilienza di comunità e territori".

In ambito nazionale, il Programma Operativo Nazionale *Governance e Capacità Istituzionale* gestito dall'Agenzia per la Coesione Territoriale, principale strumento per attuare le priorità strategiche in materia di rafforzamento e innovazione della Pubblica Amministrazione concordate tra l'Italia e la Commissione europea e contenute nell'Accordo di Partenariato 2014-2020, finanzia interventi che accompagnano le misure programmate di riforma della PA. Le azioni promosse riguardano lo sviluppo di modalità organizzative, procedure, strumenti e competenze finalizzate all'incremento di efficienza della Pubblica amministrazione.

Nel quadro di questi riferimenti programmatici, il Programma Operativo Nazionale "Rischio sismico e vulcanico" definisce come obiettivo principale quello di rafforzare la capacità istituzionale e rendere più efficiente l'azione delle Regioni per la riduzione del rischio idrogeologico, sismico e vulcanico ai fini di protezione civile, favorendo le condizioni per un miglior coordinamento e una programmazione più efficace delle azioni necessarie a tale scopo. In linea con questo obiettivo il Programma promuove il raggiungimento di "standard minimi" su tutto il territorio nazionale, attraverso un percorso di programmazione degli interventi per la riduzione dei rischi (il "progetto standard") approvato dal Dipartimento della protezione civile e condiviso dall'Agenzia per la coesione territoriale (dicembre 2015).

Il riferimento principale per lo svolgimento delle diverse attività previste dal progetto è costituito dai *Contesti territoriali*, ossia insiemi di comuni che cooperano sul tema della riduzione del rischio e nelle quali le attività possono essere esercitate in modo unitario. I Contesti territoriali sono individuati per tutte le Regioni italiane sulla base di una metodologia generale in cui sono

considerati – tra i principali riferimenti – i Sistemi locali del lavoro individuati dall'ISTAT, e sono definibili come ambiti ottimali per la gestione dell'emergenza (Dlgs, 1/2018).

All'interno dei Contesti territoriali, con riferimento al rischio sismico sono svolte attività, finalizzate a definire la pericolosità, a individuare gli elementi strutturali minimi necessari per la gestione dell'emergenza nel contesto territoriale, a valutarne l'operatività; in seguito, sono definite procedure per la programmazione, la valutazione e il monitoraggio degli interventi.

## 2 Definizioni

Per una migliore comprensione del testo, si riportano alcune definizioni. Maggiori informazioni possono essere desunte nel documento “**Linee guida individuazione elementi strutturali minimi del Contesto territoriale (CLE di CT)**” (Report CAM\_F4.1 Versione 1.2).

**Condizione Limite dell'Emergenza (CLE)** (introdotta dall'art. 18 dell'OPCM 4007/2011; si veda OCDPC 344\_2016 art. 18 c.2) - Condizione per cui, a seguito di un evento sismico, nonostante i danneggiamenti subiti l'insediamento urbano conserva, comunque, la funzionalità della *maggior parte delle funzioni strategiche per l'emergenza* e la loro connessione ed accessibilità rispetto al contesto territoriale.

**Contesto Territoriale (CT)** - Insieme di aree (municipalità) limitrofe che cooperano sul tema della riduzione del rischio e nelle quali le attività possono essere esercitate in modo unitario tra più municipalità (Accordo di Partenariato Italia 2014 – 2020).

**Sistema strutturale minimo di gestione dell'emergenza del CT** - Insieme degli elementi fisici (edifici strategici, aree per l'emergenza, infrastrutture di accessibilità e infrastrutture di connessione) indispensabili per svolgere le funzioni strategiche per la gestione dell'emergenza a scala di CT (sistema a rete).

**Grafo del sistema strutturale minimo di gestione dell'emergenza del CT** - Grafo i cui nodi sono costituiti dagli Edifici Strategici (ES) e dalle Aree di Emergenza (AE) del sistema strutturale minimo (attraverso le prescrizioni contenute nelle LG CLE di CT), e i cui percorsi (ottimizzati in funzione delle varie pericolosità con algoritmo GOCT) corrispondono alle infrastrutture di connessione e di accessibilità.

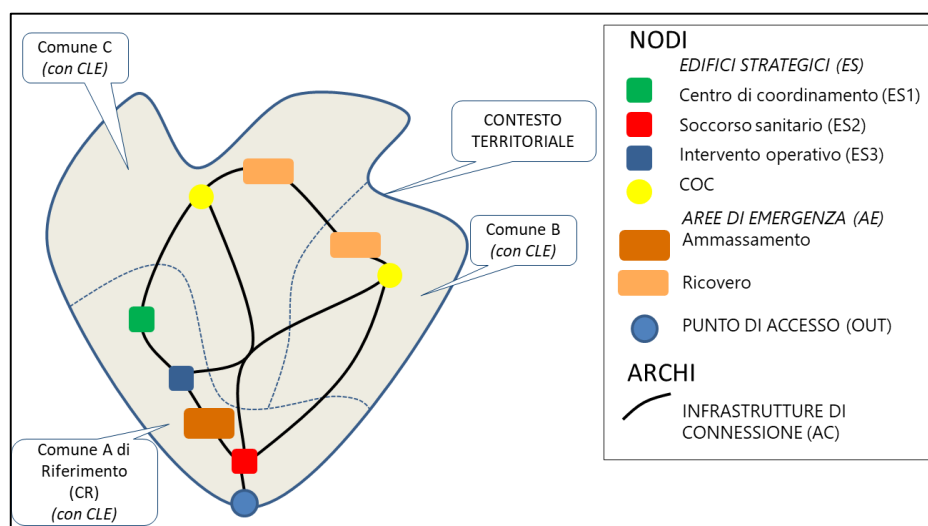


Figura 1 – L'insieme degli oggetti strutturali costituenti il sistema minimo di gestione dell'emergenza del CT

### Commento alle definizioni

Nell'ambito delle fasi per la valutazione dell'operatività del sistema strutturale di gestione dell'emergenza del CT e la definizione di interventi di mitigazione del rischio, l'individuazione degli elementi fisici che lo compongono costituisce l'operazione propedeutica necessaria (analisi della Condizione Limite dell'Emergenza, CLE). Allo stato attuale (dicembre 2021), la CLE viene prodotta nella quasi totalità dei casi a scala *comunale*.

L'individuazione degli elementi del sistema di gestione dell'emergenza del CT non può quindi prescindere dagli studi effettuati con le analisi delle CLE comunali. Allo stesso tempo, il passaggio dalla scala comunale alla scala di contesto territoriale richiede verifiche e revisioni critiche degli elementi individuati nelle analisi CLE, per diverse ragioni:

1. Dalla definizione di CLE possono derivare *diverse possibili configurazioni* del sistema di gestione dell'emergenza sismica a scala comunale. La "maggior parte delle funzioni strategiche" è un'espressione incerta, che in concreto può corrispondere a variazioni anche sensibili degli elementi considerati, oltre che a diversi *orizzonti temporali di riferimento* (brevissimo o breve, medio, lungo termine) della risposta urbana all'evento.
2. Le CLE dei vari comuni di un medesimo CT possono presentare notevoli differenze nel *numero* e nel *tipo* di elementi strategici considerati. Queste differenze possono derivare sia dalla diversa pianificazione di emergenza, sia dai diversi obiettivi delle singole amministrazioni.
3. Le analisi della CLE tra Comuni contigui sono nella maggior parte dei casi effettuate in maniera indipendente ciascuna dall'altra, trascurando pertanto le relazioni tra i comuni limitrofi e quelle tra le infrastrutture che li connettono; queste relazioni, al contrario, devono essere necessariamente considerate a scala di CT.
4. Non tutti gli elementi individuati nelle analisi della CLE comunali hanno la medesima rilevanza territoriale. Anche se si identifica in linea generale la selezione degli elementi del Sistema strutturale del CT come "*analisi della CLE del CT*", l'analisi della CLE del CT *non è definita*, attualmente, da riferimenti normativi certi. Inoltre, gli elementi strutturali per la gestione dell'emergenza alla scala del CT possono svolgere ruoli e funzioni differenti, non sempre coincidenti con quanto individuato



alla scala comunale. Si pensi ad esempio alle strutture ospedaliere che ricadono in un determinato Comune, ma che hanno un bacino di utenza esteso a più Comuni.

Di conseguenza, per individuare il sistema strutturale minimo di gestione dell'emergenza del CT, pur se a partire dalle analisi delle CLE comunali, in primo luogo è necessario esplicitare a quali obiettivi debba rispondere il sistema, e indicare i *criteri* per definire quali e quanti siano gli elementi pertinenti alla scala di CT.

L'obiettivo del sistema strutturale del CT è quello di assicurare la gestione dell'emergenza nel CT stesso in caso di evento sismico e vulcanico. La gestione dell'emergenza viene individuata sulla base di quanto deriva dalla definizione di CLE e alla luce delle definizioni del Dlgs 1/2018 ed è qui intesa solo per quanto compete agli elementi strutturali, limitandosi a identificare gli elementi fisici che permettono di svolgere le funzioni essenziali per la gestione dell'emergenza stessa. Non sono quindi considerati gli aspetti non strutturali quali, ad esempio, le modalità organizzative della risposta al sisma. Gli elementi considerati compongono un **sistema strutturale minimo**; ferme restando le specificità territoriali insediative di ogni CT, devono essere presenti almeno gli elementi fisici indispensabili per svolgere le funzioni strategiche per la gestione dell'emergenza a scala di CT. Il fatto di aver definito un sistema *minimo*, in particolare, agevola **confronti** tra diversi CT, consentendo l'individuazione di situazioni critiche e di priorità di intervento attraverso ordinamenti e graduatorie.

Gli elementi considerati che, nel loro insieme, definiscono il sistema strutturale minimo del CT (CLE di CT) sono quegli elementi fisici che consentono di svolgere le attività di gestione dell'emergenza alla scala del CT in funzione degli obiettivi e dei riferimenti precisati. Questi elementi sono di tre tipi:

- **Edifici strategici (ES);**
  - **Aree per l'emergenza (AE);**
  - **Infrastrutture di accessibilità e connessione (AC).**
- Per **Edifici strategici** rilevanti alla scala di CT si intendono gli **edifici ospitanti funzioni strategiche fondamentali**, come individuati nell'articolo 18 dell'OPCM 4007:
    - Edificio di **coordinamento interventi** a scala di CT (ES1 di CT) individuato nel Comune di Riferimento del CT (CR);
    - Edificio per il **soccorso sanitario** (ES2) di riferimento per il CT;
    - Edificio per l'**intervento operativo** (ES3 – Vigili del Fuoco) di riferimento per il CT;
    - Edifici con funzione di coordinamento degli interventi comunali (Centri Operativi Comunali - COC) dei comuni appartenenti al CT.

Per gli ES, quindi, sono considerati: **3 edifici strategici fondamentali per l'intero CT** oltre ad un numero di **ES1 comunali pari al numero dei Comuni del CT** diversi dal Comune di Riferimento (CR).

