



PON GOVERNANCE 2014-2020

Rischio Sismico e Vulcanico

Attività A2.3 | Definizione di metodi di studio delle zone suscettibili di amplificazione – Contributi alle Linee Guida Amplificazioni

Definizione di metodi di studio delle zone suscettibili di amplificazione

Contributi alle Linee Guida Amplificazioni

Versione 6.0

Pubblicato in data 13/12/2021





PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività A2.3 | Definizione di metodi di studio delle zone suscettibili
di amplificazione – Contributi alle Linee Guida Amplificazioni

Definizione di metodi di studio delle zone suscettibili di amplificazione

Contributi alle Linee Guida Amplificazioni

Versione 6.0

Pubblicato in data 13/12/2021



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

Unità operativa rischi

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

Unità di raccordo DPC

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

Unità amministrativa e finanziaria

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

Hanno fatto parte della struttura

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

REGIONI

Referenti

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

Sono stati referenti

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

Affidamento di servizi del DPC al CNR-IGAG

Responsabile Unico del Procedimento: Mario Nicoletti

Direttore di Esecuzione Contrattuale: Fabrizio Brammerini

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

Referente rischio vulcanico: Stefano Ciolli

Referenti pianificazione di emergenza: Domenico Fiorito, Stefania Renzulli

CNR-IGAG (operatore economico rischio sismico e vulcanico)

Massimiliano Moscatelli (referente)

Struttura di coordinamento

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

Struttura tecnica

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

Struttura gestionale

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

Revisori

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

Supporto tecnico-amministrativo

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

Hanno fatto parte della struttura

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

Attività 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

versione colophon 06/12/2021

Sommario

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ ED OBIETTIVI	6
SEZIONE 1 - VULNERABILITÀ SISMICA DI CAVITÀ SOTTERRANEE	8
1. INQUADRAMENTO DEL FENOMENO, CENSIMENTO DEI DATI DISPONIBILI E ANALISI STATISTICHE SU DATABASE E BIBLIOGRAFIA ESISTENTE	9
1.1 DESCRIZIONE DEL FENOMENO E DEFINIZIONE DELLE TIPOLOGIE DI CAVITÀ CONSIDERATE	9
1.2 CENSIMENTO DEI DATI ESISTENTI SULLE CAVITÀ SOTTERRANEE	13
1.3 ANALISI STATISTICA DELLE CAVITÀ PRESENTI NEL DB MS	14
1.4 CENSIMENTO DEI FENOMENI DI INSTABILITÀ DI CAVITÀ SOTTO AZIONI SISMICHE	20
BIBLIOGRAFIA (SEZIONE 1)	24
ALLEGATO 1 - BOZZA DELLE LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DI CAVITÀ SOTTERRANEE (LG VSCS)	29
APPENDICE A1 – FONTI BIBLIOGRAFICHE, CENSIMENTI E DATA-BASE DELLE CAVITÀ SUL TERRITORIO ITALIANO	55
APPENDICE A2 – METODI GEOFISICI E GEOGNOSTICI PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE CAVITÀ SOTTERRANEE E CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA L'AMMASSO DI CAVITÀ SOTTERRANEE	59
APPENDICE A3 – METODOLOGIE IMPIEGATE PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DI CAVITÀ SOTTERRANEE	61
A3.1 VULNERABILITÀ SISMICA DI CAVITÀ SOTTERRANEE	61
A3.2 APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA PROPOSTA	66
A3.3 ABACHI SEMPLIFICATI DEI FATTORI DI SICUREZZA DELLE CAVITÀ IN CONDIZIONI DINAMICHE	69
A3.4 DIMENSIONAMENTO DELLE ZONE DI INSTABILITÀ	72
APPENDICE A4 – METODI DI INTERVENTO PER LA MITIGAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DI CAVITÀ SOTTERRANEE	74
SEZIONE 2 - VALUTAZIONE DELLE INSTABILITÀ A VARI LIVELLI DI APPROFONDIMENTO	78
1 RISCHIO LIQUEFAZIONE	79
1.1 METODI SEMI-EMPIRICI	80
1.2 VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELLA LIQUEFAZIONE	81
1.3 ANALISI DINAMICA SEMPLIFICATA ED AVANZATA	83
1.4 PROGETTO LIQUEFACT	84

2	APPLICAZIONE: CASO REGIONE CALABRIA	85
2.1	CONTESTO GEOLOGICO REGIONALE	86
2.2	OSSERVAZIONI STORICHE DI LIQUEFAZIONE	86
2.3	ELABORAZIONE DEI DATI DI SONDAGGIO	87
2.3.1	<i>Predisposizione litologica. Valutazioni sulla geologia di sottosuolo</i>	88
2.3.2	<i>Ricostruzione della soggiacenza degli acquiferi superficiali della Regione Calabria</i>	90
2.4	PREDISPOSIZIONE DEI LAYER INFORMATIVI PER IL LIVELLO DI ANALISI A SCALA REGIONALE	95
2.4.1	<i>Valutazione della suscettibilità a liquefazione</i>	99
2.5	ANALISI A SCALA LOCALE: INDICE DI PREDISPOSIZIONE ALLA LIQUEFAZIONE TERRITORIALE (TPLI)	100
2.5.1	<i>Predisposizione alla liquefazione a scala locale</i>	100
	BIBLIOGRAFIA (SEZIONE 2)	102
	SEZIONE 3 - INVERSIONI DI VELOCITA'	108
1	FENOMENOLOGIA DEL PROBLEMA	109
1.1	ANALISI PARAMETRICHE DI RSL 1D	110
1.1.1	<i>Definizione della metodologia</i>	110
1.1.2	<i>Risultati</i>	113
2	INVERSIONI DI VELOCITÀ NELL'AMBITO DEGLI STUDI DI MS	123
2.1	LIVELLO 1 DI MS	124
2.2	LIVELLO 3 DI MS	126
3	INDIVIDUAZIONE DI CONTESTI GEOLOGICI CON POTENZIALI INVERSIONI DI VELOCITÀ	127
4	ANALISI STOCASTICHE DI RSL 1D IN PRESENZA DI SINGOLA INVERSIONE DI VELOCITÀ	130
5	INVERSIONI DI VELOCITÀ IN AMBIENTE VULCANICO	136
	BIBLIOGRAFIA (SEZIONE 3)	154

Descrizione dell'attività ed obiettivi

Nell'ambito dell'attività A2.3 vengono trattati tre diversi temi riguardanti le Linee guida Amplificazioni nell'ambito degli studi di Microzonazione Sismica (MS) che sono suddivisi, per semplicità, in tre diverse sezioni:

- SEZIONE 1: Vulnerabilità sismica di cavità sotterranee;
- SEZIONE 2: Valutazione delle instabilità a vari livelli di approfondimento (liquefazione);
- SEZIONE 3: Inversioni di velocità.

La **SEZIONE 1** del documento tratta il problema della vulnerabilità sismica di cavità sotterranee con approcci semplificati, al fine di fornire tecniche e strumenti di supporto alla pianificazione territoriale in aree urbane interessate da infrastrutture ed attività antropiche. Obiettivo principale dell'attività è la proposta di una procedura finalizzata allo studio del fenomeno e alla definizione di una Linea Guida (LG) per la valutazione della Vulnerabilità Sismica di Cavità Sotterranee (LG-VSCS) nell'ambito degli studi di Microzonazione Sismica (MS).

Questa sezione è articolata in una introduzione generale con l'inquadramento del problema dell'instabilità di cavità in condizioni sismiche attraverso l'analisi dei dati e relative analisi statistiche su database e bibliografia esistente (PARAGRAFO 1), a cui segue la Proposta di Linea Guida per la valutazione della Vulnerabilità Sismica di Cavità Sotterranee (LG-VSCS - ALLEGATO 1). L'allegato include: i) PARTE 1 relativa alla definizione e descrizione della procedura per l'individuazione e la perimetrazione delle zone di attenzione, suscettibilità e rispetto; ii) PARTE 2 relativa alla disciplina d'uso della linea guida; iii) APPENDICI di supporto e completamento della linea guida proposta.

I dati raccolti e i risultati ottenuti dalle analisi sviluppate nel PARAGRAFO 1 sono stati utilizzati come base per indirizzare le analisi numeriche (APPENDICE 3 dell'ALLEGATO 1), a loro volta tarate su casi reali rappresentativi delle casistiche più diffuse sul territorio nazionale, in termini di geometrie, litologie prevalenti e tipologie di cavità considerate. Allo stesso tempo, i risultati dello studio numerico sono stati utilizzati per definire i parametri predisponenti ed innescanti l'instabilità determinandone le relative soglie utilizzate nella metodologia proposta nella LG-VSCS.

La **SEZIONE 2** del documento riguarda la valutazione delle instabilità da liquefazione con approccio multi-scala. In funzione del livello di analisi considerato (*i.e.*, scala regionale e scala locale), le aree suscettibili di liquefazione sono identificate sulla base di fattori predisponenti (natura dei terreni, presenza della falda) e di fattori scatenanti (forzante sismica). La suscettibilità alla liquefazione è trattata dapprima proponendo una procedura attuata a scala regionale considerando la regione Calabria come area test. In questa procedura, i dati territoriali che caratterizzano i fattori predisponenti sono stati analizzati ed elaborati grazie all'ausilio di strumenti di analisi spaziale propri dell'approccio geostatistico per migliorare l'accuratezza delle mappe ottenute, fortemente influenzata dalla disponibilità e dalla distribuzione spaziale delle indagini. Un secondo livello di approfondimento alla scala locale è stato trattato, proponendo un nuovo indice (TPLI – Territorial Predisposing Liquefaction Index) che fornisce informazioni semi-quantitative sulla predisposizione alla liquefazione sulla base di informazioni geologiche di superficie e profonde (*i.e.*, spessore e posizione dello strato liquefacibile, posizione della falda).

La **SEZIONE 3** tratta la valutazione dell'amplificazione sismica locale in presenza di inversioni del profilo di velocità. Le inversioni di velocità sono particolari situazioni di sottosuolo che ricorrono in contesti geologici complessi che si possono incontrare nello svolgimento degli studi di MS. Nell'ambito di questa attività, le inversioni di velocità vengono trattate dapprima sotto il profilo fenomenologico; pertanto, sulla base di un esteso studio parametrico di risposta sismica locale 1D vengono analizzati i maggiori parametri di controllo del fenomeno. A valle di tale studio, sono stati individuati e studiati alcuni degli ambienti geomorfologici e deposizionali in cui si possono riconoscere fenomeni di inversioni di velocità. In funzione di ogni singolo ambiente vengono dapprima individuate delle colonne stratigrafiche 'reali' 1D (in termini di variazioni di spessori dei singoli strati, H_i , e di intervalli di velocità delle onde di taglio, $V_{s,i}$) e poi parametrizzate al fine di realizzare analisi Monte Carlo di RSL considerando la variabilità di H_i e di $V_{s,i}$, e la non linearità dei materiali attraverso un'opportuna selezione delle curve di decadimento per il calcolo dell'amplificazione/deamplificazione stratigrafica. L'obiettivo è quello di fornire elementi di valutazione a supporto dei professionisti per l'individuazione e comprensione del fenomeno delle inversioni di velocità in situazioni geologiche complesse. Ulteriori analisi sono state svolte per valutare l'effetto anche in presenza di inversioni multiple, in condizioni che tipicamente ritroviamo in ambienti vulcanici.

SEZIONE 1 - VULNERABILITA' SISMICA DI CAVITA' SOTTERRANEE

1. 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.

1.1 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 legato 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 ("sinkholes") 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 sinkholes, 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 sinkholes 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 suffusione (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 (sforamenti; sinkholes), questo può essere classificato come Collapse Sinkhole, e in funzione della litologia interessata in Bedrock/Cover/Caprock Collapse Sinkhole (Figura 1.1).

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.

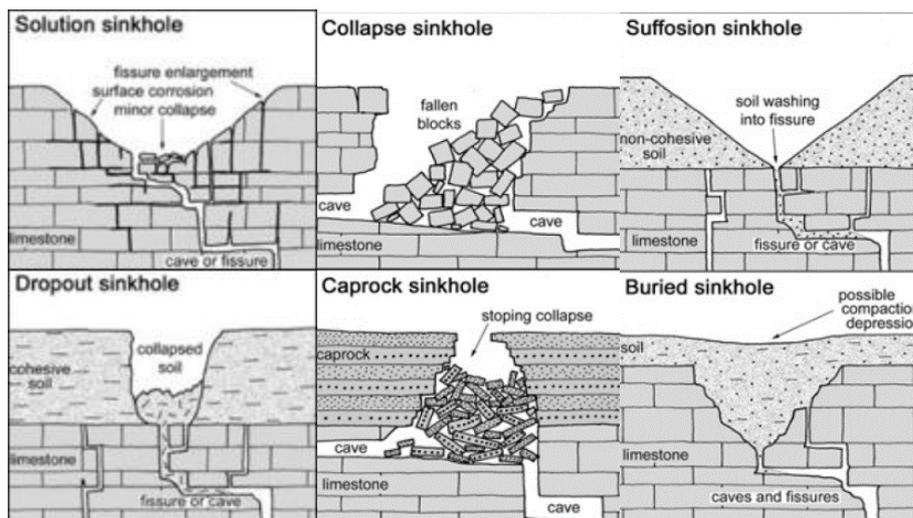


Figura 1.1 – Classificazione dei sinkhole (da Waltham et al., 2005).

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 1.2).

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 1.2 – Cavit  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 cavit  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 cavit  antropiche possono essere classificate in funzione della tipologia di opera e della loro tecnica di realizzazione (Figura 1.3), secondo i criteri utilizzati per la realizzazione del Catasto Nazionale delle Cavit  Artificiali a cura della Commissione Nazionale delle Cavit  Artificiali della Societ  Speleologica Italiana (Parise et al., 2013; Betti et al., 2018).

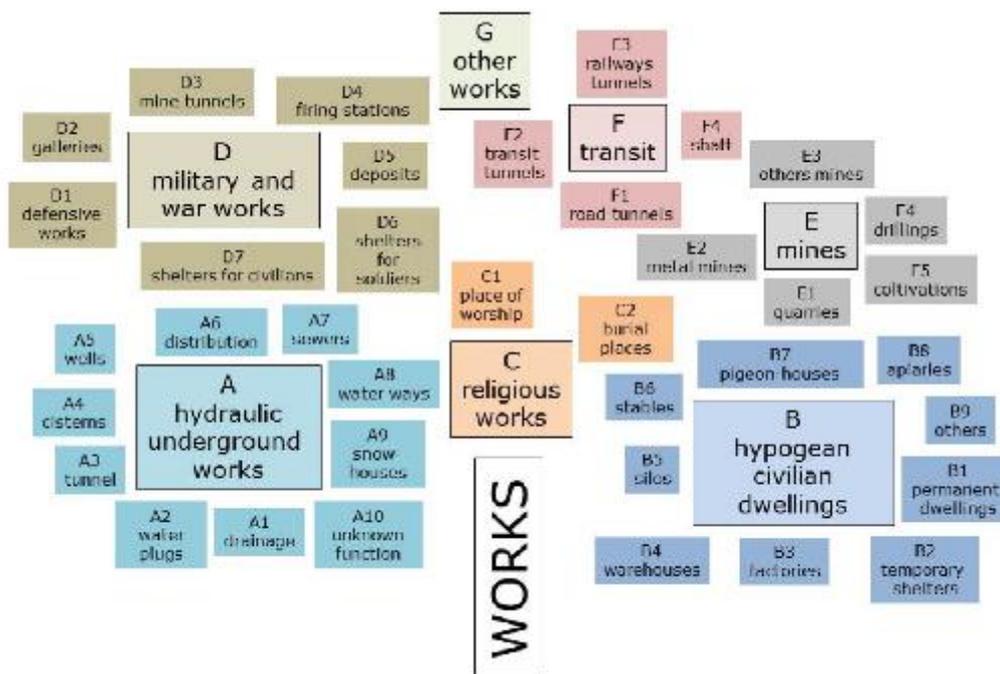


Figura 1.3 – Albero tipologico delle cavit  antropiche (da Parise et al., 2013).

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 1.2b), 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 1.3. 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 transito (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.

1.2 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 1.1), 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 1.1), 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 1.1 – 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

1.3 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 1.4). 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 1.5), di cui in Veneto circa il 15% mappate come diffuse e spesso sovrapposte alle cavità singole (Figure 1.4 e 1.6). 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.

