



Commissione tecnica per la microzonazione sismica
(articolo 5, comma 7, OPCM 13 novembre 2010, n. 3907)

STANDARD

DI RAPPRESENTAZIONE E ARCHIVIAZIONE INFORMATICA

Microzonazione sismica

Linee guida

**per la gestione del territorio in aree interessate da
Cavità Sotterranee (CS)**

BOZZA

versione 1.0 beta

Roma, 2022

Microzonazione sismica

Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Cavità Sotterranee (CS)

Versione 1.0

A cura di

Fabrizio Bramerini, Sergio Castenetto, Stefania Fabozzi, Massimiliano Moscatelli, Giuseppe Naso, Marco Nocentini, Edoardo Peronace

COMMISSIONE TECNICA PER LA MICROZONAZIONE SISMICA (ex art. 5 OPCM 3907/2010)

Walter Baricchi (Consiglio Nazionale degli Architetti Pianificatori Paesaggisti Conservatori), Fabrizio Bramerini (DPC), Sergio Castenetto (DPC, segreteria tecnica), Enrico Rispoli (Collegio nazionale geometri), Giuseppe Ianniello (Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti), Luca Lo Bianco (UNCCEM), Luca Martelli (Conferenza Unificata), Rossella Monaco (Conferenza Unificata), Filippo Cappotto (Consiglio nazionale dei Geologi), Giuseppe Naso (DPC), Antonio Ragonesi (ANCI), Raffaele Solustri (Consiglio nazionale degli Ingegneri), Elena Speranza (DPC)

Rappresentanti delle Regioni e delle Province autonome

Maria Basi (Regione Abruzzo), Giovanni Di Bello (Regione Basilicata), Silvio Marsico (Regione Calabria), Valerio Grassi (Regione Campania), Luca Martelli (Regione Emilia - Romagna), Amanda Burelli (Regione Friuli-Venezia Giulia), Giacomo Catalano (Regione Lazio), Daniele Bottero (Regione Liguria), Alessandro Ballini (Regione Lombardia), Pierpaolo Tiberi (Regione Marche), Manuele Brasiello (Regione Molise), Vittorio Giraud (Regione Piemonte), Tiziana Bisantino (Regione Puglia), Andrea Motti (Regione Umbria), Massimo Baglione (Regione Toscana), Massimo Broccolato (Regione Valle d'Aosta), Giulio Fattoreto (Regione Veneto), Antonio Torrisi (Regione Sicilia), Saverio Cooco (Provincia Autonoma di Trento), Claudio Carraro (Provincia Autonoma di Bolzano)

Hanno inoltre partecipato ai lavori della Commissione tecnica

Mauro Dolce (DPC), Domenico Angelone (Consiglio nazionale dei Geologi), Enrico Schiavon (Regione Veneto), Anna Galuppo (Regione Veneto), Maria Carmela Notarmuzi (Regione Lazio), Antonio Colombi (Regione Lazio), Marina Credali (Regione Lombardia), Federica Bellani (Regione Lombardia), Eugenio Di Loreto (Regione Lazio), Antonio Gerardi (Regione Lazio), Norman Natali (Regione Umbria), Isabella Trulli (Autorità di Bacino Puglia), Rocco Onorati (Regione Basilicata), Giuseppe Iritano (Regione Calabria), Giorgio Pipponzi (Regione Abruzzo), Adelaide Sericola (Regione Lazio), Antonio Torrisi (Regione Siciliana), Alessia Schiaroli (Regione Marche), Manuel Lenni (Regione Friuli Venezia Giulia), Vittorio D'Intinosante (Regione Toscana), Alfredo Maffei (Regione Basilicata)

L'attività di supporto e monitoraggio è svolta in accordo con CNR-IGAG (responsabile scientifico Gian Paolo Cavinato e Massimiliano Moscatelli)

Struttura tecnica di supporto

Maria Sole Benigni, Monia Coltella, Margherita Giuffrè, Paola Imprescia, Pietro Sirianni, Valentina Tomassoni, Cora Fontana, Carolina Fortunato

Il presente documento ha utilizzato anche gli elaborati dell'Attività A2.3, prodotti nell'ambito del

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, Maurizio 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 Maggio, Celestino Rampino; *Puglia:* Tiziana Bisantino (coordinatore), Carlo Caricasole, Domenico Donvito, Franco Intini, Teresa Mungari, Fabrizio Panariello, Francesco Ronco, Zoida Tafilaj; *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 Allerruzzo

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 Settini, 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 A 2.3 | Definizione di metodi di studio delle zone suscettibili di amplificazione – Contributi alle Linee Guida Amplificazioni

Responsabile DPC: Giuseppe Naso

Responsabile CNR-IGAG: Edoardo Peronace

A cura di

Massimo Cesarano; Stefania Fabozzi, Marco Nocentini; Attilio Porchia; Gino Romagnoli; Roseline Spacagna

PREMESSA

Il presente documento definisce le Linee Guida a supporto degli “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica” (ICMS 2008; Gruppo di Lavoro MS, 2008) per lo studio dei fenomeni di instabilità di cavità sotterranee sotto azioni sismiche. Sino ad oggi, in assenza di specifiche indicazioni, le cavità non sono state trattate nell’ambito degli studi di Microzonazione Sismica (MS) come oggetti esposti e, pertanto, vulnerabili all’azione sismica, studiando il livello di suscettibilità al crollo con conseguenti effetti al piano campagna (p. es. cedimenti, sprofondamenti, etc.). Negli studi di MS, la presenza di cavità viene attualmente segnalata come un’area potenzialmente soggetta a instabilità per crollo, identificandola come Zona di Attenzione per Cedimenti Differenziali/Crollo di cavità sotterranee/sinkhole (ZAcD). Negli ICMS 2008 e negli Standard 4.2 (CTMS, 2020) sono assenti indicazioni circa i criteri per valutare la vulnerabilità di tali oggetti, distinguendo differenti livelli di suscettibilità al crollo della cavità in funzione del loro livello di conoscenza, così come criteri per il dimensionamento delle zone di attenzione (ZA), di suscettibilità (ZS) e di rispetto (ZR) per i diversi livelli di approfondimento di MS. Ne consegue che, in assenza di chiare indicazioni, negli studi di MS la materia viene trattata con approcci differenti, non univoci. All’interno degli ICMS 2008, in particolare, le cavità sotterranee vengono classificate tra le Forme/Elementi sepolti, non vengono esplicitamente fornite ulteriori informazioni riguardanti le modalità di selezione delle cavità di interesse e non sono definiti i criteri per l’individuazione e la rappresentazione. Negli Standard 4.2 (CTMS, 2020), la presenza di cavità nel sottosuolo può essere rappresentata, all’interno della Carta Geologico Tecnica (CGT), come elemento puntuale (Cavità sepolta isolata) o come elemento areale (Area con cavità sepolte), a seconda che si tratti di singole cavità isolate o di aree in cui siano presenti più cavità, indipendentemente dalle eventuali interconnessioni esistenti. Nella documentazione tecnica per gli studi di MS mancano, quindi, indicazioni che permettano di selezionare quali cavità inserire in tali studi e come rappresentarle in funzione delle dimensioni, della tipologia e dell’interdistanza.

In queste Linee Guida vengono definiti criteri generali e procedure operative, in coordinamento tra lo Stato, le Regioni e gli Enti Locali, per:

- trattare il problema della stabilità delle cavità in condizioni sismiche alla scala della MS;
- definire diversi livelli di suscettibilità in funzione del livello di conoscenza raggiunto;
- fornire uno strumento utile per mitigare il rischio di crollo di cavità (proposta LG-CS);
- definire una disciplina d’uso delle zone di cavità.

Con riferimento alla Figura 1-1 la carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Carta delle MOPS; livello1 di MS) viene realizzata con l’utilizzo di dati pregressi - elementi informativi minimi (Gruppo di Lavoro MS, 2008), che consistono in informazioni di base quali, ad esempio, l’ubicazione e la geometria della cavità, la descrizione delle unità litologiche da rilievi di terreno, i parametri geotecnici derivanti da indagini geognostiche disponibili nell’area di studio, ecc. Tali informazioni minime vengono utilizzate per l’identificazione e la definizione delle zone instabili per crollo di cavità in condizioni sismiche negli studi di MS di livello 1. Per la realizzazione della Carta di Microzonazione Sismica (Carta di MS, livello 3) si rende necessaria, invece, l’esecuzione di indagini specifiche e diversi livelli di approfondimenti (livello 3 semplificato ed avanzato) per la definizione della geometria della cavità e per la caratterizzazione geomeccanica delle litologie incassanti (elementi informativi specifici).

In funzione del livello crescente di approfondimento, dal Livello 1 al Livello 3, il tipo di zona di instabilità nelle carte delle MOPS e di MS viene identificato come segue (Figura 1-1):

- Zone di Attenzione (ZA) negli studi di Livello 1 per la realizzazione della Carta delle MOPS;
- Zone di Suscettibilità (ZS) negli studi di Livello 3 per la realizzazione della Carta di MS;
- Zone di Rispetto (ZR) negli studi di Livello 3 per la realizzazione della Carta di MS.



Figura 1-1 - Schema illustrativo del tipo di zona di instabilità nelle carte delle MOPS e di MS. La raccolta dati e la tipologia di analisi permettono di ridurre le incertezze procedendo dal livello 1 al livello 3.

Concettualmente, il significato dei tre tipi di zone è il seguente:

- **Zone di Attenzione (ZA):** sono zone nelle quali i dati a disposizione, provenienti da indagini pregresse, indicano la presenza di condizioni predisponenti l'instabilità in esame, ma non sono sufficienti, per quantità e tipologia, per valutare se l'instabilità possa effettivamente verificarsi in caso di evento sismico. Le cavità ricadenti in ZA sono potenzialmente suscettibili al crollo e pertanto necessitano di ulteriori studi di approfondimento;

- Zone di Suscettibilità (ZS): sono zone nelle quali, a seguito di una raccolta dati specifica per l'instabilità in esame e l'applicazione di metodi di analisi semplificati, è possibile fornire una prima valutazione quantitativa del fenomeno;
- Zone di Rispetto (ZR): sono zone nelle quali, attraverso una raccolta dati specifica e l'applicazione di metodi di analisi avanzati, è possibile quantificare il fenomeno del crollo sismoindotto di cavità sotterranee.

Il presente documento è costituito da due parti.

Nella **PARTE PRIMA** del documento, viene descritto il fenomeno e viene proposta una procedura tecnico-operativa per valutare la vulnerabilità sismica della cavità stessa, definendo forma e dimensioni delle zone interessate dal fenomeno, al fine di fornire uno strumento di supporto alla pianificazione territoriale in aree urbane interessate da infrastrutture ed attività antropiche.

Le finalità di questa prima parte del documento sono:

- stabilire la condizione minima conoscitiva per poter inserire cavità negli studi di MS;
- definire criteri di individuazione delle cavità sotterranee rilevanti ai fini degli studi di MS e di dimensionamento delle corrispondenti zone instabili, tenendo conto del grado di incertezza dei dati di base associati al livello di MS considerato;
- definire procedure standard per la valutazione del livello di instabilità di cavità sotterranee indotto dall'azione sismica in funzione della tipologia, della qualità delle indagini svolte e dei metodi di analisi utilizzati;
- definire procedure standard per la costruzione e la rappresentazione delle zone instabili per crollo di cavità sotterranee indotto dall'azione sismica.

La **PARTE SECONDA** del documento fornisce indicazioni per la disciplina d'uso del suolo nelle zone interessate dal fenomeno, sia dal punto di vista urbanistico che dal punto di vista edilizio.

Nelle **APPENDICI** vengono trattati alcuni aspetti a complemento e supporto delle Linee Guida, relativi a: informazioni e riferimenti sui database delle cavità disponibili a livello regionale e nazionale; riferimenti alle tipologie di indagini da utilizzare per l'individuazione, la definizione della geometria delle cavità e la caratterizzazione geo-meccanica delle litologie incassanti; descrizione delle procedure di analisi numeriche utilizzate per la valutazione della stabilità di cavità in condizioni sismiche; esempi di possibili interventi di stabilizzazione delle cavità per la mitigazione del rischio sismico.

PARTE PRIMA

Descrizione del fenomeno fisico e delle zone instabili per cavità sotterranee

1 Introduzione

In presenza di cavità nel sottosuolo, il passaggio di un'onda sismica dà luogo a fenomeni di interazione tra le onde stesse e i vuoti della cavità con conseguenti effetti sulla stabilità della cavità e sul moto sismico che ne risulta modificato. Dall'interazione dell'onda sismica e la cavità possono verificarsi:

1. danneggiamenti e/o collassi di pilastri, setti, volte, fianchi per instabilità della cavità senza effetti in superficie;
2. danneggiamenti e/o collassi della cavità con effetti in superficie;
3. amplificazione/deamplificazione del moto sismico in superficie.

I primi due fenomeni sono legati al superamento, a causa dello scuotimento sismico, delle forze resistenti lungo le superfici libere della cavità, con la conseguente formazione di crolli, fratture e cedimenti che possono causare l'instabilità della cavità e generare danneggiamenti e collassi che possono propagarsi fino al piano campagna (Esposito et al., 2000; Buchignani et al., 2008; Del Prete et al., 2010; Bianchi Fasani et al., 2011; Santo et al., 2011, Santo et al., 2019). La presenza di cavità nel sottosuolo genera anche complessi fenomeni di amplificazione del moto sismico, legati principalmente alla formazione di onde superficiali lungo le superfici libere della cavità. Numerosi sono gli studi che affrontano tale fenomeno, evidenziando effetti amplificativi o deamplificativi a seconda dei casi considerati (Lanzo et al., 2011; Sanò, 2011; Verrucci et al., 2012; Sica et al., 2013; Evangelista et al., 2016).

Il presente documento considera esclusivamente il fenomeno di danneggiamenti e instabilità di cavità sotterranee che, a seguito di eventi sismici, producono effetti in superficie (cedimenti, crolli, sprofondamenti, etc.).

In linea generale, le cavità sotterranee possono essere distinte in naturali (1) ed antropiche (2), così come di seguito indicato:

- 1- **Naturale:** per cavità naturale (grotta) si intende, nella sua accezione più ampia, qualsiasi tipo di vuoto, più o meno esteso, presente nel terreno sottostante il suolo (ambiente ipogeo), formatosi a seguito di processi di formazione della roccia (Primarie) e/o di successivi processi di erosione meccanica e/o dissoluzione chimica di rocce solubili e/o fratturate (Secondarie).
- 2- **Antropica:** le cavità antropiche sono opere sotterranee (scavate nel sottosuolo o divenute ipogee in seguito alle stratificazioni del tessuto urbano) di origine antropica e di interesse storico, archeologico, urbanistico, geologico e antropologico. Secondo i criteri utilizzati per la realizzazione del Catasto Nazionale delle Cavità Artificiali, a cura della Commissione Nazionale delle Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana, le cavità antropiche possono essere classificate in funzione della tipologia di opera (Idrauliche, Insediative, Culto, Belliche, Estrattive, Transito) e della loro tecnica di realizzazione (Scavata, Costruita, di Ricoprimento).

Con riferimento alle definizioni precedenti, all'interno degli studi di MS saranno prese in considerazione sia le cavità di origine naturale che quelle di origine antropica.

Si definiscono pertanto cavità sotterranee ai fini degli studi di MS, tutte le tipologie di vuoto di origine naturale ed antropica presenti nel sottosuolo non rivestite né rinforzate, la cui stabilità è garantita esclusivamente dalla resistenza offerta dal materiale in cui la cavità viene scavata.

2 Carte, livelli di microzonazione sismica e zone di cavità

La metodologia generale nella presente linea guida si basa su procedure di analisi con complessità crescente che, partendo da quanto riportato nella Carta Geologico Tecnica per la MS (CGT_MS), consentono di individuare, nei livelli 1 e 3 di MS, le aree potenzialmente vulnerabili per crollo di cavità sotterranee sotto azioni sismiche.

Nella Tabella 2-1 vengono illustrati i diversi livelli di approfondimento per l'individuazione delle zone potenzialmente interessate dall'instabilità in questione, descritti in dettaglio nei paragrafi successivi.

Tabella 2-1 - Livelli, carte e corrispondenti tipi di zone potenzialmente soggette a crollo sismoindotto di cavità

Livello di MS	Carta	Zone di Instabilità per Cavità Sotterranee	Elementi informativi	Metodi
1	MOPS	Zone di Attenzione (Z _{AICS})	Minimi	
3	MS	Zone di Suscettibilità (Z _{SICS})	Specifici	Semplificati
3	MS	Zone di Rispetto (Z _{RICS})	Specifici	Avanzati

- **Livello 1 - (Carta delle MOPS):** individuazione di Zone di Attenzione per Cavità Sotterranee (Z_{A_{CS}}) in condizioni sismiche, sulla base di elementi informativi minimi desunti da indagini pregresse (p. es. tipologia di cavità, geometria della cavità, litostratigrafia, PGA di base, ecc.) necessari per la verifica delle condizioni predisponenti ed innescanti l'instabilità;
- **Livello 3 - (Carta di MS):** individuazione di Zone Suscettibilità (Z_{S_{CS}}) e di Zone di Rispetto (Z_{R_{CS}}) sulla base del Fattore di Sicurezza (FS) quale parametro per valutare la stabilità della cavità in condizioni sismiche. In particolare, si introduce un valore soglia di FS per le Zone Suscettibilità (FS_{Z_{S,CS}}) pari a 3 e un valore soglia di FS per le Zone di Rispetto (FS_{Z_{R,CS}}) pari a 1,5. Il Fattore di Sicurezza per le ZS (FS_{Z_{S,CS}}) viene calcolato attraverso un approccio semplificato che prevede l'utilizzo di abachi; il Fattore di Sicurezza per le ZR (FS_{Z_{R,CS}}) invece, viene calcolato con approccio avanzato attraverso analisi di stabilità sito-specifiche.

A ciascun tipo di zona così individuata corrispondono indicazioni specifiche per la pianificazione urbanistica, per gli interventi di trasformazione e/o di messa in sicurezza, trattate nella PARTE SECONDA delle presenti Linee Guida.

Il diagramma di flusso in Figura 2-1 illustra sinteticamente la metodologia adottata nei diversi livelli di approfondimento per l'identificazione delle tre tipologie di zone appena descritte.

I Livelli 1 e 3 di MS sono preceduti dallo studio preliminare effettuato per la realizzazione della CGT_MS.

Nella CGT_MS vengono riportate le cavità e i relativi litotipi all'interno dei quali sono scavate. La CGT_MS riveste, pertanto, un ruolo fondamentale per l'individuazione preliminare dell'eventuale presenza di cavità e rappresenta un vero e proprio studio propedeutico per l'individuazione delle potenziali zone soggette ad instabilità per crollo di cavità sotterranee (screening preliminare). In particolare, nella CGT_MS dovranno essere riportate solo le cavità sotterranee che rispondono a ben precisi criteri di selezione (paragrafo 2.1); tali cavità saranno oggetto di verifiche ed approfondimenti nei successivi Livelli 1 e 3 di MS.

In questa fase preliminare, nel riportare in mappa le cavità sotterranee, viene effettuata una selezione delle cavità presenti nell'area di studio in funzione della tipologia, del livello di conoscenza e della geometria della cavità (per approfondimenti sulla definizione dei criteri di selezione delle cavità di interesse per gli studi di MS si rimanda al paragrafo 2.1).

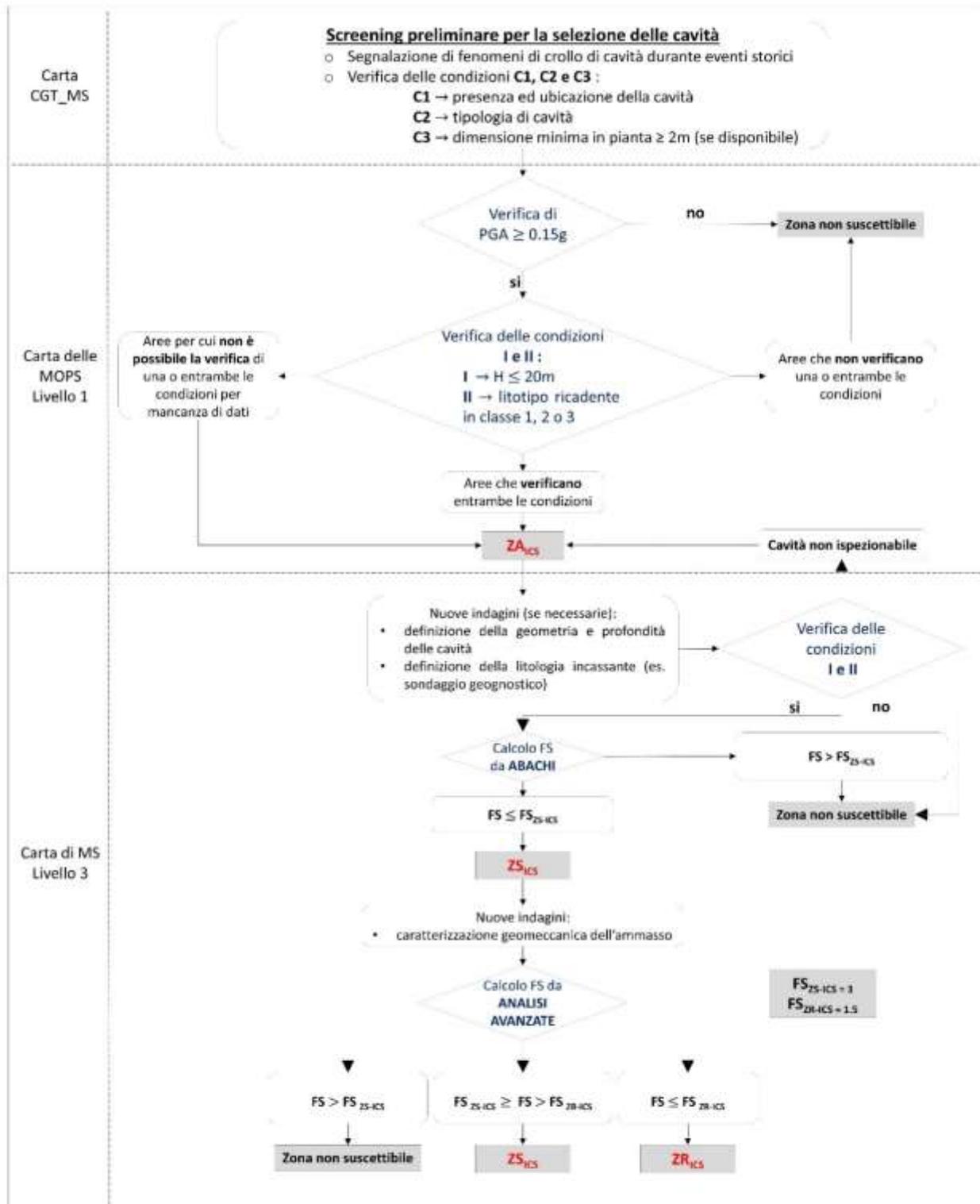


Figura 2-1 - Diagramma di flusso del percorso metodologico per la definizione delle zone di instabilità per crollo di cavità sotterranee.

Di seguito viene riportata la descrizione delle varie fasi di studio delle cavità nei livelli 1 e 3 di MS, così come schematizzato in Figura 2-1:

- Nel Livello 1 di MS, tutte le cavità riportate nella CGT_MS sono oggetto di verifica delle condizioni predisponenti ed innescanti il crollo della cavità (paragrafo 2.2): (i) le cavità che non rispettano una o più di una delle condizioni predisponenti sono da considerarsi non suscettibili al crollo; (ii) le cavità che rispettano tutte le condizioni predisponenti ed innescanti il fenomeno sono classificate come Z_{ACS} ; (iii) nel caso in cui non sia possibile la verifica di una o più condizioni predisponenti per insufficienza di dati a disposizione, la cavità oggetto di studio sarà comunque classificata come Z_{ACS} , rimandando al successivo livello di approfondimento la verifica di tali condizioni.
- Nel Livello 3 semplificato di MS viene effettuata una prima valutazione quantitativa della stabilità della cavità attraverso l'utilizzo di abachi che esprimono il livello di sicurezza della cavità attraverso il Fattore di Sicurezza (FS). Per poter utilizzare gli abachi è necessario avere informazioni sulla geometria della cavità e sulle caratteristiche litotecniche dell'ammasso incassante. Pertanto, per le Z_{ACS} per cui queste informazioni non sono disponibili, o lo sono solo parzialmente, andranno realizzate nuove indagini finalizzate alla loro definizione (per le quali si rimanda all'APPENDICE 2). A questo punto, acquisiti i nuovi dati, è necessario verificare nuovamente le condizioni predisponenti indicate nel Livello 1 (paragrafo 2.2): le cavità che rispettano tutte le condizioni predisponenti sono effettivamente classificabili come Z_{ACS} , mentre le cavità che non rispettano una o più di una delle condizioni predisponenti sono da considerarsi non suscettibili al crollo e non più classificabili come Z_{ACS} . Tutte le Z_{ACS} individuate a seguito della nuova verifica dei parametri predisponenti saranno oggetto di valutazione della loro sicurezza attraverso l'utilizzo degli abachi proposti: se attraverso l'abaco viene calcolato un $FS > 3$, allora l'area non è classificabile come area suscettibile al crollo, se invece viene calcolato un $FS \leq 3$, l'area è classificabile come area suscettibile al crollo e costituirà la Z_{SCS} , che potrà poi essere analizzata nel successivo livello di approfondimento per l'individuazione di un'eventuale Z_{RCS} . Le *cavità non ispezionabili*, per cui non è possibile effettuare nuove indagini e, pertanto, la verifica delle condizioni del Livello 1, saranno classificate come Z_{ACS} e non saranno oggetto di successivi approfondimenti, fintanto che non saranno acquisiti i dati necessari per la verifica delle condizioni del Livello 1.
- Nel Livello 3 avanzato di MS, tutte le Z_{SCS} individuate attraverso l'utilizzo degli abachi vengono studiate attraverso analisi di stabilità della cavità in condizioni sismiche sito specifiche. Al fine di modellare opportunamente il comportamento dell'ammasso roccioso nelle analisi numeriche sono previste, se necessarie, nuove indagini per un'approfondita caratterizzazione geomeccanica delle litologie incassanti (cfr. APPENDICE 2). Attraverso le analisi proprie di questo livello di approfondimento (cfr. APPENDICE 3), verrà nuovamente calcolato FS, il quale andrà confrontato con i valori soglia di FS individuati al fine di definire la zona di appartenenza della cavità in oggetto:
 - $FS > 3 \rightarrow$ zona non suscettibile;
 - $1,5 < FS \leq 3 \rightarrow$ Zona di suscettibilità Z_{SCS} ;
 - $FS \leq 1,5 \rightarrow$ Zona di rispetto Z_{RCS} .

2.1 Criteri di selezione delle cavità di interesse per gli studi di MS, nella CGT_MS

Al fine di individuare le cavità di interesse per gli studi di MS, vengono di seguito illustrati i fattori di screening per la selezione delle cavità da riportare nella CGT_MS. I relativi metodi di rappresentazione sono invece riportati nel paragrafo 3.1.

I fattori di screening preliminare da considerare nella CGT_MS (Figura 2-1) riguardano l'ubicazione, la tipologia e le dimensioni minime della cavità stessa. Si definiscono pertanto le seguenti tre condizioni preliminari:

- C1:** disponibilità di informazioni certe riguardanti la presenza e l'ubicazione della cavità nel sottosuolo;
- C2:** le tipologie di cavità da riportare negli studi sono quelle di origine naturale e antropica, non rivestite e non rinforzate, e prive di elementi murari in continuità strutturale con le strutture sovrastanti, la cui stabilità è garantita esclusivamente dalla resistenza offerta dal materiale in cui è presente la cavità;
- C3:** la cavità considerata presenta una dimensione minima in pianta maggiore di 2 m. ¹

La verifica delle suddette condizioni sarà effettuata attraverso elementi informativi minimi raccolti in maniera diretta nel corso dei rilievi eseguiti dai professionisti per la realizzazione della CGT_MS e/o, in maniera indiretta, sulla base delle informazioni disponibili nella letteratura tecnico-scientifica e nei database delle cavità regionali o nazionali (cfr. APPENDICE 1).