- Per **Aree di emergenza**, in questo ambito, si intendono:
  - un'area di ammassamento del CT;
  - un'area di **ricovero** per ognuno dei Comuni appartenenti al CT.
- Per **Infrastrutture di accessibilità e connessione** si indicano:

- le infrastrutture di connessione tra gli elementi ES e AE definiti ai punti precedenti (AC\_conn);
- le infrastrutture di accessibilità al / dal CT rispetto alla viabilità territoriale superiore (AC\_acc).

Risulta evidente che il maggior grado di complessità nel definire un sistema strutturale “minimo” risiede nella selezione delle infrastrutture di connessione, che devono essere tali da assicurare un’opportuna ridondanza dei collegamenti, non solo guardando alle ordinarie condizioni di servizio, ma soprattutto considerando le perturbazioni (c.d. effetti cascata) originate su di esse dalle multi-pericolosità. Per tale motivo è stato scelto di implementare una metodologia quantitativa (GOCT) per la valutazione di un grafo ottimale in termini di percorsi tra i nodi fondamentali del sistema.

### 3 Obiettivi

Obiettivo generale del presente lavoro è la predisposizione di una metodologia e la sua applicazione finalizzata a valutare la capacità di gestire nella fase di emergenza una catastrofe sismica da parte di un sistema territoriale. L’applicazione di tale metodologia a tutto il territorio, limitato in questo contesto alle 5 Regioni parte del progetto, ha per obiettivo l’individuazione di criticità e la definizione di priorità di intervento. A tal fine, la metodologia ha previsto:

- la valutazione di operatività del contesto territoriale;
- il miglioramento dell’operatività

Per conseguire tali obiettivi, le valutazioni di rischio considerate sono limitate a “valutazioni di operatività strutturale” del sistema di gestione dell’emergenza riferito ad un ambito territoriale ottimale di gestione (Contesto Territoriale). Tali valutazioni comprendono le analisi, definite attraverso uno specifico modello metodologico, di pericolosità, esposizione e vulnerabilità.

Il quadro riassuntivo dei modelli metodologici utilizzati per tali analisi e valutazione è riportato nella Tabella 1.

Tabella 1 – Sintesi dei principali modelli metodologici utilizzati per le analisi e le valutazioni

Analisi / Valutazione	Descrizione
Pericolosità	<p>Sismica: con modelli ufficiali di base dell’INGV amplificati per mezzo di una nuova carta nazionale del fattore di amplificazione stratigrafica ottenuta a partire dal database della Microzonazione Sismica. Cosismica (Frane e Liquefazione): con modelli di regressione logistica già utilizzati dall’USGS utilizzando il trigger della pericolosità sismica amplificata;</p> <p>Vulcanica (fenomeno della ricaduta di ceneri e di flussi piroclastici)</p> <p>Idrogeologica (frane e inondazioni)</p> <p>Dovendo valutare sistemi a rete distribuiti spazialmente, in linea generale la pericolosità è trattata in maniera stocastica tenendo conto della correlazione spaziale delle misure di intensità e la loro cross correlazione (cfr. software Openquake, GEM, 2020; letteratura sulle <i>Shakemap</i> <a href="http://shakemap.rm.ingv.it/shake/">http://shakemap.rm.ingv.it/shake/</a>).</p>
Esposizione	<p>Il modello dell’esposto è un sistema a rete distribuito spazialmente e costituito da nodi (edifici strategici, aree di emergenza) e da archi (infrastrutture di collegamento).</p> <p>Un algoritmo originale (<i>soft_GOCT</i>) è in grado di trovare i k percorsi ottimali (in termini di efficienza) tra i nodi del sistema per ogni pericolosità ed effettuare successivamente una selezione in termini di multi-pericolosità. La perturbazione della connessione è trattata in termini di impedenza di sistema (Boeing, 2018).</p>
Vulnerabilità	<p>Edifici strategici fondamentali: con curve di fragilità ricavate da metodologia SMAV (Spina et al., 2019 Spina et al. 2021);</p> <p>Edifici residenziali: con curve di fragilità ricavate da una metodologia semplificata (“<i>Sismabonus</i>”, art. 16-bis, comma 1, lettera i) del Tuir - Testo unico delle imposte sui redditi).</p>

	Le curve di fragilità vengono sempre supportate da modellazioni numeriche avanzate e da confronti con curve di letteratura (Syner-G in Pitilakis et al. 2014; SERA, 2020 <a href="http://www.sera-eu.org/en/home/">http://www.sera-eu.org/en/home/</a> ).
Valutazione di operatività	La valutazione finale dell'operatività del Contesto Territoriale è trattata con i teoremi della probabilità condizionata con riferimento a tutti i possibili scenari stocastici per tutti i nodi vulnerabili del sistema (edifici, aree di emergenza, infrastrutture) riferiti ad un determinato periodo di ritorno.  Ad ogni Contesto Territoriale viene associato un <b>Indice di Operatività (IOCT)</b> ed una <b>Classe di Operatività (COCT)</b> riproponendo in chiave territoriale il modo di operare del c.d. "Sismabonus" (art. 16-bis, comma 1, lettera i) del Tuir - Testo unico delle imposte sui redditi).
Valutazione per il miglioramento dell'operatività	Al fine di operare una strategia di miglioramento del sistema di gestione dell'emergenza, si valutano i benefici-costi del miglioramento con riferimento al passaggio di una classe di operatività oppure all'adeguamento.  Per fare questo sono stati declinati nel modello di valutazione metodologie già in uso a livello nazionale per erogare finanziamenti (Sismabonus, ordinanze per la ricostruzione) o in altri progetti europei.

Il percorso metodologico qui schematizzato risulta modulare. Nel prossimo futuro potrà essere applicato anche all'intero sistema resiliente del Contesto Territoriale/Ambito ottimale avendo cura di integrare gli elementi dell'esposizione e i modelli di vulnerabilità mancanti.

Di seguito è riportata una descrizione sintetica della metodologia. In altro e più dettagliato documento vengono riportati approfondimenti specifici che sviluppano in maniera esaustiva tutte le tematiche affrontate.

## 4 Metodologia

Nell'ambito di questo lavoro il sistema strutturale per la gestione dell'emergenza è considerato un sistema a rete complesso.

Benché non ne esista una definizione formale unanime, si può affermare che un sistema complesso ha alcune caratteristiche di fondo: è composto da un numero notevole di sottosistemi interagenti; presenta caratteristiche emergenti, cioè comportamenti ordinati derivanti dalle interazioni fra i sottosistemi quando i sottosistemi stessi o le loro connessioni superano un certo numero; è altamente strutturato; presenta meccanismi di retroazione (per cui una risposta in uscita diventa anche uno stimolo in entrata); è caratterizzato da una dinamica non lineare e sensibile alle condizioni iniziali ( $\rightarrow$  caos) (Dizionario Treccani [https://www.treccani.it/enciclopedia/sistema-complesso\\_%28Enciclopedia-della-Matematica%29/](https://www.treccani.it/enciclopedia/sistema-complesso_%28Enciclopedia-della-Matematica%29/))

Il comportamento di un sistema complesso non si può desumere dalla analisi, per quanto accurata, degli elementi che lo compongono: bisogna invece osservare le interazioni tra essi. Entità semplici interagenti tra loro e con l'ambiente circostante possono infatti dare luogo a comportamenti macroscopici non banali detti "comportamenti emergenti". Un comportamento emergente è un fenomeno collettivo: si presenta cioè spontaneamente e non grazie ad un'organizzazione centralizzata. I sistemi complessi hanno una architettura nella struttura delle interazioni che specifica quali parti di ciascun sistema interagiscono tra loro. Questa struttura interna è una rete complessa, un oggetto astratto che può essere visualizzato come un grafo (un modello matematico) in cui i nodi, che corrispondono alle componenti individuali del sistema, sono collegati da legami (archi), che schematizzano le interazioni (leggermente modificato da <https://www.isc.cnr.it/public-outreach/divulgazione/scienza-della-complessita-e-teoria-delle-reti/>).

Tenendo quindi presente questa premessa, è stata elaborata una metodologia che si sviluppa secondo le seguenti azioni:

- l'elaborazione degli studi di Microzonazione Sismica (MS) e della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) comunali che permetteranno di analizzare il sistema di emergenza strutturale del CT;
- la definizione di un sistema strutturale minimo per la gestione dell'emergenza del CT, partendo dalle CLE comunali, in accordo con le **Linee guida per l'individuazione degli elementi strutturali minimi del Contesto territoriale (CLE di CT)**. Questo processo di definizione viene declinato ai fini della modellazione numerica e successiva valutazione quantitativa.
- la definizione di una pericolosità sismica stocastica, specifica per lo studio dei sistemi a rete spazialmente distribuiti e caratterizzata dalla correlazione spaziale delle singole misure di intensità e di cross correlazione tra di esse;
- la definizione del grafo ottimale. Le scelte operate nella definizione del sistema a rete sono finalizzate all'ottimizzazione dello stesso, rispetto a uno o più criteri prestabiliti (indicatori di efficienza, perturbazioni legate a vari tipi di pericolosità) e alla riduzione degli oneri computazionali della successiva fase di valutazione;
- la valutazione del danno atteso e dell'operatività delle componenti strutturali e infrastrutturali del sistema a rete con curve di fragilità ottenute da modelli semplificati e avanzati;
- la definizione di un algoritmo per la valutazione dell'efficienza del sistema strutturale misurata attraverso un Indice di Operatività strutturale del CT (IOCT) e/o una Classe di Operatività (COCT);
- la definizione di modelli di mitigazione/intervento per ogni oggetto del sistema al fine di ottenere una stima di massima relativamente alla spesa economica per raggiungere la massima operatività strutturale o per effettuare uno o più passaggi di classe di operatività.

Le azioni elencate sono sviluppate in **2 FASI**.

Nella **FASE I** le elaborazioni sono condotte alla scala del sistema di gestione di emergenza strutturale (scala del CT, es. 1:50.000), considerando la rete delle strade carrabili presenti sul territorio e la presenza di impedenze correlate ai diversi tipi di pericolosità (e.g. sismica, vulcanica). L'obiettivo di questa fase è ottenere un **Grafo Ottimale di CT (GOCT)**, cioè un grafo tale che, considerando i percorsi che collegano gli oggetti fondamentali della CLE di CT, risulti ottimale in termini di lunghezza / tempo di percorrenza, minimizzando al contempo l'impatto in termini di impedenze dovute alle pericolosità.

Per le analisi delle reti stradali è stato sviluppato un software *stand alone* in ambiente Python denominato **SOFT\_GOCT**.

Si evidenzia che, sebbene questa fase sia fondamentale per l'ottimizzazione dei grafi, la valutazione finale del sistema strutturale di emergenza avviene esclusivamente nella FASE II.

Nella **FASE II** (valutazione finale del sistema strutturale di emergenza) si opera, sempre alla scala di CT, per una rete complessa con metodi di elaborazione originali e di dettaglio.