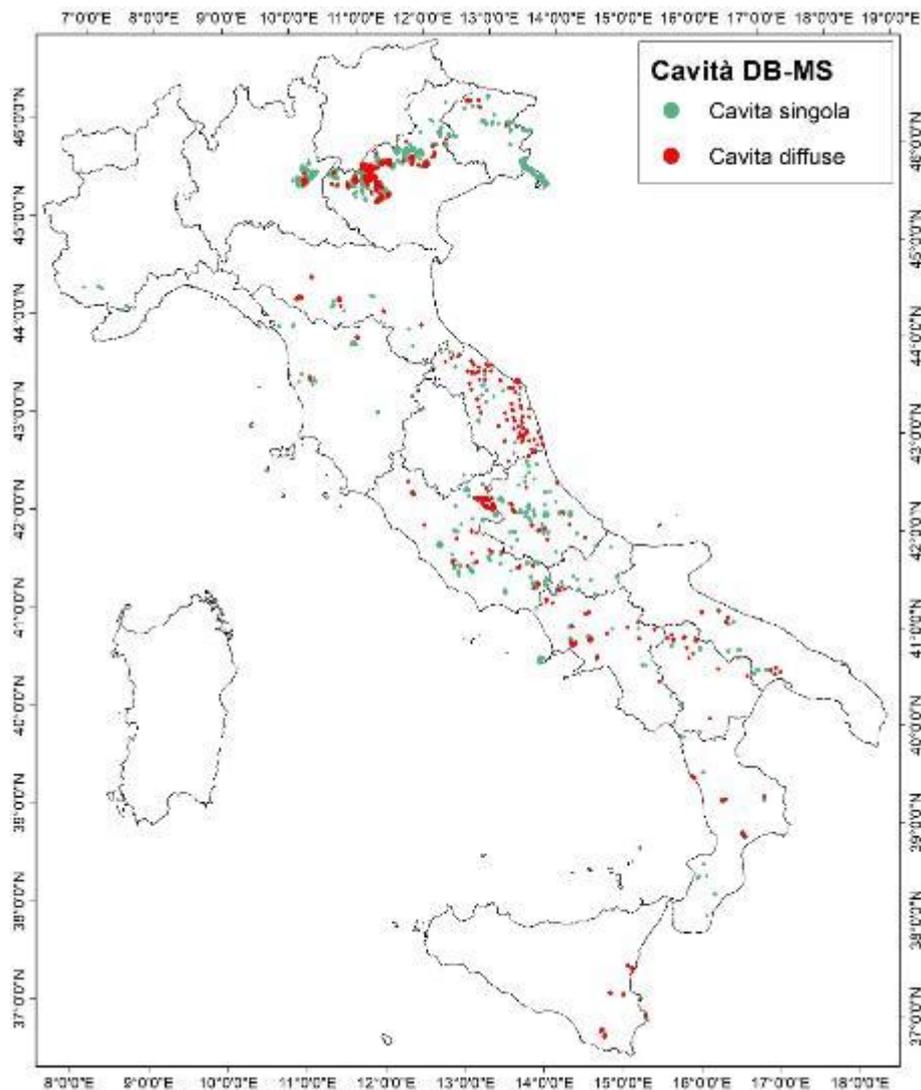


Figura 1.4 – Distribuzione delle cavità del DB-MS (versione giugno 2020) nelle regioni italiane.

In sintesi, ad eccezione di Veneto, Friuli e di alcune regioni del centro Italia (Figura 1.5, 1.6), 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).

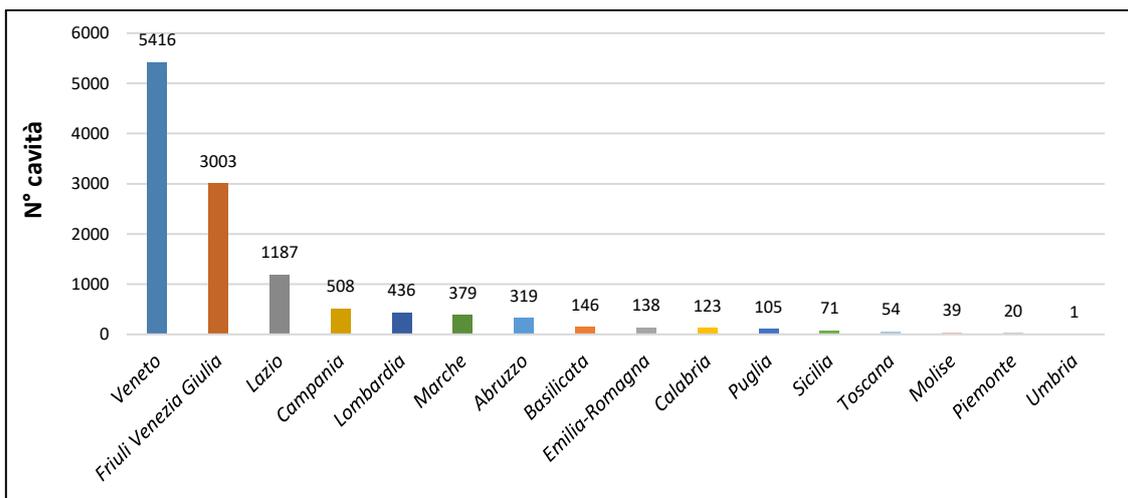


Figura 1.5 – Numero di cavità presenti nel DB-MS (versione giugno 2020) per regione.

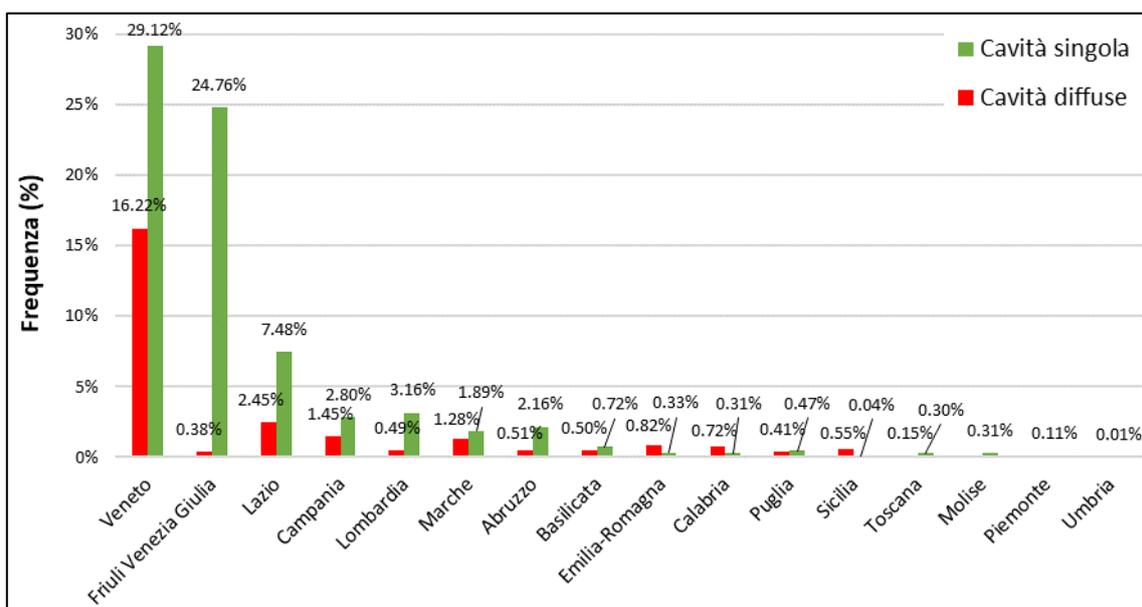


Figura 1.6 – Frequenza percentuale delle cavità distinte per tipologia nelle Regioni coperte dai dati del DB-MS.

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 1.7) e dalla Carta Litologica d'Italia 1:100.000 di ISPRA (Amanti et al., 2002) (Figura 1.8), 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 = Tufi Stratificati La Storta/Sacrofano; PZ = Pozzolane Rosse; TL = Tufo Lionato/Villa Senni), ritenuti di interesse ai fini del presente studio.

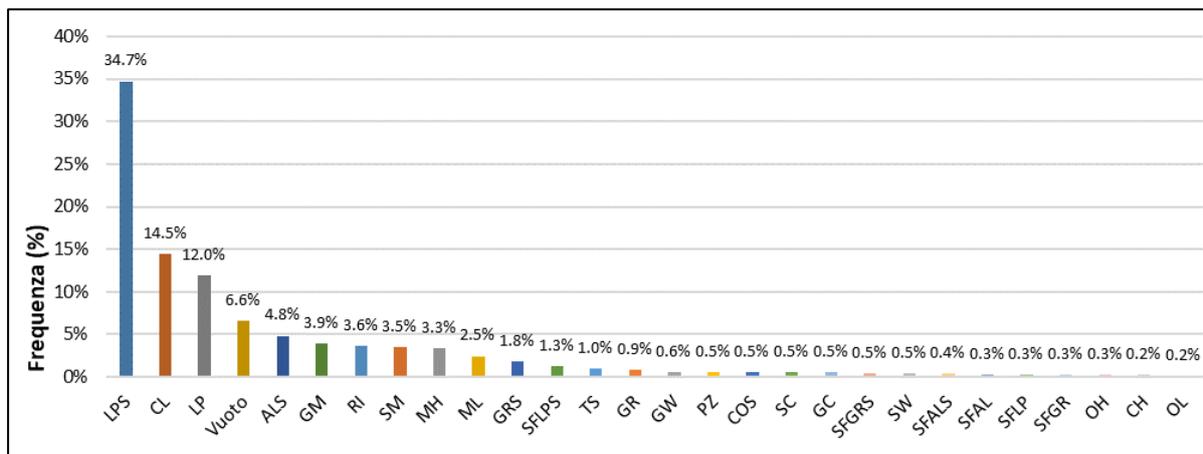


Figura 1.7 – Distribuzione di frequenza delle Unità GT associate alle cavità. Nel grafico sono riportate solo le Unità GT con n° cavità > 15 (ovvero Unità GT con frequenza >0.13%) corrispondenti al 99.4% del totale (11'945) delle cavità presenti nel DB-MS.

Le stesse analisi sono state eseguite utilizzando i dati della Carta Litologica d'Italia 1:100.000 di ISPRA (Figura 1.8). In questo confronto, oltre il 50% delle cavità risulta scavato in rocce di natura calcarea (calcilutiti, 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 1.10).

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 1.8) 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 1.9a). Per queste regioni nel DB-MS sono riportate 953 cavità, egualmente distribuite tra cavità singole e cavità diffuse (Figura 1.9b, Tabella 1.2).

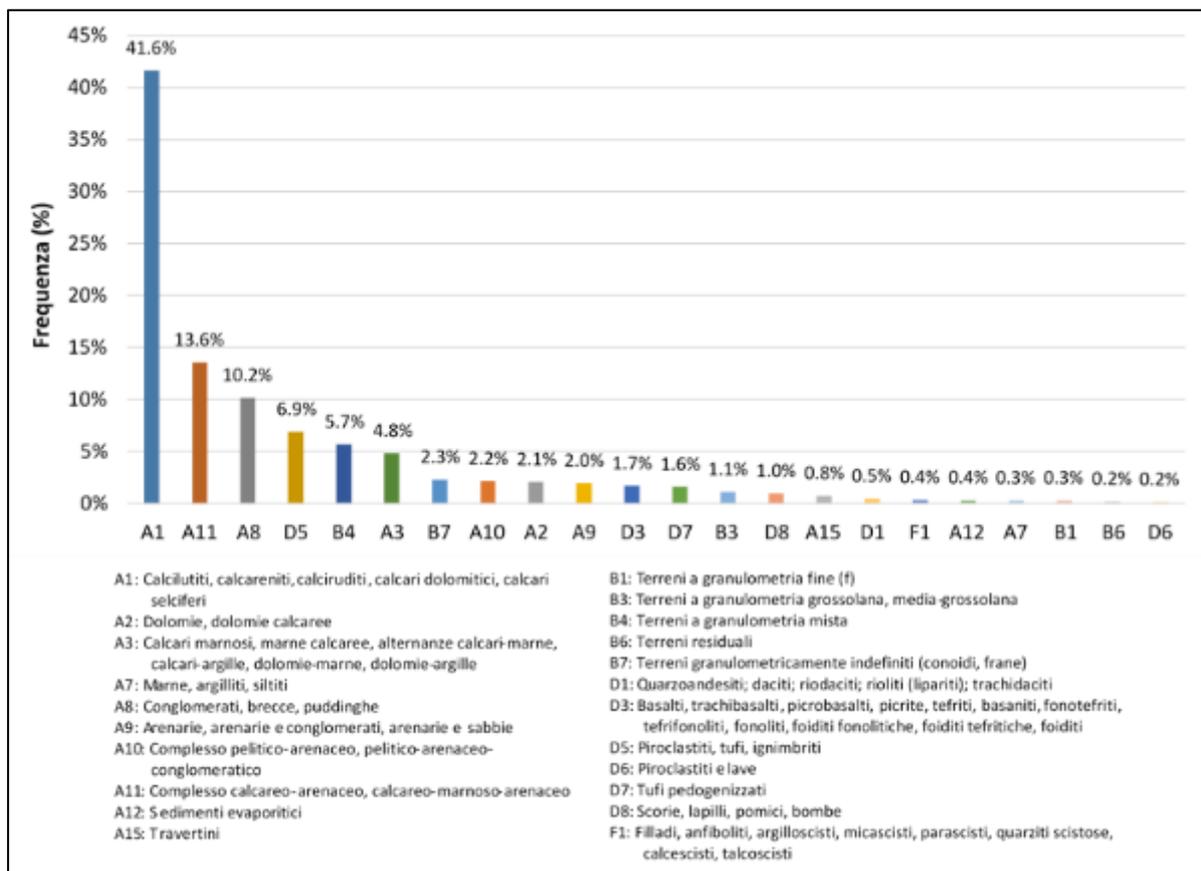


Figura 1.8 – Distribuzione di frequenza delle classi litologiche associate alle cavità. Nel grafico sono riportate solo le classi litologiche con n° cavità > 20 (ovvero classi litologiche con frequenza > 0.18%) corrispondenti al 99.3% del totale (11'945) delle cavità presenti nel DB-MS.

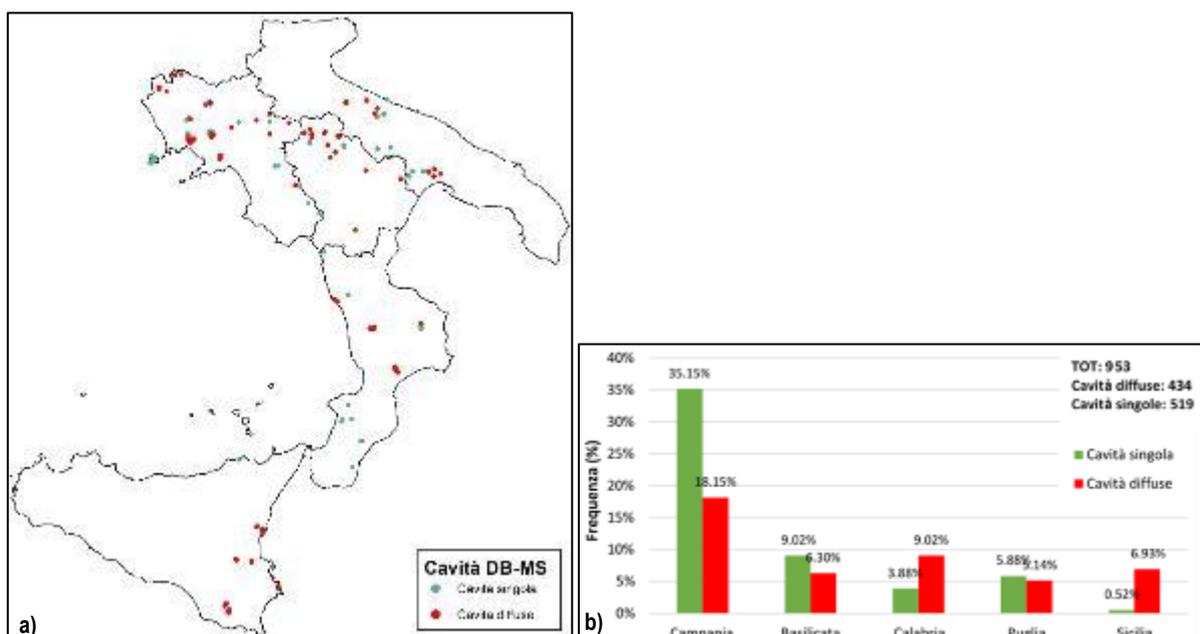


Figura 1.9 – a) Distribuzione delle cavità nelle regioni PON; b) Frequenza percentuale delle cavità, distinte per tipologia, nelle regioni PON.

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 1.2 si nota infatti, come oltre il 50% delle cavità sia localizzato in Campania, di cui più della metà sono catalogate come cavità singole (Figura 1.9b), 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 1.2 – 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 1.10). 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.