Qualora non sia possibile raccogliere informazioni, dirette o indirette, che permettano la verifica della condizione C3, le cavità in questione dovranno essere ugualmente riportate nella CGT_MS e si rimanderà ai successivi livelli di approfondimento la verifica della sussistenza di tale condizione discriminante.

Nella CGT_MS dovranno essere riportate anche le cavità, e/o le aree, per le quali si hanno notizie certe di fenomeni di crollo avvenuti in seguito ad eventi sismici storici. Queste informazioni possono essere reperite da pubblicazioni scientifiche o da cataloghi che censiscono gli effetti sismoindotti (cfr. APPENDICE 1).

2.2 Studi di MS di Livello 1 - Carta delle MOPS e Zone di Attenzione (ZA_{CS})

Nel Livello 1 di MS, sulla base delle cavità individuate nella CGT_MS, vengono definite le Zone di Attenzione (ZA_{CS}) mediante la verifica di specifiche condizioni predisponenti ed innescanti il crollo delle cavità. In particolare, viene richiesto preliminarmente di verificare la seguente condizione predisponente l'instabilità:

- l'accelerazione massima attesa al sito deve essere maggiore o uguale a 0,15 g ($PGA_{max} \geq 0,15g$) ².

Tutte le cavità che non verificano questa condizione sono da considerarsi non suscettibili al crollo, uscendo così dal flusso di valutazione (Figura 2-1). Viceversa, le cavità che verificano questa condizione sono da considerarsi potenzialmente suscettibili al crollo e pertanto proseguiranno nel flusso di valutazione (Figura 2-1) verificando le seguenti condizioni predisponenti:

- **I:** la copertura (H) della cavità deve avere uno spessore non superiore a 20m ($H \leq 20m$) ³ (Figura 2-2);

¹ Valore minimo (L) considerato nelle analisi numeriche per la definizione degli abachi.

² Il valore soglia di PGA scelto è il valore medio tra: (i) quelli derivanti dalla correlazione tra i crolli sismoindotti censiti e la PGA della carta di pericolosità INGV (MPS04) (valore minimo di PGA = 0.11g); (ii) quelli derivanti dall'analisi dei crolli avvenuti a seguito del terremoto dell'Aquila del 06/04/2009, per i quali la PGA minima, calcolata tramite l'applicativo OpenQuake, è di 0.18g; (iii) e, qualora disponibili, ma non richiesti, i valori derivanti dalle analisi numeriche (cfr. APPENDICE 3). Analisi specifiche sono richieste solo nel livello 3 avanzato per il calcolo di FS.

³ Valore massimo di H entro cui gli effetti di deformazioni o crolli in superficie possono risentirsi, considerati i risultati delle analisi numeriche (cfr. APPENDICE 3).

- **II:** la litologia incassante la cavità in oggetto deve ricadere in una delle tre classi di resistenza di seguito definite come:
 - Classe 1 (resistenza bassa → resistenza a compressione, $6 \text{ MPa} \leq \sigma_c \leq 10 \text{ MPa}$). Rientrano in questa classe: le calcareniti; le piroclastiti (es. Ignimbrite Campana).
 - Classe 2 (resistenza molto bassa → resistenza a compressione $2 \text{ MPa} \leq \sigma_c < 6 \text{ MPa}$). Rientrano in questa classe: i tufi litoidi e semi-litoidi (es. Tufo Rosso a Scorie Nere Vicano; Ignimbrite di Orvieto-Bagnoregio; Formazione di Sorano); le calcareniti tenere.
 - Classe 3 (resistenza bassissima → resistenza a compressione $\sigma_c < 2 \text{ MPa}$). Rientrano in questa classe: le pozzolane (es: Pozzolane Rosse; Pozzolane Nere; Pozzolana Napoletana); materiali coesivi e granulari (es. Limi di San Nicandro).

In Figura 2-2a, esempio 1, con riferimento ad una generica geometria della cavità con calotta sub-orizzontale, H è il valore della copertura valutato come la distanza minima tra il piano campagna e l'estradosso della cavità. Pertanto, nel caso di piano campagna orizzontale ed estradosso della cavità orizzontale, il valore di H sarà costante lungo tutta la sezione della cavità; nel caso in cui il piano campagna o l'estradosso della cavità non siano orizzontali, ma presentino una certa inclinazione, H non sarà costante lungo tutta la sezione della cavità e, a vantaggio di sicurezza, dovrà essere considerato il valore minimo. Nel caso di cavità con calotta voltata (Figura 2-2a esempio 2), H è il valore medio tra H_1 e H_2 ; nel caso di cavità con calotta voltata senza piedritti (Figura 2-2a esempio 3), H è il valore minimo raggiunto in chiave.

Nel caso di cavità a sviluppo longitudinale, se si individuano porzioni di cavità con valori di H diversi tali da rientrare in classi di H differenti (vedi classi di H per calcolo FS e dimensionamento zone), come ad esempio nel caso cavità con forti pendenze lungo lo sviluppo longitudinale (Figura 2-2c esempio 2) o con forti pendenze del piano campagna (Figura 2-2c esempio 1), è possibile trattare la cavità come più cavità a sezione omogenea come mostrato in Figura 2-2c; per ciascuna sezione omogenea così individuata, si procederà alla verifica della stabilità della porzione di cavità.

In Figura 2-2 viene anche definita la larghezza L della cavità, distinguendo il caso di cavità a sezione centrata e cavità a sviluppo longitudinale, da utilizzare per il dimensionamento delle Zone di Instabilità e per entrare negli abachi semplificati.

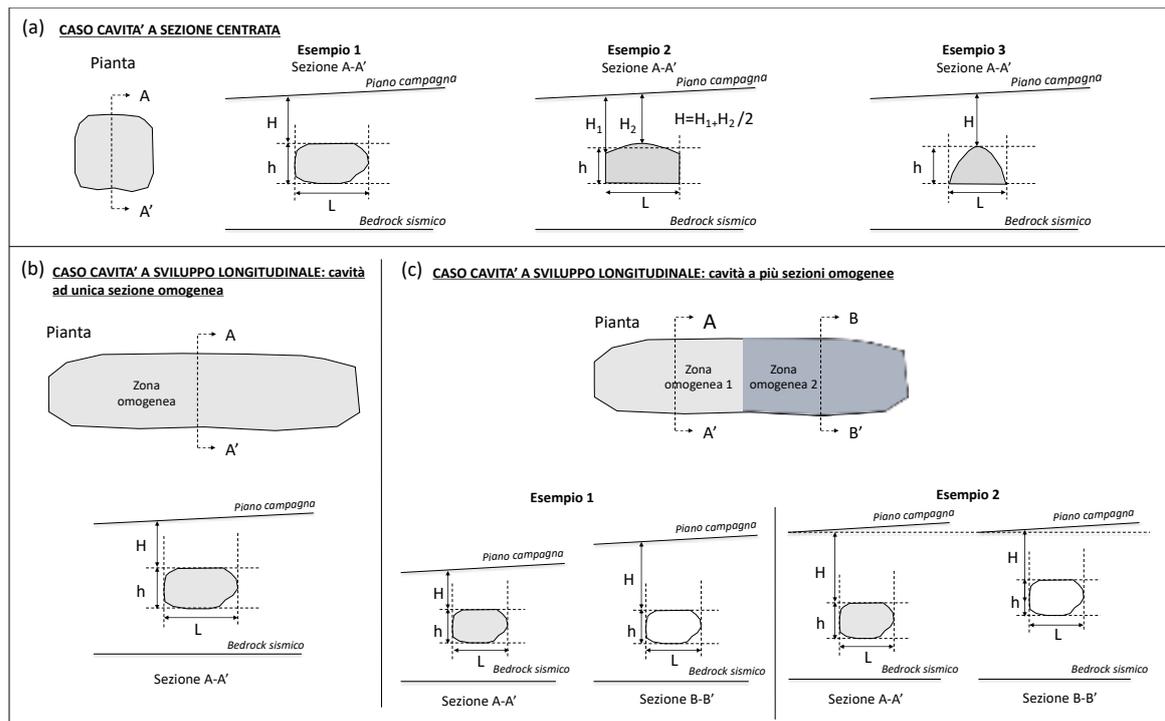


Figura 2-2 - Individuazione degli elementi geometrici significativi della cavità.

Le cavità che non rispettano una o più di una delle condizioni predisponenti sono da considerarsi non suscettibili al crollo; le cavità che rispettano tutte le condizioni predisponenti ed innescanti il fenomeno sono classificate come ZA_{CS} . Nel caso in cui non sia possibile la verifica di una o più condizioni predisponenti per insufficienza di dati a disposizione, la cavità oggetto di studio sarà comunque classificata come ZA_{CS} , rimandando al successivo livello di approfondimento la verifica di tali condizioni.

La verifica delle condizioni predisponenti, e quindi l'identificazione delle ZA_{CS} , avviene attraverso l'uso di **elementi informativi minimi** da acquisire nel corso degli studi di Livello 1. Tali elementi possono essere reperiti dalle seguenti fonti:

- Segnalazioni e studi geologici riportati nella letteratura scientifica di crolli di cavità avvenuti a seguito di eventi sismici passati;
- Report, segnalazioni e studi geologici, sia tecnici che scientifici, riguardanti la presenza di cavità nel sottosuolo;
- Rilievi della cavità effettuati sul campo da geologi durante le attività di terreno per la stesura delle carte di MS;
- Planimetrie della cavità presenti all'interno di database o catasti delle cavità regionali o nazionali (APPENDICE 1);
- Rilievi geologici eseguiti per la stesura della CGT_MS per l'individuazione della litologia incassante la cavità;
- Indagini geotecniche pregresse per la caratterizzazione geomeccanica dei litotipi incassanti la cavità.

Le informazioni raccolte dovranno essere tali da fornire indicazioni sulla geometria della cavità e sulla classe di resistenza della litologia incassante.

2.3 Studi di MS di Livello 3 (Carta di MS) - Zone di Suscettibilità ($Z_{S_{CS}}$) e Rispetto ($Z_{R_{CS}}$)

Negli studi di MS di Livello 3 le aree interessate dalla presenza di cavità e mappate al Livello 1 come $Z_{A_{CS}}$ saranno oggetto di approfondimenti finalizzati ad acquisire elementi informativi specifici, necessari per la valutazione della stabilità della cavità in condizioni sismiche mediante approcci di analisi semplificati o avanzati per l'identificazione, rispettivamente, delle $Z_{S_{CS}}$ e/o delle $Z_{R_{CS}}$. La raccolta degli **elementi informativi specifici** per la valutazione della stabilità delle cavità sotto azioni sismiche, propria di uno studio di Livello 3 (Gruppo di lavoro MS, 2008), ha i seguenti obiettivi:

- raccogliere i dati necessari per la verifica delle condizioni predisponenti per le $Z_{A_{CS}}$ definite nel Livello 1 di MS per le quali non è stata precedentemente possibile la verifica per insufficienza o mancanza di dati;
- definire le caratteristiche geometriche della cavità, in termini di sviluppo planimetrico, altezza, larghezza e copertura della cavità ricadenti in $Z_{A_{CS}}$;
- caratterizzare da un punto di vista geomeccanico i litotipi incassanti le cavità ricadenti in $Z_{A_{CS}}$.

2.3.1 Analisi semplificate (Abachi)

Le analisi semplificate hanno per obiettivo la verifica delle condizioni di instabilità delle $Z_{A_{CS}}$.

In tali zone, la suscettibilità al crollo viene definita per ciascuna cavità in via semplificata attraverso l'utilizzo di abachi costruiti *ad hoc* per tale scopo (cfr. APPENDICE 3). Qualitativamente, gli abachi forniti definiscono un livello di stabilità della cavità attraverso la stima del Fattore di Sicurezza della cavità (FS). Per utilizzare l'abaco è necessario avere i seguenti dati di ingresso:

- 1) geometria della cavità: *i.e.* spessore (H) della copertura della cavità e larghezza (L) (vedi Figura 2-2);
- 2) classe di resistenza della litologia incassante (Classe 1, 2, 3);
- 3) PGA attesa al sito.

Se ci troviamo nella condizione in cui, per le cavità ricadenti in $Z_{A_{CS}}$, le informazioni appena descritte non sono disponibili o lo sono solo parzialmente, dovranno essere realizzate nuove indagini per acquisirle. Le nuove indagini previste per questo livello di approfondimento riguardano la caratterizzazione geometrica delle cavità e l'individuazione della litologia incassante per la definizione della classe di resistenza (cfr. APPENDICE 2). Qualora tali informazioni siano già disponibili, non sarà necessario prevedere nuove indagini in questa fase di studio.

Acquisiti i nuovi dati, a questo punto, è necessario effettuare nuovamente la verifica delle condizioni predisponenti proprie del Livello 1 di MS (PGA, I e II; paragrafo 2.1; Figura 2-1) di tutte le cavità ricadenti in $Z_{A_{CS}}$. Le cavità che alla luce dei nuovi dati, non rispettano una, o più di una, delle condizioni predisponenti sono da considerarsi non suscettibili al crollo (Figura 2-1). Al contrario, le cavità che rispettano tutte le condizioni predisponenti (PGA, I e II; paragrafo 2.1; Figura 2-1) saranno oggetto di valutazione del loro FS attraverso l'utilizzo degli abachi proposti (cfr. ALLEGATO 3). Qualora non sia possibile effettuare nuove indagini per la verifica delle condizioni del Livello 1, le cavità in questione saranno mantenute come $Z_{A_{CS}}$ e non saranno oggetto di successivi approfondimenti fintanto che non saranno acquisiti i dati necessari per la verifica delle condizioni del Livello 1.

Nel caso in cui il valore di FS della cavità calcolato con l'abaco sia maggiore del valore soglia $FS_{Z_{S,CS}}$ ($FS_{Z_{S,CS}} > 3$) allora la cavità non è classificabile come zona suscettibile al crollo e, quindi, la relativa Zona di instabilità verrà rimossa. Se invece viene calcolato un FS inferiore o uguale al valore soglia $FS_{Z_{S,CS}}$ ($FS_{Z_{S,CS}} \leq 3$), la cavità è classificabile come area suscettibile al crollo e dunque andrà a costituire la relativa $Z_{S_{CS}}$.

La Zona di Suscettibilità per Cavità Sotterranee ($Z_{S_{CS}}$) in condizioni sismiche rappresenta l'area in cui, a seguito di eventi sismici, è possibile che la cavità si destabilizzi con conseguenti effetti deformativi permanenti fino al piano campagna.

2.3.2 *Analisi avanzate*

Le analisi avanzate vengono realizzate, attraverso analisi specifiche della stabilità della cavità in condizioni sismiche. In questo livello di approfondimento viene definita la suscettibilità al crollo delle cavità con maggiore accuratezza al fine di individuare in modo definitivo il fattore di sicurezza e, quindi, le ZS e ZR, ed eventualmente escludendo le zone precedentemente individuate come ZA, in caso di attribuzione di un elevato fattore di sicurezza. Le indagini integrative da realizzare in questo livello avanzato di analisi sono quelle per la caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso incassante la cavità (cfr. APPENDICE 2) finalizzate alla definizione di un modello geometrico e parametrico dell'ammasso, il cui comportamento sotto l'effetto di un sisma viene analizzato mediante simulazioni numeriche (cfr. APPENDICE 3). I risultati di queste simulazioni numeriche restituiscono un FS da confrontare con il valore soglia di $FS_{ZR,CS}$ pari a 1,5 al fine di definire la relativa zona di appartenenza della cavità in oggetto:

- se $FS > 3 \rightarrow$ zona non suscettibile;
- $1,5 < FS \leq 3 \rightarrow$ Zona di Suscettibilità (ZS_{CS});
- $FS \leq 1,5 \rightarrow$ Zona di Rispetto (ZR_{CS}).

3 Modalità di rappresentazione e perimetrazione delle cavità e delle zone di instabilità

Nel presente capitolo si definiscono i criteri di dimensionamento e le indicazioni per una corretta rappresentazione delle cavità nella CGT_MS e delle differenti zone di instabilità all'interno delle carte delle MOPS e di MS.

Le zone instabili per cavità sotterranee devono essere cartografate ad una scala di dettaglio adeguata, preferibilmente non inferiore a 1:5.000. Date le piccole dimensioni che le diverse tipologie di zona possono avere, è consigliata una rappresentazione⁴ a scala di dettaglio (1:2.000-1:500) delle aree interessate dalla presenza di Zone di Instabilità per Cavità Sotterranee in modo da renderle più visibili.

Le ZAC_S sono poligoni rappresentati nella carta delle MOPS (Livello 1 di MS) e, in casi particolari, anche nelle Carte di MS (Livello 3 di MS), mentre le ZSC_S e le ZRC_S sono poligoni riportati esclusivamente nelle Carte di MS (Livello 3 di MS).

La ZSC_S può ricadere all'interno di una ZAC_S , ma le due zone non potranno mai coincidere. Allo stesso modo la ZRC_S può essere ricompresa all'interno di una ZAC_S , ma le diverse tipologie di zone non potranno mai coincidere e inoltre non potranno coesistere sovrapposizioni tra le diverse tipologie di zone.

La ZRC_S può ricadere all'interno di una ZSC_S , ma le due zone non potranno mai coincidere né sovrapporsi. Inoltre, la ZRC_S e la ZSC_S non necessariamente coincidono con la ZAC_S , ma possono essere costituite da porzioni di essa.

Il dimensionamento delle zone è basato sulle indicazioni provenienti dalle analisi numeriche eseguite per la costruzione degli abachi, riportate nel dettaglio nell'APPENDICE 3.

3.1 Metodi di rappresentazione delle cavità nella CGT_MS

Le cavità individuate a seguito dello screening preliminare (paragrafo 2.1) dovranno essere riportate nella CGT_MS utilizzando le diverse simbologie proposte dagli Standard 4.2 (CTMS, 2020), in funzione del livello di

⁴ Da riportare nelle stampe in formato pdf della carta delle MOPS e/o in quella di MS.

conoscenza degli elementi informativi minimi (paragrafo 2.1) e della tipologia di cavità considerata (Cavità sepolta isolata o Aree con cavità sepolte).

Negli studi di MS le cavità possono essere rappresentate come elementi puntuali all'interno dello shapefile "Epuntuali" o come elementi poligonali nello shapefile "Forme", i cui codici alfanumerici per l'archiviazione delle cavità e le relative simbologie sono riportati negli Standard 4.2 (CTMS, 2020).

Di seguito, ad integrazione di quanto riportato negli Standard 4.2 (CTMS, 2020), si riportano alcune indicazioni utili per la scelta della tipologia di rappresentazione da adottare e si definiscono i relativi criteri da utilizzare per la rappresentazione delle diverse tipologie di cavità.

Nella Tabella 3-1 sono riassunti i criteri per l'individuazione della tipologia di elemento cartografico da utilizzare per rappresentare la cavità e i relativi metodi di rappresentazione, esplicitati nel dettaglio nei paragrafi successivi.

Tabella 3-1 - Tipologia di elementi cartografici, dimensioni minime⁵ e metodi di rappresentazione delle cavità

Tipologia elemento	Dimensioni minime	Metodi di rappresentazione
Cavità sepolta isolata	2 m < L < 50 m; Interdistanza tra cavità > 25 m.	Ubicare il simbolo puntuale sul centroide della cavità.
Area con cavità sepolte	Aree > 1000 m ² ; Interdistanza tra cavità < 25 m; Cavità singola con L > 50 m.	Poligono di inviluppo di tutte le cavità presenti nell'area; Sovrapporre il simbolo puntuale di Cavità sepolta isolata sul centroide, se noto, delle singole cavità che la compongono.

3.1.1 Cavità sepolta isolata

La simbologia puntuale di Cavità sepolta isolata sarà utilizzata nel caso in cui la cavità abbia una larghezza L compresa tra 2 m e 50 m e non siano presenti altre cavità nel raggio di 25 m. Nel caso in cui la singola cavità presenti larghezza L > di 50 m o siano presenti altre cavità a distanza inferiore a 25 m, è preferibile utilizzare la simbologia poligonale di Area con cavità sepolte per non appesantire e non compromettere la leggibilità della carta. Riguardo al posizionamento del simbolo di cavità sepolta isolata, è opportuno localizzare tale elemento sul centroide della cavità, piuttosto che in corrispondenza dell'imbocco della stessa, opzione da tenere in considerazione solo nel caso in cui non si conosca l'esatto sviluppo planimetrico della cavità.

Le Cavità sepolte isolate sono cartografate attraverso elementi puntuali, pertanto saranno riportate all'interno dello shapefile "Epuntuali" e rappresentate con la relativa simbologia, così come definita dagli Standard 4.2 (CTMS, 2020).

Il codice da utilizzare per il campo "Tipo_ep" è 6020.

3.1.2 Area con cavità sepolte

Il simbolo di Area con cavità sepolte sarà adottato per tutti i casi in cui siano presenti in una determinata area due o più cavità tra loro interdistanti meno di 25 m, indipendentemente dalle dimensioni delle singole cavità. È opportuno, comunque, utilizzare tale simbologia solo per aree che presentino un'estensione pari o superiore a 1.000 m². Il poligono di Area con cavità sepolte dovrà essere disegnato in maniera tale da contenere al suo interno l'intera planimetria, se nota, di ognuna delle cavità presenti nell'area. Qualora le informazioni disponibili lo consentano, è possibile sovrapporre al simbolo di Area con cavità sepolte il simbolo puntuale di Cavità sepolta isolata in corrispondenza del centroide della singola cavità, in maniera tale da mantenere le informazioni riguardanti l'ubicazione delle singole cavità che compongono l'area. Come esplicitato in precedenza (paragrafo 3.1.1) è opportuno utilizzare il simbolo di Area con cavità sepolte anche nel caso di una singola cavità avente

⁵ Allo stato attuale i valori riportati in tabella sono stati definiti in funzione della scala cartografica utilizzata per la realizzazione degli studi di MS (1:5.000), in maniera tale da non compromettere la leggibilità della carta attraverso l'identificazione della simbologia più appropriata per la rappresentazione delle cavità a seconda delle loro dimensioni in pianta.

larghezza $L > 50$ m, in quanto cavità con simili dimensioni assumono uno sviluppo planimetrico tale da essere meglio rappresentate da un elemento poligonale piuttosto che da un elemento puntuale.

In accordo con gli Standard 4.2 (CTMS, 2020) le Aree con cavità sepolte vanno riportate all'interno dello shapefile "Forme" e, pertanto, cartografate con la relativa simbologia attraverso elementi poligonali.

Il codice da utilizzare per il campo "Tipo_F" è 4030.

3.2 Z_{ACS} (Carta delle MOPS)

La Zona di Attenzione (Z_{ACS}) si costruisce sulla base di elementi informativi minimi (paragrafo 2.2) e pertanto il dimensionamento tiene conto di un certo grado di incertezza. Le dimensioni della Z_{ACS} variano infatti in funzione del livello di conoscenza della cavità che la costituisce (paragrafo 2.2), oltre che della tipologia e quindi del metodo di rappresentazione della cavità stessa (Cavità sepolta isolata o Area con cavità sepolte).

Nella Tabella 3-2 per ogni tipologia di Z_{ACS} sono definite delle dimensioni raccomandate, in funzione della larghezza (L) della cavità, che rappresentano il valore minimo che tale zona può assumere⁶. Una ampiezza minore di tale zona è sconsigliata, a meno di una dettagliata conoscenza dello sviluppo planimetrico della cavità e di chiare e documentate evidenze geologiche che giustifichino una diversa perimetrazione, che andranno esplicitate nella relazione illustrativa.

Tabella 3-2 - Dimensioni delle Zone di Attenzione di Cavità Sotterranee (Z_{ACS})

Planimetria cavità	Z _{ACS} (m)
Nota	$L * 3,5$
Ignota	$(20 * 3,5)$

Per le cavità sepolte isolate, nel caso in cui si conosca con esattezza lo sviluppo planimetrico della cavità, la Z_{ACS} dovrà essere costruita mediante un buffer calcolato sul perimetro della cavità, mentre, nel caso in cui non sia nota la planimetria della cavità, il buffer dovrà essere applicato sul centroide della cavità.

Le Z_{ACS} dovute alla presenza di un'area con cavità sepolte, qualora sia noto lo sviluppo planimetrico di tutte le cavità che la compongono, dovranno essere rappresentate mediante un buffer costruito come involucro dei buffer delle singole cavità. Nel caso di cavità con planimetria ignota, il buffer sarà costruito sul centroide della cavità.

In APPENDICE 3 sono riportati alcuni esempi di rappresentazione delle Z_{ACS}.

L'individuazione di questa zona rimanda, obbligatoriamente, ad approfondimenti successivi mediante l'acquisizione di elementi informativi specifici, propri del Livello 3 di MS (Gruppo di lavoro MS, 2008).

3.3 Z_{SCS} (Carta di MS)

La Zona di Suscettibilità (Z_{SCS}) si costruisce sulla base di elementi informativi specifici (paragrafo 2.3.1) e in particolare dello sviluppo planimetrico della cavità che la costituisce. Le dimensioni della Z_{SCS} variano infatti in funzione della profondità (H) e della larghezza (L) della cavità e sono definite in maniera univoca indipendentemente dal metodo di rappresentazione della cavità stessa (Cavità sepolta isolata o Area con cavità sepolte).

⁶ Definite in funzione dei risultati delle analisi numeriche (cfr. APPENDICE 3).

Nella Tabella 3-3 sono definite delle dimensioni raccomandate per il dimensionamento del buffer, in funzione della profondità (H) e della larghezza (L) della cavità⁷. Una ampiezza minore, o maggiore, di tale zona è sconsigliata, a meno di chiare e documentate evidenze geologiche che giustifichino una diversa perimetrazione, le quali andranno esplicitate nella relazione illustrativa.

Tabella 3-3 - Dimensioni delle Zone di Suscettibilità di Cavità Sotterranee (ZSCS); H, profondità della cavità; L, larghezza della cavità.

H (m)	ZSCS (m) CLASSE 1-2-3			
	L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 15	15 < L ≤ 20
H ≤ 2	L*3	L*2,5	-	-
2 < H ≤ 5	L*2,7	L*2,3	L*2,15	L*2
5 < H ≤ 10	-	L*2,15	L*2	L*1,9
H > 10	-	-	L*1,8	L*1,5

Per le cavità sepolte isolate la ZSCS dovrà essere costruita mediante un buffer calcolato sul perimetro in pianta della cavità che la compone.

Nel caso di Area con cavità sepolte, qualora sia noto lo sviluppo planimetrico di tutte le cavità presenti al suo interno, le ZSCS dovranno essere costruite mediante l'involuppo dei singoli buffer calcolati sul perimetro di ogni singola cavità presente. Nel caso in cui sia noto lo sviluppo planimetrico solo di alcune delle cavità presenti al suo interno, le ZSCS saranno identificate solo per queste. Per le restanti cavità verrà mantenuta la residuale ZACS.

In APPENDICE 3 sono riportati alcuni esempi di rappresentazione delle ZSCS.

3.4 ZRCs (Carta di MS)

La Zona di Rispetto (ZRCs) si costruisce sulla base di elementi informativi specifici (paragrafo 2.3.2) e in particolare dello sviluppo planimetrico della cavità che la costituisce e della caratterizzazione geomeccanica della litologia incassante. Le dimensioni della ZRCs variano infatti in funzione della profondità (H), della larghezza (L) e della classe di resistenza (1, 2, 3) della cavità e sono definite in maniera univoca indipendentemente dal metodo di rappresentazione della cavità stessa (Cavità sepolta isolata o Area con cavità sepolte).