Questa parte della metodologia consiste nella valutazione quantitativa dell'operatività strutturale del sistema emergenziale del CT con il calcolo di un **Indice dell'Operatività strutturale del CT (IOCT)**, in accordo con quanto contenuto in Mori et al. (2020a) e di **Classi di Operatività strutturale del CT (COCT)**. Si sviluppa inoltre un **calcolo della spesa economica** necessaria per ottenere la massima operatività strutturale o per il passaggio di COCT.

Anche per queste analisi è stato predisposto un software *stand alone* in Matlab denominato **SOFT\_IOCT**.

## 4.1 FASE I: Grafo Ottimale del CT (GOCT)

In questa fase vengono generati i percorsi stradali che definiscono i collegamenti tra gli elementi strutturali facenti parte della CLE di CT, andando a effettuare un'ottimizzazione sia in termini di efficienza stradale (lunghezze e tempi di percorrenza) che in termini di impedenze esterne fornite in input (e.g. delle impedenze correlate a pericolosità naturali presenti sul territorio).

A tale scopo è stato predisposto il tool softGOCT, un software che interfacciandosi direttamente con il database OpenStreetMap consente di scaricare automaticamente l'intera rete stradale dei CT di interesse e di automatizzare la maggior parte delle operazioni che portano alla definizione dei percorsi.

L'utilizzo del tool può essere sintetizzato in 5 fasi operative principali:

- 1) Importazione dei nodi strategici
- 2) Importazione delle CLE comunali (se presenti) e dei raster di impedenza
- 3) Generazione della matrice di connessione e dei percorsi con grado di ridondanza k
- 4) Selezione dei percorsi che ottimizzano le impedenze importate
- 5) Export del grafo e generazione di un report contenente i principali risultati di calcolo

### 4.1.1 Importazione dei nodi strategici

In questa fase è possibile importare tramite file Excel le informazioni relative ai nodi strategici che fanno parte della CLE di CT, andando a fornire in input le seguenti informazioni fondamentali:

- Denominazione
- Descrizione
- Coordinate

La *denominazione* è un ID che va ad individuare in maniera univoca ogni nodo strategico e ne identifica la tipologia (e.g. ES\_1, COC\_2, AR\_2, ecc.), la *descrizione* è una stringa di testo che verrà associata all'elemento per rendere più agevole il riconoscimento degli oggetti all'interno del visualizzatore grafico del software, mentre le *coordinate* forniscono la posizione dell'elemento sul territorio.

A partire dalle coordinate fornite, il software provvede in automatico ad effettuare il download della rete di strade carrabili presenti all'interno del o dei CT interessati (qualora i nodi dovessero trovarsi in Contesti differenti verranno scaricate le reti stradali di tutti i CT coinvolti) e i nodi strategici importati verranno agganciati alla rete.

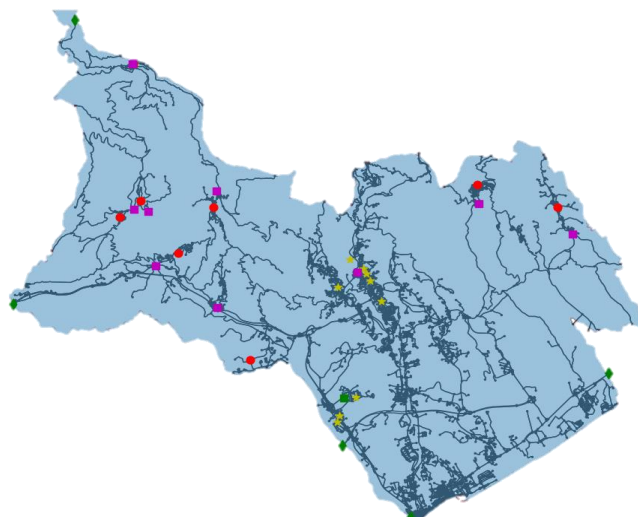


Figura 2: Scaricamento della rete stradale per il CT e aggancio dei nodi strategici

#### 4.1.2 Importazione delle CLE comunali e dei raster di impedenza

In questa fase è possibile importare all'interno del software i raster di impedenza, ovvero delle informazioni spazializzate sul territorio delle quali si vuole tenere conto nella successiva fase di generazione dei percorsi ottimali.

Al momento dell'importazione, per ognuno dei raster selezionati il software va a effettuare un campionamento sui punti geometrici che compongono la geometria dei rami del grafo stradale, andando a calcolare il valore finale dell'impedenza di ogni ramo come la media ponderata dei valori campionati sulla sua geometria.

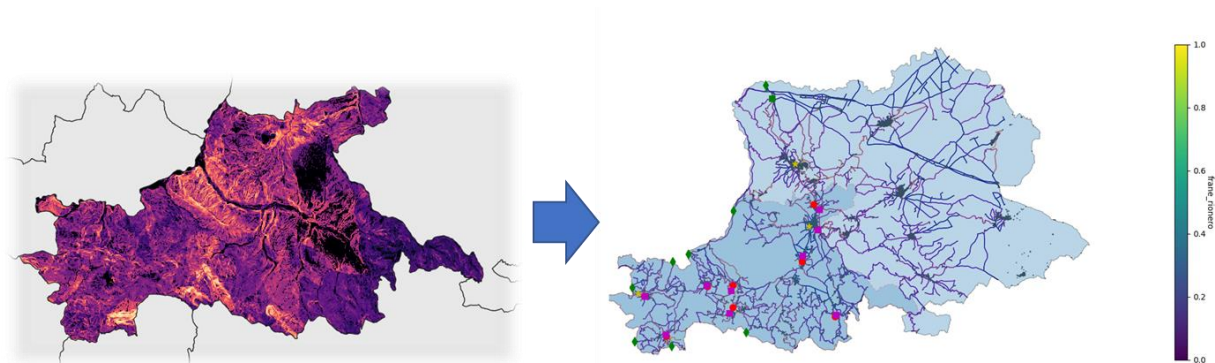


Figura 3: Importazione del raster di pericolosità e valorizzazione dei rami

Al termine di questa operazione, ognuno dei rami del grafo stradale risulterà valorizzato con dei nuovi attributi corrispondenti alle diverse impedenze importate.

Qualora fossero presenti delle CLE per alcuni dei comuni facenti parte del CT, è possibile procedere all'importazione diretta dei relativi Shapefile all'interno del tool. Al termine dell'operazione i rami stradali che fanno parte delle CLE verranno valorizzati con un apposito attributo che permetterà di distinguerli e di riconoscerli.

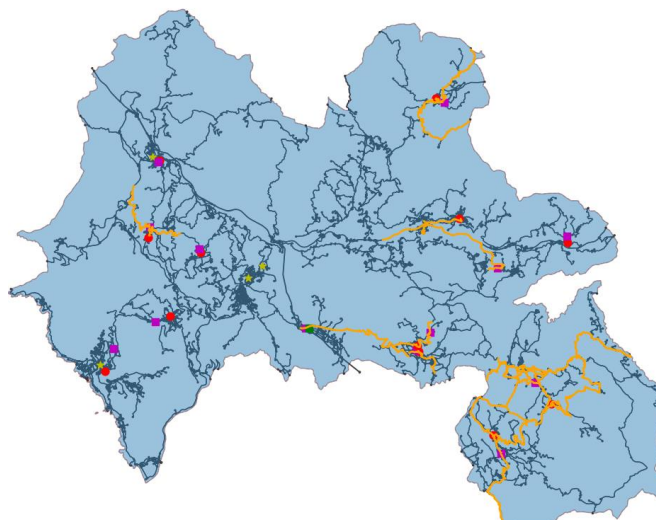


Figura 4: Importazione delle CLE comunali presenti e valorizzazione dei relativi rami del grafo stradale

#### 4.1.3 Generazione della matrice di connessione e dei percorsi con grado di ridondanza $k$

Una volta terminata la fase di import è possibile iniziare ad effettuare le prime operazioni all'interno del software.

Un elemento fondamentale propedeutico alla costruzione del grafo è la definizione di una *matrice di connessione*, ovvero una matrice che definisce quali nodi strategici della CLE di CT debbano essere collegati tra di loro, andando quindi a stabilire l'insieme delle origini e delle destinazioni.

Questa matrice può essere importata manualmente andandola a definire all'interno del file di input dei nodi strategici ma è anche possibile generarla automaticamente all'interno del software. In tal caso il software si baserà sull'ID del nodo strategico per individuarne la tipologia e costruirà la matrice secondo i criteri definiti dalla matrice delle adiacenze teorica, che possono essere sintetizzati come segue:

- L'edificio strategico ES\_1 e l'area di ammassamento AA vengono collegati a tutti gli altri nodi strategici
- Gli altri edifici strategici ES\_i verranno collegati a tutti gli altri ES e ai COC
- Il COC\_i verrà collegato a tutti gli ES e all'area di ricovero AR\_i (con lo stesso pedice)

Al termine dell'operazione la matrice generata può essere esportata su un file Excel per essere verificata e, in caso di necessità, modificata e importata nuovamente all'interno del tool.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	
2	Denominazione	ES_02_2	COC_1	AR_1	COC_2	AR_2	COC_3	AR_3	COC_4	AR_4	COC_5	AR_5	COC_6	AR_6	COC_7	AR_7	COC_8	AR_8	COC_9	AR_9	COC_10	AR_10	ES_02	COC_11	AR_11	COC_12	AR_12	ES_01	ES_02	ES_03	AR_13	AA_01	
3	ES_02_2	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	
4	COC_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	AR_1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
6	COC_2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	
7	AR_2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
8	COC_3	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	
9	AR_3	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
10	COC_4	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	
11	AR_4	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
12	COC_5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	
13	AR_5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
14	COC_6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	
15	AR_6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
16	COC_7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	
17	AR_7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
18	COC_8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	
19	AR_8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
20	COC_9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	
21	AR_9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
22	COC_10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	
23	AR_10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
24	ES_02	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0
25	COC_11	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	
26	AR_11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
27	COC_12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	
28	AR_12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
29	ES_01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
30	ES_02_3	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0
31	ES_03	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0
32	AR_13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
33	AA_01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Figura 5: Matrice di adiacenza esportata da softGOCT

Una volta definita la matrice di connessione è possibile andare a generare i percorsi ridondanti che collegano tutte le origini e le destinazioni.

In questa fase, il software calcola automaticamente i  $k$  percorsi più brevi e i  $k$  percorsi più veloci che collegano tutte le origini e le destinazioni coerentemente con quanto specificato dalla matrice di connessione. Il numero massimo  $N_{p,max}$  di percorsi ridondanti generato in questa fase risulta pari a:

$$N_{p,max} = (2 * k)^m$$

dove  $k$  è il grado di ridondanza scelto e  $m$  rappresenta il numero di coppie origine-destinazione che devono essere collegate tra loro. Il grado di ridondanza  $k$  può essere scelto arbitrariamente prima dell'inizio dell'analisi.