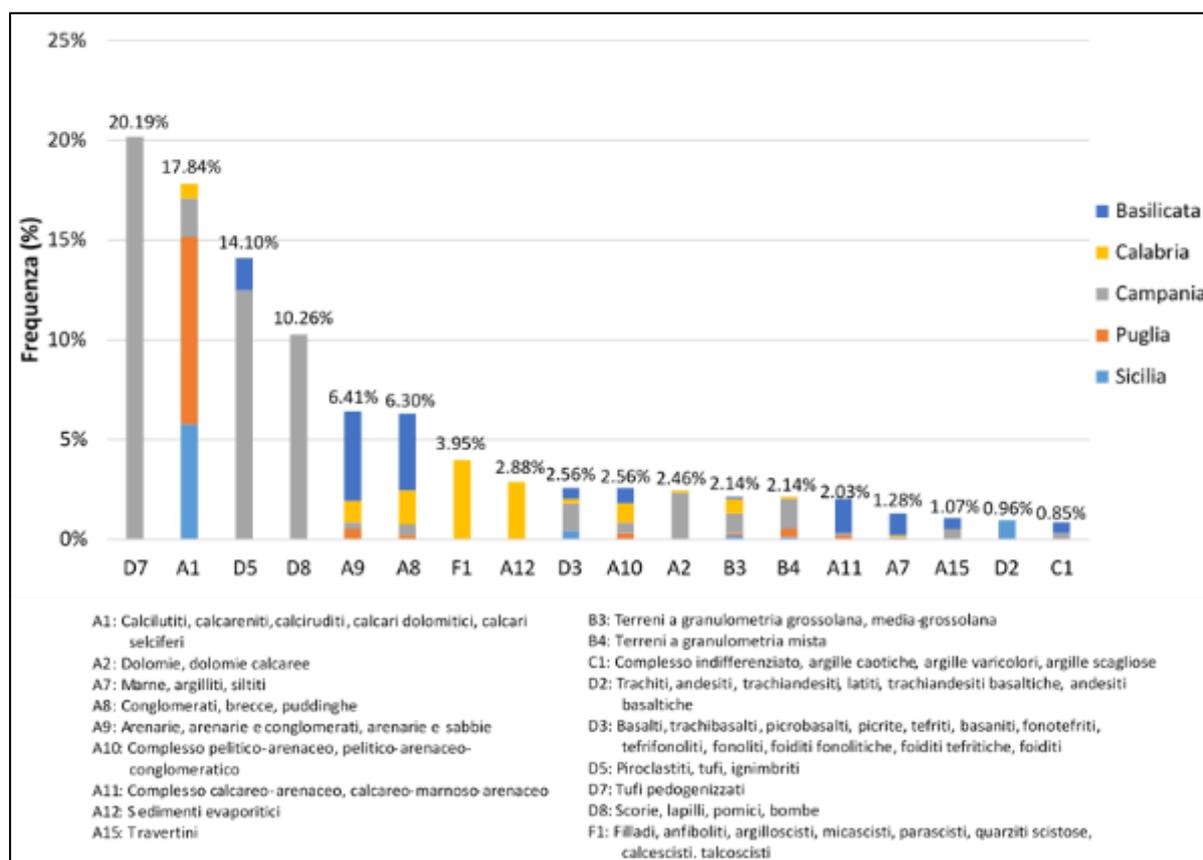


Figura 1.10 – Distribuzione di frequenza delle classi litologiche associate alle cavità delle regioni PON. Nel grafico sono riportate solo classi litologiche con N° cavità > 5 (ovvero classi litologiche con frequenza >0.5%) corrispondenti al 98% del totale (953) delle cavità presenti nel DB-MS.

1.4 Censimento dei fenomeni di instabilità di cavità sotto azioni sismiche

Diversi studi mettono in relazione la formazione di sinkholes 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; Vivencio 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) I_{MCS} epicentrale; 8) I_{MCS} sinkhole; 9) M_w ; 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.

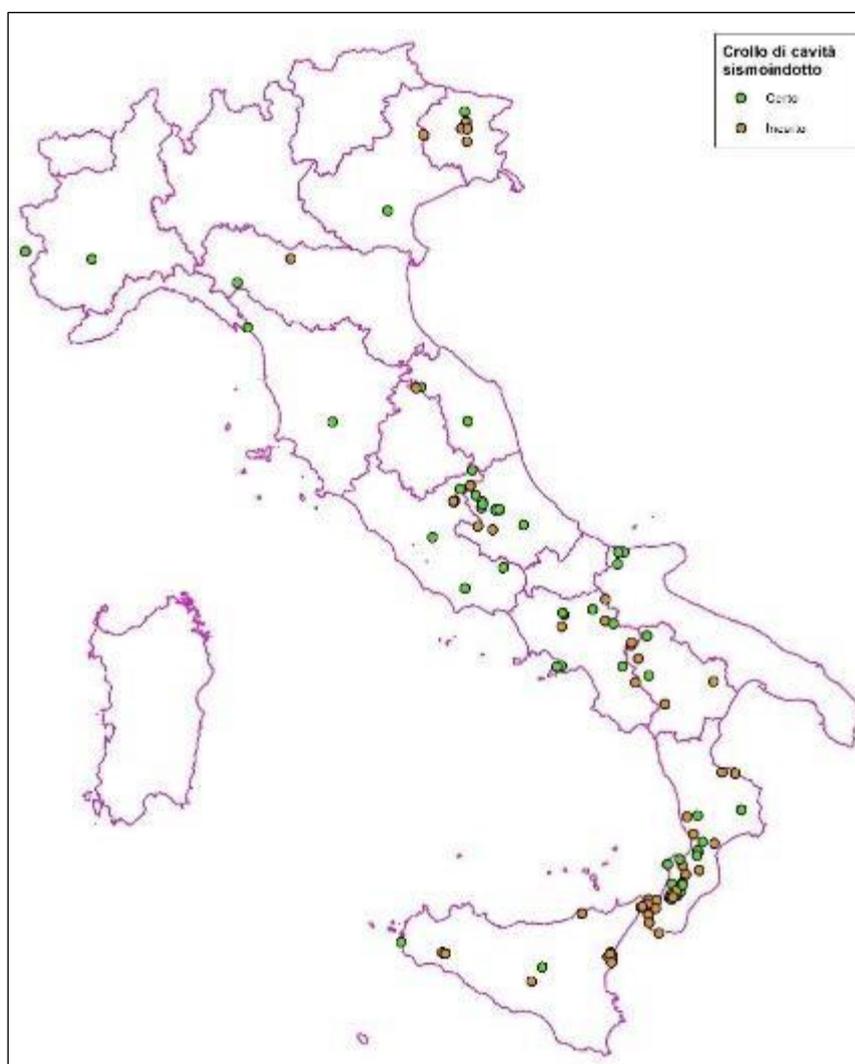


Figura 1.11 – Distribuzione dei fenomeni di crollo di cavità sismoindotto censiti.

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

maggior 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 V_{s30} , 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 V_{s30} 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.

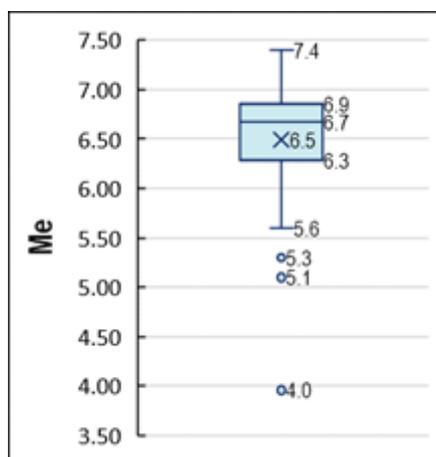


Figura 1.12 – Box-plot dell'intensità sismica dei terremoti associati a fenomeni di crollo sismoindotto.

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 (Sezione 1)

- 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 Calcarene 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-GNDCI 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., Madonna 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.

ALLEGATO 1 - Bozza delle Linee Guida per la gestione del territorio in aree interessate da Instabilità di Cavità Sotterranee (LG-ICS)

PREMESSA

Il presente documento ha la finalità di fornire una proposta di Linea Guida a supporto degli “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica” (Gruppo di Lavoro MS, 2008) specifica 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 MS come oggetti esposti e pertanto vulnerabili all’azione sismica, studiandone cioè il livello di suscettibilità al crollo con conseguente effetti al piano campagna (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) mancano 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 i professionisti incaricati degli studi trattano il problema con approcci differenti, non univoci. All’interno degli ICMS 2008 in particolare, le cavità sotterranee vengono classificate tra le Forme/Elementi sepolti, ma non vengono esplicitamente fornite ulteriori informazioni riguardanti le modalità per la selezione delle cavità di interesse, né sono definiti i criteri per l’individuazione e la rappresentazione delle aree di instabilità dovute al crollo delle cavità stesse. Negli Standard 4.2 (CTMS, 2020), la presenza di cavità nel sottosuolo può essere rappresentata, all’interno della 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 se tra loro interconnesse o meno. Nella documentazione tecnica per gli studi di MS mancano, quindi, le indicazioni che permettano di discriminare quali siano le cavità da tenere in conto negli studi di MS, così come i criteri di scelta tra l’una o l’altra modalità di rappresentazione delle cavità, come ad esempio le dimensioni, la tipologia e l’interdistanza tra le cavità.

L’obiettivo della presente proposta di Linee Guida è definire 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-ICS);
- definire una disciplina d’uso delle zone di instabilità per cavità.

Con riferimento alla

Figura A. 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 A. 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.

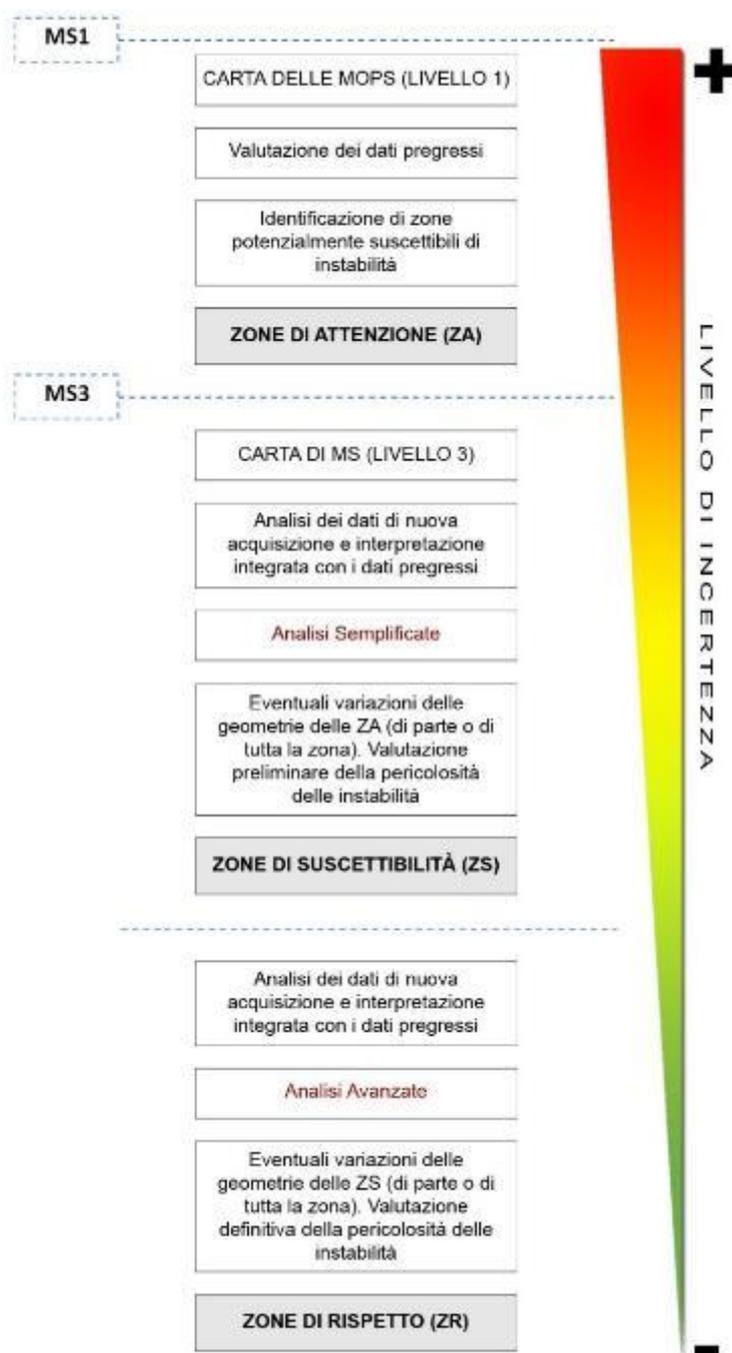


Figura A. 1 Schema illustrativo del tipo di zona di instabilità nelle carte delle MOPS e di MS. La raccolta dati e la tipologia di analisi permettono di ridurre le incertezze procedendo dal livello 1 al livello 3.

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 vulnerabili al crollo di cavità sotterranee sotto azioni sismiche

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 in presenza di cavità sotterranee

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 al crollo di cavità sotterranee sotto azioni sismiche.

In Tabella A. 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 A. 1 Livelli, carte e corrispondenti tipi di zone potenzialmente soggette a crollo sismoindotto di cavità.

Livello di MS	Carta	Zone di Instabilità per Vulnerabilità Sismica di 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 Instabilità di Cavità Sotterranee (Z_{AICS}) in condizioni sismiche sulla base di elementi informativi minimi desunti da indagini pregresse (i.e. 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):** vengono individuate le Zone Suscettibilità (Z_{SICS}) e le Zone di Rispetto (Z_{RICS}) 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_{ZS,ICS}) pari a 3 e un valore soglia di FS per le Zone di Rispetto (FS_{ZR,ICS}) pari a 1,5. Il Fattore di Sicurezza per le ZS (FS_{ZS,ICS}) viene calcolato attraverso un approccio semplificato che prevede l'utilizzo di abachi; il Fattore di Sicurezza per le ZR (FS_{ZR,ICS}) 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 della presente Linee Guida.

Il diagramma di flusso in Figura A. 2 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 (§2.1); tali cavità saranno oggetto delle verifiche ed approfondimenti dei 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).

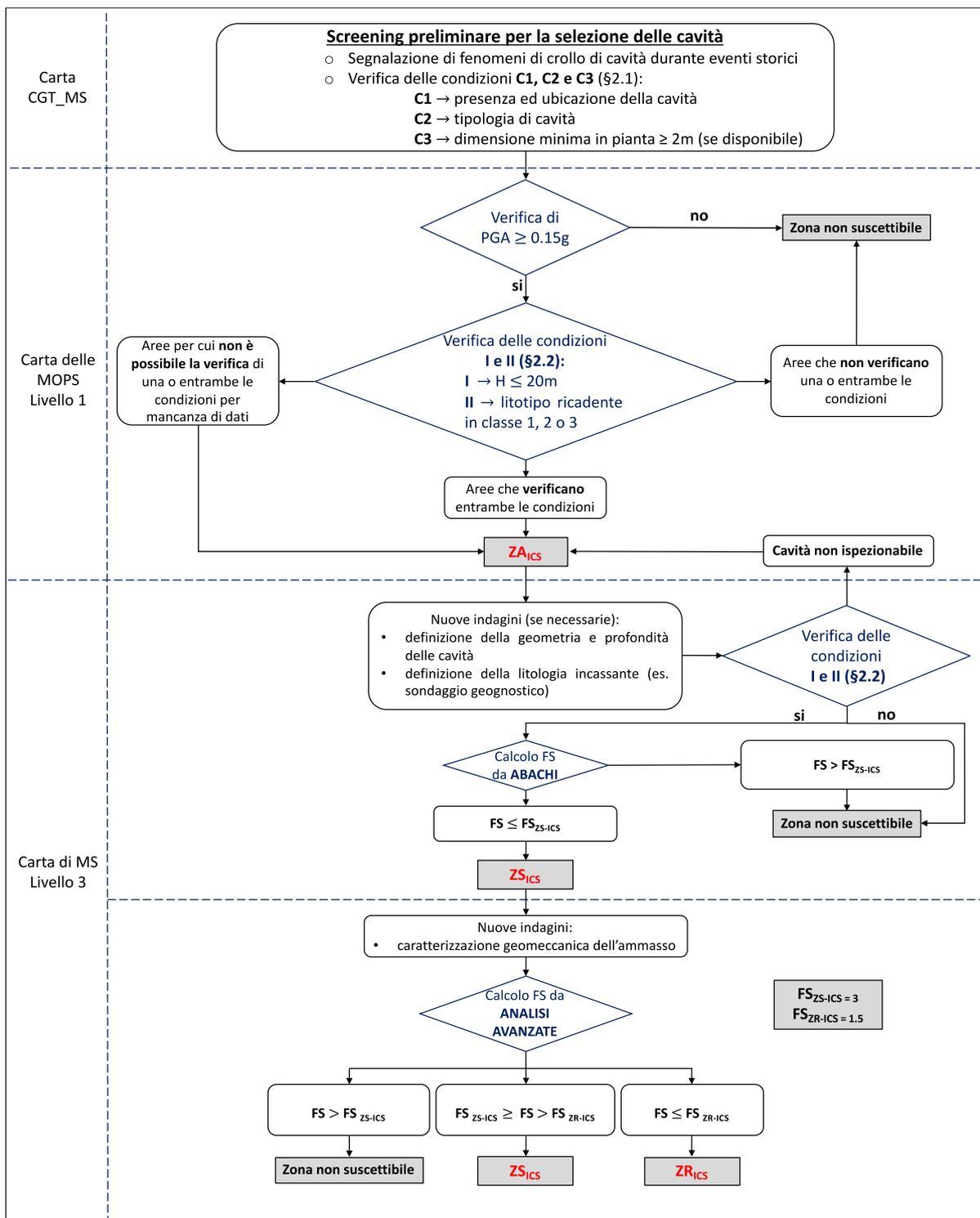


Figura A. 2 Diagramma di flusso del percorso metodologico per la definizione delle zone di instabilità per crollo di cavità sotterranee.

Qui 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 A. 2:

- 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 (§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 $Z_{A_{ICS}}$; (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 $Z_{A_{ICS}}$, 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 $Z_{A_{ICS}}$ 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 (§2.2): le cavità che rispettano tutte le condizioni predisponenti sono effettivamente classificabili come $Z_{A_{ICS}}$, 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 $Z_{A_{ICS}}$. Tutte le $Z_{A_{ICS}}$ 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 $Z_{S_{ICS}}$ che potrà poi essere analizzata nel successivo livello di approfondimento per l'individuazione di un'eventuale $Z_{R_{ICS}}$. Le cavità non ispezionabili, per cui non è possibile effettuare nuove indagini e pertanto la verifica delle condizioni del Livello 1, saranno classificate come $Z_{A_{ICS}}$ 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 $Z_{S_{ICS}}$ 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 il FS il quale andrà confrontato con i valori soglia del FS individuati al fine di definire la zona di appartenenza della cavità in oggetto:
 - se $FS > 3$ → zona non suscettibile;
 - $1,5 < FS \leq 3$ → Zona di suscettibilità $Z_{S_{ICS}}$;
 - $FS \leq 1,5$ → Zona di rispetto $Z_{R_{ICS}}$.