In Tabella 3-4 sono riportate le dimensioni raccomandate per il buffer, in funzione della profondità (H), della larghezza (L) e della classe di resistenza (1, 2, 3) della cavità, che rappresentano il valore che la ZRCs può assumere⁸. Una ampiezza minore, o maggiore, di tale zona è sconsigliata, a meno di chiare e documentate evidenze geologiche o dei risultati delle analisi numeriche che ne giustifichino una diversa perimetrazione e che andranno esplicitati nella relazione illustrativa.

Tabella 3-4 - Dimensioni del buffer per le ZR in funzione di H, profondità della cavità; L, larghezza della cavità.

H (m)	ZRCs (m) CLASSE 1			
	L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 15	15 < L ≤ 20
H ≤ 2	L*2	L*1,7	-	-
2 < H ≤ 5	L*2	L*1,6	L*1,5	L*1,5
5 < H ≤ 10	-	L*1,5	L*1,4	L*1,4
H > 10	-	-	L*1,3	L*1,1

⁷ Definite in funzione dei risultati delle analisi numeriche (cfr. APPENDICE 3).

⁸ Definite in funzione dei risultati delle analisi numeriche (cfr. APPENDICE 3).

H (m)	Z _{RCS} (m) CLASSE 2			
	L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 15	15 < L ≤ 20
H ≤ 2	L*2,2	L*2	-	-
2 < H ≤ 5	L*2,1	L*2	L*1,7	L*1,6
5 < H ≤ 10	-	L*1,8	L*1,5	L*1,5
H > 10	-	-	L*1,4	L*1,2

H (m)	Z _{RCS} (m) CLASSE 3			
	L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 15	15 < L ≤ 20
H ≤ 2	L*3	L*2,5	-	-
2 < H ≤ 5	L*2,7	L*2,3	L*2,15	L*2
5 < H ≤ 10	-	L*2,15	L*2	L*1,9
H > 10	-	-	L*1,7	L*1,5

Per le cavità sepolte isolate la Z_{RCS} dovrà essere costruita mediante un buffer calcolato sul perimetro in pianta della cavità che la compone.

Nel caso di Area con cavità sepolte, qualora sia noto lo sviluppo planimetrico e la caratterizzazione geomeccanica di tutte le cavità presenti al suo interno, le Z_{RCS} dovranno essere costruite mediante l'involuppo dei buffer calcolati sul perimetro di ogni singola cavità presente all'interno del poligono di Area con cavità sepolte. Nel caso in cui lo sviluppo planimetrico e la caratterizzazione geomeccanica sia noto solo per alcune delle cavità presenti al suo interno, le Z_{RCS} saranno identificate solo per queste ultime. Per le restanti cavità verrà mantenuta la residuale Z_{ACS} e/o Z_{SCS}.

In APPENDICE 3 sono riportati alcuni esempi di rappresentazione delle Z_{RCS}.

PARTE SECONDA - Disciplina d'uso del suolo in zone interessate da instabilità per cavità sotto azioni sismiche

4 Individuazione delle categorie di aree urbanistiche interessate

La pianificazione urbanistica e territoriale in zone interessate dal possibile crollo di cavità sotterranee sotto azioni sismiche è chiamata a disciplinare gli usi del suolo e le previsioni di trasformazione urbana, tenendo conto della relazione tra la pericolosità sismica e i diversi contesti insediativi.

È bene evidenziare che, in questo contesto, viene introdotta una condizione di pericolosità aggiuntiva (forzante sismica), per cui la disciplina d'uso, pur tenendo conto di quella già esistente per cavità sotterranee in condizioni statiche, dovrà tenerne conto in modo commisurato sia alle condizioni di pericolosità complessive che ai livelli di approfondimento conoscitivo.

Nell'ambito degli strumenti di pianificazione urbanistica, gli studi di MS, ai vari livelli, come definiti negli ICMS (2008), sono integrati con quanto specificato dalle presenti linee guida.

Al fine di definire tale disciplina, si farà riferimento convenzionalmente a **tre categorie di aree urbanistiche**:

Aree edificate (recenti o consolidate)

Aree non edificate (con previsione di trasformazione)

Aree non urbanizzate a trasformabilità limitata

Ciascuna delle tre categorie di aree è definita da specifici caratteri insediativi, infrastrutturali e di destinazione d'uso la cui relazione con la presenza di ZA_{CS}, ZS_{CS} e ZR_{CS} va sottoposta a specifiche normative.

In particolare, le tre categorie di aree urbanistiche possono essere definite nel modo seguente:

- **Aree edificate** (recenti o consolidate)

Aree urbanizzate ed edificate di diverso livello di completamento, consolidamento e stratificazione. Comprendono centri storici, tessuti consolidati, aree in completamento con usi residenziali, produttivi, a servizio o misti.

- **Aree non edificate** (con previsione di trasformazione)

Aree non edificate, parzialmente edificate o con previsione di nuovi insediamenti - residenziali, produttivi, a servizio o misti - di manufatti edilizi, di infrastrutture e reti. Tali aree possono trovarsi sia in adiacenza ad aree edificate, sia in contesti ancora non urbanizzati.

- **Aree non urbanizzate a trasformabilità limitata**

Aree non edificabili o con limitate previsioni di edificabilità, sia per destinazione d'uso (aree agricole), che per la presenza di vincoli e forme di tutela.

Queste tre categorie vanno riferite alle previsioni dello strumento di piano vigente e alle sue effettive condizioni di attuazione.

Per quanto riguarda le specifiche articolazioni della normativa urbanistica nelle suddette aree, ogni Regione potrà predisporre opportune corrispondenze tra le tre categorie urbanistiche e le zone omogenee individuate dai rispettivi strumenti di governo del territorio.

5 Disciplina d'uso

I criteri definiti per indirizzare la disciplina d'uso del suolo in zone interessate dal possibile crollo di cavità sotterranee sotto azioni sismiche devono tener conto di alcuni fattori:

- per le instabilità dovute alla presenza di cavità sotterranee l'area di studio da considerare può interessare vaste aree del territorio oppure di estensione molto limitata;
- a differenza di altre forme di instabilità (faglie attive e capaci, FAC) è possibile mettere in atto opere di riduzione della pericolosità, attraverso interventi di stabilizzazione della cavità (cfr. APPENDICE 5).
- a differenza di altre forme di instabilità (FAC e liquefazioni), la disciplina urbanistica per le aree sottoposte a instabilità (non sismoindotta) dovuta alla presenza di cavità sotterranee, può essere già stata individuata in alcuni strumenti di pianificazione territoriale di settore (i Piani di Assetto Idrogeologico disciplinano il trattamento delle cavità sotterranee negli ambiti interessati da pericolosità geomorfologica) o dalla normativa regionale e locale (in riferimento ai catasti delle cavità naturali e artificiali). Si fa riferimento quindi alle normative già esistenti e agli orientamenti generali della disciplina.
- Tenuto conto di questo, la disciplina degli usi del suolo e delle previsioni di trasformazione nelle zone interessate dal crollo di cavità sotterranee sotto azioni sismiche viene articolata in una serie di **indicazioni urbanistiche**, che definiscono possibili regolamentazioni dallo strumento urbanistico anche in termini di categorie di intervento e di destinazione d'uso⁹ e di modalità attuative.

Con riferimento alle tre categorie di aree urbanistiche sopra definite e alle zone interessate dal crollo di cavità sotterranee sotto azioni sismiche in cui esse ricadono, viene proposto un abaco di diverse tipologie di indirizzi (Tabella 5-1). Nella tabella viene riportata anche una colonna relativa alle infrastrutture, come ambito distinto e in questa sede non approfondito.

Tabella 5-1 - Indicazioni urbanistiche (fra parentesi i riferimenti ai paragrafi).

Categorie urbanistiche		Aree edificate (recenti o consolidate)	Aree non edificate (con previsione di trasformazione)	Aree non urbanizzate a trasformabilità limitata	Infrastrutture
Zone Instabili per Cavità Sotterranee	ZAcS	Obbligo di approfondimento (5.1.1)	Obbligo di approfondimento (5.2.1)		Programma Infrastrutture (5.3)
	ZScS	Programma Zone Instabili (5.1.2)	Intervento limitato (5.2.2)		
	ZRcS				

5.1 Aree edificate

5.1.1 Obbligo di approfondimento (Aree edificate)

⁹ L'art. 10, comma 2, del T.U. edilizia (D.P.R. 380/2001) attribuisce alle Regioni la competenza a disciplinare, con legge regionale, la materia della destinazione d'uso e del mutamento della stessa. Le destinazioni d'uso generalmente fanno riferimento alle seguenti categorie: residenziale, turistico-ricettiva, produttiva e direzionale, commerciale, rurale (art. 23-ter del D.P.R. 380/2001).

Nel caso di ZACS, nelle **Aree edificate (recenti o consolidate)**, per interventi di nuova edificazione (nei lotti vuoti) e per interventi sull'edificato esistente, devono essere espletati i necessari approfondimenti geologici e geotecnici, propri del Livello 3 di MS al fine di individuare le ZSCS e le ZRCS, oppure, per interventi puntuali, gli approfondimenti previsti dalla normativa tecnica vigente. È prerogativa delle Regioni definire eventuali limiti temporali, in ragione delle risorse disponibili, per l'espletamento dei suddetti approfondimenti.

L'assenza di approfondimento determina la seguente disciplina d'uso:

Edilizia	Tipo Intervento	Descrizione
Esistente	Limitato	Con esclusione degli interventi di manutenzione ordinaria, degli interventi di adeguamento igienico-sanitario, o altri interventi obbligatori di settore, qualsiasi altro tipo di intervento deve prevedere interventi di miglioramento e/o di adeguamento e/o di rafforzamento locale e la valutazione di eventuali interventi di riduzione della pericolosità (in conformità alla normativa vigente). Si rimanda alla normativa regionale o alla disciplina urbanistica del PAI di riferimento, qualora siano vigenti norme più restrittive.
Nuova costruzione	Obbligatorio	La nuova costruzione è consentita con l'obbligo di approfondimenti sull'intera zona omogenea su cui ricade la costruzione stessa o almeno sull'area nella quale la condizione di instabilità può avere effetti sulla costruzione.

5.1.2 Programma Zone Instabili

Per le ZSCS e ZRCS, nelle **Aree edificate (recenti o consolidate)**, le amministrazioni locali nell'ambito dei propri strumenti di pianificazione urbanistica e secondo le prescrizioni e gli indirizzi dei soggetti sovraordinati, individuano e perseguono uno o più obiettivi per il *Programma Zone Instabili (PZI)*, assumendone i contenuti nelle forme opportune, al fine di mitigare le condizioni di rischio. Il PZI rappresenta un programma d'intervento complesso in cui vengono definiti obiettivi e ambiti di intervento, fattibilità e modalità attuative. Il PZI riguarda più in generale tutte le aree suscettibili di instabilità, fra cui anche quelle interessate da faglie attive e capaci (FAC)¹⁰, liquefazione¹¹ e frane¹².

L'assenza di un PZI determina la stessa disciplina d'uso prevista per le ZACS.

5.1.2.1 Scelta obiettivo del PZI

La definizione di uno specifico PZI implica la scelta di uno dei seguenti obiettivi, eventualmente differenziati in funzione di ZSCS e ZRCS:

- Intervento limitato (Obiettivo 1)
- Intervento obbligatorio (Obiettivo 2)
- Intervento inibito (Obiettivo 3)

Per ciascuno di questi obiettivi di seguito vengono elencate le rispettive discipline d'uso.

¹⁰Commissione tecnica per la microzonazione sismica. *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da faglie attive e capaci*. Versione 1.0. Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e delle Province autonome. Roma, maggio 2015.

¹¹ Commissione tecnica per la microzonazione sismica. *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazione*. Versione 1.0. Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e delle Province autonome. Roma, 2017.

¹² Commissione tecnica per la microzonazione sismica. *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte*. Versione 1.0. Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e delle Province autonome. Roma, 2017.

5.1.2.1.1 Prima ipotesi: Intervento limitato (Obiettivo 1)

La scelta di questo obiettivo determina la seguente disciplina d'uso:

Edilizia	Tipo Intervento	Descrizione
Esistente	Limitato	Con esclusione degli interventi di manutenzione ordinaria, degli interventi di adeguamento igienico-sanitario, o altri interventi obbligatori di settore, qualsiasi altro tipo di intervento deve prevedere interventi di miglioramento e/o di adeguamento e/o di rafforzamento locale e valutazione di eventuali interventi di riduzione della pericolosità (in conformità alla normativa vigente). Si rimanda alla normativa regionale o alla disciplina urbanistica del PAI di riferimento, qualora siano vigenti norme più restrittive.
Nuova costruzione	Limitato	È consentita la nuova edificazione con valutazione di interventi di riduzione della pericolosità in conformità alla normativa vigente. Si rimanda alla normativa regionale o alla disciplina urbanistica del PAI di riferimento, qualora siano vigenti norme più restrittive.

5.1.2.1.2 Seconda ipotesi: Intervento obbligatorio (Obiettivo 2)

La scelta di questo obiettivo determina la seguente disciplina d'uso:

Edilizia	Tipo Intervento	Descrizione
Esistente	Obbligatorio	Non è obbligatoria la delocalizzazione, ma viene favorita. Interventi obbligatori (nei tempi definiti dalla Regione): interventi di miglioramento e/o adeguamento e/o rafforzamento locale e valutazione di interventi di riduzione della pericolosità (in conformità alla normativa vigente), indipendentemente da qualunque tipo di richiesta di intervento.
Nuova costruzione	Obbligatorio	La nuova costruzione è consentita con l'obbligo di approfondimenti sull'intera zona omogenea su cui ricade la costruzione stessa o almeno sull'area nella quale la condizione di instabilità può avere effetti sulla costruzione.

5.1.2.1.3 Terza ipotesi: Intervento inibito (Obiettivo 3)

La scelta di questo obiettivo determina la seguente disciplina d'uso:

Edilizia	Tipo Intervento	Descrizione
Esistente	Delocalizzazione	Non è consentito alcun intervento sull'edilizia esistente, perché oggetto di delocalizzazione obbligatoria.
Nuova costruzione	Inibito	Non è consentita la nuova edificazione.

Per i centri storici, oltre alle indicazioni sopra riportate riguardanti la categoria delle Aree edificate (recenti o consolidate), dovrà essere valutata l'opportunità, in sede di predisposizione del PZI, di introdurre un piano attuativo che contempli interventi finalizzati alla conservazione e al riuso, compatibili con le nuove condizioni di rischio intervenute.

5.2 Aree non edificate o non urbanizzate

5.2.1 Obbligo di approfondimento (Aree non edificate o non urbanizzate)

Le **Aree non edificate (con previsione di trasformazione)** e le **Aree non urbanizzate a trasformabilità limitata**, ricadenti in ZACS, sono soggette ad un regime di limitazione di edificabilità che non autorizza alcun intervento di trasformazione, fintantoché non vengano effettuati i necessari approfondimenti al fine di individuare le ZSCS e le ZRCS, oppure gli approfondimenti sull'intera zona omogenea su cui ricade l'intervento ovvero almeno sull'area nella quale la condizione di instabilità può avere effetti sulla costruzione.

È ammessa in tali aree la sistemazione di spazi aperti, senza realizzazione di volumetrie, a servizio delle funzioni e delle attività presenti nelle aree limitrofe, insediate e urbanizzate, o per incrementare la dotazione urbana di aree verdi, spazi pubblici e verde privato attrezzato.

Pertanto, l'assenza di approfondimento determina la seguente disciplina d'uso:

Edilizia	Tipo Intervento	Descrizione
Esistente	Limitato	Con esclusione degli interventi di manutenzione ordinaria, degli interventi di adeguamento igienico-sanitario, o altri interventi obbligatori di settore, qualsiasi altro tipo di intervento deve prevedere interventi di miglioramento e/o di adeguamento e/o di rafforzamento locale e valutazione di eventuali interventi di riduzione della pericolosità (in conformità alla normativa vigente). Si rimanda alla normativa regionale o alla disciplina urbanistica del PAI di riferimento, qualora siano vigenti norme più restrittive.
Nuova costruzione	Obbligatorio	La nuova costruzione è consentita con l'obbligo di approfondimenti sull'intera zona omogenea su cui ricade la costruzione stessa o almeno sull'area nella quale la condizione di instabilità può avere effetti sulla costruzione.

5.2.2 Intervento limitato

Nelle Aree non edificate (con previsione di trasformazione) e nelle Aree non urbanizzate a trasformabilità limitata, ricadenti in ZS_{CS} e in ZR_{CS}, è prevista la seguente disciplina d'uso:

Edilizia	Tipo Intervento	Descrizione
Esistente	Limitato	Con esclusione degli interventi di manutenzione ordinaria, degli interventi di adeguamento igienico-sanitario, o altri interventi obbligatori di settore, qualsiasi altro tipo di intervento deve prevedere interventi di miglioramento e/o di adeguamento e/o di rafforzamento locale e valutazione di eventuali interventi di riduzione della pericolosità (in conformità alla normativa vigente). Si rimanda alla normativa regionale o alla disciplina urbanistica del PAI di riferimento, qualora siano vigenti norme più restrittive.
Nuova costruzione	Limitato	È consentita la nuova edificazione con valutazione di interventi di riduzione della pericolosità in conformità alla normativa vigente). Si rimanda alla normativa regionale o alla disciplina urbanistica del PAI di riferimento, qualora siano vigenti norme più restrittive.

5.3 Programma Infrastrutture

Per le infrastrutture, le opere connesse a sistemi infrastrutturali e, più in generale le *lifelines* in programma di realizzazione, deve essere favorita la delocalizzazione, ove possibile. Se preesistenti, o non delocalizzabili, deve essere predisposto uno specifico programma, eventualmente nell'ambito del *Programma Zone Instabili*, per essere sottoposte a verifica, prevedendo specifici approfondimenti conoscitivi e interventi finalizzati alla minimizzazione dei rischi.

6 Disciplina d'uso per le zone di ricostruzione post-terremoto

Nel caso di zona di ricostruzione post-terremoto allo schema di disciplina d'uso precedentemente descritto, si andrà ad aggiungere la condizione, ben più gravosa, di manufatti danneggiati e la necessità di predisporre piani e norme specifici per l'intera area oggetto dell'evento sismico.

Pertanto, la prima delle precedenti categorie di aree urbanistiche (Aree edificate - recenti o consolidate), così come definita, deve essere integrata con i manufatti (Unità minime di intervento) classificati in funzione del danno e della vulnerabilità.

6.1 Aree edificate

6.1.1 Obbligo di approfondimento (Aree edificate)

Nel caso di ZA_{CS}, nelle **Aree edificate (recenti o consolidate)**, per interventi di ricostruzione o riparazione l'assenza di approfondimento determina la seguente disciplina d'uso:

Edilizia	Tipo Intervento	Descrizione
Danneggiata (danno leggero, medio-grave, gravissimo)	Limitato	Qualsiasi tipo di intervento deve prevedere (nei tempi definiti dalla Regione) interventi di miglioramento e/o adeguamento e/o rafforzamento locale e valutazione di eventuali interventi di riduzione della pericolosità (in conformità alla normativa vigente). Si rimanda alla normativa regionale o alla disciplina urbanistica del PAI di riferimento, qualora siano vigenti norme più restrittive.

6.1.2 Programma Zone Instabili

A quanto già previsto per le ZSCs e ZRCs, nelle **Aree edificate (recenti o consolidate)**, dovranno essere aggiunte le seguenti indicazioni.

L'assenza di un PZI determina la seguente disciplina d'uso:

Edilizia	Tipo Intervento	Descrizione
Danneggiata (danno leggero, medio-grave, gravissimo)	Limitato	Qualsiasi tipo di intervento deve prevedere (nei tempi definiti dalla Regione) interventi di miglioramento e/o adeguamento e/o rafforzamento locale e valutazione di eventuali interventi di riduzione della pericolosità (in conformità alla normativa vigente). Si rimanda alla normativa regionale o alla disciplina urbanistica del PAI di riferimento, qualora siano vigenti norme più restrittive.

6.1.2.1 Scelta obiettivo del PZI

Nel PZI dovrà essere valutata progressivamente la possibilità di adozione di uno dei seguenti obiettivi riferibili all'edilizia danneggiata:

- Intervento limitato (Obiettivo 1)
- Intervento obbligatorio (Obiettivo 2)

Per ciascuno di questi obiettivi di seguito vengono elencate le rispettive discipline d'uso.

6.1.2.1.1 Prima ipotesi: Intervento limitato (Obiettivo 1)

La scelta di questo obiettivo determina la seguente disciplina d'uso:

In ZRCs e ZSCs

Edilizia	Tipo Intervento	Descrizione
Danneggiata (danno leggero, medio-grave, gravissimo)	Limitato	Qualsiasi altro tipo di intervento deve prevedere (nei tempi definiti dalla Regione) interventi di miglioramento e/o adeguamento e/ rafforzamento locale e valutazione di eventuali interventi di riduzione della pericolosità (in conformità alla normativa vigente). Si rimanda alla normativa regionale o alla disciplina urbanistica del PAI di riferimento, qualora siano vigenti norme più restrittive.

6.1.2.1.2 Seconda ipotesi: Intervento obbligatorio (Obiettivo 2)

La scelta di questo obiettivo determina la seguente disciplina d'uso:

In ZRCs e ZSCs

Edilizia	Tipo Intervento	Descrizione
Danneggiata (danno leggero, medio-grave, gravissimo)	Obbligatorio	Non è obbligatoria la delocalizzazione, ma viene favorita. Interventi obbligatori (nei tempi definiti dalla Regione): interventi di miglioramento e/o adeguamento e/o rafforzamento locale e valutazione di interventi di riduzione della pericolosità (in conformità alla normativa vigente), indipendentemente da richieste di manutenzione o altri tipi di richiesta. Si rimanda alla normativa regionale o alla disciplina urbanistica del PAI di riferimento, qualora siano vigenti norme più restrittive.

6.1.2.1.3 Terza ipotesi: Intervento obbligatorio (Obiettivo 3)

La scelta di questo obiettivo determina la seguente disciplina d'uso:

In ZR_{CS} e ZS_{CS}

Edilizia	Tipo Intervento	Descrizione
Danneggiata (danno leggero, medio-grave, gravissimo)	Obbligatorio	Non è obbligatoria la delocalizzazione, ma viene favorita. Interventi obbligatori (nei tempi definiti dalla Regione): interventi di miglioramento e/o adeguamento e/o rafforzamento locale e valutazione di interventi di riduzione della pericolosità (in conformità alla normativa vigente), indipendentemente da richieste di manutenzione o altri tipi di richiesta. Si rimanda alla normativa regionale o alla disciplina urbanistica del PAI di riferimento, qualora siano vigenti norme più restrittive.

APPENDICE A1 – Fonti bibliografiche, censimenti e data-base delle cavità sul territorio italiano

Si riporta di seguito una rassegna dei principali database contenenti informazioni riguardanti la presenza di cavità, naturali ed antropiche, nel sottosuolo italiano, oltre che dei fenomeni di instabilità di cavità avvenuti a seguito di eventi sismici. I database disponibili sono stati realizzati da soggetti diversi, sia a scala nazionale che regionale, con scopi e finalità tra loro differenti e, molti di questi, sono in continuo aggiornamento da parte dei rispettivi curatori.

Lo scopo principale di tale appendice è quello di fornire indicazioni e supporto ai tecnici per la realizzazione degli studi di MS, illustrando le fonti, a scala nazionale e regionale, dalle quali è possibile verificare la presenza di cavità all'interno dell'area di studio e l'accadimento di crolli di cavità sismoindotti. Inoltre, a seconda del tipo di database, diverse sono le informazioni in essi contenute utili per la caratterizzazione della cavità e per la verifica dei parametri discriminanti e predisponenti il fenomeno del crollo di cavità sismoindotto, quali:

- tipologia di cavità;
- geometria della cavità e/o di sistemi caveali;
- spessore dei terreni di copertura;
- litologia e caratterizzazione geotecnica;
- condizioni idrauliche;
- tipologia di instabilità e dimensioni delle aree collassate;
- caratterizzazione evento sismico di riferimento (intensità, distanza, ...).

I cataloghi segnalati provengono da banche dati nazionali e regionali, come ad esempio il DB degli studi di MS (DB-MS), il Catasto Nazionale delle Grotte d'Italia (SSI), il Database Nazionale dei Sinkhole (ISPRA) o il CFTI5Med (INGV), e rappresentano una sintesi non esaustiva delle principali fonti disponibili a scala nazionale, regionale e comunale.

In linea generale i diversi database possono essere distinti, in funzione dei dati presenti, in tre categorie (Tab. A1.1):

- 1) Database e censimenti delle cavità (Naturali e Artificiali), in cui sono riportati l'ubicazione e, solitamente, la planimetria e/o i caratteri morfometrici delle cavità censite;
- 2) Database e cataloghi dei crolli di cavità naturali e artificiali (Sinkhole Naturali e Sinkhole Antropici), nei quali sono riportati, a prescindere dal meccanismo di formazione dello stesso, tutti gli eventi di sprofondamento improvviso del suolo censiti sul territorio italiano, la loro ubicazione e, a volte, i loro caratteri morfometrici;
- 3) Database e cataloghi dei crolli di cavità sismoindotti, in cui sono riportati i crolli e gli sprofondamenti avvenuti a seguito di eventi sismici.

Il primo gruppo comprende i cataloghi in cui sono riportate le informazioni riguardanti la presenza di cavità nel sottosuolo, le informazioni sulla loro ubicazione, i caratteri speleometrici e, solitamente, i rilievi planimetrici e le sezioni della cavità. Fanno parte di questa tipologia di database il Catasto Nazionale delle Grotte d'Italia e il Catasto Nazionale delle Cavità Artificiali a cura della Società Speleologica Italiana (SSI), il cui scopo è quello di curare e promuovere il censimento e la catalogazione delle cavità presenti sul territorio italiano fornendo informazioni di base omogenee a scala nazionale e regionale.

Tab. A1.1 Tabella riepilogativa dei principali Database di cavità, sinkhole e crolli di cavità sismoindotti.

CATEGORIA	NOME	LINK
1 – Database e censimenti delle cavità (Naturali e Artificiali)	DB_MS	http://www.webms.it/
	Catasto Nazionale delle Grotte d'Italia	http://speleo.it/catastogrotte/
	Catasto Nazionale delle Cavità Artificiali	http://catastoartificiali.speleo.it/applications/1.0/
	Catasti Regionali Cavità (Naturali e Artificiali)	Si rimanda ai siti Web delle singole Regioni
	Piani stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)	Si rimanda ai siti Web delle diverse Autorità di Bacino
2 – Database e cataloghi dei crolli di cavità (Sinkhole)	Database Nazionale dei Sinkhole	http://sgi.isprambiente.it/sinkholeweb/
	Database dei Sinkhole Antropogenici di Napoli	http://sgi2.isprambiente.it/cmnapoli/
	Piani stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)	Si rimanda ai siti Web delle diverse Autorità di Bacino
	Inventario dei Fenomeni Franosi Italiani (IFFI)	https://idrogeo.isprambiente.it/app/
3 – Database e cataloghi dei crolli di cavità sismoindotti	Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e nell'area Mediterranea (CFTI5Med)	http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/
	Catalogo italiano degli Effetti Deformativi del suolo Indotti dai forti Terremoti (CEDIT)	http://www.ceri.uniroma1.it/index_cedit.htm 1
	Publicazioni scientifiche, report tecnici, fonti storiche	

Il Catasto Nazionale delle Grotte d'Italia nasce nel 1928 e negli anni '70 riceve una strutturazione decentrata su base regionale, riconosciuta ed ufficializzata da specifiche leggi in diverse regioni d'Italia. Il Catasto è curato dalla Commissione Nazionale Catasto della Società Speleologica Italiana e concentra al suo interno le informazioni dei Catasti regionali raccolte dalle diverse Federazioni Speleologiche Regionali (FSR). Le cavità catastate sono quelle di origine naturale con uno sviluppo spaziale di almeno 5 metri misurato perpendicolarmente alla sezione di ingresso della cavità. Il Catasto è consultabile attraverso il sito del progetto WISH (Web Information System Hyperlink), progetto nato proprio con l'obiettivo di rendere fruibile e consultabile sul web il Catasto Nazionale delle Grotte d'Italia tramite un portale GIS. Il portale permette la navigazione e la consultazione dei dati a livello nazionale, la ricerca di informazioni generali e statistiche, la ricerca speleometrica, ecc., rimandando invece, tramite link, la ricerca puntuale e di dettaglio ai WebGis regionali esistenti o in via di creazione. Questi raccolgono e conservano i dati delle cavità naturali della regione di competenza: il rilievo topografico con la planimetria e le sezioni ed una scheda che riporta le coordinate geografiche, la quota dell'ingresso, il comune, la località o gruppo montuoso in cui ricadono, i dati speleometrici (sviluppo planimetrico, profondità), i dati geologici, idrologici, archeologici ecc., la storia delle esplorazioni ed una breve descrizione. I Catasti regionali hanno regolamenti propri sull'accessibilità e fruizione dei dati. In generale i dati, in quanto informazioni ambientali, sono resi disponibili previa citazione della fonte e nel rispetto della proprietà intellettuale dei dati, che sono degli speleologi che hanno effettuato i rilievi delle cavità.