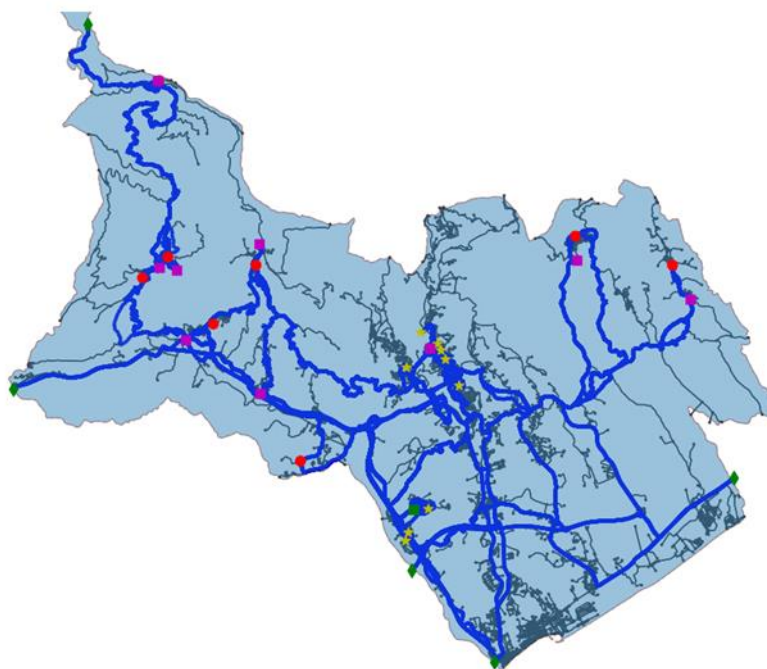


Figura 6: Grafo dei percorsi ridondanti generato con grado di ridondanza  $k=3$



Il calcolo dei percorsi ridondanti può essere effettuato utilizzando 3 livelli di approccio nei confronti delle CLE comunali eventualmente importate nel programma:

- Approccio a priorità assoluta di CLE
- Approccio a priorità parziale di CLE
- Approccio a priorità nulla di CLE

Se i percorsi ridondanti vengono generati utilizzando un approccio a *priorità assoluta di CLE* il software cercherà di collegare le origini e le destinazioni utilizzando, dove possibile, i soli rami appartenenti alla CLE. Scegliendo invece l'approccio a *priorità parziale di CLE* il software collega le origini e le destinazioni andando a privilegiare i rami appartenenti alle CLE comunali, ma in maniera meno stringente rispetto al criterio precedente. In ultimo, utilizzando un approccio a *priorità nulla di CLE*, come suggerito dal nome verrà effettuata una generazione secondo un criterio puramente di ottimizzazione di lunghezze e tempi di percorrenza, ignorando l'informazione relativa all'appartenenza o meno dei rami alle CLE comunali.

Il software permette inoltre di visualizzare l'incremento di costo, inteso come incremento di lunghezza e di tempo di percorrenza, che deriva dall'utilizzo degli approcci a priorità assoluta e parziale di CLE rispetto ad un utilizzo a priorità nulla di CLE (ottimizzazione pura). In base ai risultati, la scelta finale dell'approccio da utilizzare è demandata all'utilizzatore.

#### 4.1.4 Selezione dei percorsi che ottimizzano le impedenze selezionate

Una volta generati i percorsi ridondanti, il software permette di andare a determinare il grafo ottimale nei confronti delle impedenze importate andando a individuare per ogni coppia origine-destinazione il percorso che minimizza il valore medio delle impedenze sui rami che lo compongono. Considerando il  $k$ -esimo percorso tra origine e destinazione, il suo valore di score  $S_k$  nei confronti delle impedenze sarà pari a:

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} l_i \bar{l}_i}{\sum_{i=1}^{n_k} l_i}$$

dove  $n_k$  è il numero di rami che compongono il  $k$ -esimo percorso,  $\bar{l}_i$  e  $l_i$  sono rispettivamente l'impedenza media e la lunghezza del ramo  $i$ -esimo.

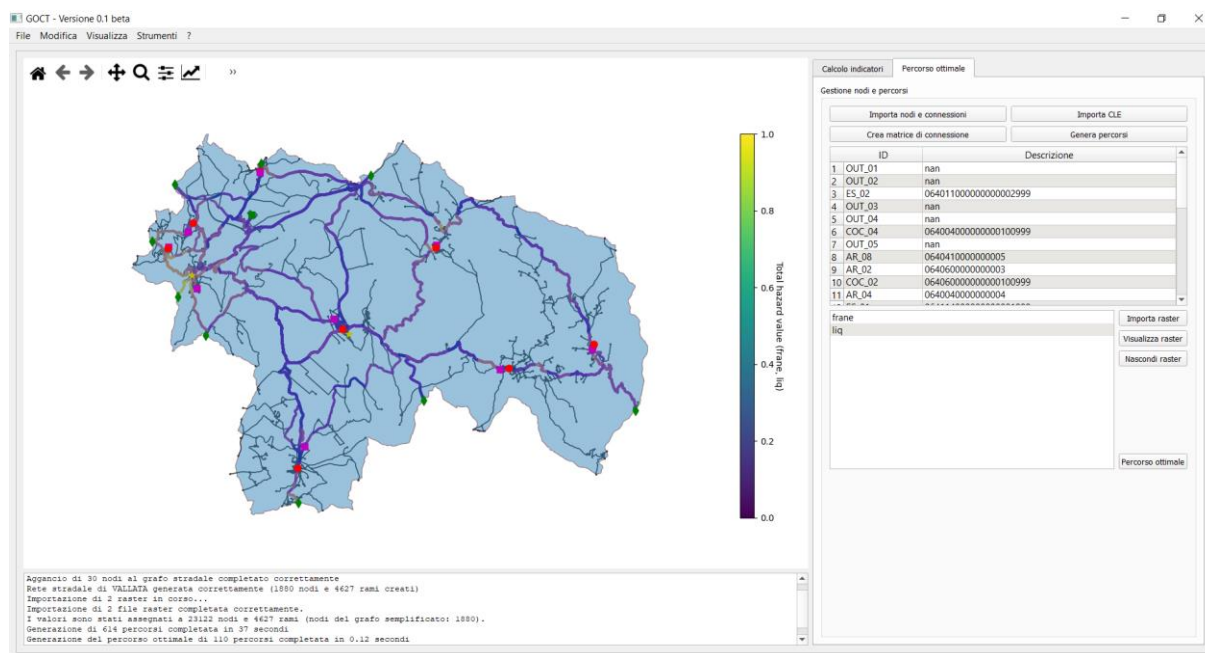


Figura 7: Percorso ottimale generato minimizzando le impedenze medie dei rami

Al termine delle operazioni, il grafo generato potrà essere esportato in formato Shapefile o Geopackage per essere poi verificato ed eventualmente modificato in un software GIS per un successivo post-processing.

## 5 FASE II. Indice di Operatività strutturale del Contesto Territoriale (IOCT) e Classi di Operatività (COCT)

Nella FASE II si valuta il sistema a rete costituito dalla parte strutturale di un sistema di emergenza. In particolare, si valuta l'operatività del sistema a partire dai grafi ottimali (uno per ogni tipo di pericolosità) individuati nella FASE I.

La valutazione dell'operatività deve essere condotta in termini stocastici in quanto l'indice di rischio deve essere dato dalla convoluzione di tutti i possibili scenari che contribuiscono ad una data azione con un determinato periodo di ritorno (l'utilizzo di una pericolosità aggregata determinerebbe un indice di rischio sovrastimato in quanto ogni punto del grafo è caratterizzato dal valore massimo atteso della pericolosità al sito). Nel caso sismico la valutazione del sistema a rete è irrobustita dalla presenza delle correlazioni spaziali tra le misure di intensità dello scuotimento tra i diversi siti (attraverso i residui delle GMPE) e delle cross-correlazioni tra le misure di intensità nel singolo sito.

Nel seguito è descritta la metodologia per la pericolosità sismica.

L'impianto generale della metodologia è contenuto in Mori et al. (2020a) e si basa su quanto prodotto nei progetti SynerG (<http://www.vce.at/SYNER-G/>), SERA 2020 (<http://www.sera-eu.org/en/Dissemination/deliverables/>) e del progetto LIQUEFACT (<http://www.liquefact.eu/disseminations/deliverables/>).

La struttura oggetto di valutazione è il grafo ottimale di gestione del sistema dell'emergenza del CT (Figura 1).

Nel grafo si distinguono:

- elementi puntuali come gli edifici e le aree di emergenza (**nodi primari**);
- Elementi lineari (archi) come le infrastrutture stradali di collegamento
- baricentri geometrici degli elementi lineari (**nodi baricentrici**) come le infrastrutture stradali di collegamento;
- intersezioni tra gli elementi lineari (**nodi secondari**).

Tale suddivisione, oltre che di carattere formale, determina anche una struttura gerarchica: infatti solo nelle prime due tipologie di nodi viene calcolata la perturbazione sismica (fenomeni transienti come accelerazione, velocità) e, conseguentemente, vengono determinate le probabilità di operatività degli oggetti sulla base dei loro modelli di fragilità. L'ultima tipologia di nodo ha una valenza meramente topologica, comunque necessaria per la costruzione della geometria della rete.

Gli archi rappresentano le infrastrutture stradali di accessibilità e di collegamento dei nodi primari, cioè degli oggetti componenti il sistema strutturale di gestione dell'emergenza. Per le valutazioni relative all'operatività del generico tratto di infrastruttura, la perturbazione è applicata al nodo baricentrico dell'arco. Il livello di tale approssimazione può essere gestito variando la dimensione dei tratti elementari che compongono la rete.

A ciascun elemento del grafo sono associati gli attributi necessari per le valutazioni probabilistiche di operatività (Tabella 2).

Tabella 2 - Elementi di un grafo di CT e attributi associati

Tipologia di elemento	Componente	Attributi
Puntuale	Edifici strategici (ES)	Geolocalizzazione; Identificativi; Caratteristiche tipologiche; Interferenza su infrastrutture; Modelli di fragilità da misure in sito o da altri studi (eventuali).
Puntuale	Centri Operativi di Coordinamento (COC)	Geolocalizzazione; Identificativi; Caratteristiche tipologiche; Interferenza su infrastrutture; Modelli di fragilità da misure in sito o da altri studi (eventuali).
Puntuale	Aree di emergenza (ricovero o ammassamento)	Geolocalizzazione; Identificativi; Interferenza di infrastrutture; Modelli di vulnerabilità per fenomeni cosismici;
Puntuale	Nodi di ingresso al CT	Geolocalizzazione; Identificativi;

Lineare	Infrastrutture (connessione o accessibilità)	Identificativi; Geolocalizzazione di nodi origine/destinazione e nodi baricentrici; Interferenza di infrastrutture; Modelli di vulnerabilità per fenomeni cosismici;
---------	---	--

Oltre che da nodi e archi il grafo è composto da regole di connessione, che stabiliscono quali i elementi devono essere mutuamente collegati perché il sistema di gestione dell'emergenza mantenga la sua operatività. Queste regole di connessione sono rappresentate matematicamente dalla matrice di adiacenza e stabiliscono le coppie di nodi di origine e destinazione del sistema.