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 in §3.1.

I fattori di screening preliminare da considerare nella CGT_MS (Figura A. 2) 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 Carta Geologico-Tecnica 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 ($Z_{A_{ICS}}$)

Nel Livello 1 di MS, sulla base delle cavità individuate nella CGT, vengono definite le Zone di Attenzione ($Z_{A_{ICS}}$) 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 ($PG_{Amax} \geq 0,15g$) ².

¹ Valore minimo di 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 i valori derivanti dalle analisi numeriche (cfr. APPENDICE 3).

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

- **I:** la copertura (H) della cavità deve avere uno spessore non superiore a 20m ($H \leq 20m$) ³ (Figura A. 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 A.3a 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 A.3a esempio 2), H è il valore medio tra H_1 e H_2 ; nel caso di cavità con calotta voltata senza piedritti (Figura A.3a 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 A.3c esempio 2) o con forti pendenze del piano campagna (Figura A.3c esempio 1), è possibile trattare la cavità come più cavità a sezione omogenea come mostrato in Figura A.3c; per ciascuna sezione omogenea così individuata, si procederà alla verifica della stabilità della porzione di cavità.

In Figura A.3 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.

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).

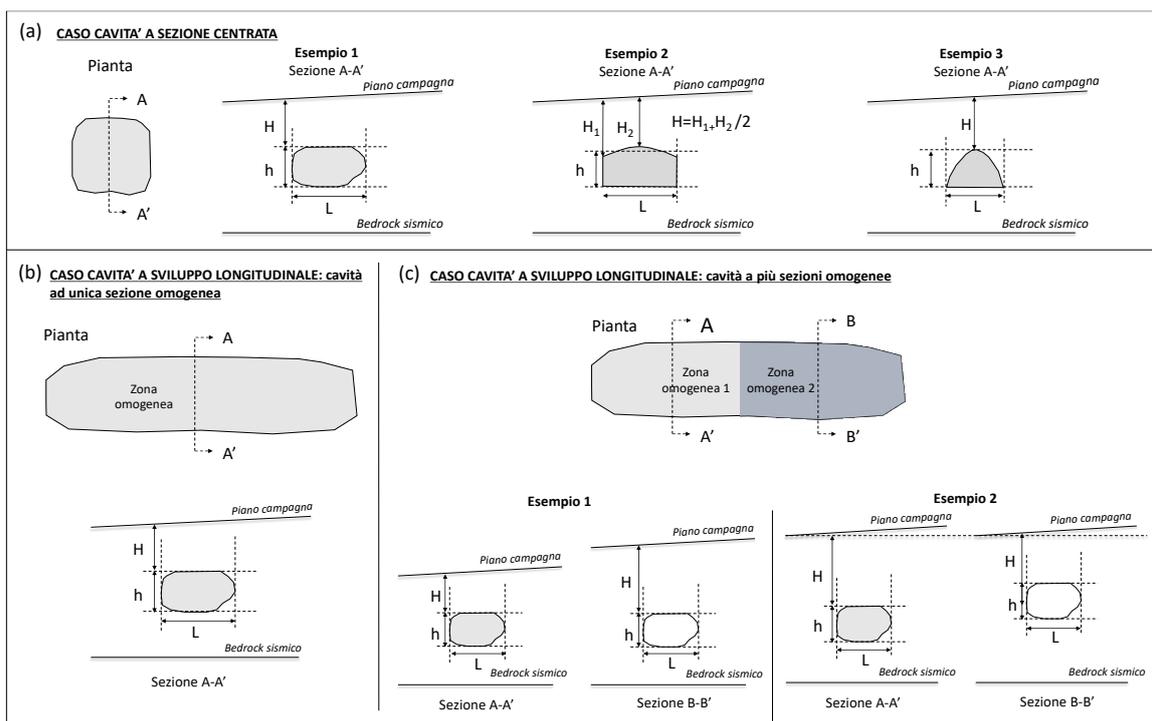


Figura A. 3 Individuazione degli elementi geometrici significativi della cavità.

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_{ICS} . 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_{ICS} , rimandando al successivo livello di approfondimento la verifica di tali condizioni.

La verifica delle condizioni predisponenti, e quindi l'identificazione delle ZA_{ICS} , 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_{SICS}) e Rispetto (Z_{RICS})

Negli studi di MS di Livello 3 le aree interessate dalla presenza di cavità e mappate al Livello 1 come Z_{AICS} 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_{SICS} e/o delle Z_{RICS} . 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_{AICS} 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_{AICS} ;
- caratterizzare da un punto di vista geomeccanico i litotipi incassanti le cavità ricadenti in Z_{AICS} .

2.3.1. Analisi semplificate (Abachi)

Le analisi semplificate hanno per obiettivo la verifica delle condizioni di instabilità delle ZA.

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 A. 3);
- 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_{AICS} 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; §2.1; Figura A. 2) di tutte le cavità ricadenti in Z_{AICS} . 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 A. 2). Al contrario, le cavità che rispettano tutte le condizioni predisponenti (PGA, I e II; §2.1; Figura A. 2) 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_{AICS} 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 $FS_{ZS,ICS}$ ($FS_{ZS,ICS} > 3$) 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 $FS_{Zs,ICS}$ ($FS_{Zs,ICS} \leq 3$), la cavità è classificabile come area suscettibile al crollo e dunque andrà a costituire la relativa ZS_{ICS} .

La Zona di Suscettibilità per Instabilità di Cavità Sotterranee (**ZS_{ICS}**) 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 $FS_{ZR,ICS}$ 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_{ICS});
- $FS \leq 1,5 \rightarrow$ Zona di Rispetto (ZR_{ICS}).

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 e delle differenti zone di instabilità all'interno delle carte delle MOPS e di MS.

Le zone instabili per vulnerabilità sismica di 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 ZAV_{SCS} 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 ZS_{ICS} e le ZR_{ICS} sono poligoni riportati esclusivamente nelle Carte di MS (Livello 3 di MS).

La ZS_{ICS} può ricadere all'interno di una ZA_{ICS} , ma le due zone non potranno mai coincidere. Allo stesso modo la ZR_{ICS} può essere ricompresa all'interno di una ZA_{ICS} , ma le diverse tipologie di zone non potranno mai coincidere e inoltre non potranno coesistere sovrapposizioni tra le diverse tipologie di zone.

La ZR_{ICS} può ricadere all'interno di una ZS_{ICS} , ma le due zone non potranno mai coincidere né sovrapporsi. Inoltre, la ZR_{ICS} e la ZS_{ICS} non necessariamente coincidono con la ZA_{ICS} , ma possono essere costituite da porzioni di essa.

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

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

Le cavità individuate a seguito dello screening preliminare (§2.1) dovranno essere riportate nella CGT utilizzando le diverse simbologie proposte dagli Standard 4.2 (CTMS, 2020), in funzione del livello di conoscenza degli elementi informativi minimi (§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 A. 2 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 A. 2 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 involucro 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 il posizionamento del simbolo di cavità sepolta isolata si consiglia di 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).

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.

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. Si consiglia comunque di 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 (§3.1.1) si consiglia di utilizzare il simbolo di Area con cavità sepolte anche nel caso di una singola cavità avente 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_{AICS} (Carta delle MOPS)

La Zona di Attenzione (Z_{AICS}) si costruisce sulla base di elementi informativi minimi (§2.2) e pertanto il dimensionamento tiene conto di un certo grado di incertezza. Le dimensioni della Z_{AICS} variano infatti in funzione del livello di conoscenza della cavità che la costituisce (§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 A. 3 per ogni tipologia di Z_{AICS} 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 A. 3 Dimensioni delle Zone di Attenzione per Vulnerabilità Sismica di Cavità Sotterranee (Z_{AICS})

Planimetria cavità	Z _{A_{vscs}} (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_{AICS} 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.

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

Le $Z_{A_{ICS}}$ 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 involuppo 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 $Z_{A_{ICS}}$.

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. $Z_{S_{ICS}}$ (Carta di MS)

La Zona di Suscettibilità ($Z_{S_{ICS}}$) si costruisce sulla base di elementi informativi specifici (§2.3.1) e in particolare dello sviluppo planimetrico della cavità che la costituisce. Le dimensioni della $Z_{S_{ICS}}$ 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).

Nella Tabella A. 4 sono definite delle dimensioni raccomandate per il dimensionamento del buffer, in funzione della profondità (H) e della larghezza (L) della cavità ⁷. Una ampiezza minore, o maggiore, di tale zona è sconsigliata, a meno di chiare e documentate evidenze geologiche che giustificano una diversa perimetrazione, le quali andranno esplicitate nella relazione illustrativa.

Tabella A. 4 Dimensioni delle Zone di Suscettibilità per Vulnerabilità Sismica di Cavità Sotterranee ($Z_{S_{ICS}}$); H, profondità della cavità; L, larghezza della cavità.

H (m)	$Z_{S_{ICS}}$ (m) CLASSE 1-2-3			
	$L \leq 5$	$5 < L \leq 10$	$10 < L \leq 15$	$15 < L \leq 20$
$H \leq 2$	$L*3$	$L*2,5$	-	-
$2 < H \leq 5$	$L*2,7$	$L*2,3$	$L*2,15$	$L*2$
$5 < H \leq 10$	-	$L*2,15$	$L*2$	$L*1,9$
$H > 10$	-	-	$L*1,8$	$L*1,5$

Per le cavità sepolte isolate la $Z_{S_{ICS}}$ 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 $Z_{S_{ICS}}$ 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 $Z_{S_{ICS}}$ saranno identificate solo per queste. Per le restanti cavità verrà mantenuta la residuale ZA.

In APPENDICE 3 sono riportati alcuni esempi di rappresentazione delle $Z_{S_{ICS}}$.

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

3.4. ZR_{ICS} (Carta di MS)

La Zona di Rispetto (ZR_{ICS}) si costruisce sulla base di elementi informativi specifici (§2.3.2) e in particolare dello sviluppo planimetrico della cavità che la costituisce e della caratterizzazione geomeccanica della litologia incassante. Le dimensioni della ZR_{ICS} 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 A. 5 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 ZR_{ICS} 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 giustificano una diversa perimetrazione e che andranno esplicitati nella relazione illustrativa.

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

H (m)	ZR _{ICS} (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

H (m)	ZR _{ICS} (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)	ZR _{ICS} (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 ZR_{ICS} 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 ZR_{ICS} 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

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

caratterizzazione geomeccanica sia noto solo per alcune delle cavità presenti al suo interno, le ZR_{ICS} saranno identificate solo per queste ultime. Per le restanti cavità verrà mantenuta la residuale ZA e/o ZS.

In APPENDICE 3 sono riportati alcuni esempi di rappresentazione delle ZR_{ICS} .

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

1. 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_{ICS}, ZS_{ICS} e ZR_{ICS} 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.

2. 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 B.1). Nella tabella viene riportata anche una colonna relativa alle infrastrutture, come ambito distinto e in questa sede non approfondito.

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).

Categorie urbanistiche		Aree edificate (recenti o consolidate)	Aree non edificate (con previsione di trasformazione)	Aree non urbanizzate a trasformabilità limitata	Infrastrutture
Zone Instabili per Vulnerabilità Sismica di Cavità Sotterranee	Z _{AICS}	Obbligo di approfondimento (2.1.1)	Obbligo di approfondimento (2.2.1)		Programma Infrastrutture (2.3)
	Z _{SICS}	Programma Zone Instabili (2.1.2)	Intervento limitato (2.2.2)		
	Z _{RICS}				

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

2.1. Aree edificate

2.1.1. Obbligo di approfondimento (Aree edificate)

Nel caso di Z_{AICS}, 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 Z_{SICS} e le Z_{RICS}, 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	Inibito	Non è consentita la nuova edificazione

2.1.2. Programma Zone Instabili

Per le Z_{SICS} e Z_{RICS}, 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 ZA_{ics}.

2.1.2.1. Scelta obiettivo del PZI

La definizione di uno specifico PZI implica la scelta di uno dei seguenti obiettivi, eventualmente differenziati in funzione di ZS_{ics} e ZR_{ics}:

Intervento limitato (Obiettivo 1)

Intervento obbligatorio o limitato (Obiettivo 2)

Intervento inibito (Obiettivo 3)

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

2.1.2.1.1. 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.

2.1.2.1.2. Seconda ipotesi: Intervento obbligatorio o limitato (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	Limitato	Non è consentita la nuova edificazione.

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.

2.1.2.1.3. 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.

2.2. Aree non edificate o non urbanizzate

2.2.1. 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 Z_{AICS}, 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 Z_{SICS} e le Z_{RICS}.

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	Inibito	Non è consentita la nuova edificazione.

2.2.2. Intervento limitato

Nelle Aree non edificate (con previsione di trasformazione) e nelle Aree non urbanizzate a trasformabilità limitata, ricadenti in Z_{SICS} e in Z_{RICS}, 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.

2.3. 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.

3. 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.

3.1. Aree edificate

3.1.1. Obbligo di approfondimento (Aree edificate)

Nel caso di Z_{AICS}, 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.

3.1.2. Programma Zone Instabili

A quanto già previsto per le Z_{SICS} e Z_{RICS}, 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.

3.1.2.1. 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.

3.1.2.1.1. Prima ipotesi: Intervento limitato (Obiettivo 1)

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

In ZR_{ICS} e ZS_{ICS}

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.

3.1.2.1.2. Seconda ipotesi: Intervento obbligatorio (Obiettivo 2)

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

In ZR_{ICS} e ZS_{ICS}

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.

3.1.2.1.3. Terza ipotesi: Intervento obbligatorio (Obiettivo 3)

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

In ZR_{ICS} e ZS_{ICS}

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. I):

- 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. I 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 Sinkholes 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.html
	Pubblicazioni 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 (CFTI5Med) 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: 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 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.

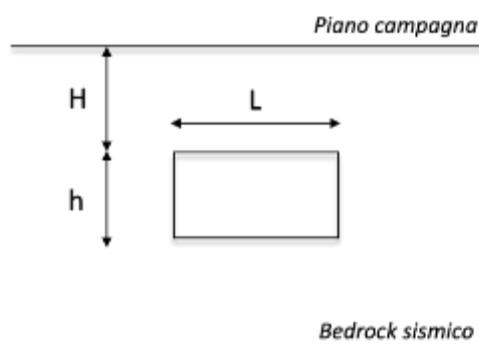


Figura A3.1. Schema geometrico di riferimento per le cavità (in sezione).

In Figura A3.2 viene riportata 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.

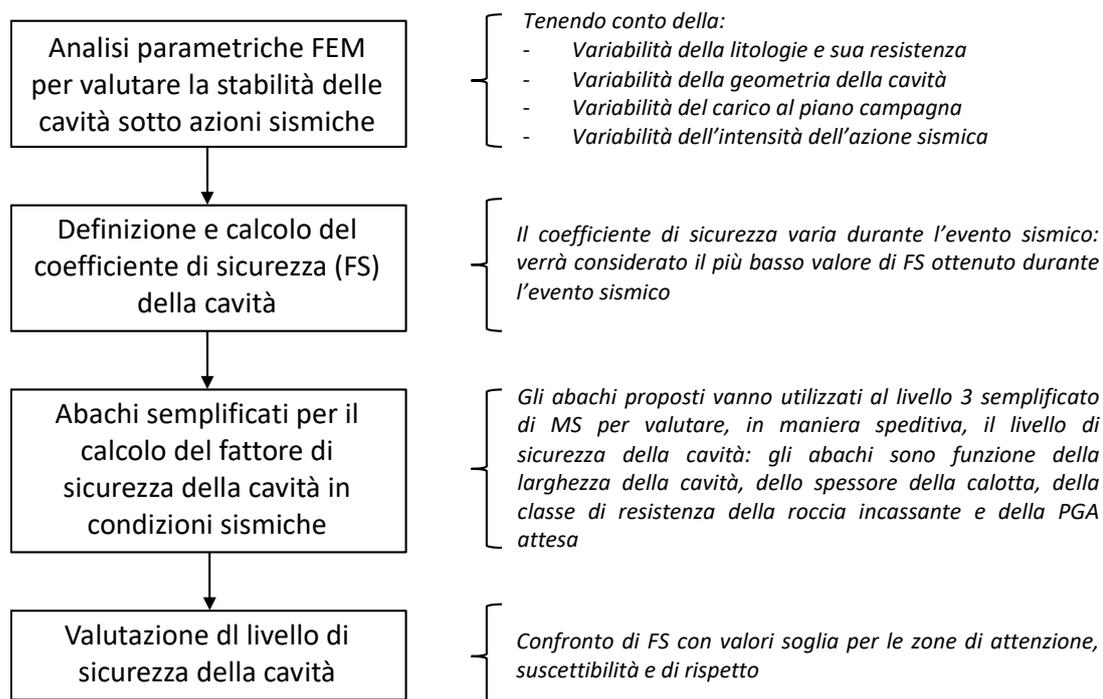


Figura A3.2. Flow chart della metodologia proposta per la valutazione della vulnerabilità sismica di cavità sotterranee.