Le cavità artificiali, di origine antropica, sono archiviate in appositi catasti regionali raggruppati all'interno del Catasto Nazionale delle Cavità Artificiali (nel seguito Catasto Nazionale CA), costituito a far data dal 2 gennaio 1989 e gestito dalla Commissione Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana. Il Catasto Nazionale CA è consultabile, previa autenticazione, tramite Web e i dati catastati contengono al loro interno informazioni analoghe a quelle presenti nel Catasto Nazionale delle Grotte d'Italia (es. coordinate geografiche, dati speleometrici, etc.). I dati delle Cavità Artificiali sono consultabili anche attraverso i Catasti regionali, i quali

hanno regolamenti propri sull'accessibilità e fruizione dei dati, che sono di proprietà del soggetto che li ha prodotti ed elaborati.

Di questo primo gruppo di cataloghi fa parte anche il DB-MS all'interno del quale sono riportate le cavità censite nei Comuni in cui sono stati eseguiti degli Studi di MS. All'interno di questo database le cavità sono distinte in cavità singole e cavità diffuse e per ciascuna di queste è riportata esclusivamente l'informazione cartografica relativa alla presenza delle cavità nel sottosuolo, senza ulteriori dati riguardanti le caratteristiche morfometriche, le litologie interessate e la tipologia di cavità censita (Naturale o Artificiale).

Al secondo gruppo appartengono i database nei quali sono riportati gli eventi di sprofondamento improvviso del suolo (sinkhole), a prescindere dal loro meccanismo di formazione. Il principale tra questi cataloghi è il Database Nazionale dei Sinkhole (Nisio et al., 2007) curato dal Servizio Geologico d'Italia - Dipartimento Difesa del Suolo (ISPRA), in cui sono censiti oltre 1800 sinkhole verificatisi sul territorio italiano. In questo database i fenomeni avvenuti sono distinti in Sinkhole Naturali e Sinkhole Antropici e al suo interno sono archiviate le informazioni riguardanti la loro ubicazione e, dove disponibili, i caratteri morfometrici, la data di accadimento del fenomeno, il meccanismo genetico di formazione, lo stato di attività e la litologia coinvolta.

Un database analogo al precedente è quello dei Sinkhole Antropogenici della Città Metropolitana di Napoli, curato dalla Provincia di Napoli insieme ad ISPRA, nel quale sono riportate le informazioni riguardanti la creazione di sinkhole all'interno del Comune e della Provincia di Napoli. I dati sono consultabili attraverso un WebGis dedicato che contiene l'informazione cartografica sulla localizzazione dei fenomeni censiti insieme alla documentazione fotografica e ai rimandi alle fonti da cui sono stati individuati da cui è possibile recuperare altre informazioni utili. All'interno dello stesso WebGis sono consultabili anche i dati sulla presenza di cavità nel sottosuolo, estratti dai censimenti effettuati dalla Città Metropolitana di Napoli, dal Comune di Napoli e dalla Federazione Speleologica Campana, per molte delle quali è disponibile la planimetria della cavità.

Un caso intermedio tra il primo e il secondo gruppo di fonti è rappresentato dai Piani stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) redatti dalle diverse Autorità di Bacino, i quali in alcuni casi riportano al loro interno le aree in cui si sono verificati in passato crolli di cavità e/o sinkhole, in altri segnalano la presenza di aree interessate da cavità sotterranee quale elemento di pericolosità da tenere in considerazione nella gestione del territorio, catalogando tali zone come aree con pericolosità da frana P4, cioè come "aree a pericolo di frana molto elevato, interessate da frane caratterizzate da elevati volumi e/o velocità di spostamento da estremamente rapido a rapido (da > 3 m/s a > 1.5 m/giorno: frane di crollo, colate di detrito, sinkhole, scorrimenti traslazionali e rotazionali in terra e roccia)" (Cfr. PAI AdBT).

Allo stesso modo di quanto avviene nei PAI alcuni dei fenomeni di sprofondamento del suolo a seguito del crollo di cavità sotterranee sono riportati all'interno dell'Inventario dei Fenomeni Franosi Italiani (IFFI). In questo catalogo tali fenomeni sono archiviati in maniera generica insieme alle frane di crollo e quindi difficilmente distinguibili, a meno di specifici approfondimenti sui singoli casi in esame.

L'ultima categoria di database disponibili è composta dai cataloghi e censimenti al cui interno sono riportati i crolli e gli sprofondamenti del terreno avvenuti a seguito di eventi sismici passati, i cui dati sono di fondamentale importanza per la realizzazione degli Studi di MS in quanto permettono di riportare negli studi le aree dove tali fenomeni si sono verificati in passato, di porre l'attenzione sulla possibile riattivazione degli stessi e fornire informazioni sulle caratteristiche morfologiche litotecniche e stratigrafiche delle aree suscettibili a questa tipologia di fenomeni. Il principale e più completo di questi cataloghi è senza dubbio il Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e nell'area Mediterranea (CFIT5Med) curato dall'INGV (Guidoboni et al., 2019), il quale contiene le informazioni circa gli effetti in superficie dei principali terremoti avvenuti in tempi storici e recenti. Al suo interno è riportata una specifica categoria di fenomeni co-sismici denominata "Crollo di cavità"; per ogni evento catalogato sono riportate le coordinate geografiche, la data e il nome dell'evento sismico di riferimento, la data di accadimento del fenomeno co-sismico, la distanza epicentrale e la magnitudo del terremoto, sia come intensità Macrosismica che come Magnitudo Equivalente; inoltre sono disponibili in consultazione le fonti storiche da cui sono stati individuati i fenomeni censiti. All'interno dello stesso catalogo sono riportati nella categoria "Sprofondamento, avvallamento, voragine" ulteriori casi di formazione di sinkhole a seguito di eventi

sismici che, a seguito di un'attenta rilettura ed eventuali approfondimenti specifici, possono essere ricondotti al possibile crollo di cavità e quindi rappresentano un'ulteriore fonte di dati da tenere in considerazione.

Un database analogo al precedente è quello del Catalogo italiano degli Effetti Deformativi del suolo Indotti dai forti Terremoti (CEDIT) (Fortunato et al., 2012) curato dal CERI dell'Università Sapienza di Roma. Il catalogo è consultabile tramite WebGis e alla voce "Ground changes" riporta il censimento, insieme ad altre tipologie di fenomeni come liquefazioni e cedimenti, alcuni fenomeni di sprofondamento del suolo riferibili al crollo di cavità. Similmente al CFTI5Med per ogni evento censito sono riportate le coordinate geografiche, i dati del terremoto di riferimento e le fonti storiche utili per eventuali approfondimenti.

Ulteriori informazioni sull'accadimento di crolli di cavità co-sismici possono essere recuperate da pubblicazioni scientifiche (Pergalani 1984; Faccenna et al., 1993; Maffei et al., 2005; Del Prete et al., 2010; Santo et al., 2011) e da report tecnici, oltre che dall'analisi delle fonti storiche segnalate nei cataloghi precedentemente descritti.

APPENDICE A2 – Metodi geofisici e geognostici per l'individuazione delle cavità sotterranee e caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso di cavità sotterranee

Le tipologie di indagini per l'individuazione, la definizione della geometria e lo studio delle cavità sotterranee comprendono sia metodi indiretti che diretti:

METODI INDIRETTI (GEOFISICI)

- geoelettrica;
- georadar;
- microgravimetria;
- sismica attiva o passiva.

METODI DIRETTI

- sondaggi meccanici;
- rilievi speleologici;
- rilievi topografici;
- indagini televisive o laser in foro.

I **metodi indiretti (geofisici)** sono basati sulla misura di una proprietà specifica dei vuoti, che si presentano come oggetti a bassa o nulla densità, rigidità nulla ed alta resistività elettrica. Le problematiche di utilizzazione dei vari metodi geofisici risiedono nel fatto che usualmente le indagini vengono eseguite in aree urbane nelle quali le procedure ed i principi adottati per effettuare prospezioni in aperta campagna non possono essere applicati; infatti, la geofisica in area urbana presenta una serie di problemi, ancora non tutti risolti, tanto da poter essere considerata come una specifica branca della geofisica applicata. I problemi principali dell'utilizzo di metodologie geofisiche in zone ad alta urbanizzazione possono essere: i) la presenza di barriere fisiche (muri, strade, edifici, ecc.) che impediscono l'uso di configurazioni geometriche standardizzate; ii) i rumori di fondo di varia natura (vibrazionali, elettrici, correnti vaganti, ecc.) che diminuiscono la sensibilità delle varie strumentazioni. I metodi indiretti non permettono ovviamente nessuna valutazione circa lo stato fisico di stabilità delle calotte e dei pilastri, ma hanno però il vantaggio di essere non distruttivi e applicabili su aree vaste. Le indagini geofisiche dovranno essere condotte utilizzando, preferibilmente, uno dei metodi di prospezione di seguito specificati, opportunamente scelti e tarati in base alle esigenze contingenti dell'area di studio:

- Indagine geoelettrica / elettromagnetica (georadar): si dovrà fare riferimento alle tecniche tomografiche nelle configurazioni e con i passi ritenuti più idonei in relazione all'area da investigare. Le indagini elettromagnetiche (georadar) potranno essere applicate scegliendo i metodi che si riterranno più adatti alla soluzione delle problematiche geologiche dell'area da investigare;
- Indagini gravimetriche: da effettuarsi preferibilmente con tecniche microgravimetriche con una densità utile in funzione dell'area da investigare e con una precisione centimetrica sulla ubicazione planoaltimetrica delle stazioni. La correzione topografica dovrà essere calcolata con particolare riguardo per le zone circostanti ogni stazione. In caso di profili ubicati in zone notevolmente urbanizzate, il sistema di acquisizione dovrà essere dotato di opportuni sistemi di filtraggio;
- Indagini sismiche: da effettuarsi con varie tecniche di acquisizione (attive o passive) e di analisi dei dati, opportunamente scelte sulla base della situazione contingente e della tipologia di dato che si vuole ottenere. Tali indagini dovranno prevedere sia misure sismiche di superficie sia misure sismiche in fori di sondaggio opportunamente attrezzati. Non si potrà, comunque, prescindere dall'esecuzione di tomografie sismiche tra fori adiacenti o tra punti diversi del piano topografico, laddove si riconoscano condizioni critiche.

I **metodi diretti** sono condizionati dalla effettiva possibilità di esplorazione della cavità in relazione alla presenza o meno di accessi ed alle condizioni di sicurezza per i tecnici che li eseguono; oltre ai rilevamenti speleologici, un metodo diretto che supera questi problemi può essere l'indagine televisiva o laser in foro di sondaggio. I diversi metodi diretti permettono, per quanto possibile, di individuare il reale andamento plano-altimetrico ipogeo. Inoltre, si sottolinea la necessità di una interpretazione diagnostica diretta delle cavità per raggiungere realistiche valutazioni della stabilità e di pericolo geologico che può avvenire soltanto tramite analisi visiva dei pilastri e delle calotte. Il quadro conoscitivo può essere completato da indagini mirate alla ricostruzione del modello geologico e idrogeologico di sottosuolo. Indagini geognostiche di tipo diretto possono essere utilizzate per la ricostruzione delle successioni stratigrafiche ma anche per la determinazione dello spessore delle coperture delle cavità, per individuare l'eventuale presenza di più livelli di cavità, per il prelievo di campioni da sottoporre ad analisi geotecniche di laboratorio, per eventuali prove in foro. Il numero di indagini dirette da eseguire sarà funzione dell'estensione dell'area da caratterizzare.

La **caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso** può essere eseguita mediante indagini geognostiche di tipo diretto e/o indiretto, analisi in sito e/o di laboratorio finalizzate all'identificazione delle proprietà fisiche, parametri di resistenza (a trazione e compressione) e di rigidità (moduli di rigidità, velocità delle onde di taglio) funzionali alla modellazione numerica richiesta nel livello 3 avanzato.

APPENDICE A3 – Metodologie impiegate per la valutazione della vulnerabilità sismica di cavità sotterranee

A3.1 Vulnerabilità sismica di cavità sotterranee

Sotto azioni sismiche, le cavità sotterranee possono essere oggetto di instabilità con conseguenti danneggiamenti ad eventuali strutture e/o infrastrutture che interagiscono con esse (esempio crolli di cavità nel paese di Castelnuovo - AQ - a seguito del terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009; Sica et al., 2013; Evangelista et al., 2016).

Il verificarsi di sprofondamenti e collassi di cavità in condizioni sismiche è legato a diversi meccanismi di collasso che principalmente dipendono dai seguenti fattori:

1. *Tipologia di cavità (e.g. singola cavità, cavità a camere e pilastri, sistemi di cavità);*
2. *Forma della cavità;*
3. *Dimensione della cavità;*
4. *Spessore della copertura al di sopra della cavità (ovvero profondità della cavità);*
5. *Carichi agenti al piano campagna (es. riporti, edifici, strade, ...);*
6. *Resistenza e comportamento meccanico del materiale in cui è ricavata la cavità;*
7. *Intensità dell'azione sismica.*

L'effetto dei singoli fattori predisponenti l'instabilità della cavità (primi 6 fattori in elenco) sotto azioni sismiche è stato studiato in maniera parametrica attraverso analisi numeriche agli elementi finiti, considerando la loro variabilità in relazione alle aree urbane italiane in cui possono ricadere (variabilità desunta dai risultati dello studio bibliografico e statistico contenuti nell' Appendice 1). In questo studio è stata scelta una forma "tipo" di cavità singola esemplificativa su cui effettuare lo studio parametrico (Figura A3.1). Si è scelto il caso di cavità rettangolare le cui dimensioni e le profondità sono state variate compatibilmente con le tipiche geometrie di cavità superficiali in aree urbane (da Appendice 1 e Nocentini et al., 2021), dopo aver verificato la loro stabilità in campo statico.

Riguardo la litologia incassante la cavità, sono state studiate, con riferimento ai risultati ottenuti in Nocentini et al., 2021, le litologie maggiormente ricorrenti sul territorio nazionale per le quali l'effetto della variabilità in termini di resistenza del materiale verrà studiato parametricamente.

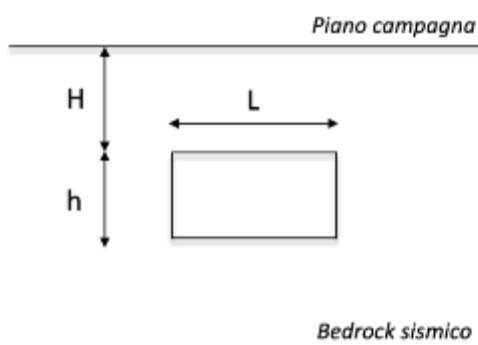


Figura A3.1. Schema geometrico di riferimento per le cavità (in sezione).

In Figura A3.2 viene riportato la flow chart della metodologia proposta che prevede 2 fasi principali:

1. Analisi parametriche FEM di analisi dinamiche accoppiate di cavità sotterranee in cui si tiene in conto l'effetto della variabilità della *i)* litologia e sua resistenza, *ii)* geometria della cavità (L/H), *iii)* carico agente al piano di campagna, *iv)* intensità dell'azione sismica;
2. Definizione e calcolo del fattore di sicurezza (FS);
3. Definizione di abachi semplificati per la valutazione della vulnerabilità sismica delle cavità nel livello 3 semplificato degli studi di MS: gli abachi saranno funzione della *i)* geometria della cavità in termini di L/H e carichi applicati al p.c.; *ii)* intensità sismica attesa e *iii)* litologia attraverso la classe di resistenza del materiale.

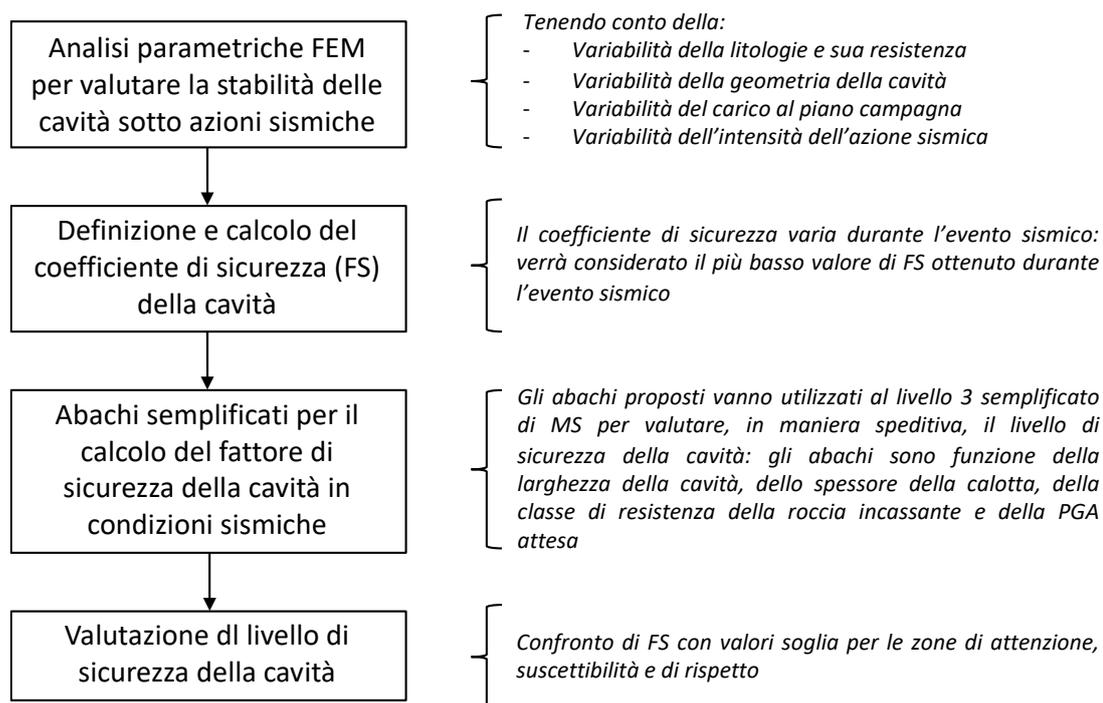


Figura A3.2. Flow chart della metodologia proposta per la valutazione della vulnerabilità sismica di cavità sotterranee.

In particolare, l'effetto della variabilità dei parametri di cui al precedente punto 1) verrà tenuto in conto come segue:

- **GEOMETRIA:** con riferimento alla geometria rettangolare della cavità scelta per le analisi, l'effetto della variabilità della geometria viene tenuto in conto in termini di L/H (L=larghezza cavità; H=profondità copertura). La scelta dei valori di L/H rispetto ai quali verranno eseguite le analisi, saranno da un lato compatibili con le geometrie ricorrenti in aree urbane, dall'altro saranno compatibili con i criteri di stabilità in condizioni statiche (*i.e.*, $FS_{statico} > 1$). In particolare, in Tabella A3.1 vengono indicate le geometrie di cavità rettangolare che sono state considerate in questo studio.

Tabella A3.1. Analisi parametriche FEM: geometrie delle cavità considerate.

ID geometria rettangolare	Larghezza cavità L (m)	Profondità calotta cavità H (m)	L/H	Numero geometrie	Carichi al p.c.	Numero casi
1.1	2		1			
1.2	5	2	2.5	3	q ₁ - q ₂	6
1.3	10		5			
2.1	5		1			
2.2	10	5	2	4	q ₁ - q ₂	8
2.3	15		3			
2.4	20		4			
3.1	10		1			
3.2	15	10	1.5	3	q ₁ - q ₂	6
3.3	20		2			
TOT	-	-	-	10	2	20

- **CARICHI AL P.C.:** l'effetto della presenza di carichi agenti al piano campagna, che possono corrispondere ad eventuali riporti, ricoprimenti, edifici, strade, ecc., viene tenuta in conto modellando nel modello numerico FEM un carico uniformemente distribuito pari rispettivamente a q₁=50 kN/m² e q₂=150 kN/m². Pertanto, vengono definiti un numero di casi (geometrie x combinazioni di carico) pari a 20 come indicato nella Tabella A3.1.
- **LITOLOGIA:** Al fine di individuare le litologie incassanti le cavità più diffuse in Italia e quindi ricondurre i materiali di interesse alla classificazione di Deere & Miller (1966) riportata in Tabella A3.2, si è condotto un esteso studio di letteratura volto ad individuare, per ciascun litotipo in cui è ricorrente la presenza di cavità antropiche, i principali parametri geotecnici che consentono di classificare la roccia secondo Deere & Miller 1966. Dallo studio condotto, si è concluso che le cavità sono principalmente scavate in rocce con una bassa resistenza a compressione, che generalmente non supera i 25MPa, facendo ricadere le litologie di interesse nella classe E della Tabella A3.2. Nell'ambito di queste categorie di materiali così individuati ($\sigma_c \leq 25\text{MPa}$), sono stati distinti i tre seguenti sottogruppi:
 - **CLASSE 1: rocce tenere con resistenza a compressione bassa ($6 \leq \sigma_c < 10 \text{ MPa}$)**
Rientrano in questa classe: le calcareniti; le piroclastiti (es. ignimbrite campane)
 - **CLASSE 2: rocce tenere con resistenza a compressione molto bassa ($2 \leq \sigma_c < 6 \text{ MPa}$)**
Rientrano in questa classe: i tufi litoidi e semi-litoidi (es. rosso, nero, giallo); le calcareniti tenere
 - **CLASSE 3: rocce tenerissime con resistenza a compressione bassissima ($\sigma_c < 2 \text{ MPa}$)**
Rientrano in questa classe: le pozzolane (es: pozzolana rossa; pozzolana nera; pozzolana Napoletana); materiali sciolti (es. limi di San Nicandro).

Tabella A3.2. Classifica tecnica della roccia intatta in base alla resistenza a compressione uniassiale (Deere & Miller 1966).

CLASSE	DESCRIZIONE	σ_c (MPa)
A	Resistenza molto alta	> 200
B	Resistenza alta	100 - 200
C	Resistenza media	50 - 100
D	Resistenza bassa	25 - 50
E	Resistenza molto bassa	< 25

Sulla base di queste tre classi così definite da un punto di vista qualitativo, sono stati definiti tre set di parametri geo-meccanici rappresentativi di ciascuna classe utilizzati per le analisi numeriche di stabilità delle cavità come mostrati in Tabella A3.3.

Tabella A3.3. Parametrizzazione geo-meccanica delle rocce tenere e tenerissime (classe E di Deere & Miller 1966) incassanti le cavità sotterranee italiane.

Parametri		CLASSE 1 Resistenza bassa	CLASSE 2 Resistenza molto bassa	CLASSE 3 Resistenza bassissima
γ	kN/m ³	18	16	15
E	kPa	5e6	2e6	1e6
v	-	0.3	0.3	0.3
c'	kPa	1400	866	150
ϕ	°	38	30	40
Vs	m/s	1024	687	485
σ_t	kPa	500	300	150

- i) **AZIONE SISMICA:** l'effetto dell'intensità dell'azione sismica è stato tenuto in conto selezionando un set di 12 segnali reali accelerometrici elencati in Tabella A3.4. La scelta dei segnali è stata effettuata variando in un certo range i valori di PGA_{max} e PGV_{max} dei singoli segnali, tenendo in considerazione anche le indicazioni derivanti dall'analisi degli eventi presenti in bibliografia. In Tabella A3.4 i segnali sono riportati per PGA_{max} crescente mentre in Figura A3.3 vengono mostrati i range di variabilità di tutte le variabili considerate (*i.e.*, PGA_{max} e PGV_{max}).

Tabella A3.4. Set di accelerogrammi scelti per le analisi parametriche FEM.

Id	EVENTO	DATA	M_w	PGA_{max} (g)	PGV_{max} (cm/s)	f_{max} (Hz)
1	Grecia	07.09.1999	5.8	0.118	8.90	2.33
2	L'Aquila	09.04.2009	5.4	0.146	2.37	11.26
3	Sud Italia	09.09.1998	5.6	0.161	2.23	1.56
4	Cosenza	25.10.2012	5.0	0.182	11.23	3.48
5	Centro Italia	26.10.2016	5.4	0.192	8.53	2.91
6	Visso	26.10.2016	5.9	0.210	20.96	1.06
7	Sud Grecia	15.09.1986	4.8	0.232	22.96	1.34
8	Norcia	30.10.2016	6.5	0.264	26.39	0.88
9	Grecia	15.10.2016	5.5	0.287	15.58	2.68
10	Imperial Valley	15.10.1979	6.4	0.315	31.49	1.90
11	Friuli 3 th shock	15.09.1976	6.0	0.341	23.60	5.10
12	Loma Prieta	18.10.1989	6.9	0.367	44.69	0.51

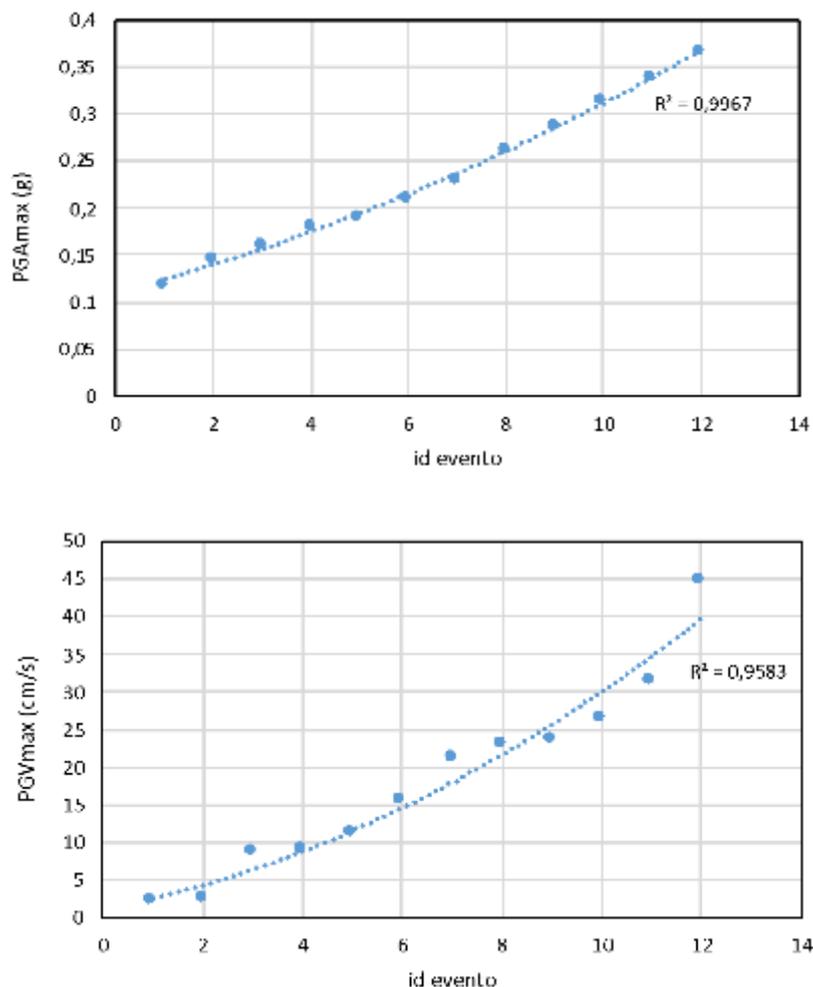


Figura A3.3. Scelta set di segnali accelerometrici: variazione di PGAmax, e PGVmax.