La pericolosità sismica (idrogeologica e vulcanica), che agisce come fattore perturbativo del sistema, viene determinata generando tanti singoli eventi di scenario mediante un approccio stocastico. Per ciascun evento di scenario e per ciascuno degli elementi oggetto di valutazione (nodi e archi) viene ricavato un insieme di misure di intensità in corrispondenza ai nodi primari e baricentrici del sistema. Queste misure di intensità, a loro volta, costituiscono i parametri di ingresso (input sismico) dei modelli di fragilità degli elementi oggetto di valutazione (aree suscettibili di frana, aree suscettibili di liquefazione, edifici interferenti lungo le infrastrutture di collegamento, edifici strategici).

Vista l'estensione areale del CT, per ogni nodo vulnerabile vengono selezionati gli eventi sismici corrispondenti al tempo di ritorno scelto (tipicamente pari a 475 anni)<sup>1</sup>.

L'intensità sismica (input sismico) di ciascuno scenario è utilizzata per ricavare la probabilità di operatività di ciascun oggetto del sistema in accordo ai modelli di fragilità degli stessi, definiti a priori con modelli generati ad hoc per il progetto o di letteratura.

A questo punto è possibile passare al calcolo dell'Indice di Operatività del CT (IOCT).

**L'Indice di Operatività strutturale del CT (IOCT)**, definito come il rapporto tra l'efficienza del sistema strutturale di gestione dell'emergenza modificata per effetto della perturbazione e quella in condizione di servizio, descrive una perdita di efficienza del sistema.

La valutazione è arricchita anche dal calcolo di alcuni indici parziali, legati alle singole componenti che costituiscono il sistema. Questi indici parziali sono i valori medi dell'operatività rispetto a tutti gli scenari considerati. Ciò fornisce una indicazione quantitativa di quanto ciascuna componente della rete influisca, all'abbattimento dell'indice di operatività complessivo.

Gli indici parziali possono essere utilizzati per indirizzare eventuali interventi di miglioramento del sistema.

Il miglioramento del sistema viene associato a quantificazioni economiche di massima, mediante l'utilizzo di criteri semplificati per la definizione dei costi unitari.

---

<sup>1</sup> In dettaglio, questa operazione è fatta secondo questa procedura: fissato un nodo, ciascuna MI è associata a un periodo di ritorno T. L'insieme degli scenari generati può quindi essere suddiviso in sottoinsiemi in base a T. Ovviamente, variando il nodo considerato, varia il sottoinsieme di eventi associati a un certo periodo di ritorno T. La valutazione dell'operatività del sistema per il periodo di ritorno T è valutata sul sottoinsieme di eventi ottenuto come unione di tutti i sottoinsiemi associati a T per i singoli nodi.

Di seguito si descrivono in dettaglio le metodologie di calcolo della pericolosità sismica, del livello di danneggiamento degli edifici e del calcolo degli indici e delle classi di operatività.

### 5.1.1 Pericolosità stocastica specifica per sistemi a rete

Per la valutazione del rischio sismico di sistemi a rete, costituiti da oggetti spazialmente distribuiti, è opportuno utilizzare una pericolosità stocastica in cui gli scenari sismici siano ottenuti utilizzando GMPE che contemplino i modelli di correlazione spaziale dei residui. Il risultato finale, in termini di rischio, risulta dalla convoluzione di tutti gli scenari possibili per gli oggetti facenti parte del grafo. Per il calcolo della pericolosità sismica viene utilizzato il software Openquake (GEM, 2020) e in particolare l'analisi *Event-Based Probabilistic Seismic Hazard Analysis*.

Le caratteristiche dell'analisi di pericolosità di base sono:

- modello delle sorgenti in accordo con la procedura della pericolosità sismica nazionale in vigore (<http://esse1.mi.ingv.it/>): zonazione ZS9, tassi osservati *Activity Rates* (AR) da catalogo CPTI04 (<https://emidius.mi.ingv.it/CPTI/>), meccanismi di rottura e profondità medie;
- albero logico: 60% AR completezza storica, 40% AR completezza statistica;
- leggi di attenuazione: Bindi et al. (2011).

Le caratteristiche della pericolosità che tenga conto delle amplificazioni locali sono:

- mappa a scala nazionale della  $V_{s30}$  (Mori et al., 2020b) nella GMPE di Bindi et al. (2011) (metodologia semplificata);
- mappa a scala nazionale di fattori di amplificazione realizzata con un software originale, scritto nell'ambito del progetto (Falcone et al., 2021);
- correlazione spaziale dei residui della GMPE secondo il modello di Jayaram and Baker (2009);
- cross-correlazione tra le misure di intensità nel sito secondo il modello presente in Silva and Horspool (2019).

Le misure di intensità, che vengono calcolate direttamente nei nodi vulnerabili del grafo, cioè nei nodi primari e baricentrici, sono:

- *Peak Ground Acceleration* (PGA) calcolata per tutti i nodi vulnerabili del grafo; da utilizzare nelle curve di fragilità degli edifici interferenti, per valutare la probabilità di crollo e quindi le interferenze con le aree di emergenza e con le infrastrutture di connessione;
- *Peak Ground Velocity* (PGV) calcolata per tutti i nodi vulnerabili del grafo; da utilizzare per la valutazione delle frane e liquefazione cosismiche e quindi le interferenze con le aree di emergenza e con le infrastrutture di connessione;
- *Acceleration Spectrum Intensity* (ASI), per i nodi corrispondenti agli edifici strategici per i quali sono state eseguite misure di vibrazione e sono stati identificati i parametri modali sperimentali; il parametro viene utilizzato nelle curve di fragilità degli edifici strategici sui quali è stata applicata la metodologia SMAV (Spina et al., 2019) per valutarne la probabilità di operatività strutturale.

La valutazione dei fenomeni di instabilità permanente cosismici avviene secondo le seguenti metodologie:

- calcolo della probabilità di frana e *areal coverage* con metodologia Nowicki et al. (2018);
- calcolo della probabilità di liquefazione e *areal coverage* con metodologia Zhu et al. (2017).

### 5.1.2 Valutazione del danneggiamento degli edifici

La valutazione del danneggiamento degli edifici avviene secondo diverse modalità:

- *Per gli edifici strategici fondamentali:* attraverso curve di fragilità per l'operatività strutturale o danno D2 ricavate dall'applicazione del modello SMAV (Spina et al., 2019, Spina et al. 2021) a sua volta ottenuto dalle misurazioni di vibrazione sull'edificio. Questa modalità, che è riservata ai tre edifici strategici fondamentali del CT, rappresenta l'approccio avanzato. A supporto e validazione della metodologia adottata per la costruzione delle curve di fragilità, su alcuni edifici sono state fatte misure sperimentali ed è stata anche eseguita una modellazione numerica non lineare a macroelementi.

Laddove non fosse possibile impiegare le curve derivanti da dati sperimentali, in presenza di modellazione numerica degli edifici, si prevede l'utilizzo delle curve di fragilità ottenute a partire da questi.

Al fine di valutare le prestazioni degli edifici strategici in cemento armato con un numero di piani elevato, come tipico di quelli con funzione di soccorso sanitario, è stata sviluppata una particolare procedura per la valutazione basata sullo sviluppo di modelli *beam-like* (Occhipinti et al., 2021).

- *Per gli altri edifici strategici dei singoli comuni (COC):* in questo caso si utilizza con un approccio semplificato, utilizzando curve di fragilità di letteratura relativamente al danno D2.
- *Per gli edifici residenziali interferenti con infrastrutture:* attraverso curve di fragilità calibrate sul metodo semplificato riportato nel "Sismabonus" (art. 16-bis, comma 1, lettera i) del Tuir - Testo unico delle imposte sui redditi; Anelli et al., 2021) e la valutazione del collasso (danno D4+D5). La classe di vulnerabilità viene assegnata in base alle caratteristiche tipologiche (presenti nelle schede degli edifici delle CLE), all'epoca di costruzione in relazione all'anno di classificazione sismica del Comune, ad eventuali interventi di miglioramento o adeguamento sismico e, infine, a modificatori di comportamento in presenza di aggregati. Per l'attribuzione della classe di vulnerabilità e in maniera omogenea con la metodologia I.Opà.CLE (Dolce et al., 2018), ci si è basati sui criteri riportati in Figura 8.

CLASSI DI VULNERABILITA'		Strutture Verticali										
		Non identificate	Muratura di qualità cattiva			Muratura di qualità buona			Muratura mista (muratura + c.a.)		Calcestr. armato	
			N piani ≤ 3		N piani>3	N piani ≤ 3		N piani>3	N piani≤3	N piani>3	PIANO PILOTIS SI	PIANO PILOTIS NO
			SENZA cordoli o catene	CON cordoli o catene		SENZA cordoli o catene	CON cordoli o catene					
Anno Costruzione < Classificazione sismica [post 1982]	Non identif_	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Anno di costruzione ≤ 1919	---	A	B	A	B	C1	B	B	A	---	---
	Anno di costruzione 1919 -1945	---	A	B	A	B	C1	B	B	A	---	---
	Anno di costruzione 1945-Class	---	B	C1	B	C1	D1	C1	C1	B	B	C2
Edifici costruiti in conformità alla normativa antisismica [post 1982]	Anno di costruzione >Class	---	C1	D1	C1	D1	D1	D1	C1	C1	C2	D2

Tabella di attribuzione della classe di vulnerabilità per **ES e US** (se l'edificio è oggetto di intervento di miglioramento/adequamento sismico l'anno di costruzione diventa quello di intervento)

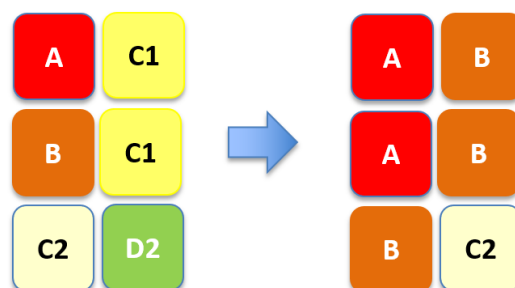
Tabella di attribuzione della classe di vulnerabilità per **ES e US** (se l'edificio è oggetto di intervento di miglioramento/adequamento sismico l'anno di costruzione diventa quello di intervento)

*Nota bene: l'anno di prima classificazione sismica del Comune ha significato solo post 1982*

Figura 8 – Attribuzione della classe di vulnerabilità per gli edifici residenziali interferenti con una infrastruttura (IOPACLE in Dolce et al., 2018)

Nella Figura 9 vengono riportati i coefficienti correttivi utilizzati per modificare le attribuzioni della classe di vulnerabilità, anche in relazione alla distribuzione della vulnerabilità nell'aggregato strutturale.