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	2	1	3	q ₁ - q ₂	6
1.2	5		2.5			
1.3	10		5			
2.1	5	5	1	4	q ₁ - q ₂	8
2.2	10		2			
2.3	15		3			
2.4	20		4			
3.1	10	10	1	3	q ₁ - q ₂	6
3.2	15		1.5			
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
ν	-	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

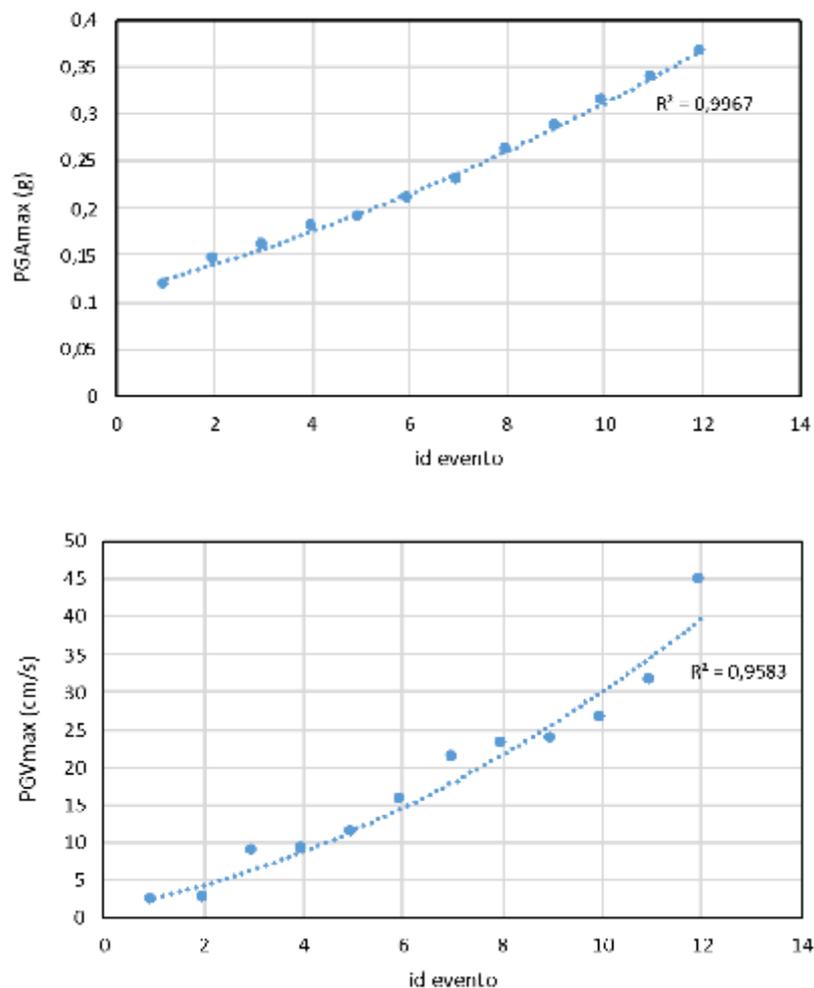


Figura A3.3. Scelta set di segnali accelerometrici: variazione di PGAmax, e PGVmax.

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	x	2	x	12	x	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 *ah 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.

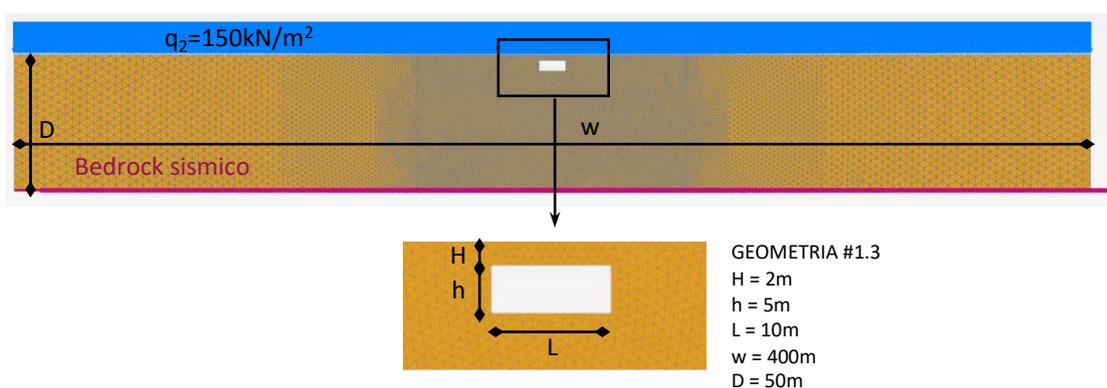


Figura A3.4. Mesh numerica implementata in Plaxis 2D (modificato da Fabozzi et al., 2021a,b).

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).

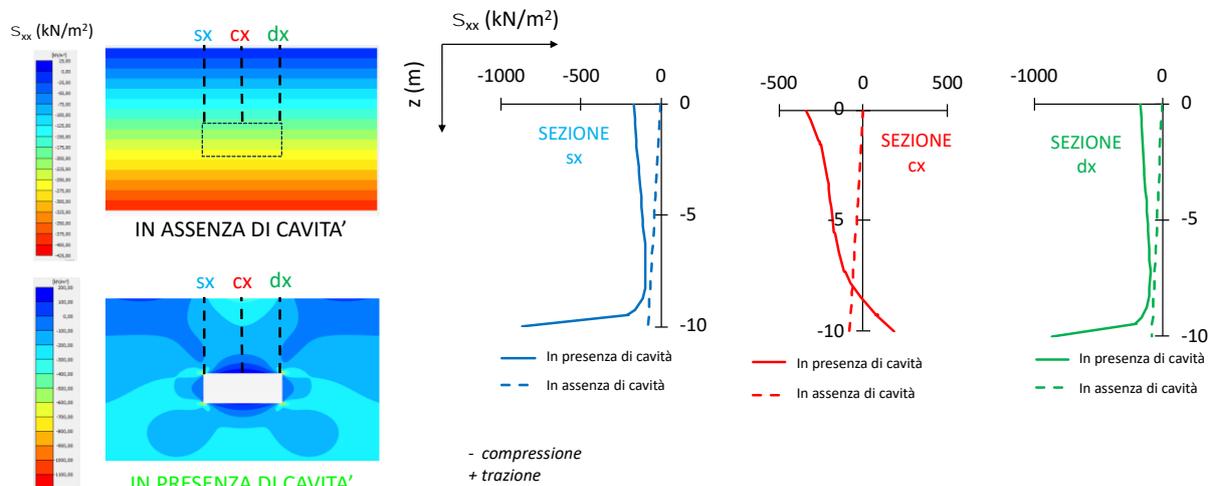


Figura A3.5. Distribuzione delle σ_{xx} in condizioni statiche in presenza e in assenza di cavità della geometria #1.3 (Classe 1 di resistenza, sovraccarico q_2). (modificato da Fabozzi et al., 2021a,b).

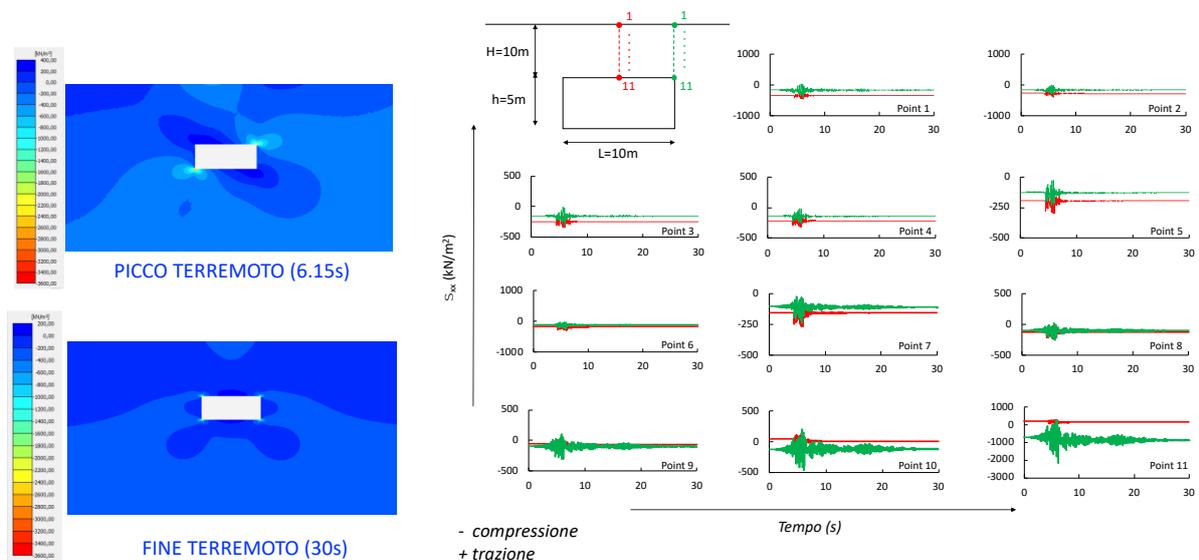


Figura A3.6. Distribuzione delle σ_{xx} in condizioni dinamiche durante il terremoto di Loma Prieta del 18.10.1989, geometria #1.3 (Classe 1 di resistenza, sovraccarico q_2). (modificato da Fabozzi et al., 2021a,b).

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 redistribuzione 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.

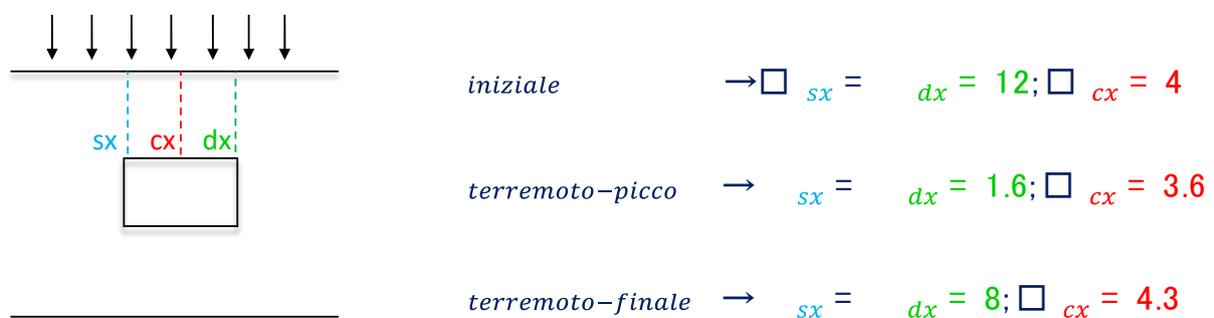


Figura A3.7. Coefficiente di sicurezza in condizioni statiche e dinamiche per la cavità rettangolare #1.3 (Classe 1 di resistenza, sovraccarico q_2).

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.

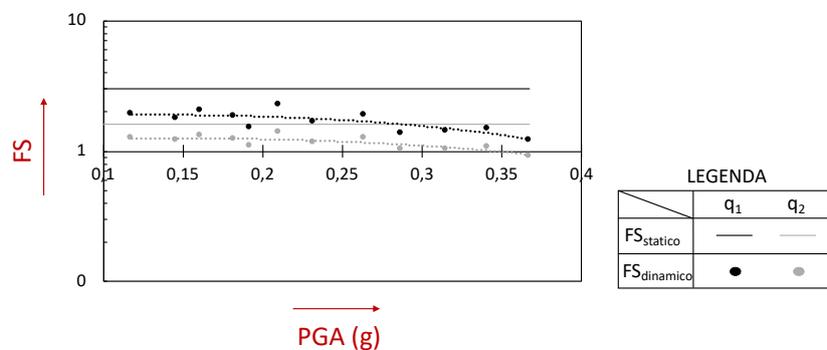


Figura A3.8. Variazione del coefficiente di sicurezza con la PGA per la cavità rettangolare #1.3 (Classe 1 di resistenza, sovraccarico q_2). (modificato da Fabozzi et al., 2021a,b).

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

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

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

CLASSE 1 - $100 < q \leq 200 \text{ kN/m}^2$

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

CLASSE 2 - 100 < q ≤ 200 kN/m²

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

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

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

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

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

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

H (m)	FS (PGA > 0,25g) CLASSE 3 $100 < q \leq 200 \text{ kN/m}^2$			
	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 \leq 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.

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 q_2 , 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 geomeccanica 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 condizioni 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 $L \cdot m$ 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.

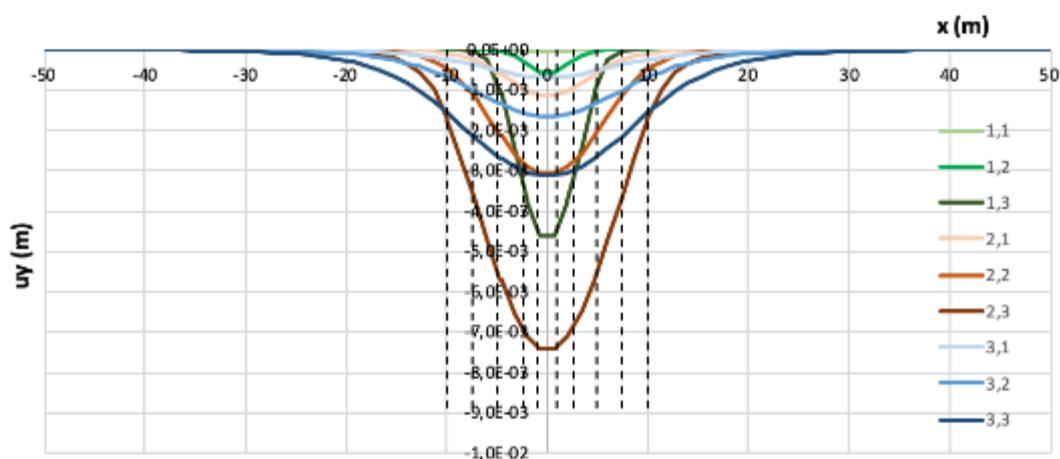
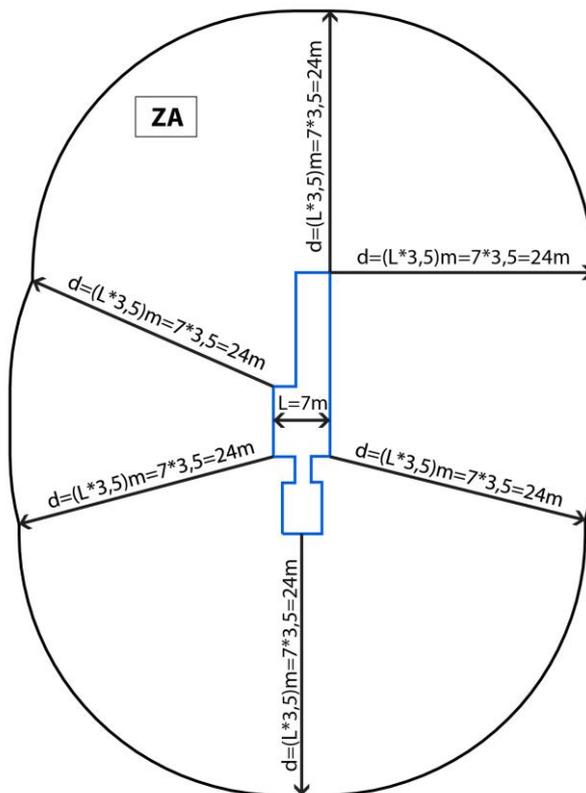


Figura A3.9. Esempio conche di subsidenza cavità Classe 1 di resistenza, sovraccarico q_2 .

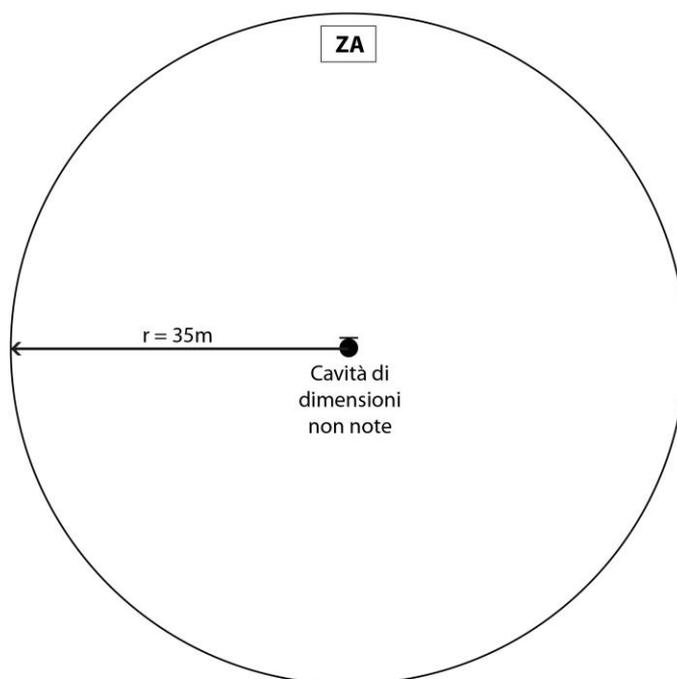
Di seguito sono riportati alcuni esempi di rappresentazione delle ZA, nell'ipotesi di geometria nota (geometria di forma generica) e geometria non nota.

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)



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 fluidata 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 (miscela 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-GNDCI 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° 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., Prestinanzi 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., 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>.
- 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.