Pertanto, per ciascuna classe litologica (*i.e.*, Classe 1, Classe 2, Classe 3) è stato realizzato un numero di analisi pari a 240 per un totale di 720 analisi come mostrato in Tabella A3.5.

Tabella A3.5. Numero totale analisi per una classe litologica e livello di resistenza.

Numero geometrie	Numero carichi p.c.	Numero segnali	Numero classi	Numero analisi
10	2	12	3	720

A3.2 Applicazione della metodologia proposta

Sulla base della metodologia proposta nel paragrafo precedente per la valutazione della vulnerabilità sismica di cavità sotterranee, si riporta, di seguito, un esempio della sua applicazione al caso di cavità rettangolare #1.3 con larghezza $L=10\text{m}$, altezza $h=5\text{m}$ e profondità $H=2\text{m}$, che corrisponde al caso di una cavità molto superficiale. In particolare, viene discusso il modello numerico definito *ab hoc* per la Classe 2 di resistenza della roccia ed un carico applicato al piano campagna pari a q_2 . In Figura A3.4 viene riportato il modello numerico implementato in Plaxis 2D. Il modello numerico ha una profondità di 50m dove è stato posto il bedrock sismico ed una larghezza di 400 al fine di limitare l'effetto di riflessione delle onde sui bordi che sono stati modellati con contorni assorbenti (Lysmer and Kuhlemeyer, 1969). La risposta dinamica del modello numerico così definito è stata dapprima validata confrontando i risultati di un'analisi dinamica free-field sotto noise in termini di frequenza dominante con la frequenza calcolata dalla relazione elastica $f=V_s/4H$.

Validato il modello, viene impostata l'analisi numerica nelle seguenti fasi:

1. calcolo stato tensionale iniziale pre-scavo nell'intero dominio;
2. calcolo stato tensionale indotto dallo scavo della cavità;
3. analisi dinamiche utilizzando il set di 12 segnali scelto.

Nelle fasi 2) e 3) vengono calcolati rispettivamente i coefficienti di sicurezza iniziali (FS_{iniziale}), cioè quello precedente all'applicazione del carico sismico, e quello dinamico attinto durante il sisma (FS_{dinamico}),

Il coefficiente di sicurezza (sia statico che dinamico) in particolare, viene calcolato come rapporto tra il momento resistente, M_{res} , dello spessore di roccia in corrispondenza della porzione resistente della calotta (*i.e.*, H) e il corrispondente momento agente, M_{agente} , nella sezione più sollecitata nella relativa fase di calcolo considerata (fase 2 statica e fase 3 dinamica). Il valore di M_{agente} viene calcolato come l'integrale della distribuzione delle tensioni a compressione σ_{xx} lungo la sezione considerata. Nel caso di FS_{dinamico} , dal momento che durante l'evento sismico considerato c'è una continua redistribuzione delle tensioni e dunque delle sollecitazioni nell'intorno della cavità, il valore di M_{agente} considerato è il valore più alto mobilitato durante la storia temporale che dà luogo al valore più basso del coefficiente di sicurezza.

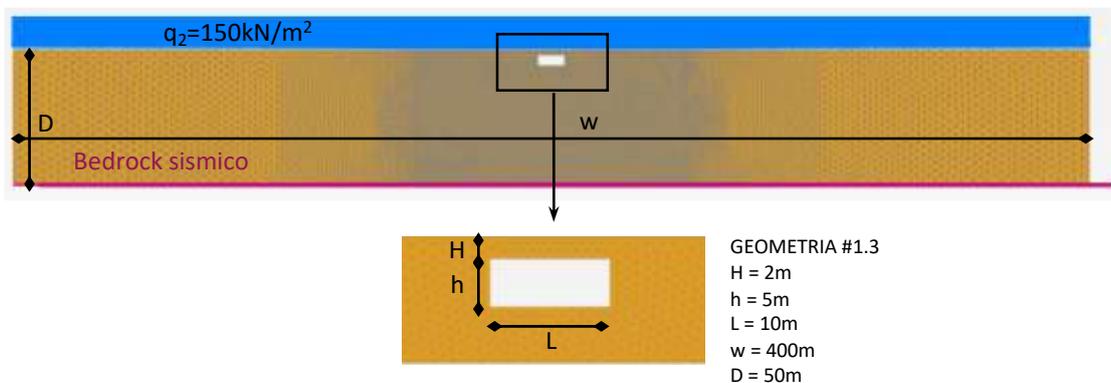


Figura A3.4. Mesh numerica implementata in Plaxis 2D (modificato da Fabozzi et al., 2021a,b).

Per comprendere i meccanismi deformativi che nascono nell'intorno della cavità prima dell'applicazione del carico sismico (condizione iniziale) e durante l'evento sismico, si riportano in Figura A3.5 e in Figura A3.6 gli isocontorni delle σ_{xx} in condizioni iniziali e durante alcuni istanti temporali del segnale accelerometrico relativo al terremoto di Loma Prieta (1989), preso ad esempio, in corrispondenza della sezione di mezzeria (cx) e delle estremità di destra (dx) e di sinistra (sx) della copertura (a filo cavità).

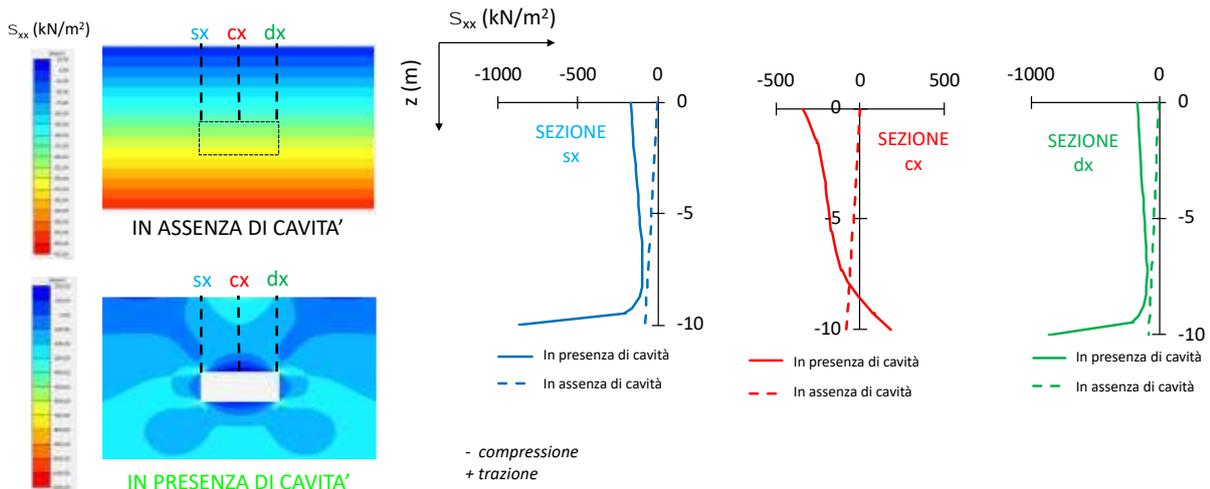


Figura A3.5. Distribuzione delle σ_{xx} in condizioni statiche in presenza e in assenza di cavità della geometria #1.3 (Classe 1 di resistenza, sovraccarico q2). (modificato da Fabozzi et al., 2021a,b).

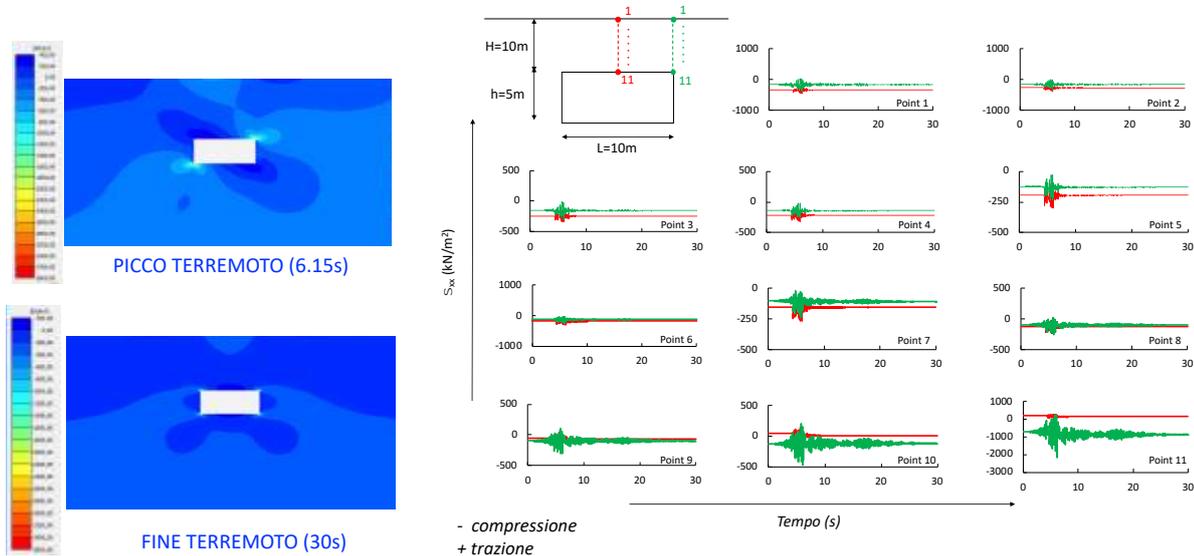


Figura A3.6. Distribuzione delle σ_{xx} in condizioni dinamiche durante il terremoto di Loma Prieta del 18.10.1989, geometria #1.3 (Classe 1 di resistenza, sovraccarico q2). (modificato da Fabozzi et al., 2021a,b).

In condizioni statiche, la copertura risulta avere un comportamento a trave con carico distribuito uniformemente: fibre compresse superiori e fibre tese inferiori. Durante l'evento sismico le sezioni di riferimento tendono a comprimersi con valori di picco in corrispondenza delle sezioni a filo cavità. Pertanto, si può osservare come le sezioni critiche in corrispondenza della copertura della cavità cambiano in funzione dell'azione considerata (sezione di mezzeria in condizioni statiche e sezioni filo cavità in condizioni sismiche) così come i meccanismi di deformazione.

Coerentemente con quanto osservato, in condizioni statiche, in corrispondenza delle sezioni sx (per simmetria uguale alla sezione dx) e cx, viene calcolato un valore di $FS_{iniziale}$ pari rispettivamente a 12 e 4 come mostrato in Figura A3.7, mentre in condizioni dinamiche, in corrispondenza delle sezioni sx (per simmetria uguale alla sezione dx) e cx, viene calcolato un valore di $FS_{terremoto-picco}$ pari rispettivamente a 1.6 e 3.6 all'istante $t=6.15$ s della time history e un valore di $FS_{terremoto-finale}$ pari rispettivamente a 8 e 4.3. Pertanto, le condizioni statiche iniziali della sezione centrale non cambiano sostanzialmente durante lo scuotimento, anzi si verifica un leggero aumento di FS alla fine dello scuotimento dovuto alla ridistribuzione delle sollecitazioni. Al contrario, si osserva un'importante riduzione del coefficiente di sicurezza nelle sezioni laterali sia durante che al termine dello scuotimento (si calcola una riduzione del coefficiente di sicurezza statico pari rispettivamente all'86% e al 25%

circa) a causa dell'elevata intensità sismica del terremoto prescelto, evidenziando l'effetto delle modifiche indotte dal terremoto dell'equilibrio statico sotto carichi gravitazionali. In definitiva, il valore di FS dopo il terremoto aumenta nella sezione (quella centrale) dove $FS_{iniziale}$ era più basso e non si riduce al di sotto dell'unità nelle sezioni laterali, quindi la stabilità del tetto della cavità prescelta non è compromessa nel caso in esame.

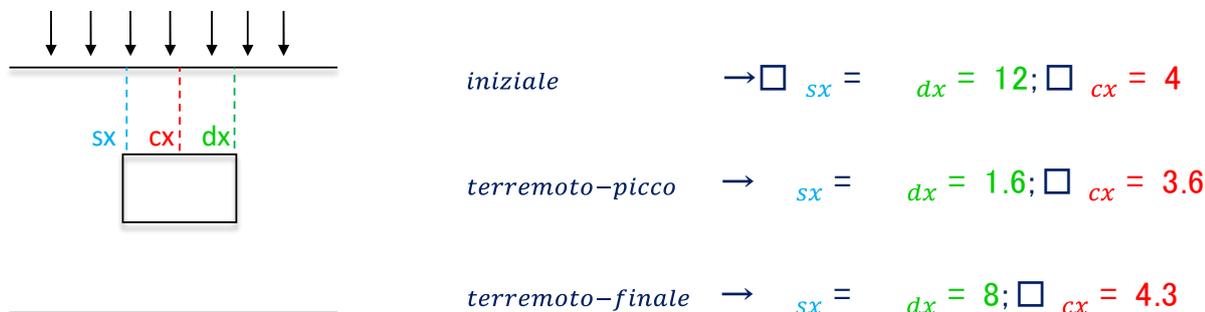


Figura A3.7. Coefficiente di sicurezza in condizioni statiche e dinamiche per la cavità rettangolare #1.3 (Classe 1 di resistenza, sovraccarico q_2).

Per generalizzare l'esito dello studio parametrico proposto, i valori di $FS_{dinamico}$, calcolati come il minimo tra le sezioni centrale e laterale, sono stati elaborati in funzione dell'intensità crescente di PGA come mostrato Figura A3.8 per il caso fin ora esaminato #1.3.

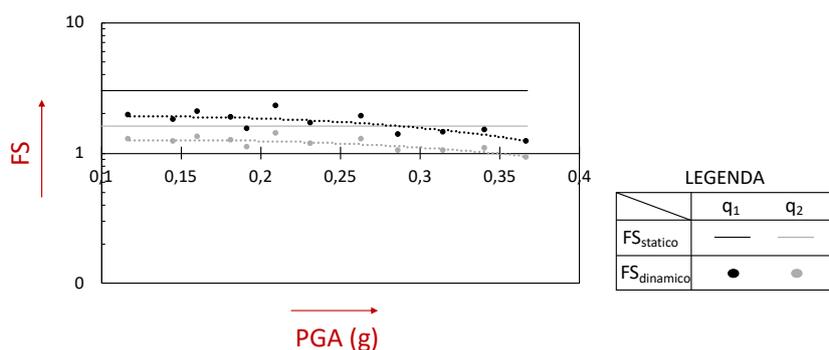


Figura A3.8. Variazione del coefficiente di sicurezza con la PGA per la cavità rettangolare #1.3 (Classe 1 di resistenza, sovraccarico q_2). (modificato da Fabozzi et al., 2021a,b).

Come si può osservare, *i*) FS decresce con l'aumento dell'intensità sismica espressa in termini di PGA; *ii*) valori più alti di FS sono attesi per q_1 rispetto a q_2 , stante la minore entità del carico distribuito al piano campagna nel primo caso.

Risultati simili sono stati ottenuti per tutte le geometrie e combinazioni di analisi sintetizzate in Tabella A3.1 e A3.5. I valori così calcolati del coefficiente di sicurezza vanno confrontati con i valori soglia riportati nella Linea Guida pari rispettivamente a $FS_{ZS,ICS} = 3$ e $FS_{ZR,ICS} = 1,5$ come proposto in Fabozzi et al., 2021a,b per poter valutare il livello di sicurezza della cavità in esame e definirne la zona.

A3.3 Abachi semplificati dei fattori di sicurezza delle cavità in condizioni dinamiche

Al fine di facilitarne il calcolo, i risultati ottenuti dallo studio parametrico in termini di coefficiente di sicurezza sono stati rielaborati per definirne abachi semplificati dei fattori di sicurezza delle cavità in condizioni dinamiche in funzione della geometria, della resistenza del materiale e dell'intensità dell'azione sismica.

CLASSE 1 - $0 < q \leq 100 \text{ kN/m}^2$

FS (PGA ≤ 0,25g) CLASSE 1 0 < q ≤ 100 kN/m ²				
H (m)	L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 15	15 < L ≤ 20
H ≤ 2	FS > 3	FS < 1,5	-	-
2 < H ≤ 5	FS > 3	FS > 3	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5
5 < H ≤ 10	-	FS > 3	FS > 3	1,5 ≤ FS ≤ 3
H > 10	-	-	FS > 3	FS > 3

FS (PGA > 0,25g) CLASSE 1 0 < q ≤ 100 kN/m ²				
H (m)	L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 15	15 < L ≤ 20
H ≤ 2	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5	-	-
2 < H ≤ 5	FS > 3	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5	FS < 1,5
5 < H ≤ 10	-	FS > 3	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5
H > 10	-	-	FS > 3	FS > 3

CLASSE 1 - 100 < q ≤ 200 kN/m²

FS (PGA ≤ 0,25g) CLASSE 1 100 < q ≤ 200 kN/m ²				
H (m)	L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 15	15 < L ≤ 20
H ≤ 2	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5	-	-
2 < H ≤ 5	FS > 3	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5	FS < 1,5
5 < H ≤ 10	-	FS > 3	1,5 ≤ FS ≤ 3	1,5 ≤ FS ≤ 3
H > 10	-	-	FS > 3	FS > 3

FS (PGA > 0,25g) CLASSE 1 100 < q ≤ 200 kN/m ²				
H (m)	L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 15	15 < L ≤ 20
H ≤ 2	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5	-	-
2 < H ≤ 5	1,5 ≤ FS ≤ 3	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5	FS < 1,5
5 < H ≤ 10	-	FS > 3	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5
H > 10	-	-	FS > 3	FS > 3

CLASSE 2 - 0 < q ≤ 100 kN/m²

FS (PGA ≤ 0,25g) CLASSE 2 0 < q ≤ 100 kN/m ²				
H (m)	L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 15	15 < L ≤ 20
H ≤ 2	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5	-	-
2 < H ≤ 5	FS > 3	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5	FS < 1,5
5 < H ≤ 10	-	FS > 3	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5
H > 10	-	-	FS > 3	FS > 3

FS (PGA > 0,25g)				
------------------	--	--	--	--

CLASSE 2 $0 < q \leq 100 \text{ kN/m}^2$				
H (m)	$L \leq 5$	$5 < L \leq 10$	$10 < L \leq 15$	$15 < L \leq 20$
$H \leq 2$	$1,5 \leq FS \leq 3$	$FS < 1,5$	-	-
$2 < H \leq 5$	$1,5 \leq FS \leq 3$	$1,5 \leq FS \leq 3$	$FS < 1,5$	$FS < 1,5$
$5 < H \leq 10$	-	$1,5 \leq FS \leq 3$	$1,5 \leq FS \leq 3$	$FS < 1,5$
$H > 10$	-	-	$1,5 \leq FS \leq 3$	$1,5 \leq FS \leq 3$

CLASSE 2 - $100 < q \leq 200 \text{ kN/m}^2$

FS (PGA $\leq 0,25g$) CLASSE 2 $100 < q \leq 200 \text{ kN/m}^2$				
H (m)	$L \leq 5$	$5 < L \leq 10$	$10 < L \leq 15$	$15 < L \leq 20$
$H \leq 2$	$FS < 1,5$	$FS < 1,5$	-	-
$2 < H \leq 5$	$1,5 \leq FS \leq 3$	$FS < 1,5$	$FS < 1,5$	$FS < 1,5$
$5 < H \leq 10$	-	$FS > 3$	$1,5 \leq FS \leq 3$	$FS < 1,5$
$H > 10$	-	-	$FS > 3$	$FS > 3$

FS (PGA $> 0,25g$) CLASSE 2 $100 < q \leq 200 \text{ kN/m}^2$				
H (m)	$L \leq 5$	$5 < L \leq 10$	$10 < L \leq 15$	$15 < L \leq 20$
$H \leq 2$	$FS < 1,5$	$FS < 1,5$	-	-
$2 < H \leq 5$	$1,5 \leq FS \leq 3$	$1,5 \leq FS \leq 3$	$FS < 1,5$	$FS < 1,5$
$5 < H \leq 10$	-	$1,5 \leq FS \leq 3$	$1,5 \leq FS \leq 3$	$FS < 1,5$
$H > 10$	-	-	$1,5 \leq FS \leq 3$	$1,5 \leq FS \leq 3$

CLASSE 3 - $0 < q \leq 100 \text{ kN/m}^2$

FS (PGA $\leq 0,25g$) CLASSE 3 $0 < q \leq 100 \text{ kN/m}^2$				
H (m)	$L \leq 5$	$5 < L \leq 10$	$10 < L \leq 15$	$15 < L \leq 20$
$H \leq 2$	$FS < 1,5$	-	-	-
$2 < H \leq 5$	$1,5 \leq FS \leq 3$	$FS < 1,5$	-	-
$5 < H \leq 10$	-	$FS > 3$	$1,5 \leq FS \leq 3$	-
$H > 10$	-	-	$1,5 \leq FS \leq 3$	$1,5 \leq FS \leq 3$

FS (PGA $> 0,25g$) CLASSE 3 $0 < q \leq 100 \text{ kN/m}^2$				
H (m)	$L \leq 5$	$5 < L \leq 10$	$10 < L \leq 15$	$15 < L \leq 20$
$H \leq 2$	$FS < 1,5$	-	-	-
$2 < H \leq 5$	$FS < 1,5$	$FS < 1,5$	-	-
$5 < H \leq 10$	-	$1,5 \leq FS \leq 3$	$FS < 1,5$	-
$H > 10$	-	-	$1,5 \leq FS \leq 3$	$1,5 \leq FS \leq 3$

CLASSE 3 - $100 < q \leq 200 \text{ kN/m}^2$

FS (PGA $\leq 0,25g$) CLASSE 3				
------------------------------------	--	--	--	--

100 < q ≤ 200 kN/m ²				
	L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 15	15 < L ≤ 20
H ≤ 2	FS < 1,5	-	-	-
2 < H ≤ 5	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5	-	-
5 < H ≤ 10	-	1,5 ≤ FS ≤ 3	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5
H > 10	-	-	1,5 ≤ FS ≤ 3	1,5 ≤ FS ≤ 3

H (m)	FS (PGA > 0,25g) CLASSE 3 100 < q ≤ 200 kN/m ²			
	L ≤ 5	5 < L ≤ 10	10 < L ≤ 15	15 < L ≤ 20
H ≤ 2	FS < 1,5	-	-	-
2 < H ≤ 5	FS < 1,5	FS < 1,5	-	-
5 < H ≤ 10	-	FS < 1,5	FS < 1,5	FS < 1,5
H > 10	-	-	1,5 ≤ FS ≤ 3	FS < 1,5

Confrontati i valori del coefficiente di sicurezza desunti da abaco con i valori soglia, è possibile definire le ZS e ZR che vanno dimensionate secondo le indicazioni riportate di seguito.

6.2 A3.4 Dimensionamento delle Zone di Instabilità

Il dimensionamento proposto per le ZA, ZS e delle ZR, corrisponde all'area di influenza in superficie delle cavità in condizioni iniziali, in funzione della geometria e caratteristiche meccaniche del materiale, In particolare:

- I valori proposti per il dimensionamento delle ZR sono stati desunti considerando l'area di influenza in superficie delle cavità, in funzione della geometria e caratteristiche meccaniche del materiale, come mostrato in Figura A3.9. Quest'ultima mostra, come esempio per il caso Classe 1 condizione di carico q₂, le curve di subsidenza di ciascuna geometria che mostrano la distanza oltre la quale l'effetto della cavità si estingue in termini di spostamenti. Pertanto, per le ZR, sono stati individuati valori per ciascuna classe del materiale e condizione di carico, oltre che naturalmente della classe di PGA;
- Per il dimensionamento delle ZS, invece, non viene fatta distinzione in termini di classe di resistenza del materiale e i valori proposti fanno riferimento alla sola Classe 3. Questa scelta vuole tenere in conto l'incertezza legata alla conoscenza della classe di resistenza del materiale che si potrebbe avere nel livello 3 semplificato e che solo nel livello 3 avanzato viene eliminata attraverso l'implementazione di indagini specifiche per la caratterizzazione geo-meccanica dell'ammasso, Pertanto, per le ZS, le aree sono considerate tutte appartenenti alla Classe 3 di resistenza del materiale e i corrispondenti valori sono quindi funzione della sola Classe 3 del materiale e delle condizione di carico, oltre che naturalmente della classe di PGA;
- Per il dimensionamento delle ZA, distinguiamo due casi, il caso in cui le dimensioni in pianta della cavità sono note, e il caso in cui le dimensioni delle cavità non sono note. Nel primo caso (dimensioni della cavità note), la ZA viene calcolata come L*m dove L è la dimensione (nota) della cavità mentre m=3.5 è il massimo valore di buffer calcolato per la Classe 3 delle ZS; nel secondo caso (dimensioni della cavità non note) invece, la ZA è pari alla condizione più sfavorevole (massimo valore di L e massimo valore di m) desunta dalle aree di influenza delle ZS.

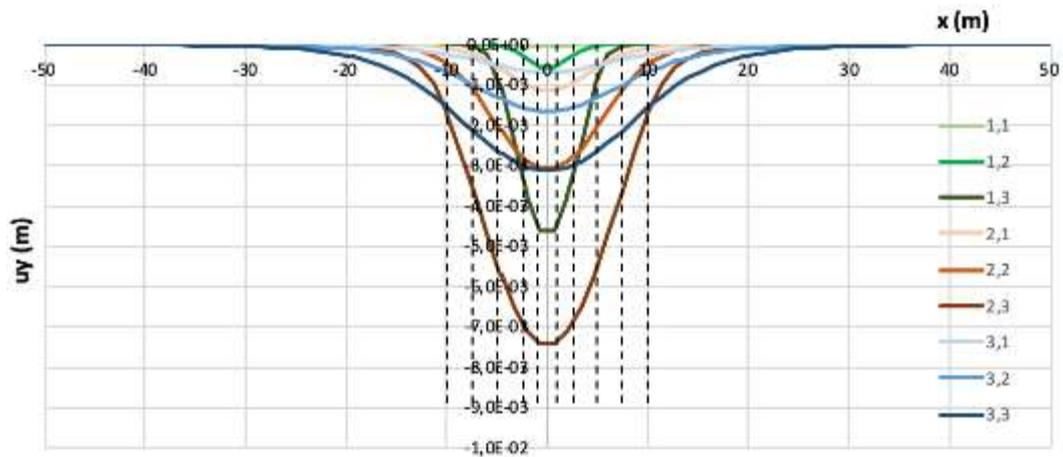
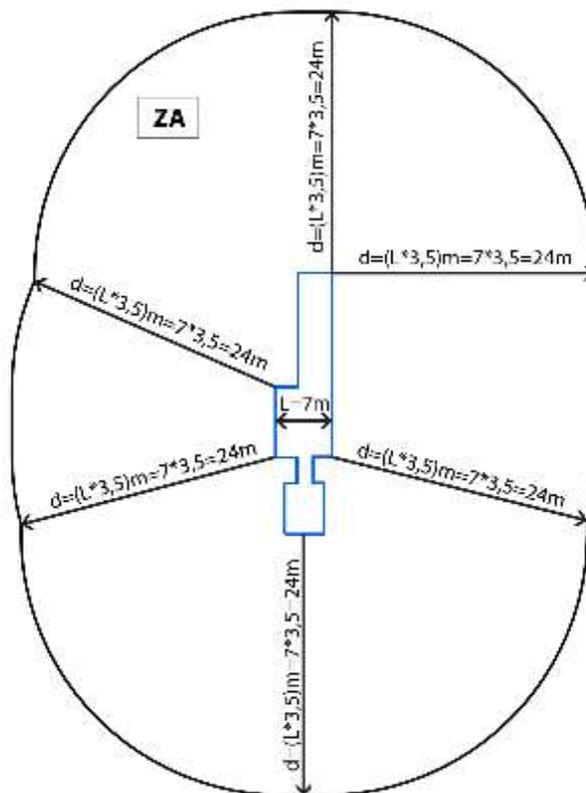


Figura A3.9. Esempio conche di subsidenza cavità Classe 1 di resistenza, sovraccarico q_2 .