INDICE DI VULNERABILITA' AGGREGATO			
INTERAZIONI TRA US			Coeff
12	Presenza di US caratterizzate da grandi Luci	si	0,03
		no	0,00
13-16	Eterogeneità strutturale/costruttiva dell'AS	si	0,03
		no	0,00
REGOLARITA' STRUTTURALE			
24	Disallineamento tra quote di imposta della copertura	si	0,03
		no	0,00
25	Disallineamento tra quote orizzontamenti	si	0,03
		no	0,00
26	Disallineamento pareti di facciata	si	0,03
		no	0,00
27	Disallineamento spazi interni	si	0,03
		no	0,00
28	Testata snella	si	0,03
		no	0,00
INFRASTRUTTURE DI SERVIZIO (ELETTRICITA')			
29	Elementi mal collegati	si	0,03
		no	0,00
30	Sistema di bucatore incongruo	si	0,03
		no	0,00
31	Pilastri isolati, portici, piani pilotis	si	0,03
		no	0,00
32	Sopraelevazioni, altane, torrioni	si	0,03
		no	0,00
33	Torri, campanili, ciminlere	si	0,03
		no	0,00
34	US degradate o danneggiate	si	0,03
		no	0,00



**Passaggio sfavorevole di classe per le US se compresenti 9/13 parametri di irregolarità nell'aggregato. Se il 70% delle US è in classe A le altre US vengono degradate di 1 classe**

Figura 9 - Coefficienti correttivi per aggregati strutturali, utilizzati per modificare le attribuzioni della classe di vulnerabilità (IOPACLE in Dolce et al., 2018)

### 5.1.3 La valutazione delle interferenze su strade e aree di emergenza

La valutazione dell'interferenza (ovvero l'ingombro di strade e aree per frane, liquefazioni e materiale derivante dal crollo di edifici prospicienti) a seguito della perturbazione sismica è calcolata per le aree di emergenza e per le infrastrutture di collegamento.

Il modello di interferenza legato ai fenomeni cosismici è calcolato in maniera semplificata: a seguito del superamento di una soglia dell'intensità sismica, determinata come quella a cui corrisponde il 50% di probabilità che si verifichi il fenomeno, viene attribuito un valore di probabilità di operatività pari al 50%. Tale valore di soglia dell'intensità sismica viene calcolato invertendo le espressioni analitiche presenti in Nowicki et al. (2018) e Zhu et al. (2017).

Il modello messo a punto per la valutazione della probabilità di operatività delle infrastrutture di connessione in relazione ai crolli degli edifici interferenti è stato presentato in Anelli et al. (2020).

### 5.1.4 Indice di Operatività del CT (IOCT) e Classi di Operatività (COCT)

La fase propedeutica al calcolo dell'**Indice di Operatività del Contesto Territoriale (IOCT)** è la determinazione, sulla base dei modelli di fragilità di ogni oggetto, della probabilità di operatività associata ad ogni scenario sismico facente parte dell'impianto stocastico.

IOCT è un parametro sintetico definito come il rapporto tra l'efficienza della rete in condizioni perturbate e l'efficienza in condizioni di servizio (Figura 10).

Alla sua determinazione concorrono, oltre alla probabilità di operatività degli elementi puntuali, i percorsi minimi delle infrastrutture di collegamento tra i nodi primari che, per effetto della perturbazione, sono modificati a seguito delle non operatività di alcuni archi stradali.

In condizioni di servizio l'efficienza è data dalla sommatoria, per tutte le coppie di nodi che devono rimanere connesse (secondo la matrice di adiacenza del sistema), del rapporto tra il prodotto dell'operatività del nodo di origine e di destinazione e la lunghezza minima del percorso tra i due nodi (tramite l'algoritmo di Dijkstra). In condizioni di servizio, l'operatività dei nodi è assunta unitaria, pertanto l'unico elemento che contribuisce all'efficienza della rete in condizioni non perturbate è l'inverso della lunghezza minima dei collegamenti mutui tra i diversi oggetti.

$$IOCT(T_R) = \frac{E_{CT}(T_R)}{E_{CT}(0)}$$

**Efficienza in condizioni di servizio**

$$E_{CT}(0) = \sum_O \sum_D \frac{1}{L_{OD}}$$

$L_{OD}$   
Lunghezza percorso minimo fra nodo origine e destinazione calcolato con algoritmo di Dijkstra

**Efficienza in condizioni sismiche**

$$E_{CT}(T_R) = \sum_O \sum_D \frac{P(OP_O \cup OP_D, T_R)}{\bar{L}_{OD}(T_R)}$$

$P(OP_O \cup OP_D, T_R)$   
Probabilità di operatività congiunta del nodo origine e destinazione

$\bar{L}_{OD}(T_R)$   
Variazione di lunghezza del percorso minimo condizionata all'operatività del nodo origine e destinazione in funzione di:

- frana cosismica
- liquefazione cosismica
- ingombro macerie dovuto a crolli degli edifici interferenti

Figura 10 – Formulazione dell'Indice di Operatività del CT (IOCT) come rapporto tra efficienza pre e post evento.



Poiché nella formulazione compare una sommatoria estesa a tutte le coppie di nodi primari, cioè rappresentativi di oggetti fisici del sistema, è opportuno sottolineare come la matrice di adiacenza che schematizza le regole di collegamento tra gli oggetti del grafo (Figura 11), costituisca un sistema di pesi implicito, in quanto i nodi che compaiono più volte nella sommatoria, cioè quelli con più connessioni con gli altri, influiscono maggiormente sul risultato.

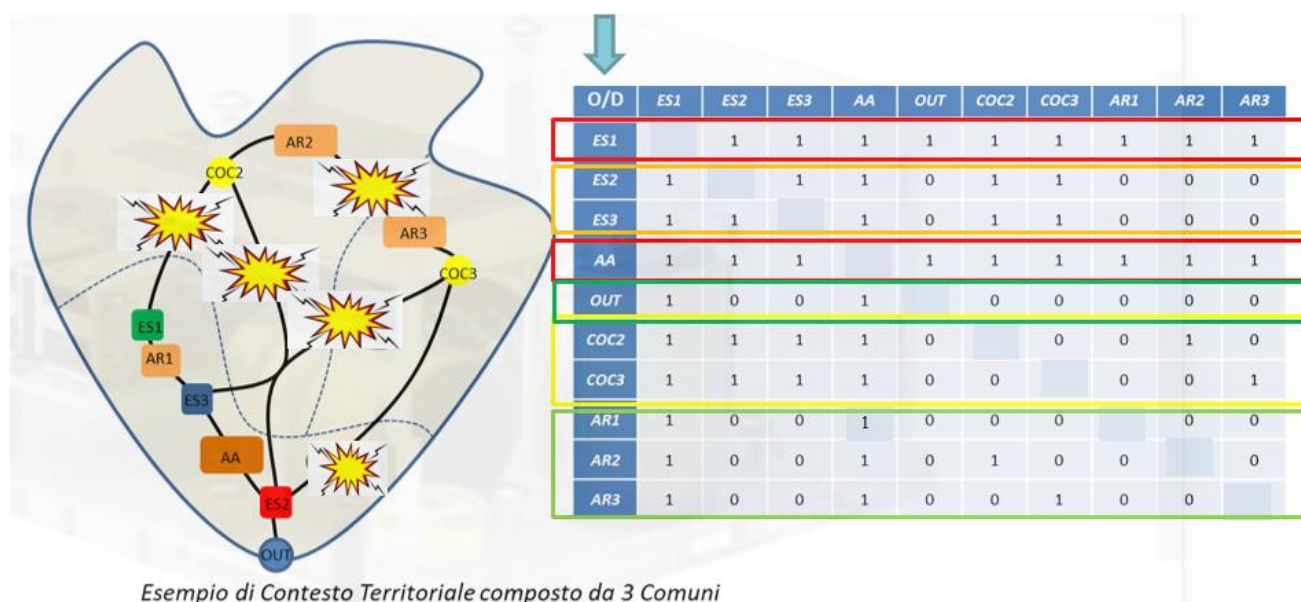


Figura 11 – Esempio di matrice delle adiacenze per un CT composto da 3 Comuni.

In condizioni perturbate, l'efficienza del sistema si modifica in quanto le operatività dei nodi tendono a ridursi (danno degli edifici e interferenze sulle aree di emergenza) e i percorsi minimi tra questi tendono a subire delle modifiche per effetto delle interferenze (frane, liquefazioni, crolli degli edifici interferenti).

Si ha, pertanto, un doppio effetto di riduzione dell'indice in condizioni di disturbo: uno legato ad una riduzione delle probabilità di operatività dei nodi e, un altro, legato alla variazione dei percorsi minimi di collegamento a seguito della perdita di operatività di alcuni tratti stradali.

Poiché l'operatività dei singoli nodi e quella degli archi stradali non sono eventi stocasticamente indipendenti, nel calcolare il contributo all'efficienza complessiva del singolo "sistema elementare", costituito da una coppia di nodi primari e dalla lunghezza del percorso minimo che li unisce, è necessario fare uso del concetto di probabilità condizionata.

Nel dettaglio si procede nel modo seguente:

- Sull'intero insieme  $N$  di scenari di evento si calcola la probabilità media di operatività del primo nodo primario  $i$  del sistema elementare;
- A partire dall'insieme di  $N$  scenari di evento, vengono selezionati quegli eventi (in numero pari a  $n_1 \leq N$ ) tali per cui il nodo  $i$  risulta essere operativo. Questa prima selezione avviene estraendo in maniera casuale, per ognuno degli  $N$  eventi, un numero reale  $X$  nell'intervallo  $[0,1]$  (con distribuzione di probabilità uniforme) e confrontando tale valore con la probabilità di operatività  $OP$  del nodo, precedentemente calcolata. Se  $X \leq OP$  il nodo è considerato operativo, altrimenti è non operativo.

- c) Su questo sottoinsieme di  $n_1$  eventi di scenario si calcola la probabilità media di operatività del secondo nodo del sistema elementare (condizionata alla operatività del primo nodo). Per il teorema di Bayes della probabilità condizionata questo valore, moltiplicato alla probabilità che il nodo  $i$  sia operativo (calcolabile direttamente dal set originale di  $N$  eventi come media delle probabilità di operatività del nodo  $i$ ) fornisce la probabilità dell'intersezione tra gli eventi "operatività del nodo origine  $i$ " ed "operatività del nodo destinazione  $j$ ".
- d) A partire dall'insieme degli  $n_1$  scenari del primo sottoinsieme, viene determinato, con la stessa procedura descritta sopra, il sottoinsieme di  $n_2 \leq n_1$  scenari tali per cui anche il secondo nodo di destinazione  $j$  risulta essere operativo.
- e) Su questo secondo sottoinsieme di  $n_2$  scenari viene quindi calcolata la lunghezza attesa del percorso minimo che unisce i nodi del sistema elementare considerato. Il valore atteso del percorso minimo tra i nodi  $i$  e  $j$  viene determinato mediante l'algoritmo di Dijkstra modificando la matrice di adiacenza dei nodi del grafo (matrice il cui generico elemento, in condizioni di servizio, è pari a zero se i due nodi non sono collegati e pari alla lunghezza dell'arco di collegamento in presenza di quest'ultimo) annullando i termini (che equivale a scollegare i due nodi del grafo) per i quali un numero estratto in maniera random nell'intervallo  $[0, 1]$  a partire da una densità di probabilità uniforme supera la probabilità di operatività media dell'arco stradale di collegamento valutata sugli  $n_2$  eventi ricavati in precedenza (per cui sono operativi sia i nodi origine che destinazione).