SEZIONE 2 - VALUTAZIONE DELLE INSTABILITÀ A VARI LIVELLI DI APPROFONDIMENTO

1 Rischio liquefazione

La liquefazione è un fenomeno che si può manifestare durante un evento sismico all'interno di depositi sabbiosi saturi e poco addensati, causato dalla rapida perdita di resistenza al taglio e di rigidità dei terreni dovuta all'insorgere di sovrappressioni neutre (Δu). La valutazione del potenziale di liquefazione, ovvero del rischio di attivazione del fenomeno una volta verificato l'evento sismico atteso, viene prevalentemente effettuata mediante metodi semplificati. Tali metodi consistono nell'applicazione di correlazioni empiriche tra osservazioni di casi reali di liquefazione (e non liquefazione) effettuate in seguito ai terremoti più forti recenti, e i corrispondenti parametri del terreno misurati con le comuni prove geotecniche in sito (quali il numero di colpi $NSPT$, la resistenza alla punta q_c , l'attrito laterale f_s o la velocità delle onde S, V_s), rappresentativi della resistenza del terreno alla liquefazione cosismica.

Richiamando quanto previsto dalla normativa italiana sul tema, le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) stabiliscono al punto 7.11.3.4 che un sito su cui insiste un manufatto deve essere stabile nei confronti della liquefazione. Per la valutazione del rischio da liquefazione del sito di interesse, le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018, punto 7.11.3.4.2), stabiliscono che la probabilità che nei terreni sabbiosi saturi si verifichino fenomeni di liquefazione è bassa o nulla se si verifica almeno una delle seguenti condizioni:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0.1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$, dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (SPT) normalizzata a una tensione efficace verticale di 100 kPa, e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (CPT) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 2-1°, nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ e in Figura 2-1b nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

Qualora la prima condizione non fosse verificata, occorre che le indagini geotecniche siano finalizzate alla determinazione dei parametri necessari per la verifica delle altre tre condizioni. Quando nessuna delle quattro condizioni indicate è soddisfatta, il sito è ritenuto suscettibile alla liquefazione e quindi potenzialmente a rischio. Occorre pertanto procedere alla valutazione del coefficiente di sicurezza alla liquefazione alle profondità in cui sono presenti i terreni potenzialmente liquefacibili. Per la verifica è possibile utilizzare procedure di analisi avanzate in grado di simulare l'insorgere di sovrappressioni neutre nel terreno (analisi dinamiche avanzate), oppure si può procedere con metodologie di tipo empirico in cui il coefficiente di sicurezza FS_{liq} viene definito dal rapporto tra la resistenza disponibile alla liquefazione e la sollecitazione indotta dal terremoto di progetto.

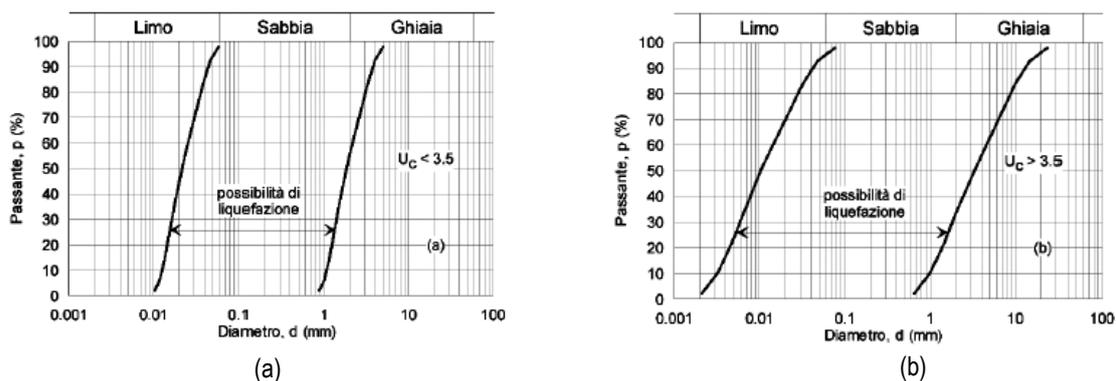


Figura 2-1 Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione (da NTC 2018).

1.1 Metodi semi-empirici

I metodi semi-empirici si basano sulla seguente procedura di calcolo:

- 1) *Valutazione dell'azione sismica (rapporto tensionale ciclico, CSR)*

Si dispone di un'azione sismica rappresentata dal rapporto tensionale ciclico che poi viene confrontata con una misura di resistenza in situ.

- 2) *Correzione e normalizzazione delle misure in-situ (resistenza normalizzata, $R1(N_{60}, q_c, V_s)$)*

La misura di resistenza in situ va preventivamente corretta e normalizzata per poter entrare negli abachi di liquefazione, che forniscono il rapporto di resistenza ciclico in funzione di resistenza corretta e normalizzata.

- 3) *Uso degli abachi di liquefazione - rapporto di resistenza ciclica, $CRR = f(R1)$ (Figura 2.2)*

- *Abachi di liquefazione da prove SPT;*
- *Abachi di liquefazione da prove CPT;*
- *Abachi di liquefazione basato su V_s .*

Gli abachi di liquefazione (Figura 2-2) restituiscono, in corrispondenza del valore di resistenza normalizzata $R1$, il valore di resistenza ciclica CRR sull'asse delle ordinate intersecando la curva di liquefazione.

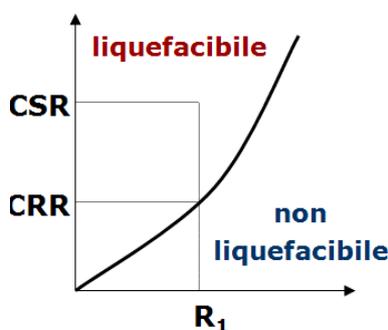


Figura 2-2 Abachi da liquefazione: rapporto di resistenza ciclica normalizzata.

A questo punto, nota l'azione sismica in termini di CSR, è possibile definire il fattore di sicurezza (Eq. 2.1), $FS_{liq}(z)$ (Seed e Idriss, 1971; Boulanger e Idriss, 2015; Robertson e Wride, 1998), come rapporto tra la tensione tangenziale necessaria ad indurre la liquefazione (espressa dal rapporto di resistenza ciclica, CRR) e la sollecitazione indotta dal sisma (espressa dal rapporto tensionale ciclico, CSR):

$$FS_{liq}(z) = \frac{CRR(z)}{CSR(z)} = \frac{CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma \cdot K_\alpha \quad (2.1)$$

dove la capacità $CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1}$ è calcolata in riferimento ad un evento sismico di magnitudo $M=7.5$ e uno stato tensionale efficace verticale di un'atmosfera ($\sigma'_v=103$ kPa). Il coefficiente MSF (*Magnitude Scaling Factor*) è un fattore di scala della magnitudo e i due coefficienti correttivi K_σ e K_α portano in conto rispettivamente gli effetti della tensione verticale e un eventuale sforzo di taglio statico preesistente l'evento sismico.

I valori di CRR sono generalmente ricavati da correlazioni empiriche basate sui risultati di prove in sito CPT e SPT (Boulanger e Idriss; 2015) mentre il rapporto di tensione ciclica CSR è calcolato attraverso l'equazione 2.2 (Seed e Idriss, 1971):

$$CSR(z) = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \quad (2.2)$$

in cui σ_v e σ'_v sono la tensione litostatica totale ed efficace alla generica profondità (z), a_{max} è il valore di picco dell'accelerazione orizzontale attesa in superficie, g è l'accelerazione di gravità e r_d è un fattore riduttivo dell'accelerazione con la profondità z che può essere stimato empiricamente o determinato numericamente attraverso una analisi di risposta sismica locale.

Definito tale fattore di sicurezza, le NTC 2018 indica le seguenti condizioni di verifica:

- $FS_{liq} > 1$: la verifica a liquefazione è soddisfatta;
- $FS_{liq} < 1$: la verifica a liquefazione non è soddisfatta, il terreno è liquefacibile per le azioni sismiche di progetto.

1.2 Valutazione degli effetti della liquefazione

I parametri chiave che regolano gli effetti del fenomeno della liquefazione sono lo spessore dello strato non liquefacibile, lo spessore dello strato liquefacibile e la loro profondità. In letteratura è mostrato il loro effetto in termini di cedimento in corrispondenze di edifici ed infrastrutture (Liu e Dobry, 1997; Shahir e Pak, 2010; Karamitros et al., 2013; Bertalot e Brennan, 2015; Lu, 2017), in termini di modifica delle caratteristiche e l'intensità del moto in superficie (Bouckovalas et al., 2017) e in termini di manifestazione di fenomeni di liquefazione in superficie (Ishihara, 1985; Ishihara et al., 1990).

Tali effetti risultano influenzati dalla variazione degli sforzi con la profondità, in particolare, l'aumento della resistenza ciclica del terreno con la profondità alla quale si contrappone una diminuzione dello sforzo indotto, porta all'individuazione di una soglia di profondità (z_{crit}) oltre la quale il fenomeno non si manifesta (Figura 2-3).

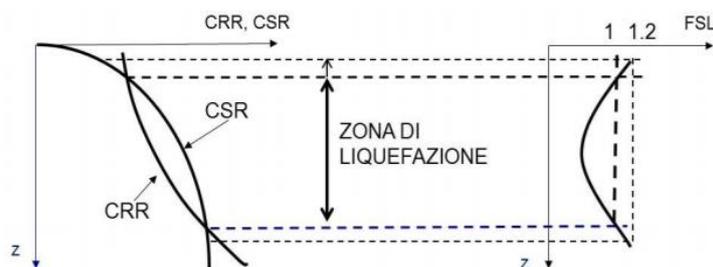


Figura 2-3 Effetto della liquefazione con la profondità.

Generalmente, per valutarne gli effetti in superficie, viene utilizzato un indicatore integrale del potenziale di liquefazione fino ad una profondità z_{max} , tipicamente posta pari a 20 m. Il più utilizzato è quello proposto da Iwasaki et al. (1978), LPI (*Liquefaction Potential Index*) espresso dall'equazione 2.3.

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot W(z) dz \quad (2.3)$$

dove z è la profondità in metri, e $F(z)$ e $W(z)$ sono rispettivamente paria alle equazioni 2.4 e 2.5:

$$F(z) = \begin{cases} 1 - FS_{liq} & \text{for } FS_{liq} < 1 \\ 0 & \text{for } FS_{liq} \geq 1 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$W(z) = 10 - 0.5z \quad (2.5)$$

Il valore dell'indice LPI esprime il potenziale di rottura come indicato in Tabella 2-1.

INDICE LPI	POTENZIALE DI ROTTURA
=0	Nulla
$0 < LPI \leq 5$	Basso
$5 < LPI \leq 15$	Elevato
$LPI > 15$	Estremamente elevato

Tabella 2-1 Potenziale di rottura attraverso l'indice del potenziale di liquefazione (LPI).

Recentemente Tonkin e Taylor (2013) hanno introdotto un nuovo indicatore del rischio da liquefazione (*Liquefaction Severity Number, LSN*), definito come il valore integrale delle deformazioni volumetriche ε_v dovute alla dissipazione delle sovrappressioni interstiziali accumulate durante il sisma (Zhang et al., 2002), calcolate per ciascun strato e divise per la profondità del relativo baricentro (Eq. 2.6):

$$LSN = 1000 \cdot \int \frac{\epsilon_v}{z} \cdot dz \quad (2.6)$$

LSN considera il contributo di tutti gli strati presenti nel sottosuolo dando più rilevanza agli strati più superficiali attraverso la funzione peso iperbolica della profondità ($1/z$).

Gli effetti della liquefazione in termini di spostamenti, invece, possono essere valutati mediante diverse relazioni di letteratura, riportate anche nelle linee guida dell'AGI (Associazione Geotecnica Italiana): *i*) le deformazioni volumetriche possono essere ricavate in funzione di CSR e della resistenza penetrometrica. Analogamente all'utilizzo degli abachi di liquefazione, si entra nel diagramma, di seguito riportato, con il valore della resistenza normalizzata, l'azione sismica e l'eventuale correzione per effetto della magnitudo, e viene stimato il valore della deformazione volumetrica (Figura 2-4a); *ii*) le deformazioni volumetriche possono essere ricavate in funzione dell'azione sismica (deformazione sismica ciclica calcolata γ_{cyc}) e delle proprietà del terreno (densità relativa D_r) (Figura 2-4b).

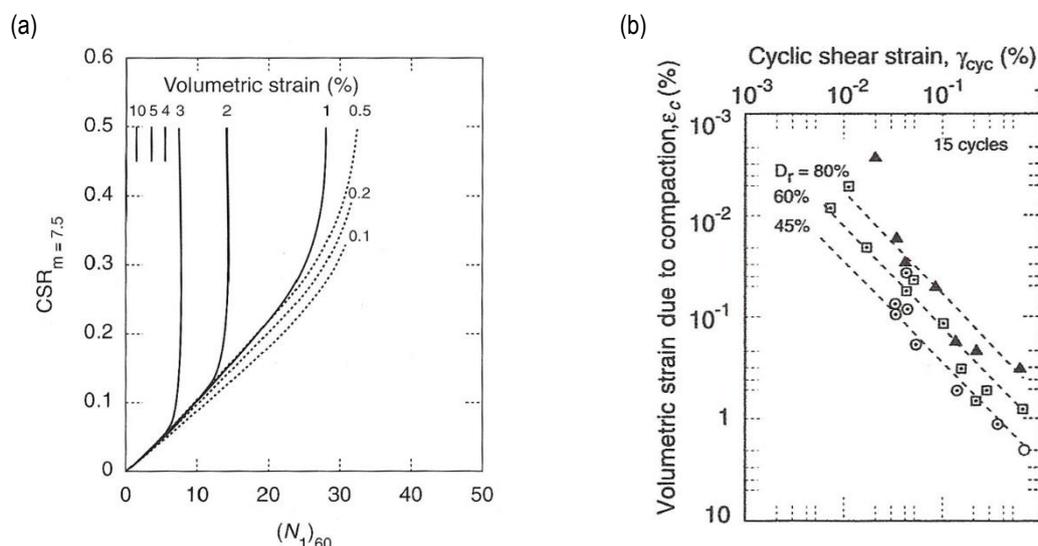


Figura 2-4 Abachi per deformazioni volumetriche funzione (a) di CRS e della resistenza penetrometrica e (b) della deformazione sismica ciclica.

1.3 Analisi dinamica semplificata ed avanzata

In alcuni casi i metodi semi-empirici non sono adeguati a prevedere correttamente il fenomeno della liquefazione viste le approssimazioni che li caratterizzano; pertanto, è possibile procedere mediante approcci più raffinati che implementano analisi dinamiche semplificate o avanzate.

Nell'analisi dinamica semplificata il modello di comportamento del terreno è generalmente di tipo visco-elastico e l'analisi condotta è di tipo lineare equivalente. La risposta del terreno può essere espressa in termini di accelerazione, tensioni e talvolta in termini di pressioni interstiziali. Tali analisi prevedono una prima fase di cui la CSR viene calcolata mediante analisi 1-D di risposta sismica locale del sito, utilizzando *i*) codici di calcolo che lavorano in tensioni totali, utilizzando leggi costitutive del terreno ed analisi lineari equivalenti che forniscono la variazione delle tensioni e deformazioni tangenziali durante l'evento sismico, o *ii*) codici di calcolo che lavorano in termini di tensioni efficaci perché in grado di prevedere l'accumulo delle

sovrappressioni interstiziali, adottando leggi costitutive del terreno ed analisi non lineari per la simulazione di accumulo di sovrappressione neutra (in forma accoppiata o disaccoppiata).

Calcolata la CRS, per la valutazione del rischio liquefazione, vanno confrontate le tensioni tangenziali con quelle limite ($\tau_{eq} < \tau_{lim}$), e le deformazioni tangenziali con quelle limite ($\gamma_{eq} < \gamma_{lim}$). Se l'analisi è condotta in tensioni efficaci, bisogna anche confrontare la sovrappressione neutra con la componente efficace di tensione normale iniziale ($\Delta u / \sigma'_0 < 1$).

Nei metodi di analisi dinamica avanzata invece, si deve tenere conto della natura polifase dei terreni, considerando l'accoppiamento tra fase solida e fase fluida, e si deve descrivere adeguatamente il comportamento meccanico delle terre in condizioni cicliche. Vengono generalmente usati metodi di calcolo numerici bidimensionali (es. Codici FEM o DEM), legami costitutivi avanzati ed eventualmente si tiene conto dell'interazione con altre strutture se presenti. In questo caso è necessario caratterizzare con elevata affidabilità l'azione sismica di riferimento, la geometria del sottosuolo ed il comportamento dei terreni attraverso prove in sito e laboratorio.

Generalmente l'impiego dei metodi dinamici avanzati per l'analisi della suscettibilità alla liquefazione è limitato al caso di opere importanti come, ad esempio, è il caso delle dighe in terra.

1.4 Progetto Liquefact

Il progetto *LIQUEFACT*, finanziato dall'UE nell'ambito di *H2020 – DRS 2015 call (Research Innovation Action)* (<http://www.liquefact.eu>) ha come oggetto la mitigazione dei rischi da liquefazione sismoindotta (*Earthquake Induced Liquefaction Disasters, EILDs*) in Europa, mediante un approccio olistico. Il progetto si occupa non solo della resistenza delle strutture agli eventi *EILD*, ma anche della resilienza della comunità urbana collettiva in relazione al rapido recupero post evento.