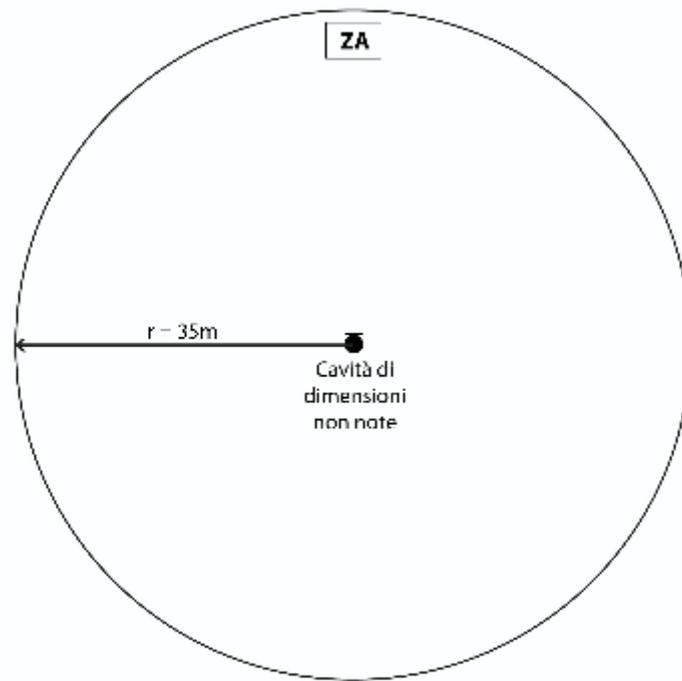
Di seguito sono riportati alcuni esempi di rappresentazione delle ZA, nell'ipotesi di geometria nota (geometria di forma generica) e geometria non nota.

Per le ZS e le ZR si possono seguire gli stessi criteri, facendo però riferimento alle dimensioni delle corrispondenti zone proposte in §3.3 e §3.4, rispettivamente.

ESEMPIO DI RAPPRESENTAZIONE (in pianta) DELLE ZA_{ICS} - (caso L noto)



ESEMPIO RAPPRESENTAZIONE (in pianta) DELLE ZA - CAVITA' (caso L non noto)



7 APPENDICE A4 – Metodi di intervento per la mitigazione della vulnerabilità sismica di cavità sotterranee

Una volta valutata la condizione di instabilità di una cavità in condizioni sismiche, due principali tipologie di intervento possono essere individuate per la sua messa in sicurezza:

- riempimento della cavità;
- consolidamento strutturale della cavità.

L'intervento di riempimento deve essere progettato in relazione al materiale più idoneo da immettere nella cavità, il quale deve assicurare una permeabilità ed una rigidità dello stesso ordine di grandezza dell'ammasso circostante. Si fa inoltre osservare che alcune cavità possono avere una rilevanza storico-artistica e culturale, della quale va tenuto conto nel progettare l'intervento di consolidamento.

In generale l'intervento deve essere tale da:

- ripristinare la continuità dell'ammasso con un materiale che abbia, per quanto possibile, caratteristiche meccaniche (rigidità, resistenza alla compressione e deformabilità) prossime al materiale circostante;
- mantenere stabile nel tempo il "contatto" e quindi la continuità fra il riempimento e le pareti della cavità, ovvero il materiale non deve avere un ritiro rilevante con il tempo;
- alterare il meno possibile lo stato tensionale dell'intorno della cavità per evitare di sovraccaricare le aree limitrofe che hanno raggiunto un proprio equilibrio;
- non causare una riduzione di permeabilità sensibile nelle formazioni che sono sede di moti di filtrazione;
- garantire la compatibilità ambientale.

I materiali utilizzabili per il riempimento possono essere costituiti da pozzolane/sabbie calcarenitiche e calce fluida in acqua, oppure dei calcestruzzi a granulometria sabbiosa appositamente progettati per tali riempimenti, i quali hanno la caratteristica di essere permeabili e di avere una densità e rigidità paragonabile agli aggregati pozzolanici/calcarenitici. Inoltre, è importante che tali miscele di riempimento siano facilmente iniettabili e che non richiedano operazioni di compattazione o vibrazione, e che nel contempo garantiscano assenza di assestamenti da segregazione ed una certa stabilità nel tempo. A tale scopo si possono utilizzare dei particolari 'calcestruzzi alleggeriti' costituiti da una miscela a base di leganti idraulici ed una certa quantità di aggregati sabbiosi naturali, fluida, autolivellante, con caratteristiche controllate, priva di segregazione ed essudazione. Quest'ultimo allo stato solido è un prodotto del tutto assimilabile ad un terreno artificiale, idoneo per terreni tufaceo-pozzolanici e/o calcarenitici porosi.

L'intervento di consolidamento dovrà essere tale da mettere in sicurezza ogni parte della cavità, fianchi, pilastri e parti voltate della cavità. Esistono numerose tecniche di intervento di consolidamento, quali ad esempio il rinforzo con Spritz-Beton, le iniezioni di materiali tradizionali (miscele acqua cemento con additivi fluidificanti, composti silicatici o resine non espandenti) o innovativi (resine espandenti). Non è preclusa la possibilità di adottare altre metodologie di rinforzo, come ad esempio la messa in opera di centine metalliche, purché in ogni caso si garantiscano i livelli di sicurezza richiesti dalle vigenti "Norme Tecniche per le Costruzioni – NTC18".

Si fa osservare infine che eventuali interventi di mitigazione della vulnerabilità sismica della cavità, ed in particolare il caso di riempimento dell'intera cavità, possono modificare l'effetto filtro che la cavità esplica al passaggio dell'onda sismica in termini di amplificazione locale e contenuto in frequenza del segnale in ingresso.

Bibliografia

- Bianchi Fasani G., Bozzano F., Cercato M. (2011), The underground cavity network of south-eastern Rome (Italy): an evolutionary geological model oriented to hazard assessment. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 70, 533–542. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0360-0>.
- Buchignani V., D'Amato Avanzi G., Giannecchini R., Puccinelli A., (2008). Evaporite karst and sinkholes: a synthesis on the case of Camaiole (Italy). *Environ. Geol.* 53, 1037–1044. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0730-x>.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, (2020). Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. Versione 4.2. Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e delle Province autonome. Roma, 2020.
- Del Prete, S., Di Crescenzo, G., Santangelo, N., Santo, A. (2010). Collapse sinkholes in Campania (southern Italy): predisposing factors, genetic hypothesis and susceptibility. *Z. Geomorphol.* 54 (2), 259–284. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2010/0054S2-0014>.
- Esposito, E., Porfido, S., Iaccarino, G. & G. Tranfaglia, (2000), Terremoti e centri storici dell'Irpinia: gli effetti del terremoto del 1930. In: *Proc. GeoBen 2000*, CNR-GNDICI 2133, 477-484.
- Evangelista L., Landolfi L., d'Onofrio A., Silvestri F. (2016), The influence of the 3D morphology and cavity network on the seismic response of Castelnuovo hill to the 2009 Abruzzo earthquake. *Bull Earthq Eng.* 2016; 14:3363–3387.
- Fabozzi S., de Silva F., Nocentini M., Peronace E., Bilotta E., Moscatelli M. (2021a) *Seismic vulnerability of shallow underground cavities in soft rock*. COMPDYN 2021 - 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Streamed from Athens, Greece, 27–30 June 2021.
- Fabozzi S., de Silva F., Nocentini M., Peronace E., Bilotta E., Moscatelli M. (2021b) Vulnerabilità sismica di cavità sotterranee in roccia tenera. 39^o Convegno nazionale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida - GNGTS 2021.
- Faccenna C, Florindo F, Funicello R, Lombardi S, (1993), Tectonic setting and Sinkhole Features: case histories from western Central Italy. *Quaternary Proceedings* 3, 47-56.
- Fortunato C., Martino S., Prestininzi A., Romeo R.W., coauthors Fantini A., Sanandrea P. (2012), New release of the Italian catalogue of earthquake-induced ground failures (CEDIT). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, DOI: 10.4408/IJEGE.2012-02.O-05.
- Gruppo di Lavoro MS (2008) - Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica. Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e Province autonome; 3 vol. e 1 DVD.
- Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valentini G. (2019), CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area. *Scientific Data* 6, 80. doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>.
- Lanzo G., Silvestri F., Costanzo A., d'Onofrio A., Martelli L., Pagliaroli A., Sica S., Simonelli A. (2011), Site response studies and seismic microzoning in the Middle Aterno valley (L'Aquila, Central Italy). *Bull Earthq Eng* 9(5):1417–1442
- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, 859–877.
- Maffei A., Martino S., Prestininzi A. (2005). From the geological to the numerical model in the analysis of gravity-induced slope deformations: an example from the central Apennines (Italy). *Eng. Geol.* 78, 215–236.

- Nisio S., Caramanna G., Ciotoli G. (2007). Sinkhole in Italy: first results on the inventory and analysis. In: Parise M., Gunn J. (Eds.), *Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis and Mitigation*. Geological Society of London, Special Publications 279, 23–45.
<https://doi.org/10.1144/SP279.4>.
- Nocentini M, Fabozzi S., Peronace E., Castenetto S. (2021) *Proposal procedure to evaluate the seismic stability of underground cavities at seismic microzonation scale*. Italian Journal of Geosciences (under review).
- Pergalani F. (1984), Alcune note sul terremoto del 1799 nell'area camerte, in "Proposte e ricerche", fasc.13, pp.90-94. Urbino.
- Sanò T. (2011). Risposta sismica locale in presenza di cavità sotterranee. *Ingegneria sismica*, anno XXVIII 2, 25-34.
- Santo A., Ascione A., Del Prete S., Di Crescenzo G., Santangelo N. (2011), Collapse sinkholes distribution in the carbonate massifs of Central and Southern Apennines. *Acta Carsologica* 40 (1), 95–112.
<https://doi.org/10.3986/ac.v40i1.31>.
- Santo A., Santangelo N., De Falco M., Forte G., Valente E. (2019), Cover collapse sinkhole over a deep buried carbonate bedrock: The case study of Fossa San Vito (Sarno - Southern Italy). *Geomorphology*, 345.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106838>.
- Sica S., Dello Russo A., Rotili F., Simonelli A.L. (2013), Ground motion amplification due to shallow cavities in nonlinear soils. *Nat Hazards*.; 71, 1913–1935.
- Verrucci L., Lanzo G., Pagliaroli A. (2012), Effetti della presenza di cavità sulla risposta sismica in superficie. *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2012 - IARG 2012, Padova, 2-4 luglio 2012*.

APPENDICE A5 Inquadramento del fenomeno, censimento dei dati disponibili e analisi statistiche su database e bibliografia esistente

Allo scopo di inquadrare, da un punto di vista fenomenologico il comportamento delle cavità a seguito di eventi sismici, è stata portata avanti un'attenta analisi della bibliografia esistente riguardante questa tipologia di fenomeno e dei dati disponibili all'interno di Database (DB) e Catasti delle cavità e dei crolli sismoindotti, sia a scala nazionale che regionale. Tale attività ha come obiettivi: i) individuare e definire le tipologie di cavità da considerare per la redazione delle Linee Guida; ii) indirizzare nella scelta delle geometrie e dei litotipi da analizzare nelle analisi numeriche; iii) analizzare la distribuzione spaziale delle cavità a scala nazionale e regionale; iv) fornire indicazioni sui parametri discriminanti, predisponenti e innescanti il fenomeno, anche attraverso il confronto con i fenomeni verificatisi in passato a seguito di eventi sismici.

A5.1 Descrizione del fenomeno e definizione delle tipologie di cavità considerate

In presenza di cavità nel sottosuolo, il passaggio di un'onda sismica dà luogo a fenomeni di interazione tra le onde stesse e i vuoti della cavità con conseguenti effetti sia sul moto sismico, che ne risulta modificato, sia sulla stabilità della cavità stessa. Per effetto del passaggio di un'onda sismica, infatti, una cavità può perdere la sua stabilità in termini di resistenza dando luogo ad effetti localizzati (danneggiamenti e/o crolli locali) fino al suo completo collasso (completa instabilità ovvero perdita completa di resistenza). Tali effetti, pertanto, possono essere raggruppati per semplicità come segue:

- Instabilità parziale (i.e. perdita di resistenza parziale) della cavità con possibili danneggiamenti e/o crolli di pilastri, setti, volte, fianchi senza effetti in superficie;
- Instabilità parziale o totale (i.e. perdita di resistenza parziale o completa) della cavità con effetti in superficie;
- Alterazione del moto sismico in superficie.

Le prime due tipologie di fenomeni sono legate al superamento legate all'attingimento della resistenza a rottura dei materiali nell'intorno della cavità con conseguente formazione di meccanismi plastici, che possono causare l'instabilità, con la conseguente formazione di crolli, fratture e cedimenti, che possono causare l'instabilità, parziale o completa, della cavità e generare danneggiamenti e crolli, che in alcuni casi si possono propagare fino al piano campagna con la formazione di voragini (sfornellamenti) (Esposito et al., 2000; Buchignani et al., 2008; Del Prete et al., 2010; Bianchi Fasani et al., 2011; Santo et al., 2011, Santo et al., 2019).

La presenza di cavità nel sottosuolo genera anche complessi fenomeni di amplificazione del moto sismico, legati principalmente alla formazione di onde superficiali lungo le superfici libere che costituiscono la cavità stessa. Numerosi sono gli studi che affrontano tale fenomeno, senza però giungere a conclusioni univoche, evidenziando effetti amplificativi o deamplificativi a seconda dei casi considerati (Lanzo et al., 2011; Sanò, 2011; Verrucci et al., 2012; Sica et al., 2013; Evangelista et al., 2016).

La presente attività riguarda nello specifico lo studio del fenomeno dell'instabilità di cavità sotterranee con effetti in superficie a seguito di eventi sismici (i.e. Instabilità parziale o totale - perdita di resistenza parziale o completa - della cavità con effetti in superficie).

Il fenomeno della creazione improvvisa di sprofondamenti e voragini ("sinkhole") ha subito un notevole incremento negli ultimi decenni, specialmente in contesti antropici, suscitando un sempre maggiore interesse da parte della comunità scientifica e delle amministrazioni pubbliche (Waltham et al., 2005; Caramanna et al., 2008; Bianchi Fasani et al., 2011; Ciotoli et al., 2013, 2015a, 2015b; Meloni et al., 2013; Benson et al., 2016; Nisio 2017). Questo anche perché la diffusa presenza di cavità sotterranee in alcuni contesti urbani italiani, se da un lato rappresenta un patrimonio di quei territori, dall'altro ne costituisce anche un rischio, associato all'instabilità degli ambienti di vuoto sotterraneo che possono avere ripercussioni sulle opere e le infrastrutture soprastanti (Ciotoli et al., 2013; Evangelista & Viggiani 2013; 2015a, 2015b; Nisio et al., 2018).

Ad esclusione della causa innescante (scuotimento sismico), i processi che portano al crollo della volta di cavità sotterranee sono essenzialmente gli stessi che portano alla formazione di alcuni tipi di sinkhole, intendendo per sinkhole tutti quei fenomeni di sprofondamento del suolo, naturale ed improvviso, che hanno dato origine a voragini generalmente di forma sub-circolare e di diametro variabile da alcuni metri a poche centinaia di metri (Beck 2004; Nisio et al., 2007).

In ambito internazionale la classificazione dei sinkhole più completa e condivisa è quella di Waltham et al. (2005), che suddivide gli sprofondamenti in funzione dei processi genetici che li hanno generati, in sei grandi tipologie: da dissoluzione, da crollo, da crollo della copertura, da caduta a goccia, da suffosione (o soffusione), sinkhole sepolti (Figura 1.1).

Riprendendo questa classificazione, Gutierrez et al. (2008), suggeriscono che le tipologie di sinkhole possono essere distinte in termini di: tipologia di processo genetico di formazione (collapse; soffusion, sagging) e tipologia di materiale coinvolto (bedrock, cover, caprock).

Considerando quindi il meccanismo di formazione del fenomeno considerato, cioè l'instabilità di cavità sotterranee con la conseguente formazione di voragini al piano campagna (sforzellamenti; sinkholes), questo può essere classificato come Collapse Sinkhole, e in funzione della litologia interessata in Bedrock/Cover/Caprock Collapse Sinkhole (Figura A5.1).

All'interno di questa categoria (collapse sinkhole) possono essere ricompresi anche i sinkhole antropici (Nisio et al., 2007), cioè le voragini formatesi a causa della presenza nel sottosuolo di cavità di natura antropica, in quanto anche questi eventi sono generalmente legati a fenomeni di crollo, piuttosto che a processi di dilavamento o infiltrazione ad opera di acque superficiali o profonde.

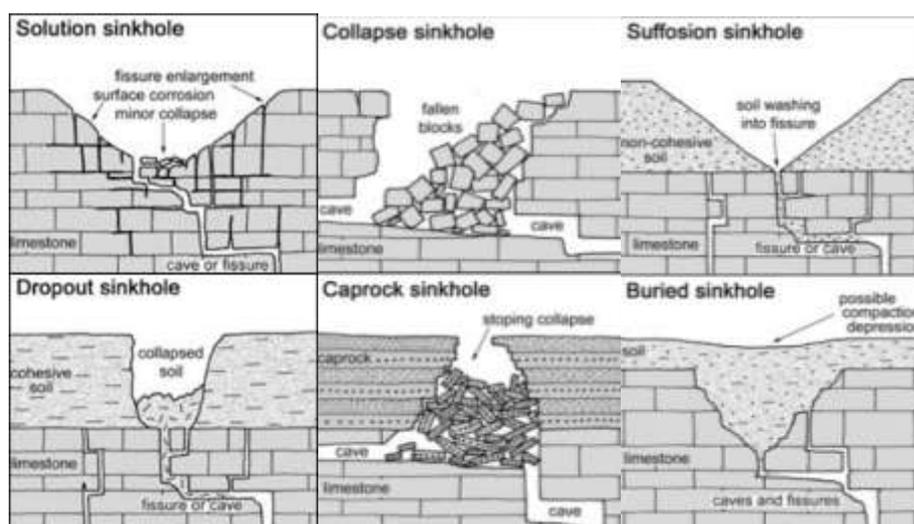


Figura A5.1 – Classificazione dei sinkhole (da Waltham et al., 2005).

Essendo la presenza di una cavità nel sottosuolo il fattore discriminante per il verificarsi del fenomeno di crollo sismo-indotto, considerata la varietà tipologica e le numerose definizioni e metodi di classificazione delle cavità in bibliografia, si è scelto di adottare una definizione univoca di cavità che verrà utilizzata per lo sviluppo delle LG-VSCS.

In questo documento, le cavità sotterranee possono essere distinte in naturali (1) e antropiche (2), così come di seguito definite:

1. Naturale: Per cavità naturale (grotta) si intende, nella sua accezione più ampia, qualsiasi tipo di vuoto, più o meno esteso, presente nel terreno sottostante il suolo (ambiente ipogeo), formatosi a seguito di processi di formazione della roccia e/o di successivi processi di erosione meccanica e/o dissoluzione chimica (Figura A5.2).

In funzione dei processi che hanno portato alla formazione delle cavità naturali (1), queste possono essere ulteriormente classificate in:

- Primarie (Figura 1.2a): cavità legate ai processi di formazione della roccia o a processi tettonici:
 - Vulcanica = Tunnel di lava;
 - Tettonica = Fratture e faglie.
- Secondarie (Figura 1.2b): cavità dovute ai processi di erosione (chimica e meccanica) di rocce solubili e/o fratturate (es. Carbonati; Evaporiti):
 - Orizzontali = gallerie, cunicoli, caverne;
 - Verticali = pozzi.

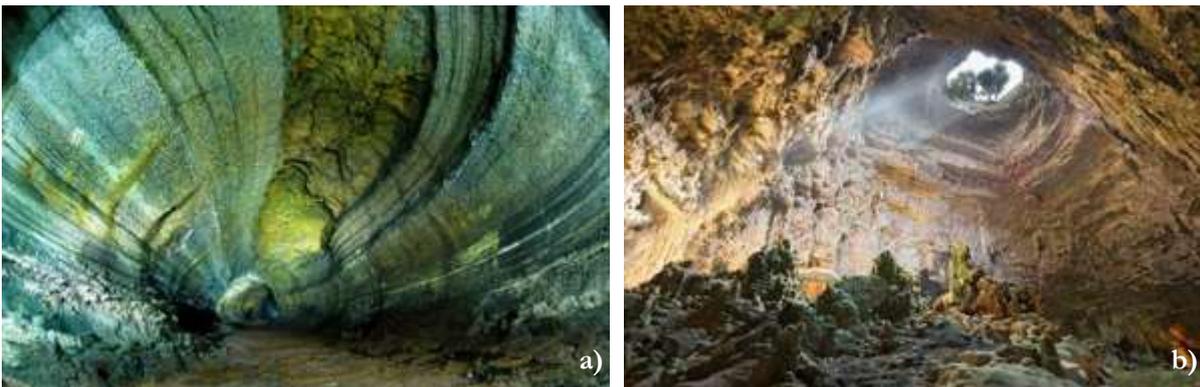


Figura A5.2 – Cavità di origine naturale: a) Primaria (Tunnel di lava, Jeju Island, autore: Korean Culture and Information Service); b) Secondaria (Carsica, Grotte di Castellana, autore: Francesco Cinque).

- 2- Antropica: Le cavità antropiche sono opere sotterranee (scavate, costruite nel sottosuolo o divenute ipogee in seguito alle stratificazioni del tessuto urbano) di origine antropica e di interesse storico, archeologico, urbanistico, geologico ed antropologico.

Le cavità antropiche possono essere classificate in funzione della tipologia di opera e della loro tecnica di realizzazione (Figura A5.3), secondo i criteri utilizzati per la realizzazione del Catasto Nazionale delle Cavità Artificiali a cura della Commissione Nazionale delle Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana (Parise et al., 2013; Betti et al., 2018).

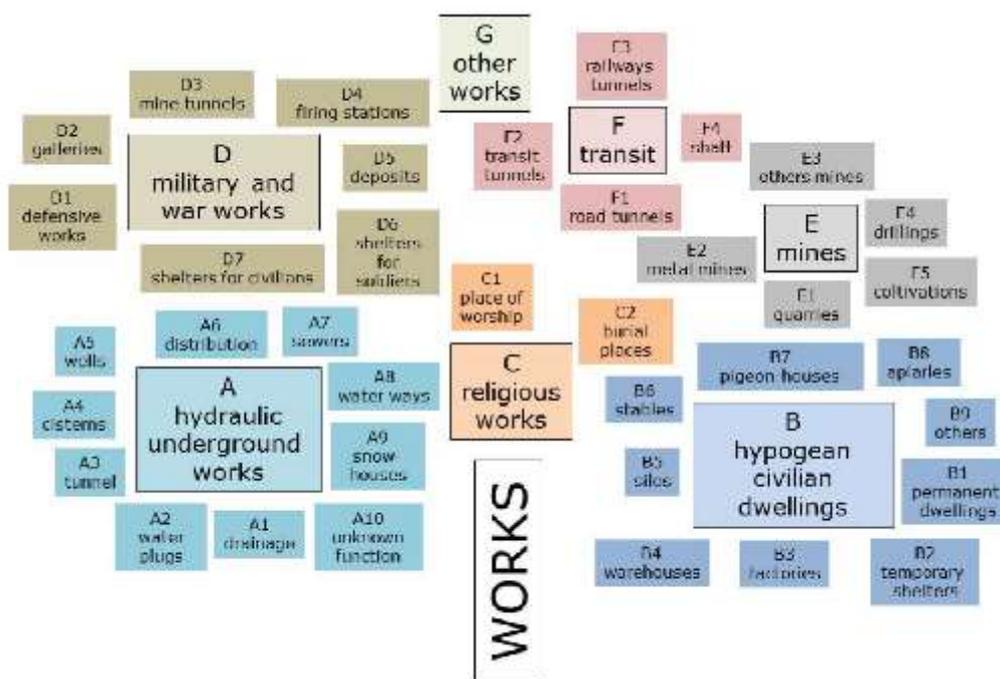


Figura A5.3 – Albero tipologico delle cavità antropiche (da Parise et al., 2013).

All'interno del presente studio si terranno in considerazione sia le cavità di origine naturale che quelle di origine antropica.

Per quanto riguarda le cavità naturali si è deciso di considerare tutte le possibili tipologie, tenendo comunque ben presente che, sul territorio italiano, la maggioranza delle cavità naturali sono costituite da cavità secondarie di origine carsica (Figura A5.2b), spesso ubicate al di fuori dei contesti urbanizzati.

Per le cavità antropiche, si è deciso invece di considerare solamente quelle riconducibili a determinate tipologie tra quelle riportate in Figura A5.3. Nello specifico saranno incluse nelle analisi, e ricomprese nelle casistiche analizzate, solamente le tipologie B (Insediative), C (Culto) ed E (Estrattive). Tale scelta è motivata principalmente dal fatto che tali cavità sono quelle più diffuse all'interno delle aree urbane (Ciotoli et al., 2015; Nisio et al., 2007; Nisio 2018). Inoltre, le altre tipologie di cavità antropiche sono state escluse dalle analisi a causa di motivi geometrici (le opere idrauliche (A) o di transit (F) presentano generalmente sviluppi lineari e/o dimensioni ridotte se paragonate alle tipologie considerate) e/o costruttivi (generalmente si tratta di opere rivestite o rinforzate).

In sintesi, si definiscono cavità sotterranee, ai sensi di quanto contenuto nel presente documento, tutte le tipologie di vuoto di origine naturale presente nel sottosuolo e le cavità di origine antropica di tipologie B (Insediative), C (Culto) ed E (Estrattive), scavate in roccia o in terreni compatti semi-litoidi.

A5.2 Censimento dei dati esistenti sulle cavità sotterranee

Si riporta di seguito una rassegna dei dati raccolti riguardanti la presenza di cavità, naturali ed antropiche, nel sottosuolo italiano e dei fenomeni di instabilità di cavità avvenuti a seguito di eventi sismici. I dati raccolti provengono da banche dati nazionali e regionali, come ad esempio il DB degli studi di MS (DB-MS), il Catasto Nazionale delle Grotte d'Italia o il Database Nazionale dei Sinkhole (ISPRA).

La raccolta di tali dati, di seguito elencati (Tabella A5.1), è finalizzata da una parte a fornire indicazioni e supporto per le analisi di stabilità specifiche, dall'altra alla stesura delle Linee Guida, definendo i dati di base da

considerare per la caratterizzazione delle aree soggette a instabilità di cavità sotto azioni sismiche e fornendo ai tecnici indicazioni sui database da consultare per la realizzazione degli studi di MS e sulle verifiche dei parametri discriminanti e predisponenti il fenomeno, quali:

- tipologia di cavità;
- geometria della cavità e/o di sistemi caveali;
- spessori della copertura;
- litologia e caratterizzazione geotecnica;
- condizioni idrauliche;
- tipologia di instabilità e dimensioni delle aree collassate;
- caratterizzazione evento sismico (intensità, distanza, ...).