IOCT viene poi composto dalla sommatoria estesa a tutti i sistemi elementari, cioè a tutte coppie di nodi origine e destinazione, tenendo conto della matrice che ne stabilisce i collegamenti necessari ai fini della gestione dell'emergenza.

IOCT varia tra 0 ed 1 e può essere rappresentato in 5 **Classi di Operatività del CT (COCT)** (Tabella 3, Figura 12):

Tabella 3 – Classi di Operatività (COCT) e corrispondenti valori di operatività (IOCT).

COCT	IOCT
A	1.0-0.65
B	0.65-0.35
C	0.35-0.15
D	0.15-0.05
E	0.05-0.0

Vengono poi calcolati anche gli indici e le classi relativamente alle seguenti famiglie di oggetti del CT:

- edifici strategici fondamentali;
- edifici strategici dei singoli comuni (solo COC);
- area di ammassamento;
- aree di emergenza;
- infrastrutture di connessione;
- punti di accesso al CT.

Gli indici sono calcolati come il 50° percentile delle probabilità medie di operatività degli oggetti appartenenti alla singola famiglia.

Di seguito la scansione delle classi in base agli indici parziali:

CLASSE	INDICE
A	1.0-0.8
B	0.8-0.6
C	0.6-0.4
D	0.4-0.2
E	0.2-0.0

Questa analisi disgiunta delle singole componenti conduce a una utile rappresentazione grafica, attraverso un diagramma a radar, che indica quantitativamente il contributo di ciascuna singola componente del sistema al valore di IOCT e fornisce dei criteri per la fase successiva di valutazione per il miglioramento dell'operatività del sistema.

### RISULTATI per Tr=475 anni

### Legenda indici e classi

Componenti del sistema di gestione dell'emergenza		INDICE	CLASSE	CLASSE	INDICE	Risultati per le singole componenti (50° percentile delle medie)
	ES fondamentali	0.61	B*	A	0.8 - 1.0	
	Area di ammassamento	1.00	A	B	0.6 - 0.8	
	Edifici COC	0.47	C*	C	0.4 - 0.6	
	Aree di ricovero	0.96	A	D	0.2 - 0.4	
	Connessioni	0.50	C	E	0 - 0.2	
	Out	1.00	A			
		IOCT	COCT	COCT	IOCT	Risultato globale per il Contesto Territoriale (Indice IOCT)
Contesto Territoriale		0.44	B	A	0.60 - 1.0	
				B	0.35 - 0.6	
				C	0.15 - 0.35	
				D	0.05 - 0.15	
				E	0 - 0.05	

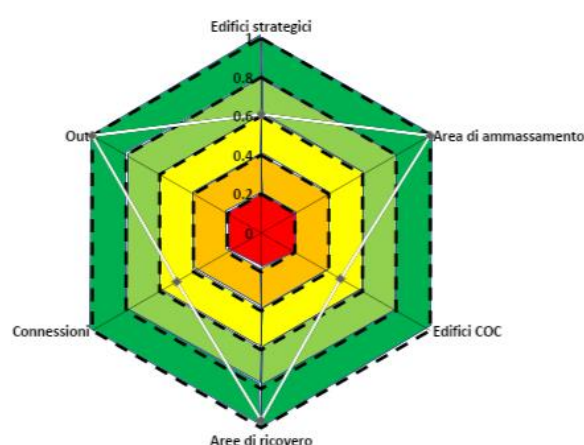


Figura 12 – Esempio di rappresentazione dei risultati del CT di Cariati (CS) per TR=475 anni

### 5.1.5 Valutazioni per il miglioramento dell'operatività

Al fine di stimare il costo per il miglioramento dell'operatività occorre evidenziare che qualitativamente maggiore è la differenza tra l'area totale dell'esagono e l'area del poligono individuato dai diversi indici parziali, maggiore sarà il costo per l'adeguamento del sistema (Figura 13).

Al fine di fornire una stima di massima di tale costo, sono stati messi a punto modelli, basati su ipotesi semplificative, che mettono in relazione il miglioramento delle prestazioni del singolo oggetto (edificio, infrastruttura, area di emergenza) con il relativo costo.

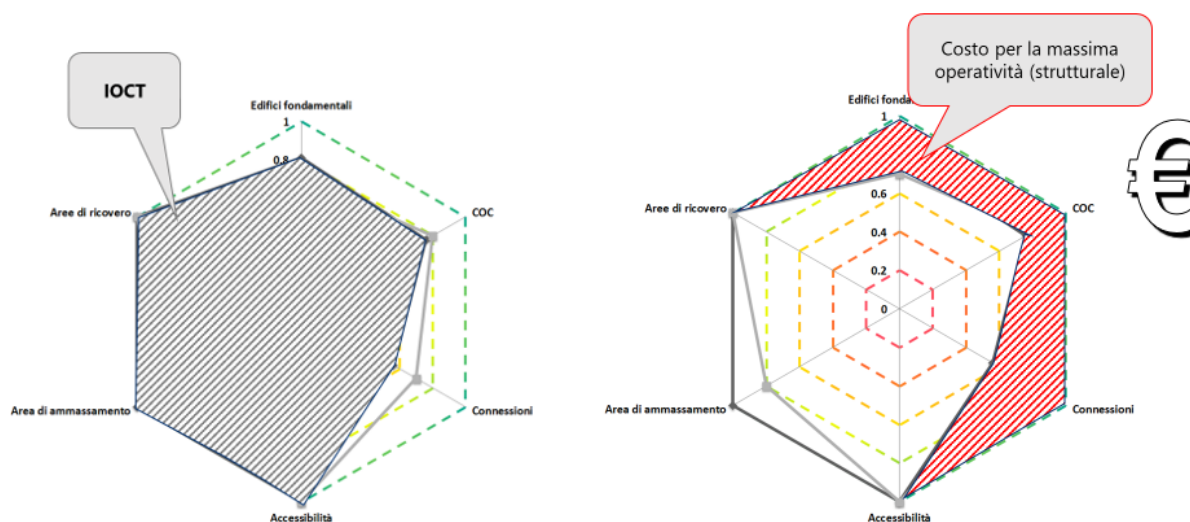


Figura 13– Costo per la massima operatività strutturale del sistema

Le caratteristiche principali dei modelli di mitigazione/miglioramento utilizzati per la stima del costo per la massima operatività strutturale o passaggi di classe COCT, con riferimento ai modelli di danneggiamento degli edifici e ai modelli di interferenze per le connessioni sono:

- Operatività degli edifici strategici

Viene utilizzato la metodologia presente in Caterino et al. (2018) adattata all'utilizzo di curve di fragilità da modello SMAV. Tale metodologia permette di ottenere le curve di fragilità e vulnerabilità post-intervento dell'edificio con un basso onere computazionale, non essendo necessarie ulteriori analisi numeriche, ma esclusivamente una manipolazione numerica delle curve pre-intervento.

Partendo da curve di fragilità pre-intervento generate con metodologia SMAV, si assume una variazione delle caratteristiche dinamiche dell'edificio per effetto dell'intervento e si stimano le curve di fragilità SMAV post-intervento. Da qui si applica la metodologia proposta da Caterino et al. (2018).

- Crollo degli edifici interferenti (per interferenza su connessioni)

Le curve di fragilità e vulnerabilità post-intervento (Anelli et. al, 2021) sono ricavate a partire da quanto contenuto nell'Allegato A del "Sismabonus" (<http://www.mit.gov.it/normativa/decreto-ministeriale-numero-24-del-09012020>) partendo da un approccio macrosismico contenuto in Lagomarsino e Giovinazzi (2006).

- Accadimento frane (per interferenza su connessioni)

Per quanto riguarda la stima degli interventi relativamente alla mitigazione dell'interferenza dovuta alle frane sismoindotte, si utilizza il prezzario ANAS2019 "Manutenzione Ordinaria". A differenza di quanto sviluppato per gli edifici, si assume che l'intervento elimini totalmente l'interferenza (Figura 14).



**Sanas**  
GRUPPO FS ITALIANE

**Direzione Ingegneria e Verifiche**

MO.2019 - Rev.0

**LISTINO PREZZI 2019**

**Manutenzione Ordinaria**

Direzione Ingegneria  
LISTINO  
NC-MS.  
Nuove Costruzioni - Manutenzione

**LISTINO PREZZI 2019**

**E - LAVORI DIVERSI**

CODICE	DESCRIZIONE	U.M.	PREZZO	M
E.03.030.a	con grammatura non inferiore alla classe A della EN 10244. Gli oneri per la realizzazione e l'installazione degli ancoraggi sono da conteggiarsi a parte. <b>RETE CON RESISTENZA A TRAZIONE LONGITUDINALE <math>50 \leq \text{KN/M} &lt; 100</math></b>	m <sup>2</sup>	30,09	
E.03.030.b	<b>RETE CON RESISTENZA A TRAZIONE LONGITUDINALE <math>100 \leq \text{KN/M} &lt; 150</math></b>	m <sup>2</sup>	46,65	
E.03.030.c	<b>RETE CON RESISTENZA A TRAZIONE LONGITUDINALE <math>\text{KN/M} \geq 150</math></b>	m <sup>2</sup>	67,72	
E.03.033	<b>RIVESTIMENTO, FASCIATURA ED IMBRAGAGGIO DI PARETI ROCCIOSE</b> O grossi massi pericolanti o instabili, eseguito con pannelli di rete metallica di acciaio ad alta resistenza, formati da funi perimetrali del D = 12 mm, da funi intermedie del D = 10 mm anima metallica ed intrecciate a maglia romboidale di dimensione max cm 30x30, rinforzati agli incroci in modo da garantire una resistenza allo strappo di almeno 20 kN e ben fissate al perimetro mediante manicotti in alluminio pressato. Compreso e compensato nel prezzo l'onere delle cuciture dei pannelli eseguito in parete a qualsiasi altezza dal piano viabile, il pilotaggio del traffico e quant'altro occorra per dare il lavoro finito a perfetta regola d'arte. Sono esclusi gli eventuali ponteggi e le eventuali opere provvisorie, da computarsi a parte.	m <sup>2</sup>	49,61	

Figura 14 – Voci di prezzo utilizzate per la stima economica relativa all'accadimento delle frane (ANAS2019).

- Accadimento liquefazione (per interferenza su connessioni)

Per quanto riguarda la stima degli interventi relativamente alla mitigazione dell'interferenza dovuta alla liquefazione dinamica, si utilizzano due riferimenti: il progetto *Liquefact* (2020) (Figura 15) e le ordinanze per la ricostruzione post sisma della Regione Emilia-Romagna per l'evento del 2012 (Ordinanze numero 51/2012, 57/2012, 86/2012).