LIQUEFACT mira ad acquisire una comprensione più approfondita degli *EILDs*, per migliorare l'applicazione di tecniche di mitigazione e svilupparne di nuove più appropriate a scenari specifici, sia in contesti europei che mondiali.

Nell'ambito del progetto è stato sviluppato un software (*LIQUEFACT*) come strumento per la valutazione del rischio liquefazione e per la mitigazione della liquefazione a livello locale e regionale. Il software può fornire supporto per valutazioni di fattibilità e analisi costi-benefici dell'applicazione di determinate tecniche di mitigazione della liquefazione per un dato evento indotto da un sisma. L'analisi del rischio di liquefazione consiste nel valutare se un singolo edificio, un aggregato urbano, un'infrastruttura distribuita, ricade in un'area suscettibile a liquefazione.

Le metodologie di valutazione del rischio di liquefazione implementate nel software si basano su due approcci:

- > *approccio quantitativo;*
- > *approccio qualitativo.*

L'approccio quantitativo consiste nelle seguenti due fasi principali (Figura 2-5):

- 1a. *LIQUEFACTION TRIGGERING ANALYSIS* - analisi di innesco della liquefazione *Step-1*: per stimare la tendenza a sviluppare la liquefazione sotto un dato input sismico attraverso il calcolo del fattore di sicurezza a liquefazione;
- 1b. *LIQUEFACTION INDUCED SURFICIAL MANIFESTATIONS* - valutazione degli effetti in superficie indotti dalla liquefazione *Step-2*: implica la valutazione degli effetti sul terreno.

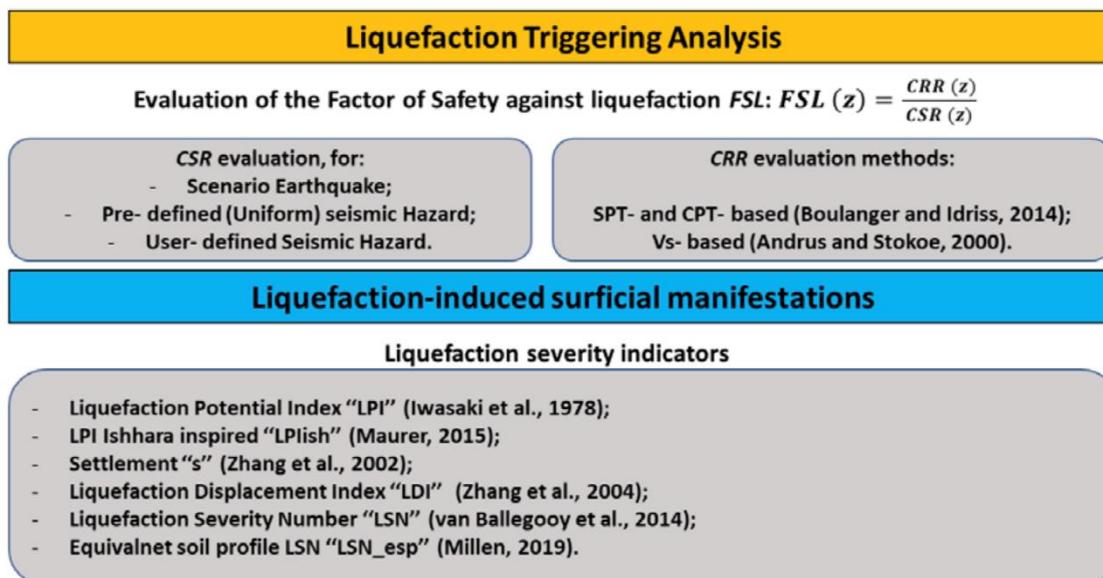


Figura 2-5 Approccio quantitativo per la valutazione del rischio liquefazione nel progetto LIQUEFACT.

La valutazione del rischio liquefazione basata su un approccio qualitativo è, in generale, considerata come una fase di livello 1 dell'analisi del rischio di liquefazione in cui non sono richiesti dati geotecnici dettagliati sul profilo del sottosuolo o informazioni specifiche sul terremoto. La valutazione del rischio viene fatta qualitativamente utilizzando etichette che vanno da "Non suscettibile", "No liquefazione" a "Liquefazione", a seconda del tipo di indicatore di rischio liquefazione utilizzato. I risultati di questo livello di valutazione forniscono una valutazione qualitativa sul livello di esposizione delle strutture ed infrastrutture e possono essere utilizzate come guida per analisi più dettagliate (valutazione quantitativa sopra descritta).

2 Applicazione: caso Regione Calabria

La Regione Calabria è stata selezionata per lo sviluppo della metodologia di analisi della suscettibilità alla liquefazione con approccio di analisi multi-scala. In particolare i livelli di analisi riguarderanno:

1. **Livello regionale di analisi della suscettibilità a liquefazione** - applicando i fattori predisponenti ed innescanti definiti dalla normativa tecnica e nelle LG per la MS (NTC18; Commissione Tecnica per la MS, 2017) su scala regionale, viene fatta una valutazione preliminare di tipo booleana della suscettibilità a liquefazione;
2. **Livello locale di analisi semi-quantitativa della suscettibilità a liquefazione** - nelle aree individuate nel livello di analisi precedente, utilizzando i dati opportunamente elaborati provenienti dal DB della MS e dal DB delle indagini di sottosuolo della legge 464/84 dell'ISPRA, viene quantificato il fenomeno della liquefazione attraverso l'elaborazione di un Indice di Predisposizione Territoriale (TPLI) che identifica 4 livelli di suscettibilità (nullo, basso, alto, molto alto), in relazione allo spessore dei livelli granulari nel sottosuolo e alla loro posizione.

2.1 Contesto geologico regionale

Le unità geologiche presenti in Calabria sono riconducibili a 5 principali complessi geologici/idrogeologici caratterizzati da litologie differenti e valori di permeabilità e porosità molto variabili (De Vita et al. 2018). In particolare è possibile distinguere complessi costituiti da (Figura 2-6): i) Unità cristallino-metamorfiche, ii) Unità di piattaforma carbonatica, iii) Unità argilloso-calcaree bacinali, iv) Unità terrigene mio-plioceniche, v) Unità clastiche e argillose pleistocenico-oloceniche.

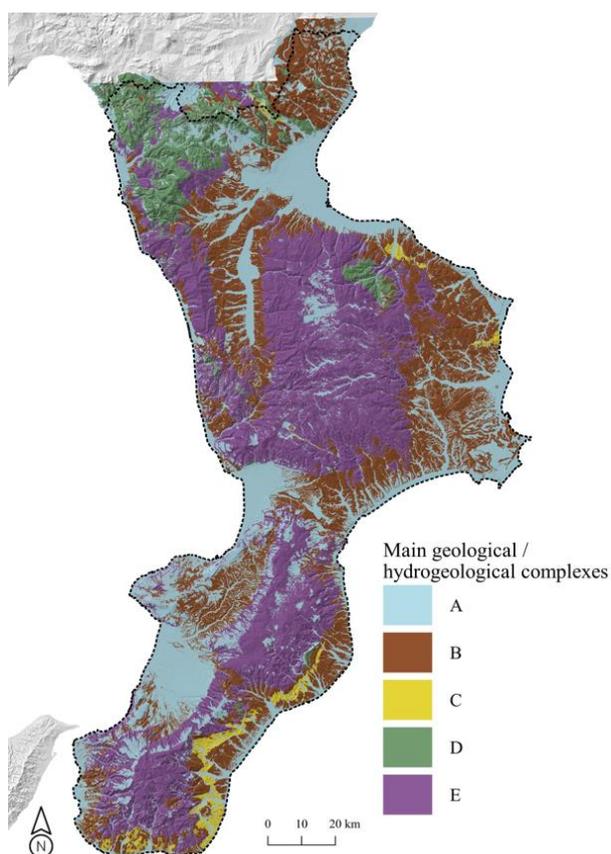


Figura 2-6 Principali complessi geologici/idrogeologici. A) Unità clastiche e argillose pleistocenico-oloceniche; B) Unità terrigene mio-plioceniche; C) Unità argilloso-calcaree bacinali; D) Unità di piattaforma carbonatica; E) Unità cristallino-metamorfiche.

Per gli obiettivi di questo lavoro, il complesso “A” risulta essere quello di maggiore interesse in quanto è quello in cui possono svilupparsi fenomeni di liquefazione. Tali depositi, di origine sia marina che continentale, sono costituiti da alternanze di argille limose, sabbie e ghiaie, con frequenti eteropie laterali (Guerricchio & Melidoro, 1975; Polemio & Luise, 2007; Cuiuli, 2012), e spessori che possono variare dai pochi metri alle svariate centinaia di metri. I maggiori spessori si ritrovano in corrispondenza delle piane costiere (e.g. Piane di Sibari e Lamezia) o in ampi bacini intracatena (Valle del Crati).

2.2 Osservazioni storiche di liquefazione

Le liquefazioni storiche registrate in Calabria (Figura 2-7) vanno a concentrarsi proprio all'interno di questi settori. Da un punto di vista idrogeologico, questi depositi rappresentano acquiferi porosi, eterogenei ed anisotropi legati alla variabilità spaziale dei meccanismi di messa in posto di tali depositi (De Vita et al. 2018). Sono essenzialmente poco cementati per cui la loro

permeabilità è legata ad una porosità primaria. In base alla loro organizzazione stratigrafica verticale, tali depositi sono per lo più frazionati in più acquiferi sovrapposti sia confinati che non confinati.

Inoltre, a parte il complesso delle unità carbonatiche, tutti gli altri complessi possono presentare coltri eluviali di spessore molto variabile che in particolari condizioni pluviometriche possono dare vita a falde effimere superficiali. Tali elementi possono essere dei fattori che predispongono le porzioni granulari del materiale eluviale all'innescio di fenomeni di liquefazione.

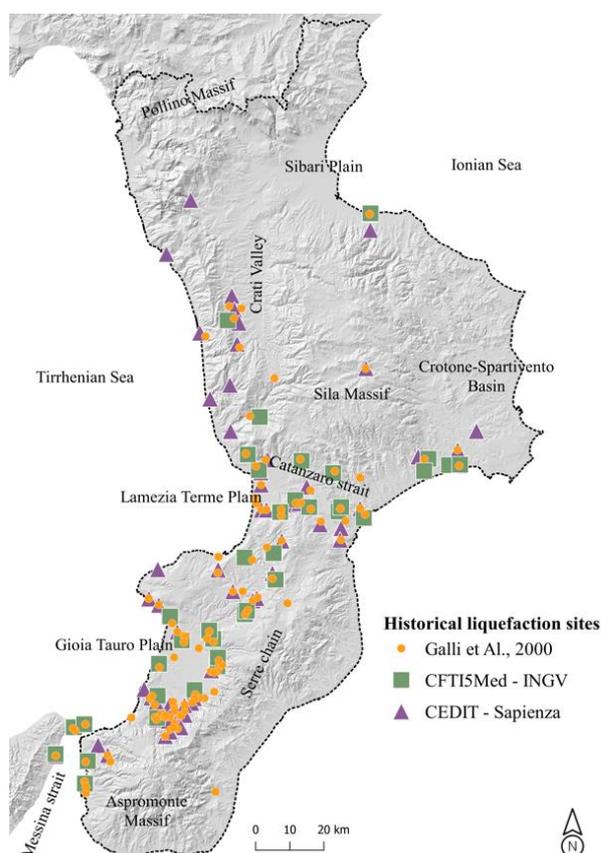


Figura 2-7 Fenomeni di liquefazione indotti da terremoti storici riportate nei cataloghi nazionali CEDIT (Università di Roma la Sapienza) (Fortunato et al., 2012), CFT15med (INGV) (Guidoboni et al., 2019) e nel lavoro di Galli et. al. 2000.

2.3 Elaborazione dei dati di sondaggio

Per la predisposizione dei layer informativi riguardanti la litologia e la soggiacenza della falda sono stati acquisiti ed elaborati i dati provenienti dal DB della MS (www.webms.it) e dell'Archivio nazionale delle indagini di sottosuolo ai sensi della Legge 464/84, (ISPRA – Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia – Servizio GEO-APP, Roma) (Figura 2-8). Dal DB-MS sono stati estratti 1762 sondaggi che identificano 2827 livelli litostratigrafici, ai quali si aggiungono 3458 sondaggi della Legge 464/84, che identificano 11751 livelli litostratigrafici. Ambedue i DB contengono anche informazioni riguardanti il livello della falda idrica. L'elaborazione dei dati per la determinazione della soggiacenza della falda verrà trattata nello specifico al paragrafo 2.3.2. Di seguito, al paragrafo 2.3.1, sarà esposta l'elaborazione eseguita per quanto riguarda la valutazione della predisposizione litologica di sottosuolo.

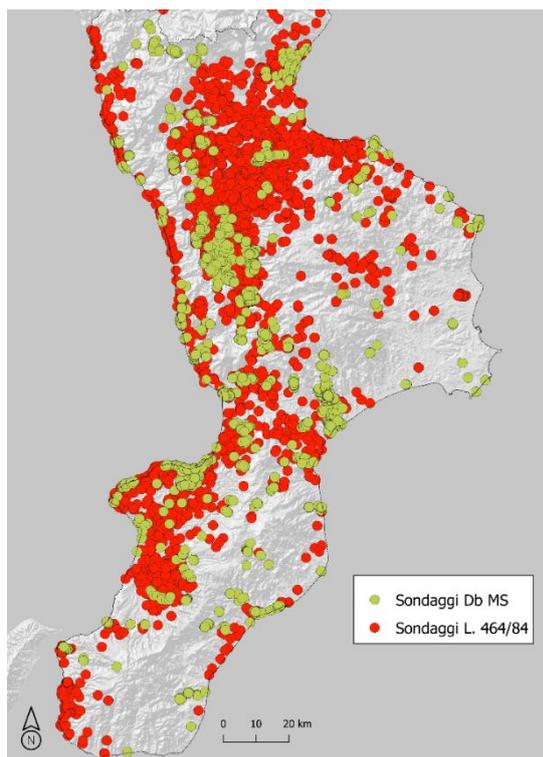


Figura 2-8 Set di dati utilizzati provenienti dal DB nazionale della Microzonazione Sismica e dall'Archivio nazionale delle indagini di sottosuolo ai sensi della Legge 464/84 (ISPRA).

2.3.1 Predisposizione litologica. Valutazioni sulla geologia di sottosuolo

Con lo scopo di perseguire gli obiettivi riguardanti un approccio multiscala (regionale-locale) finalizzato all'analisi della suscettibilità a liquefazione, è stata effettuata l'elaborazione dei sondaggi geognostici disponibili in due modi differenti: *i*) a scala regionale, per validare ed estendere le aree con predisposizione litologica; *ii*) a scala locale, per quantificare il livello di predisposizione stratigrafico. Ripercorriamo nel dettaglio le fasi delle elaborazioni.

La prima fase ha riguardato una omogeneizzazione e riclassificazione di tutte le stratigrafie di sondaggio, in particolare tutti i 14578 livelli litostratigrafici riportati nei 5220 sondaggi, sono stati riclassificati in relazione alla litologia e, in particolare, i terreni di copertura nei primi 20 m di profondità sono stati distinti in:

- > *granulari (limi sabbiosi, sabbie, sabbie limose, sabbie ghiaiose, sabbie argillose e ghiaie sabbiose);*
- > *coesivi (argille);*
- > *litoidi (depositi molto cementati e.g. conglomerati, travertini).*

Tutti i substrati geologici, sia in affioramento che in profondità, sono stati identificati e distinti dai terreni di copertura (Figura 2-9 a,b). In Figura 2-10 è riportata la tabella di conversione utilizzata per riclassificare i sondaggi estratti dal DB-MS secondo le 4 classi individuate.

Nella seconda fase, i dati riclassificati sono stati elaborati secondo la duplice finalità descritta in precedenza, ovvero:

- I. Per ogni sondaggio, è stato calcolato lo spessore cumulato dei livelli granulari entro i primi 20 m dal p.c. indipendentemente dalla posizione stratigrafica assunta (Figura 2-9c). Tale elaborazione, alla scala regionale, ci consente di individuare quei sondaggi con presenza di livelli granulari entro i 20m di profondità al fine di validare la selezione delle aree con predisposizione litologica alla liquefazione effettuata solo in considerazione della geologia di superficie e, allo stesso tempo, di introdurre nella selezione nuove porzioni di territorio o tipologie di deposito.
- II. Per ogni sondaggio geognostico, associando il valore di soggiacenza della falda e rispettando la posizione stratigrafica dei vari livelli (Figura 2-11d) sono stati calcolati:
 - a. Spessore degli strati granulari sottofalda;
 - b. Spessore dei livelli insaturi – spessore della crosta al di sopra dei livelli granulari saturi.