I diversi database possono essere distinti (Tabella A5.1), in funzione dei dati presenti, in tre categorie:

1. Database e censimenti delle cavità (Naturali e Artificiali), in cui sono riportati l'ubicazione e, solitamente, la planimetria e/o i caratteri morfometrici delle cavità censite;
2. Database e cataloghi dei crolli di cavità naturali e artificiali (Sinkhole Naturali e Sinkhole Antropici), nei quali sono riportati, a prescindere dal meccanismo di formazione dello stesso, tutti gli eventi di sprofondamento improvviso del suolo censiti sul territorio italiano, la loro ubicazione e i loro caratteri morfometrici;
3. Database e cataloghi dei crolli di cavità sismoindotti, in cui sono riportati i crolli e gli sprofondamenti avvenuti a seguito di eventi sismici.

Tabella A5.1 – Database di cavità, sinkhole e crolli di cavità sismoindotti consultati nel presente studio.

CATEGORIA	NOME	NOTE
1 – Database e censimenti delle cavità (Naturali e Artificiali)	DB_MS	Riporta ubicazione e tipologia (Singola, Diffuse); mancano Liguria, Sardegna, Trentino, Valle d'Aosta
	Catasto Nazionale delle Grotte d'Italia	Solo consultazione; rimanda ai cataloghi regionali; mancano Calabria, Marche, Molise, Trentino
	Catasto Nazionale delle Cavità Artificiali	Solo consultazione; rimanda ai cataloghi regionali; mancano Calabria, Marche, Molise, Trentino
	Catasti Regionali Cavità (Naturali e Artificiali)	Eterogenei per accessibilità e dati disponibili a seconda delle Regioni
	DB_Castelnuovo_USRC	Dati approfonditi e affidabili, ma molto localizzati
2 – Database e cataloghi dei crolli di cavità (Sinkhole)	Database Nazionale dei Sinkhole - ISPRA	Solo consultazione; impossibilità di interrogare il DB
	Database dei Sinkholes Antropici di Napoli	Solo consultazione; impossibilità di interrogare il DB
	IFFI	Eventi catalogati insieme ai fenomeni di crollo
3 – Database e cataloghi dei crolli di cavità sismoindotti:	CFTI 5 Med	Eventi catalogati sia all'interno delle classi Crollo cavità che Sprofondamenti/Voragini
	DB_Castelnuovo_USRC	Dati approfonditi e affidabili, ma molto localizzati
	CEDIT	Eventi catalogati alla voce Ground changes insieme ad altre tipologie di fenomeni (es. cedimenti, liquefazioni)
	Pubblicazioni scientifiche	Informazioni molto disomogenee

A5.3 Analisi statistica delle cavità presenti nel DB MS

Le cavità presenti negli studi di MS sono state analizzate al fine di definirne le tipologie, la loro distribuzione spaziale, le litologie prevalenti e altri parametri utili per indirizzare le analisi numeriche e la stesura delle LG-VSCS.

All'interno del DB-MS sono riportate, alla data di scrittura del presente documento, 11'945 cavità presenti sul territorio italiano, ad eccezione di Liguria, Sardegna, Trentino, Valle d'Aosta per le quali non vengono catalogate alcune cavità. Le cavità vengono distinte in cavità singole (8'838) e cavità diffuse (3'107) (Figura A5.4). La distribuzione delle cavità risulta molto disomogenea, sia a scala nazionale che regionale, con circa il 70% del totale delle cavità localizzate in Veneto (5'416) e Friuli-Venezia Giulia (3'003) (Figura A5.5), di cui in Veneto circa il 15% mappate come diffuse e spesso sovrapposte alle cavità singole (Figure A5.4 e A5.6). Ciò è dovuto in parte alle caratteristiche geologico-geomorfologiche del territorio, ma allo stesso tempo è condizionato dallo

stato di avanzamento degli studi di MS, così come dalla sensibilità regionale a tale argomento e/o a specifiche linee guida d'indirizzo regionale.

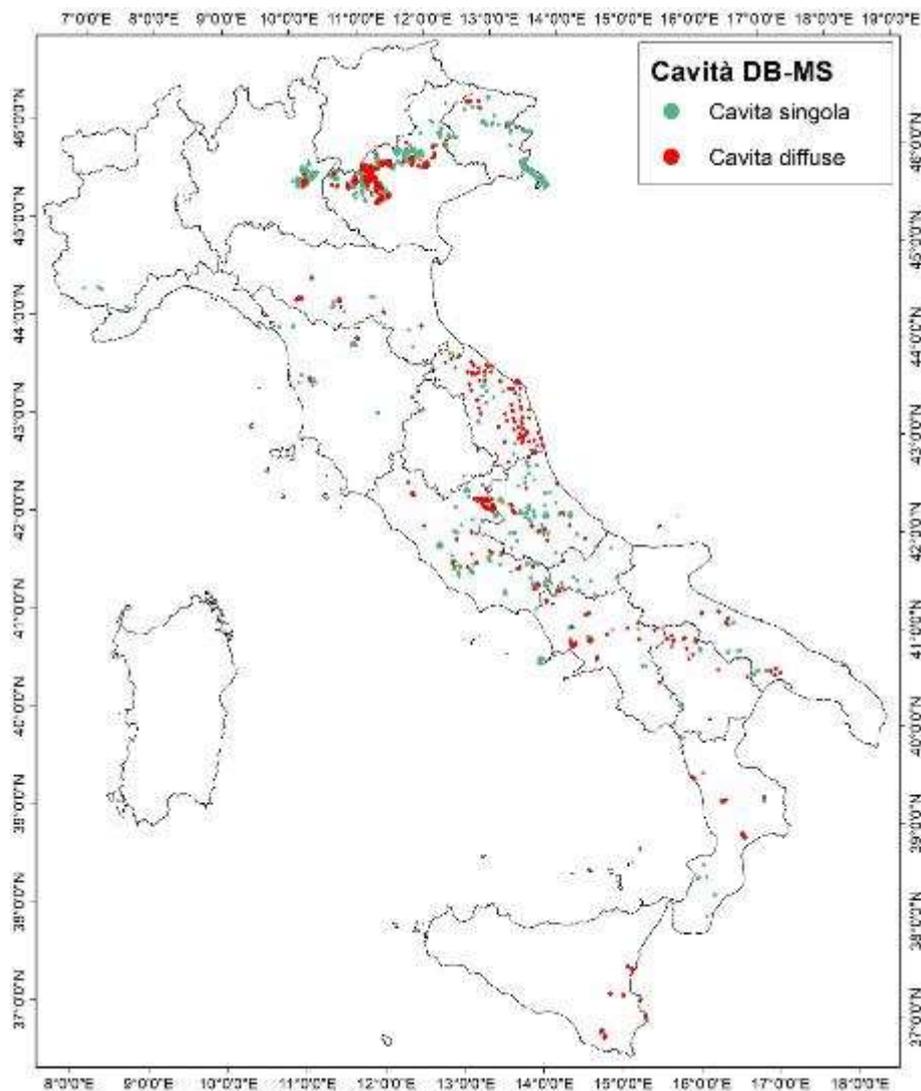


Figura A5.4 – Distribuzione delle cavità del DB-MS (versione giugno 2020) nelle regioni italiane.

In sintesi, ad eccezione di Veneto, Friuli e di alcune regioni del centro Italia (Figura A5.5, A5.6), i dati riportati sono abbastanza scarsi, anche in casi di Regioni con un'elevata copertura di studi di MS (es. Umbria); specialmente se confrontati con quelli presenti nei catasti regionali delle cavità (es. Toscana: 54 cavità riportate nel DB-MS contro le 2'038 cavità del Catasto Grotte Naturali Toscana); Puglia: 105 cavità riportate nel DB-MS contro 3'543 cavità del Catasto Grotte e Cavità Artificiali Puglia).

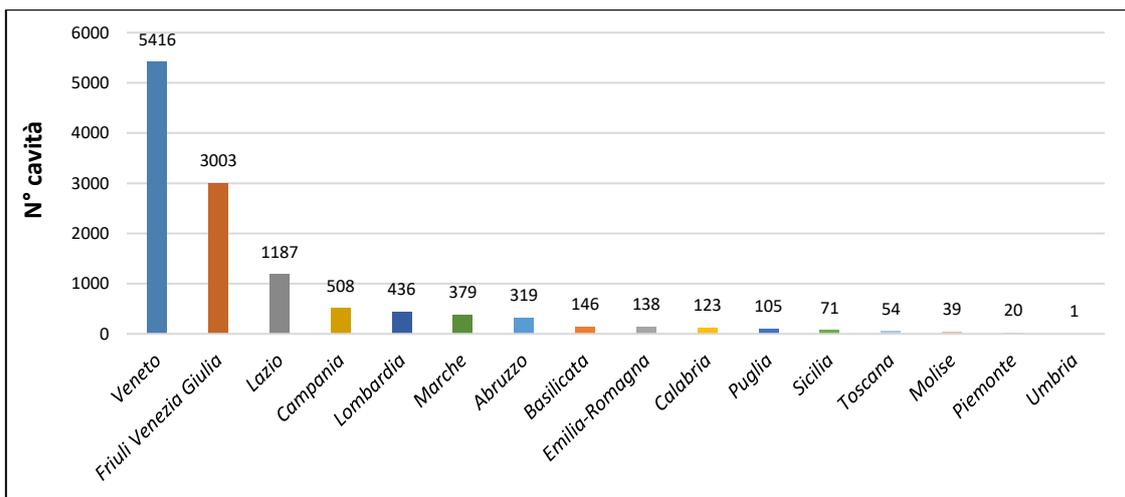


Figura A5.5 – Numero di cavità presenti nel DB-MS (versione giugno 2020) per regione.

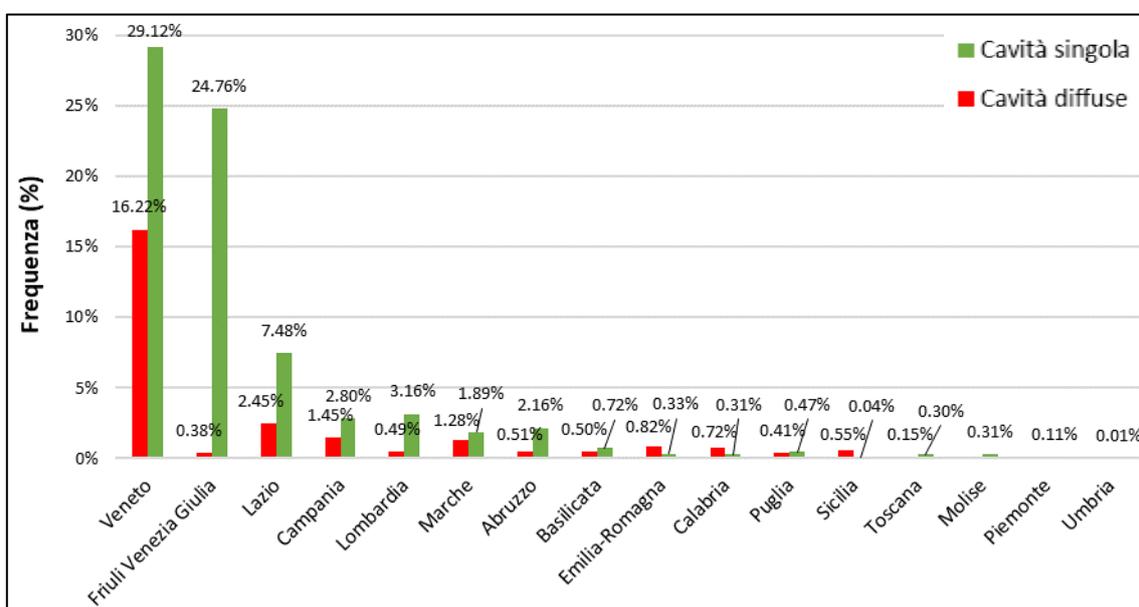


Figura A5.6 – Frequenza percentuale delle cavità distinte per tipologia nelle Regioni coperte dai dati del DB-MS.

Le cavità presenti nel DB-MS sono state associate alle litologie corrispondenti, estraendo i dati dalla Carta Geologico-tecnica per la MS (CGT-MS) (Figura A5.7) e dalla Carta Litologica d'Italia 1:100.000 di ISPRA (Amanti et al., 2002) (Figura A5.8), con l'obiettivo principale di guidare la scelta delle litologie da analizzare nelle successive analisi numeriche.

In Figura 1.7 è riportata la distribuzione di frequenza delle Unità GT associate alle cavità mappate nel DB-MS. Le statistiche mostrano come circa il 50% delle cavità è scavato in terreni lapidei (LPS, LP), con un'alta percentuale di cavità in terreni di copertura coesivi (CL), costituiti da coperture colluviali al di sopra di sistemi di cavità (o come riempimento di doline). L'alta percentuale di casi Vuoti (6.6%) è dovuta, in parte, alla mancanza della CGT_MS in formato vettoriale che non era obbligatoria nei primi studi di MS (es. Puglia). I terreni di copertura granulari presentano percentuali complessive comprese tra il 10% e il 4%; tra questi anche i riporti (RI), in buona parte derivanti dagli studi di MS della città di Roma. Considerato l'elevato numero di cavità che caratterizza queste litologie, nell'analisi sono state mantenute alcune sigle non corrispondenti agli Standard MS, legate a depositi vulcanici delle Unità GT di Roma (TS = Tufo Stratificati La Storta/Sacrofano; PZ = Pozzolane Rosse; TL = Tufo Lionato/Villa Senni), ritenuti di interesse ai fini del presente studio.

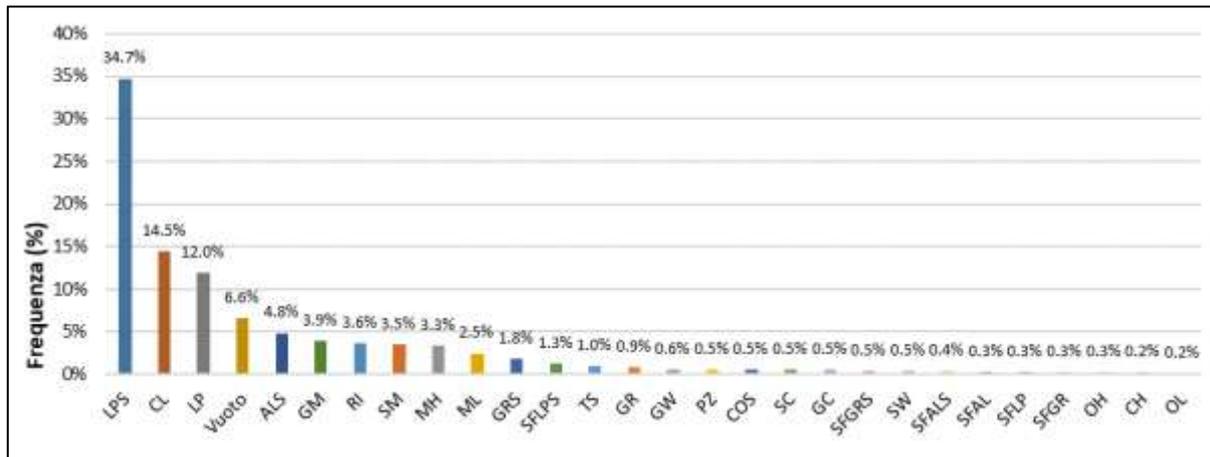


Figura A5.7 – Distribuzione di frequenza delle Unità GT associate alle cavità. Nel grafico sono riportate solo le Unità GT con n° cavità > 15 (ovvero Unità GT con frequenza >0.13%) corrispondenti al 99.4% del totale (11'945) delle cavità presenti nel DB-MS.

Le stesse analisi sono state eseguite utilizzando i dati della Carta Litologica d'Italia 1:100.000 di ISPRA (Figura A5.8). In questo confronto, oltre il 50% delle cavità risulta scavato in rocce di natura calcarea (calclutiti, calcareniti, calcari, ecc...). Seguono, con percentuali tra il 10% e il 7%, terreni semi-litoidi sia sedimentari (conglomerati, breccie, arenarie), che vulcanici (piroclastiti, tufi, ignimbriti). Le restanti litologie presentano una frequenza molto bassa a scala nazionale, ma possono avere un importante peso se analizzate su scala regionale (es. tufi e piroclastiti in Lazio e Campania, evaporiti in Emilia-Romagna e Calabria) (Figura A5.10).

Questo forte sbilanciamento verso rocce carbonatiche è sicuramente legato all'abbondanza di paesaggi carsici, specialmente in regioni come Veneto e Friuli o in Appennino centro-meridionale, regioni in cui sono riportate un gran numero di cavità (Figura 1.6). D'altra parte, ciò può essere legato anche a una maggiore conoscenza, disponibilità di dati e facilità di accesso agli stessi per le cavità naturali, spesso sviluppate in aree non antropizzate e in terreni lapidei, rispetto alle cavità artificiali, di sovente scavate in terreni semi-litoidi e nascoste nel sottosuolo dei contesti urbani.

Dal confronto dei dati statistici estratti dalla Carta Litologica d'Italia 1:100.000 (Figura A5.8) con i dati delle Unità GT (Figura 1.7) si nota una generale somiglianza nelle distribuzioni delle litologie, con una netta prevalenza in entrambi i casi di termini litoidi. Le differenze riscontrate possono essere riferite in buona parte alla diversa scala cartografica delle basi geologiche utilizzate per le analisi.

Sono state successivamente analizzate nello specifico le regioni oggetto del PON (Basilicata, Calabria, Campania, Puglia, Sicilia; Figura A5.9a). Per queste regioni nel DB-MS sono riportate 953 cavità, egualmente distribuite tra cavità singole e cavità diffuse (Figura A5.9b, Tabella A5.2).

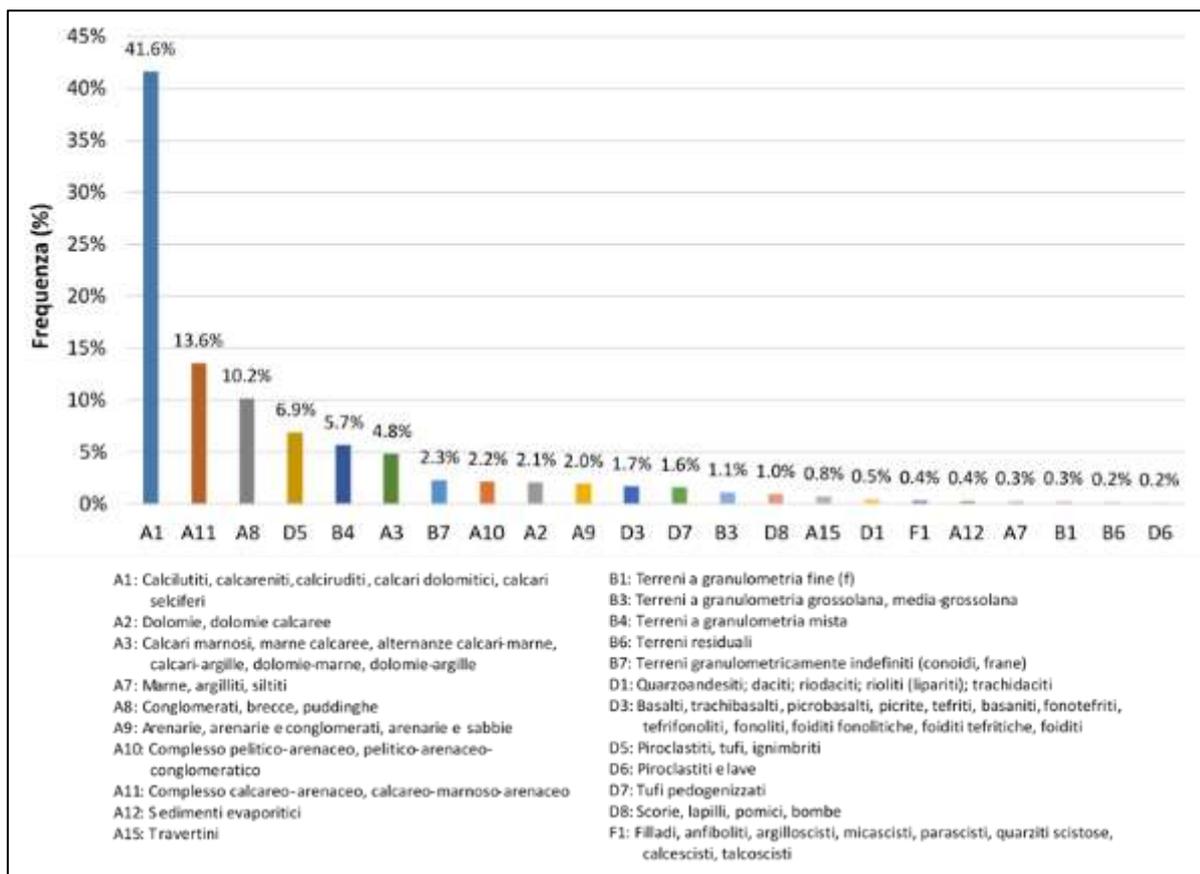


Figura A5.8 – Distribuzione di frequenza delle classi litologiche associate alle cavità. Nel grafico sono riportate solo le classi litologiche con n° cavità > 20 (ovvero classi litologiche con frequenza >0.18%) corrispondenti al 99.3% del totale (11'945) delle cavità presenti nel DB-MS.

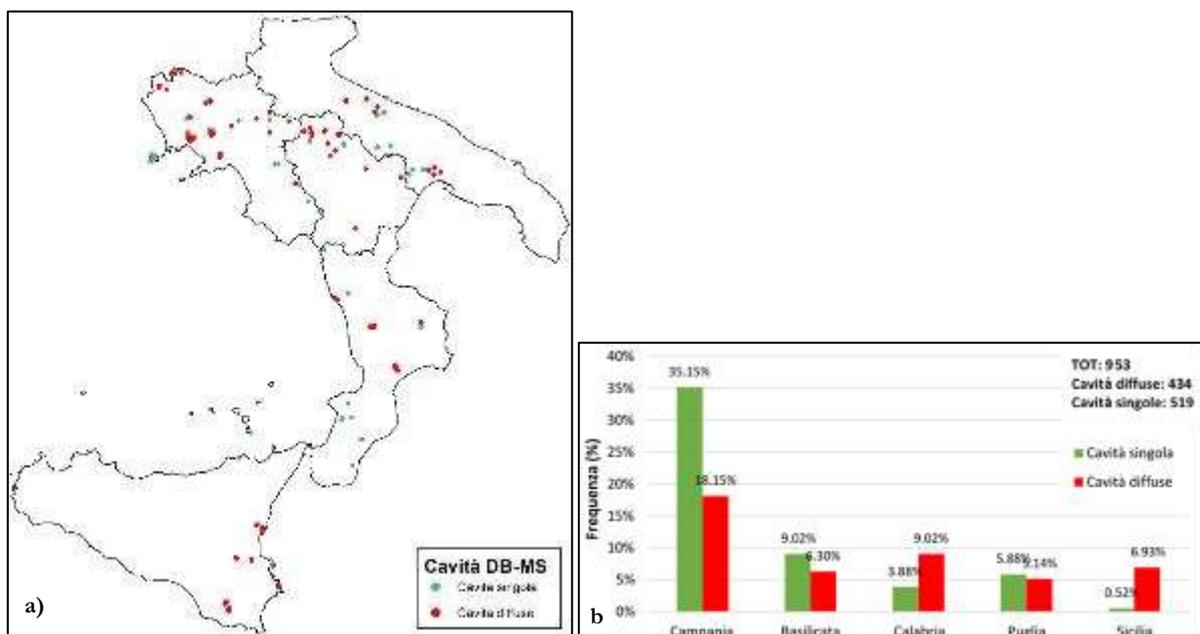


Figura A5.9 – a) Distribuzione delle cavità nelle regioni PON; b) Frequenza percentuale delle cavità, distinte per tipologia, nelle regioni PON.

La loro distribuzione è certamente legata alle caratteristiche geologico-geomorfologiche delle regioni e alla abbondanza di cavità antropiche in alcune regioni, ma allo stesso tempo è condizionata dallo stato di avanzamento degli studi di MS e dalla sensibilità regionale a tale argomento e/o a specifiche linee guida regionali. In Tabella A5.2 si nota infatti, come oltre il 50% delle cavità sia localizzato in Campania, di cui più della metà sono catalogate come cavità singole (Figura A5.9b), sebbene la copertura degli studi di MS in questa regione sia

inferiore a quella di altre regioni come la Basilicata o la Calabria. Per quanto riguarda Basilicata e Puglia le cavità sono egualmente distribuite tra singole e diffuse, ma molto sottostimate rispetto ai numeri reali, se confrontate con i dati dei catasti regionali. In Calabria e Sicilia prevalgono le cavità diffuse, con un basso numero di cavità in Sicilia, probabilmente proprio a causa dei pochi studi di MS realizzati.

Tabella A5.2 – Cavità presenti nel DB-MS nelle regioni PON.

	CAMPANIA	BASILICATA	CALABRIA	PUGLIA	SICILIA	Totale
N° TOT	508	146	123	105	71	953
Freq %	53.3	15.3	12.9	11	7.5	100

Infine, sono state analizzate le litologie in cui ricadono le cavità presenti nelle regioni PON, associando queste ai dati della Carta Litologica d'Italia 1:100.000 di ISPRA (Amanti et al., 2002) (Figura A5.10). L'analisi statistica dei dati ottenuti mostra come le litologie più ricorrenti, circa il 40% del totale, siano riconducibili a depositi vulcanici (tufi, piroclastiti, scorie), sebbene queste siano presenti quasi esclusivamente in Campania. Un buon numero di cavità è sviluppato all'interno di calcilutiti, calcareniti e termini calcarei, in particolare per quanto riguarda Puglia e Sicilia. Le cavità presenti in Basilicata risultano essere sviluppate in buona parte in depositi granulari (arenarie, conglomerati, breccie), mentre in Calabria le cavità più frequenti sono quelle in terreni metamorfici o evaporitici.

Tali indicazioni, riguardanti la distribuzione spaziale e le litologie prevalenti nelle regioni PON, hanno permesso di indirizzare le analisi numeriche, concentrandosi in prima battuta sui tufi della Campania, implementando il caso di studio di cavità scavate all'interno del Tufo Giallo Napoletano.