A differenza di quanto sviluppato per gli edifici, si assume che l'intervento elimini totalmente l'interferenza.

Technologies	Unit Cost
Earthquake drains	1.5-11.4 €/m
Deep Dynamic Compaction	10-30.5 €/m <sup>2</sup>
Vibro Compaction	14-25.7 €/m
Vibro replacements	43-170€/m
Compaction Grouting	84.2-843/m <sup>3</sup>
Jet Grouting	80-200 €/m <sup>3</sup>
Deep soil mixing	170-357/m

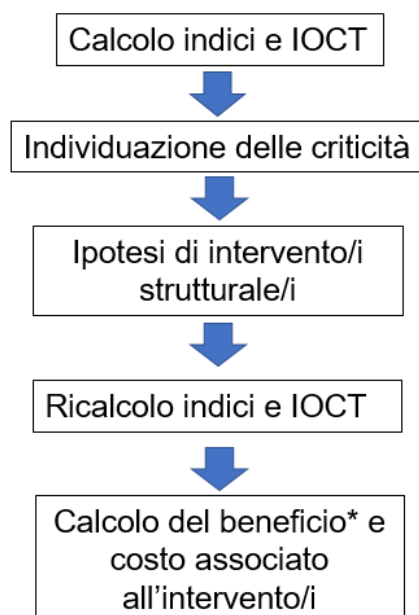
Table 12-Comparative unit costs by ground modification technologies

Figura 15 - Voci di prezzo utilizzate per la stima economica relativa all'accadimento delle liquefazioni (*Liquefact*, 2020).

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva con i modelli utilizzati per il miglioramento del sistema:

Operatività <u>connessioni/aree</u> per Frana	Operatività <u>connessioni/aree</u> per Liquefazione	Operatività <u>Edifici ES</u>	Operatività <u>Edifici COC</u>	Operatività <u>connessioni/aree</u> per crollo edifici interferenti
Prezzari ANAS	Progetto Liquefact	Caterino et al., 2018 (per c.a.)  Stime parametriche Reluis (per muratura)	Caterino et al., 2018 (per c.a.)  Stime parametriche Reluis (per muratura)	Curve di letteratura Anelli et al., 2021

Il processo utilizzato per determinare gli interventi per il miglioramento strutturale è il seguente:



In funzione degli indici parziali si individuano le criticità. Per ogni criticità viene simulato il miglioramento attraverso i modelli di cui sopra e si ricalcola l'indice parziale e l'indice complessivo con associata un'indicazione di massima sul costo economico.

Tale procedimento è iterativo e si interrompe quando si ottiene il "beneficio" definito come passaggio di classe dell'indice complessivo IOCT.



## 6 Bibliografia

### Lavori originali prodotti per il Progetto e finalizzati direttamente alla costruzione della metodologia di calcolo

- Anelli, A., Mori, F., Vona, M., 2020. Fragility curves of the urban road network based on the debris distributions of interfering buildings. Appl. Sci. <https://doi.org/10.3390/app10041289>
- Anelli, A., 2021. Seismic fragility and vulnerability curves for the Italian residential building stock – Structure and Infrastructure Engineering , DOI: 10.1080/15732479.2021.1936568
- Falcone, G., Acunzo, G., Mendicelli, A., Mori, F., Naso, G., Peronace, E., Porchia, A., Romagnoli, G., Tarquini, E. and Moscatelli, M., 2021. Seismic amplification maps of Italy based on site-specific microzonation dataset and one-dimensional numerical approach, Eng. Geol., doi:10.1016/j.enggeo.2021.106170
- Mori, F., Gaudiosi, I., Tarquini, E., Bramerini, F., Castenetto, S., Naso, G., Spina, D., 2019. HSM: a synthetic damage-constrained seismic hazard parameter. Bull. Earthq. Eng. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00677-2>
- Mori, F., Gena, A., Mendicelli, A., Naso, G., Spina, D., 2020a. Seismic emergency system evaluation: The role of seismic hazard and local effects. Eng. Geol. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105587>
- Mori, F., Mendicelli, A., Moscatelli, M., Romagnoli, G., Peronace, E. and Naso, G., 2020b. A new Vs30 map for Italy based on the seismic microzonation dataset, Eng. Geol., doi:10.1016/j.enggeo.2020.105745
- Occhipinti et al., Multistorey building fragility curves by means of an equivalent beam like model - Engineering Structures – under review
- Spina, D., Acunzo, G., Fiorini, N., Mori, F., Dolce, M., 2019. A probabilistic simplified seismic model of masonry buildings based on ambient vibrations. Bull. Earthq. Eng. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0481-y>
- Spina, D., Acunzo, G., Fiorini, N., Mori, F. and Dolce, M., 2021: A probabilistic simplified Seismic Model from Ambient Vibrations (SMAV) of existing reinforced concrete buildings, Eng. Struct., doi:10.1016/j.engstruct.2021.112255.

### Letteratura scientifica di supporto alla metodologia

- Amadori et al. 2015 Gli interventi di riduzione del rischio di liquefazione per la ricostruzione post sisma Emilia 2012 Atti NGTS 2015
- Bindi, D., Pacor, F., Luzi, L., Puglia, R., Massa, M., Ameri, G., Paolucci, R., 2011. Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. Bull. Earthq. Eng. <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9313-z>
- Boeing, G., 2017. Methods and Measures for Analyzing Complex Street Networks and Urban Form. SSRN Electron. J. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3012684>
- Boeing, G., 2017. OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. Comput. Environ. Urban Syst. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>

- Boeing, G., 2018. Measuring the complexity of urban form and design. *Urban Des. Int.* <https://doi.org/10.1057/s41289-018-0072-1>
- Boeing, G., 2019. Urban spatial order: street network orientation, configuration, and entropy. *Appl. Netw. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s41109-019-0189-1>
- Caterino, N., Azmoodeh, B.M., Manfredi, G., 2018. Seismic Risk Mitigation for a Portfolio of Reinforced Concrete Frame Buildings through Optimal Allocation of a Limited Budget. *Adv. Civ. Eng.* <https://doi.org/10.1155/2018/8184756>
- DD 12418/2012: Approvazione degli elaborati cartografici concernenti la delimitazione delle aree nelle quali si sono manifestati gravi effetti di liquefazione a seguito degli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012 e degli indirizzi per interventi di consolidamento dei terreni. Determinazione del Dirigente del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna n° 12418 del 02/10/2012. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/speciale-terremoto/interventi-per-la-ricostruzione-e-la-ripresa>
- DD 1105/2014: Approvazione di "Indicazioni sulla documentazione tecnica da produrre a supporto della richiesta di contributi per interventi di consolidamento del terreno di fondazione in caso di riparazione, ripristino con miglioramento sismico o demolizione e ricostruzione di edifici dichiarati inagibili che abbiano riportato danni da liquefazione, a seguito della sequenza sismica che ha interessato la pianura emiliana nel maggio-giugno 2012". Determinazione del Dirigente del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna n° 1105 del 03/02/2014. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/speciale-terremoto/interventi-per-la-ricostruzione-e-la-ripresa>
- Decreto Legislativo 6 febbraio 2020, n. 4. "Disposizioni integrative e correttive del decreto legislativo 2 gennaio 2018, n. 1, recante: «Codice della protezione civile»". Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n.35 del 12.02.2020
- Dolce, M., Speranza, E., Bocchi, F., Conte, C., 2018. Probabilistic assessment of structural operational efficiency in emergency limit conditions: the I.OPà.CLE method. *Bull. Earthq. Eng.* <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0327-7>
- Eads, L., Miranda, E., Lignos, D.G., 2015. Average spectral acceleration as an intensity measure for collapse risk assessment. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* <https://doi.org/10.1002/eqe.2575>
- Franchin, P., Elnashai, A., 2013. Report 1: Methodology for systemic seismic vulnerability assessment of buildings, infrastructures, networks and socio-economic impacts, Syner-G. <https://doi.org/10.2788/69238>
- GEM (2020). The OpenQuake-engine User Manual. *Global Earthquake Model (GEM) Open-Quake Manual for Engine version 3.8.1*. doi: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.8.1, 183 pages.
- Jayaram, N., Baker, J.W., 2009. Correlation model for spatially distributed ground-motion intensities. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* <https://doi.org/10.1002/eqe.922>
- Kaynia, A.M., 2013. Guidelines for deriving seismic fragility functions of elements at risk: Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities, SYNER-G Reference Report 4, JRC Scientific and Policy Reports. <https://doi.org/10.2788/19605>
- Kohrangi, M., Bazzurro, P., Vamvatsikos, D., Spillatura, A., 2017. Conditional spectrum-based ground motion record selection using average spectral acceleration. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* <https://doi.org/10.1002/eqe.2876>
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., 2006. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bull. Earthq. Eng.* <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9024-z>
- Liquefact, 2020. The Challenge to Improve Community Resilience (<http://www.liquefact.eu/>)



- Modoni, G., Spacagna, R.L., Paoella, L., Salvatore, E., Rasulo, A., Martelli, L., 2019. Liquefaction risk assessment: Lesson learned from a case study, in: Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions- Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2019.
- Nowicki Jessee, M.A., Hamburger, M.W., Allstadt, K., Wald, D.J., Robeson, S.M., Tanyas, H., Hearne, M., Thompson, E.M., 2018. A Global Empirical Model for Near-Real-Time Assessment of Seismically Induced Landslides. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* <https://doi.org/10.1029/2017JF004494>
- Pitilakis, K., Crowley, H., Kaynia, a M., Facilities, C., 2014. SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk, 11. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7872-6>
- Pitilakis, F.T., Kakderi, K., 2013. Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain (Presentation), Syner-G. <https://doi.org/10.2788/23242>
- Pitilakis, K., Franchin, P., Khazai, B., Wenzel, H., 2014. SYNER-G: Systemic seismic vulnerability and risk assessment of complex urban, utility, lifeline systems and critical facilities: Methodology and Applications. *Geotech. Geol. Earthq. Eng.*
- Pitilakis, K., Crowley, H., Kaynia, A.M., 2014. SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk: Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities. *Geotech. Geol. Earthq. Eng.* <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7872-6>
- SERA 2020 Project, <http://www.sera-eu.org/en/home/>
- Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Monelli, D., Pinho, R., 2014. Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Nat. Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0618-x>
- Silva, V., Horspool, N., 2019. Combining USGS ShakeMaps and the OpenQuake-engine for damage and loss assessment. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* <https://doi.org/10.1002/eqe.3154>
- Zhu, J., Baise, L.G., Thompson, E.M., 2017. An updated geospatial liquefaction model for global application. *Bull. Seismol. Soc. Am.* <https://doi.org/10.1785/0120160198>
- D26.7 Framework for European integrated risk assessment ([https://eu-risk.eucentre.it/wp-content/uploads/2019/08/SERA\\_D26.7\\_Risk\\_Framework.pdf](https://eu-risk.eucentre.it/wp-content/uploads/2019/08/SERA_D26.7_Risk_Framework.pdf))