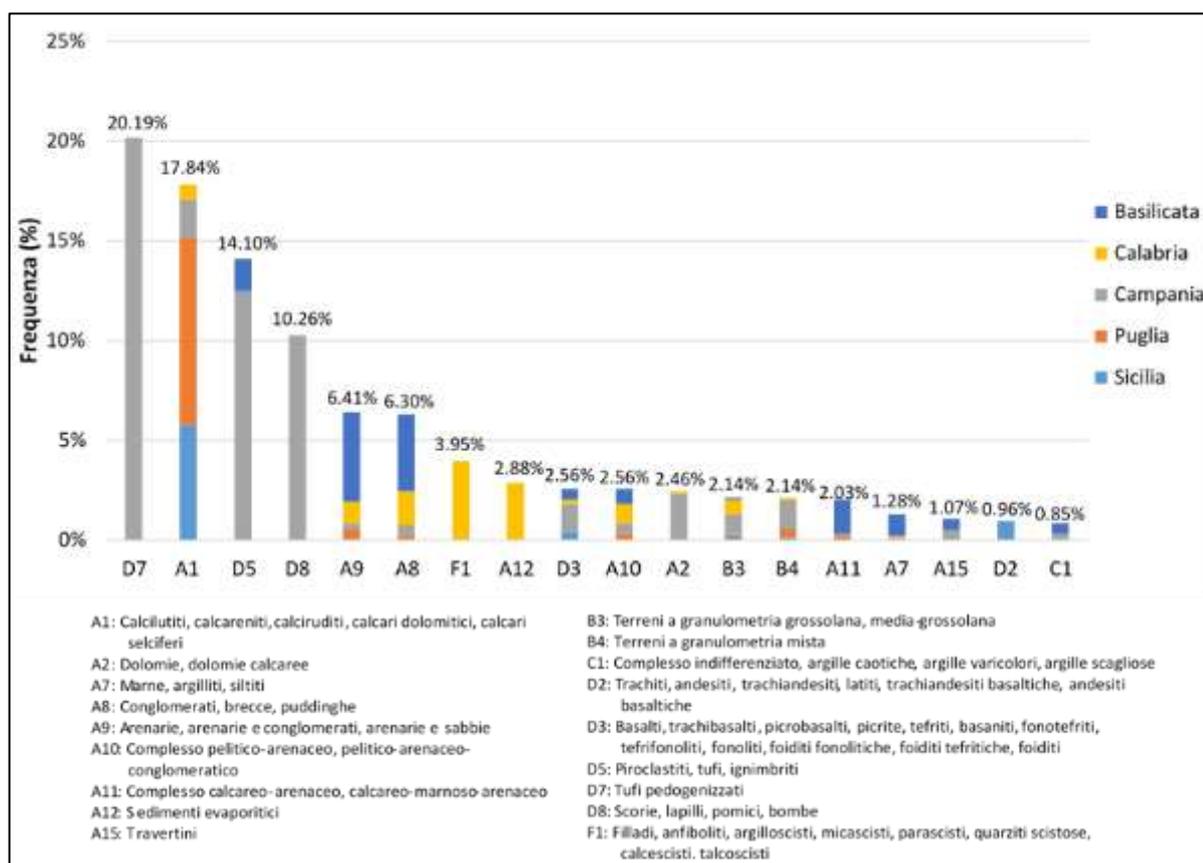


Figura A5.10 – Distribuzione di frequenza delle classi litologiche associate alle cavità delle regioni PON. Nel grafico sono riportate solo classi litologiche con N° cavità > 5 (ovvero classi litologiche con frequenza >0.5%) corrispondenti al 98% del totale (953) delle cavità presenti nel DB-MS.

A5.4 Censimento dei fenomeni di instabilità di cavità sotto azioni sismiche

Diversi studi mettono in relazione la formazione di sinkhole con il verificarsi di eventi sismici, fornendo esempi di collassi avvenuti a seguito di eventi passati e indicazioni sui fattori predisponenti di tali fenomeni, come l'assetto strutturale dei litotipi, la distanza da faglie attive e la presenza acque minerali (Faccenna et al., 1993; Esposito et al., 2000; Maffei et al., 2005; Buchignani et al., 2008; Del Prete et al., 2010; Santo et al., 2011, 2019; Tassi et al., 2012).

Attraverso un attento lavoro di revisione, sono stati censiti gli eventi verificatisi a seguito di eventi sismici passati sul territorio nazionale, basandosi sui dati riportati in database e cataloghi degli effetti sismoindotti (CFTI5Med; CEDIT) e nelle pubblicazioni scientifiche (Pergalani 1984; Faccenna et al., 1993; Santo et al., 2011), oltre che sulle fonti storiche in essi riportate (De Poardi 1627; Tiberi 1639; Uria De Llanos 1703; Vivenzio 1788; Crema 1924).

I dati raccolti saranno utilizzati per fornire delle indicazioni, basate su casi reali, riguardo le soglie di innesco del fenomeno, le dimensioni dei fenomeni avvenuti e le litologie interessate. Tali risultati saranno molto utili sia per indirizzare le analisi numeriche, che per la stesura delle LG-VSCS.

Ogni evento è stato catalogato inserendo, laddove disponibili, le seguenti informazioni: 1) Nome sinkhole; 2) Coordinate sinkhole; 3) Data evento sismico; 4) Data formazione sinkhole; 5) Epicentro; 6) Distanza epicentrale; 7) IMCS epicentrale; 8) IMCS sinkhole; 9) MW; 10) Diametro min; 11) Diametro max; 12) Profondità; 13) Fonte bibliografica.

In totale sono stati censiti 137 eventi (Figura 1.11) ad ognuno dei quali è stato associato un diverso grado di affidabilità, distinguendoli in: Certo, Incerto e Scartato. Gli eventi Certi (64) sono quelli per cui le informazioni sono complete, omogenee e affidabili; gli Incerti (66) sono eventi per i quali mancano, o sono incerte o non univoche, alcune informazioni (es. dimensioni, evento sismico, localizzazione), ma che in generale presentano comunque un buon grado di attendibilità riguardo l'accadimento del fenomeno; gli eventi Scartati (7) sono quelli per cui non si è verificata la formazione di un sinkhole vero e proprio, ma solo il cedimento del terreno, o per i quali i dati e le fonti storiche sono assenti o contrastanti.

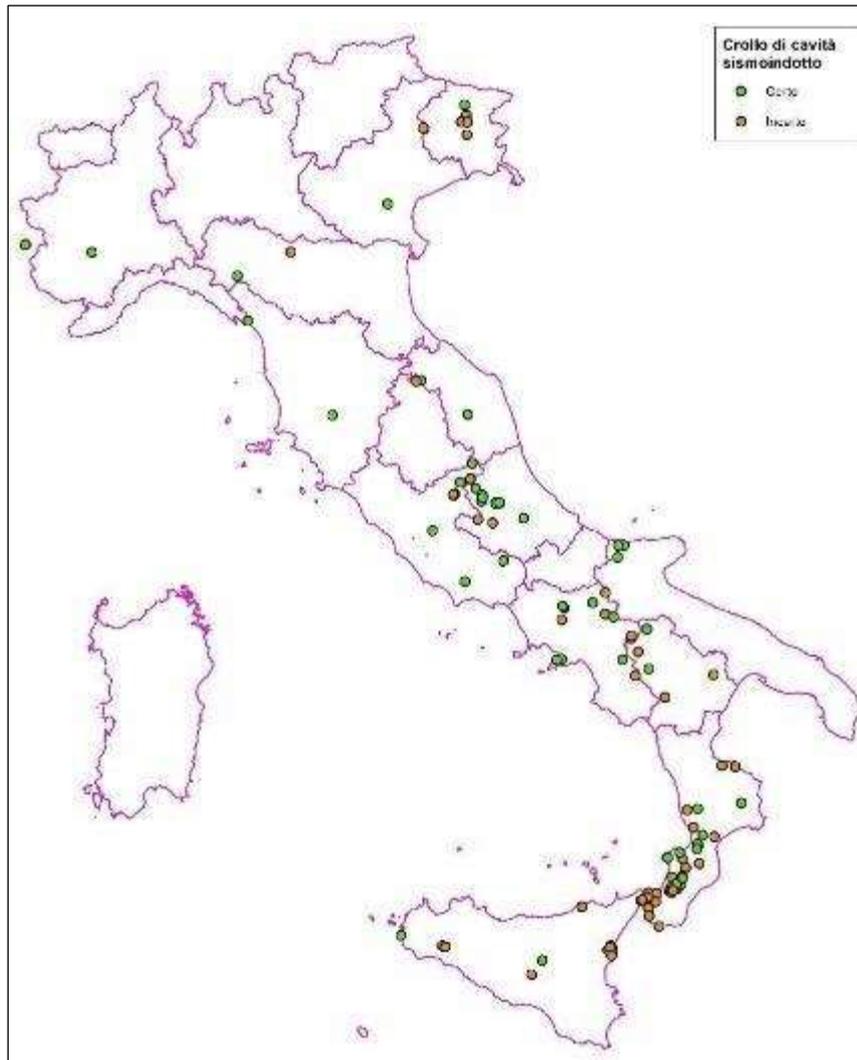


Figura 1.11 – Distribuzione dei fenomeni di crollo di cavità sismoindotto censiti.

Dalla distribuzione spaziale degli eventi censiti si nota come questi siano in buona parte allineati lungo le aree di catena appenninica Laziale-Abruzzese e Campano-Lucana e lungo l'arco Calabro-Peloritano (Figura 1.11). Questo è probabilmente dovuto alla maggiore sismicità di queste aree, alla vicinanza con elementi tettonici attivi o con zone di intensa fratturazione, così come alla predisposizione delle litologie presenti a favorire fenomeni carsici o di attività estrattiva e quindi alla presenza di cavità nel sottosuolo. Si nota inoltre come gli eventi di crollo di cavità mappate nell'Appennino Centrale abbiano una maggiore affidabilità rispetto a quelli dell'arco Calabro-Peloritano. Questo può essere spiegato in parte dall'alto numero di eventi censiti a seguito di terremoti recenti in Appennino Centrale (Fucino 1915, Crema 1924; L'Aquila 2009, GdL MS-AQ 2010) e dall'altra dalla maggiore completezza delle fonti storiche. Infatti, numerosi sono gli eventi riportati in Calabria e Sicilia a seguito dei terremoti del 1638, 1783 e del 1908 (Vivenzio 1788; Recupito 1638; Baratta 1910), le cui fonti descrittive non chiariscono completamente l'occorrenza del fenomeno e l'esatta ubicazione. A partire dai dati raccolti sono state elaborate analisi statistiche fondamentali per fornire indicazioni sui parametri predisponenti dei fenomeni di crollo di cavità sismoindotti. L'analisi statistica è stata realizzata considerando la magnitudo equivalente (M_e) degli eventi sismici innescanti i fenomeni di crollo censiti (Figura 1.12). Dall'analisi dei dati si evince come la quasi totalità dei fenomeni di crollo si sia verificata per $M_e > 5$, con il 50% dei quali avvenuto per $M_e \geq 6.7$ e un valore medio di circa 6.5.

Al fine di ottenere informazioni preliminari sulle soglie di innesco dei fenomeni censiti, mediante l'applicativo OpenQuake, sono stati realizzati degli scenari di rottura stocastica della sorgente (Scenario Hazard – GEM, 2020) per stimare la PGA al bedrock mediata in corrispondenza dei crolli avvenuti a seguito del terremoto dell'Aquila del 06/04/2009 (M_w 6.2). Per questo evento sono stati censiti 6 casi di crollo di cavità, localizzati

all'interno di diverse litologie e a distanze epicentrali comprese tra 2 e 21 Km (Tabella 1.3). Per ognuno dei casi considerati è stato determinato il parametro Vs30, necessario per la modellazione attraverso OpenQuake, derivante sia da indagini geofisiche eseguite nell'intorno della cavità crollata (caso I), che dai dati riguardanti la litologia interessata riportati negli studi di MS (caso II), ad eccezione del caso n.3 per cui sono stati utilizzati i valori di Vs30 minimo e massimo disponibili in letteratura. Le analisi effettuate mostrano che, per i casi in questione, il valore minimo di PGA in corrispondenza dei crolli di cavità è compreso tra 0.18g e 0.2g, a seconda del modello di velocità considerato.

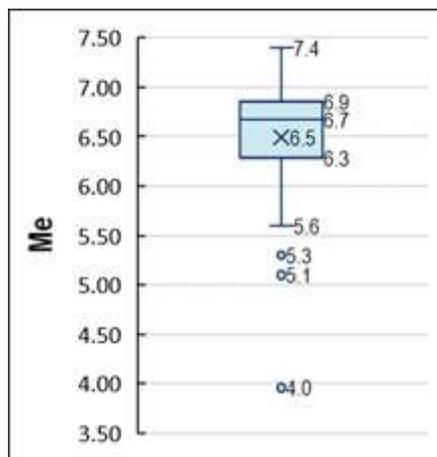


Figura 1.12 – Box-plot dell'intensità sismica dei terremoti associati a fenomeni di crollo sismoindotto.

Tabella 1.3 – Parametri utilizzati per il calcolo della PGA degli eventi di crollo sismoindotto censiti per il terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009.

#	Nome	Lat.	Long.	Distanza epicentrale (Km)	Litologia	Vs30 (m/s) (Caso I)	Vs30 (m/s) (Caso II)	PGA (g) (Caso I)	PGA (g) (Caso II)
1	Via de Bartholomeis 6 (AQ)	42.346098	13.394741	2.10	Colluvi su Breccie dell'Aquila	386	572	0.367	0.314
2	Via Campo di Fossa (AQ)	42.345798	13.395372	2.10	Colluvi su Breccie dell'Aquila	386	572	0.376	0.321
3	Convento San Giuliano (AQ)	42.372924	13.390910	5.50	Calcari fratturati	500	700	0.337	0.285
4	Castelnuovo 9-Cav164-003B	42.294650	13.628669	21.20	Limi calcarei	320	410	0.202	0.186
5	Castelnuovo 16-Cav251-002	42.293993	13.629473	21.20	Limi calcarei	320	410	0.196	0.181
6	Castelnuovo 31-32-34	42.295370	13.628323	21.20	Limi calcarei	284	410	0.198	0.176

Bibliografia

Amanti M., Bontempo R., Cara P., Conte G, Di Bucci D., Lembo P. (2002), Interactive geological map of Italy, 1:100.000. SGN, SSN, ANAS 3 CD-ROM. 2002.

Beck B.F. (2004), Soil piping and sinkhole failures. In: White, W.B. (Ed.), Encyclopedia of Caves. Elsevier, New York, pp. 523–528.

Bekendam R.F. (1998), Pillar stability and large- scale collapse of abandoned room and pillar limestone mines in south Limburg, the Netherlands. PhD Thesis, TU Delft, 361 p.

- Benson R.C., Yuhr L.B. (2016), Insight into the Nature of Cover Collapse Sinkholes. In: Site Characterization in Karst and Pseudokarst Terraines. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9924-9_10
- Betti M., Bixio R., Galeazzi C., Galeazzi S., Germani C., Mazzoli M., Meneghini M., Belvederi G., Parise M., Saj S. (2018), Catasto speleologico nazionale delle cavità artificiali (CA). Classificazione, interventi di tutela e monitoraggio conseguiti grazie ai dati speleologici e prospettive future. In: Bozzano F., Di Loreto E., Nisio S., Parise M. (Eds). Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione. *Geologia dell'Ambiente*, Supplemento al n. 4/2018, 13-18.
- Bianchi Fasani G., Bozzano F., Cercato M. (2011), The underground cavity network of south-eastern Rome (Italy): an evolutionary geological model oriented to hazard assessment. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 70, 533–542. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0360-0>.
- Buchignani V., D'Amato Avanzi G., Giannecchini R., Puccinelli A., (2008). Evaporite karst and sinkholes: a synthesis on the case of Camaiole (Italy). *Environ. Geol.* 53, 1037–1044. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0730-x>.
- Caramanna, G., Ciotoli, G., Nisio S. (2008): A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas. *Natural Hazards*, 45, 145–172.
- Carter T.G. (1992), A new approach to surface crown pillar design. In: *Proceedings of the 16th Canadian Rock Mechanics Symp.*, Sudbury, 75-83.
- Ciantia M. O., Castellanza R., Di Prisco C., Lollino P., Merodo J. A. F., Frigerio G. (2015), Evaluation of the Stability of Underground Cavities in Calcarenite Interacting with Buildings Using Numerical Analysis. *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 8*, Springer International Publishing Switzerland 2015. DOI 10.1007/978-3-319-09408-3_8.
- Ciotoli G., Corazza A., Finoia M.G., Nisio S., Succhiarelli C. (2013), Gli sprofondamenti antropogenici nell'area urbana di Roma. *Mem. Descr. Carta Geol. D'Italia*, 93, 143-182.
- Ciotoli G., Nisio S., Serafini R. (2015a), Analisi della suscettibilità ai sinkholes antropogenici nel centro urbano di Roma. *Mem. Descr. Carta Geol. D'Italia*, 99, pp. 167 – 188.
- Ciotoli G., Finoia M.G., Liperi L., Meloni F., Nisio S., Tonelli V. & Zizzari P. (2015b) - Sinkhole susceptibility map of the Lazio Region, Central Italy. *Journal of Maps* 1/2015.
- Crema C. (1924), Sprofondamenti carsici del gennaio e del febbraio 1915 nella Valle del Velino (Aquila). In: *Tra i monti del Lazio e dell'Abruzzo*, Sezione di Roma del Club Alpino Italiano Roma, 41-54. Roma.
- De Poardi G.V. (1627), Nuova relatione del grande e spaventoso terremoto successo nel Regno di Napoli, nella Provincia di Puglia, in Venerdì li 30 luglio 1627. Roma.
- Del Prete, S., Di Crescenzo, G., Santangelo, N., Santo, A. (2010). Collapse sinkholes in Campania (southern Italy): predisposing factors, genetic hypothesis and susceptibility. *Z. Geomorphol.* 54 (2), 259–284. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2010/0054S2-0014>.
- Diederichs M.S. (2003), Rock fracture and collapse under low confinement conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36 (5), 339-381.
- Diederichs M.S., Kaiser P.K. (1999a), Stability of large excavations in laminated hard rock masses: the voussoir analogue revisited. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 36, 97-117.
- Diederichs M.S., Kaiser P.K. (1999b), Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 36, 69-96.
- Esposito, E., Porfido, S., Iaccarino, G., G. Tranfaglia, (2000), Terremoti e centri storici dell'Irpinia: gli effetti del terremoto del 1930. In: *Proc. GeoBen 2000*, CNR-GNDICI 2133, 477-484.

- Evangelista A. & Viggiani C. (2013), A paradise inhabited by devils? The geotechnical risks in the city of Napoli and their mitigation. In: *Geotechnics and Heritage: Case Histories* (Bilotta, E., Flora, A., Lirer, S., & Viggiani, C. Eds.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b14965>.
- Evangelista A., Feola A., Flora A., Lirer S., Maiorano R.M.S. (2000), Numerical analysis of roof failure mechanisms in a soft rock. *Goegen 2000*. Melbourne
- Evangelista A, Flora A, Lirer S, de Sanctis F, Lombardi G. (2002), Studi ed interventi per la tutela di un patrimonio sotterraneo: l'esempio delle cavità di Napoli. In: *Proceedings of 21st Geotechnical National Conference*. L'Aquila; 11–14 September 2002. p. 579–588.
- Evangelista L., Landolfi L., d'Onofrio A., Silvestri F. (2016), The influence of the 3D morphology and cavity network on the seismic response of Castelnuovo hill to the 2009 Abruzzo earthquake. *Bull Earthq Eng*. 2016; 14:3363–3387.
- Faccenna C, Florindo F, Funicello R, Lombardi S, (1993), Tectonic setting and Sinkhole Features: case histories from western Central Italy. *Quaternary Proceedings* 3, 47-56.
- Fazio N.L., Perrotti M., Lollino P., Parise M., Vattano M., Madonia G., Di Maggio C. (2017), A three-dimensional back-analysis of the collapse of an underground cavity in soft rocks. *Engineering Geology* 228 (2017) 301-311.
- Ferrero A.M., Segalini A., Giani G.P. (2010), Stability analysis of historic underground quarries. *Comput. Geotech.*, 37, 476-486.
- Fiore A., Fazio N. L., Lollino P., Luisi M., Miccoli M. N., Pagliarulo R., Perrotti M., Pisano L., Spalluto L., Vennari C., Vessia G., Parise M. (2018), Evaluating the susceptibility to anthropogenic sinkholes in Apulian calcarenites, southern Italy. *Geological Society, London, Special Publications* (2018), 466(1):318 <http://dx.doi.org/10.1144/SP466.20>.
- Ganainy H.E., Demirkan M. M., Gutierrez J. J., Ramanathan R., Hatipoglu B., Adib M. E., Barton D. (2015), Stability of Solution Cavities in Urban Developments: A Case Study Towards Enhancing Geohazard Risk Assessment. *Geotech Geol Eng* DOI 10.1007/s10706-015-9933-1.
- Ghabezloo S., Pouya A. (2006), Numerical modelling of the effect of weathering on the progressive failure of underground limestone mines. In: Van Cotthem A., Charlier R., Thimus J.F., Tshibangu J.P. (Eds.), *EUROCK 2006, Multiphysics Coupling and Long-Term Behaviour in Rock Mechanics*. Taylor and Francis Group, London, 233-240.
- GEM (2020). The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) Open-Quake Manual for Engine version 3.10.1. doi: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.10.1, 204 pages.
- Goodings D.J., Abdulla W.A. (2002), Stability charts for- predicting sinkholes in weakly cemented sand over karst limestone. *Engineering Geology*, 65, 179-184.
- Gruppo di Lavoro MS-AQ (2010). *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*. Dipartimento della Protezione Civile—Regione Abruzzo.
- Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valensise G. (2019), CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area. *Scientific Data* 6, 80. doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>.
- Gutiérrez F., Guerrero J., Lucha P. (2008), A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposure in Spain. *Environ. Geol.* 53, 993–1006. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0727-5>.
- Gutiérrez F., (2016). Sinkhole hazards. In: Cutter S.L. (Ed.), *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. Oxford University Press, Oxford, 1–88. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.40>.

- Jaeger J.C., Cook N.G.W. (1979), *Fundamentals of Rock Mechanics*. Chapman and Hall, London, 593.
- Lanzo G., Silvestri F., Costanzo A., d'Onofrio A., Martelli L., Pagliaroli A., Sica S., Simonelli A. (2011), Site response studies and seismic microzoning in the Middle Aterno valley (L'Aquila, Central Italy). *Bull Earthq Eng* 9(5):1417–1442
- Lee C., Shin H.S., Chang S.H. (2014), A preliminary study on the structural stability of room-and-pillar underground structures. In: Yoo, Park, Kim & Ban (Eds.), *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. Korean Geotechnical Society, Seoul, Korea, ISBN 978-1-138-02700-8.
- Lollino P., Martimucci V., Parise M. (2013), Geological survey and numerical modeling of the potential failure mechanisms of underground caves. *Geosystem Engineering*, 16 (1), 100–112. <http://dx.doi.org/10.1080/12269328.2013.780721>.
- Maffei A., Martino S., Prestininzi A. (2005). From the geological to the numerical model in the analysis of gravity-induced slope deformations: an example from the central Apennines (Italy). *Eng. Geol.* 78, 215-236.
- Meloni F., Nisio S., Ciotoli G., Liperi L., Tonelli V., Zizzari P. (2013), Il Catalogo Regionale unificato dei sinkholes del Lazio e le aree a rischio. *Mem. Descr. Carta Geol. d'Italia*, 93, 261-297.
- Mortazavi A., Hassani F.P., Shabani M. (2009), A numerical investigation of rock pillar failure mechanism in underground openings. *Computers and Geotechnics*, 36, 691-697.
- Nicksons. D. (1992), Cable support guidelines for underground hard rock mine operations. MSc Thesis, Dept. Mining and Mineral Processing, University of British Columbia, 223 p.
- Nisio S., Caramanna G., Ciotoli G. (2007). Sinkhole in Italy: first results on the inventory and analysis. In: Parise M., Gunn J. (Eds.), *Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis and Mitigation*. Geological Society of London, Special Publications 279, 23–45. <https://doi.org/10.1144/SP279.4>.
- Nisio S. (2017). Aree soggette ai sinkholes. *ISPRA Annuario dei dati Ambientali 2017; Pericolosità Geologiche*, 84-90.
- Nisio S. (2018), I sinkholes antropogenici nelle città italiane. *Qualità dell'ambiente urbano – XIV Rapporto (2018) ISPRA Stato dell'Ambiente 82/18*, 149-158.
- Obert L., Duvall W.I. (1967), *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rocks*. Wiley, New York.
- Parise M., Lollino P. (2011), A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in southern Italy. *Geomorphology*, 134(1–2), 132-143.
- Parise M., Galeazzi C., Bixio R., Dixon M. (2013), Classification of artificial cavities: a first contribution by the UIS commission. In: Filippi M., Bosák P. (Eds.), *Proceedings of the 16th International Congress of Speleology*, Brno, July 21 –28, 2013, Volume 2, 230-235.
- Pergalani F. (1984), Alcune note sul terremoto del 1799 nell'area camerte, in "Proposte e ricerche", fasc.13, pp.90-94. Urbino.
- Perrotti M., Lollino P., Fazio N. L., Pisano L., Vessia G., Parise M., Fiore A., Luisi M. (2018), Finite element-based stability charts for underground cavities in soft calcarenites. *International Journal of Geomechanics*, ASCE, ISSN 1532-3641. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001175.
- Perrotti M., Lollino P., Fazio N. L., Parise M. (2019a), Stability charts based on the finite element method for underground cavities in soft carbonate rocks: validation through case-study applications. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 2079–2095. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2079-2019>.
- Perrotti M., Lollino P., Fazio N. L., Parise M. (2019b), FEM-based stability charts for underground cavities in soft carbonate rocks: validation through case-study applications. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-55>.

- Potvin Y., Milne D. (1992), Empirical cable bolt support design. In: Kaiser, McCreath (Eds.), *Rock support in Mining and Underground Construction*. Baalkema, Rotterdam, 269-275.
- Recupito G.C. (1638), *De novo in universa Calabriae terraemotu congeminitus nuncius*. Napoli.
- Sanò T. (2011). Risposta sismica locale in presenza di cavità sotterranee. *Ingegneria sismica*, anno XXVIII 2, 25-34.
- Santo A., Ascione A., Del Prete S., Di Crescenzo G., Santangelo N. (2011), Collapse sinkholes distribution in the carbonate massifs of Central and Southern Apennines. *Acta Carsologica* 40 (1), 95–112. <https://doi.org/10.3986/ac.v40i1.31>.
- Santo A., Santangelo N., De Falco M., Forte G., Valente E. (2019), Cover collapse sinkhole over a deep buried carbonate bedrock: The case study of Fossa San Vito (Sarno - Southern Italy). *Geomorphology*, 345. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106838>.
- Scotto di Santolo A., Forte G., Santo A. (2018), Analysis of sinkhole triggering mechanisms in the hinterland of Naples (southern Italy). *Eng Geol.*, 237, 42–52.
- Sica S., Dello Russo A., Rotili F., Simonelli A.L. (2013), Ground motion amplification due to shallow cavities in nonlinear soils. *Nat Hazards.*; 71, 1913–1935.
- Tassi F, Cabassi J, Rouwet D, Palozzi R, Marcelli M, Quartararo M, Capecchiacci F, Nocentini M, Vaselli O. (2012), Water and dissolved gas geochemistry of the monomictic Paterno sinkhole (central Italy). *J Limnol*, 71 (2), 245-260. <https://www.jlimnol.it/index.php/jlimnol/article/view/jlimnol.2012.e27>.
- Tiberi C. (1639), *Nuova, e vera relazione del terribile, e spaventoso terremoto successo nella città della Matrice*. Roma, Domenico Marciiani.
- Uria De Llanos A. (1703), *Relazione, ovvero itinerario fatto dall'auditore D.Alfonso Uria De Llanos per riconoscere li danni causati dalli passati Terremoti seguiti li 14 Gennaro, e 2 Febraro MDCCIII con il numero de' Morti, e Feriti nella provincia dell'Aquila, e tutti li luoghi circonvicini per darne di essi distinta notizia al Signor Vice Ré di Napoli*. Roma
- Verrucci L., Lanzo G., Pagliaroli A. (2012), Effetti della presenza di cavità sulla risposta sismica in superficie. *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2012 - IARG 2012, Padova, 2-4 luglio 2012*.
- Vivenzio G. (1788), *Istoria de' Tremuoti avvenuti nella Provincia della Calabria ulteriore, e nella Città di Messina nell'anno 1783 e di quanto nella Calabria fu fatto per lo suo risorgimento fino al 1787 preceduta da una Teoria, ed Istoria Generale de' Tremuoti*, 2 vol. Napoli.
- Waltham T., Bell F., Culshaw M. (2005), *Sinkholes and subsidence. Karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer, 382 pp.