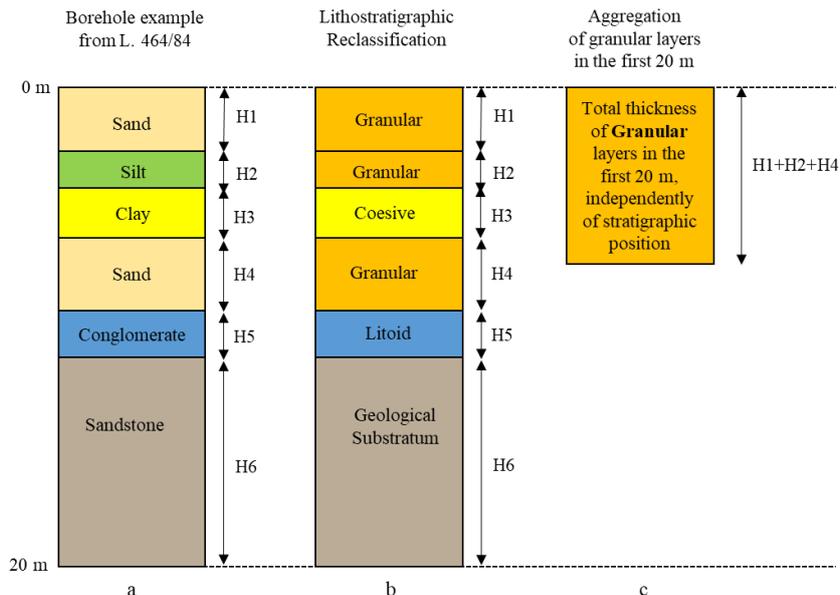


Figura 2-9 Schema semplificato delle fasi di elaborazione dei sondaggi per valutazioni alla scala regionale. a) dato geognostico nella forma di base; b) classificazione per litologia; c) costruzione del dato utile alle valutazioni alla scala regionale.

<p>LITHOLOGICAL CLASS 1: GRANULAR DEPOSITS</p> <p>RI: Terrains containing remains of human activity anthropic deposits GW: Well sorted gravels, mixed gravels and sands GP: Not sorted gravels, mixed gravels and sands GM: Silty gravels, mixed gravels, sands and silts GC: Clayey gravels, mixed gravels, sands and clays SW: Well sorted sands, mixed sands and gravels SP: Not well sorted sands SM: Silty sands, mixed sands and silts SC: Clayey sands, mixed sands and clays OL: Organic silts, low plasticity organic silty-clays OH: Middle plasticity organic clays, organic silts MH: Inorganic silts, fine sands, diatomic silts ML: Inorganic silts, fine silty-clayey sands, low plasticity clayey, silts</p> <hr/> <p>LITHOLOGICAL CLASS 2: COHESIVE DEPOSITS</p> <p>CL: Middle-low plasticity inorganic clays, gravel-sandy clays, silty-clays CH: High plasticity inorganic clays PT: Peat and organic soils</p> <hr/> <p>LITHOLOGICAL CLASS 3: LITHOID DEPOSITS</p> <p>LC: Lithoid Cover deposit</p>	<p>LITHOLOGICAL CLASS 4: GEOLOGICAL SUBSTRATUM</p> <p>LP: Lapideous; GR: Grainy cemented CO: Cohesive over-consolidated AL: Alternations of lithotypes LPS: Lapideous stratified GRS: Grainy cemented stratified COS: Cohesive over-consolidated stratified ALS: Alternations of lithotypes stratified SFLP: Lapideous fractured/weathered SFGR: Grainy cemented fractured/weathered SFAL: Alternations of lithotypes fractured/weathered</p>
---	--

Figura 2-10 Tabella di conversione tra le unità geologico-tecniche degli standard della MS (Commissione Tecnica, 2020) e le 4 principali classi litologiche individuate.

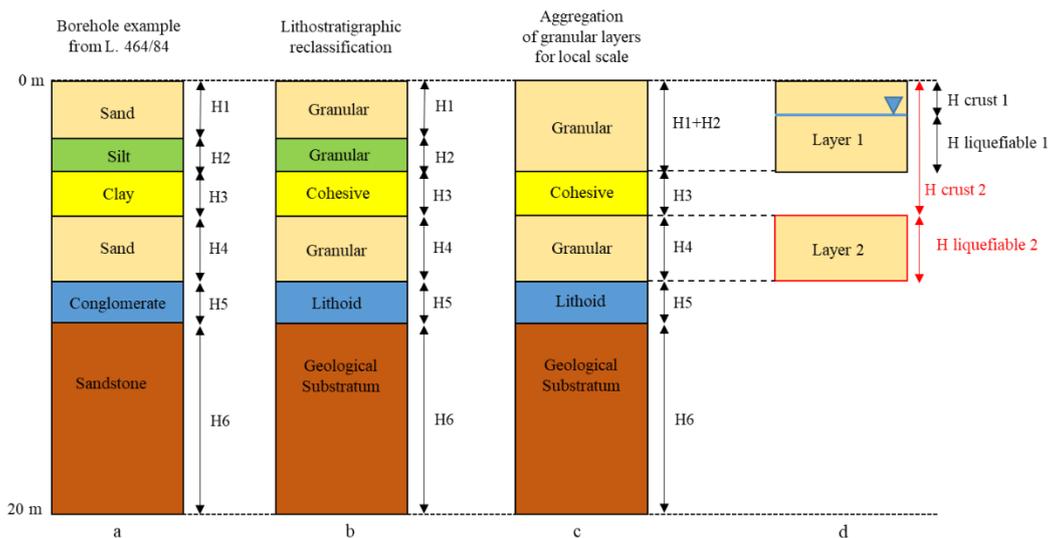


Figura 2-11 Schema semplificato delle fasi di elaborazione dei sondaggi per valutazioni alla scala locale. a) dato geognostico nella forma di base; b) classificazione per litologia; c) raggruppamento dei livelli per litologia e posizione stratigrafica; d) calcolo dello spessore liquefacibile e della crosta per ogni livello granulare.

2.3.2 Ricostruzione della soggiacenza degli acquiferi superficiali della Regione Calabria

2.3.2.1 Database analizzati

Come già anticipato (§2.3) per l'elaborazione della soggiacenza della falda sono stati acquisiti ed elaborati i dati provenienti dall'Archivio nazionale delle indagini di sottosuolo ai sensi della Legge 464/84, (ISPRA – Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia – Servizio GEO-APP, Roma) e dal database della Microzonazione Sismica (www.webms.it). Ambedue i database, oltre a informazioni riguardanti la stratigrafia, contengono anche i valori misurati di soggiacenza i quali sono stati analizzati ponendo particolare attenzione, ove possibile, nel considerare l'acquifero più superficiale.

In totale, si tratta 3.915 perforazioni sul territorio della Regione Calabria e relativo valore di soggiacenza, che sono stati integrati da 4.331 punti di soggiacenza nulla lungo la costa, in corrispondenza dell'affioramento di depositi sabbiosi, e 7217 punti di soggiacenza nulla lungo i corsi d'acqua principali. La distribuzione spaziale dei punti di misura così individuati è riportata nella Figura 2-12a.

Per l'individuazione dei punti a soggiacenza nulla in corrispondenza dei corsi d'acqua sono stati presi in considerazione i principali bacini idrografici su scala regionale e, all'interno di questi, selezionato il corso d'acqua con ordine di Horton maggiore. Di ogni corso d'acqua individuato, ne sono stati considerati solo i tratti a pendenza inferiore ed esclusi quelli a pendenza maggiore in cui il corso d'acqua scorre in alvei rocciosi confinati. Ai primi corrisponde una dinamica fluviale di bassa energia con sedimentazione di materiali fini, ai secondi una dinamica di alta energia con sedimenti ghiaiosi Figura 2-12b.

Al fine di valutare il livello di soggiacenza negli acquiferi di interesse, il database è stato ridimensionato escludendo quei punti di misura che ricadevano esternamente rispetto alle litologie individuate in precedenza (ghiaie, sabbie e argille fluviali e fluvio-lacustri; Figura 2-19). Il database così costruito conta di 4.033 punti la cui distribuzione è rappresentata nella Figura 2-12c.

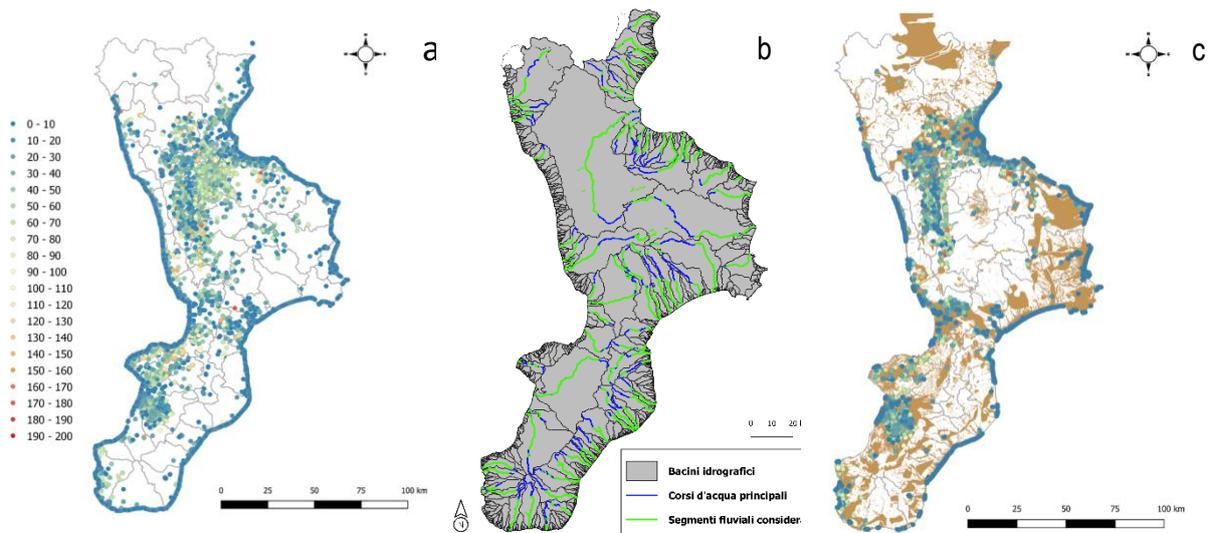


Figura 2-12 a) Punti di misura della soggiacenza della falda; b) punti a soggiacenza nulla lungo i corsi d'acqua; c) Selezione dei dati in corrispondenza delle litologie di interesse.

Focalizzando l'attenzione sulla distribuzione spaziale dei dati, si può osservare che i valori della soggiacenza presentano una forte variabilità in aree molto ridotte, come evidenziato dai due ingrandimenti ripotati in Figura 2-13. Queste anomalie, probabilmente riconducibili a misure eseguite su acquiferi a profondità diverse, non sono congruenti con il fenomeno osservato e pertanto devono essere individuati prima di poter proseguire nelle analisi successive di rappresentazione e di gestione del dato.

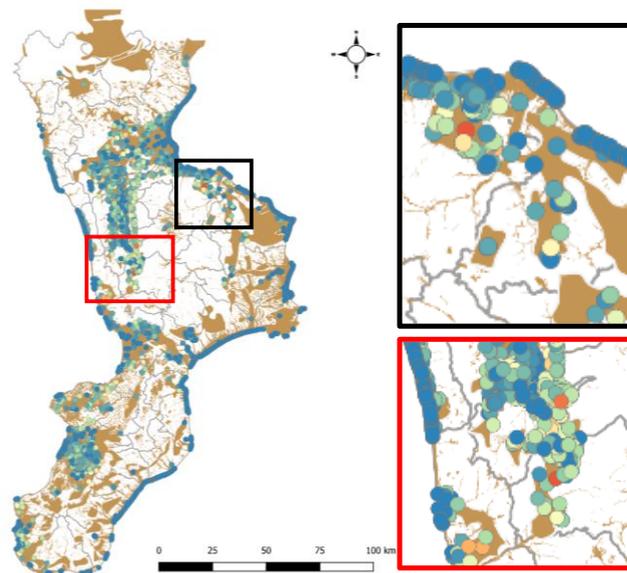


Figura 2-13 Punti di misura della soggiacenza della falda in corrispondenza degli acquiferi di interesse.

2.3.2.2 Procedura di analisi

Nella procedura di analisi proposta, il livello della soggiacenza è stato valutato in base alla disponibilità dei dati per la scala di analisi considerata. Pertanto, la robustezza e il grado di incertezza dei risultati ottenuti è fortemente correlata alla disponibilità e distribuzione spaziale di queste informazioni. L'approccio geostatistico (Chilès e Delfiner, 2012) fornisce gli strumenti di analisi spaziale appropriati per gestire e studiare questi dati territoriali. L'analisi statistica e geostatistica è stata eseguita tramite il software R (R Core Team, 2021) e il pacchetto "gstat" (Pebesma EJ, 2004).

La procedura di analisi, riporta in Figura 2-14, prevede due fasi successive. La prima fase consente di gestire le anomalie locali evidenziate durante la costruzione del database, con l'introduzione degli strumenti per l'individuazione degli *outliers* spaziali. La seconda fase si basa sull'analisi geostatistica dei dati puntuali per la costruzione della mappa del livello di soggiacenza tramite la *kriging*, una tecnica di interpolazione geostatistica che considera sia la distanza che il grado di variazione delle variabili e fornisce l'incertezza associata alla loro stima.

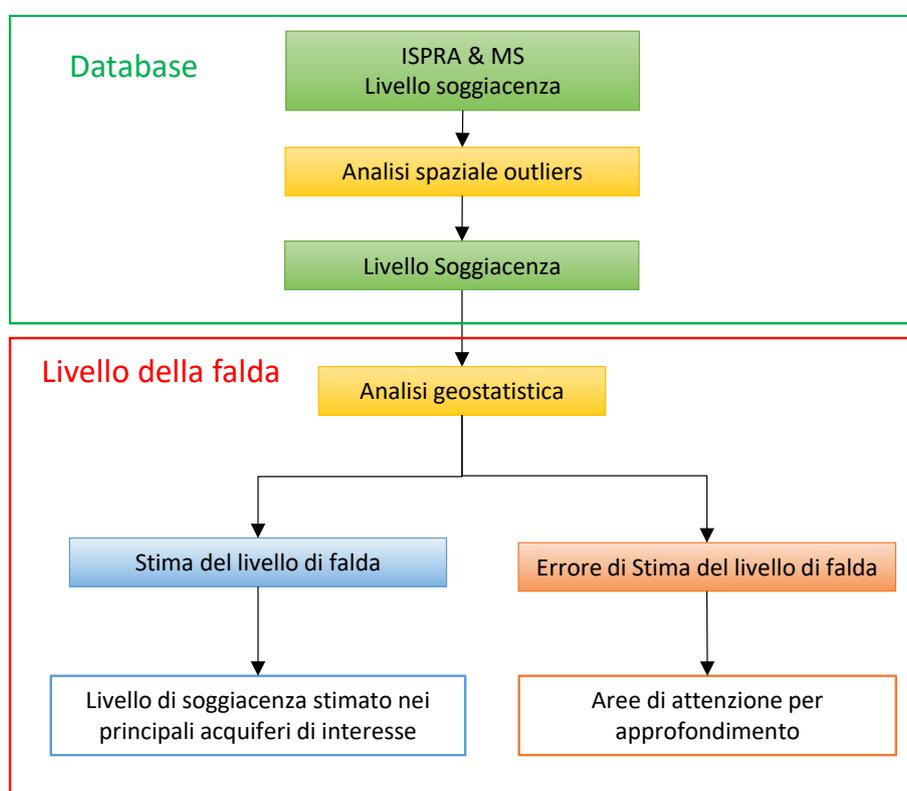


Figura 2-14: Procedure di analisi per la valutazione del livello di soggiacenza con l'approccio geostatistico.

La procedura di individuazione e di gestione delle anomalie locali, riporta in Figura 2-15, si basa sul metodo della Cross-Validation (Paoletta et al, 2020).

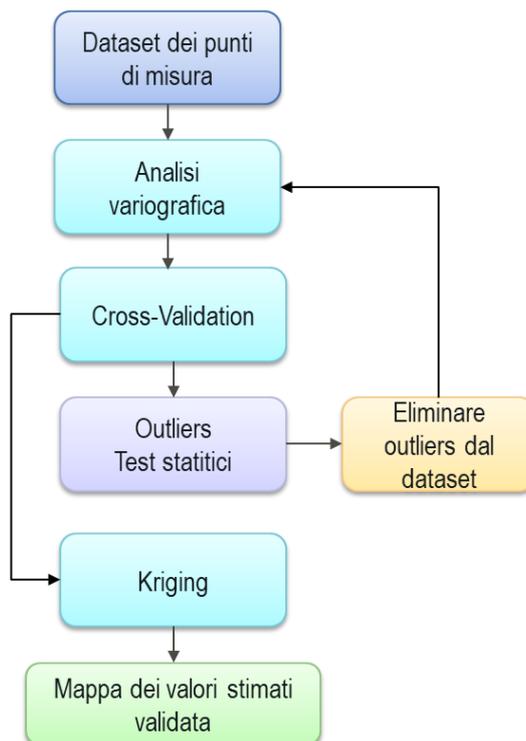


Figura 2-15: Procedura per l'individuazione degli outliers spaziali.

La struttura spaziale dei dati è esaminata tramite gli strumenti dell'analisi variografica. Il variogramma consente di valutare la semivarianza della grandezza misurata tra coppie di punti, e caratterizza, tramite i suoi parametri, la variabilità della variabile all'aumentare della distanza tra coppie di punti (Figura 2-16a,b). Tale struttura viene utilizzata per stimare i valori della grandezza in corrispondenza dei punti di misura mediante la tecnica del Kriging. La Cross-Validation confronta i valori stimati con i valori misurati (Figura 2-16d). Applicando un filtro statistico del box plot sui residui calcolati come differenza tra valore stimato e valore misurato, si evidenziano i punti di misura in corrispondenza dei quali l'errore è elevato, indicati in rosso sulla Figura 2-16c,d. Tali punti sono considerati come valori anomali e quindi eliminati dal dataset (Figura 2-17).

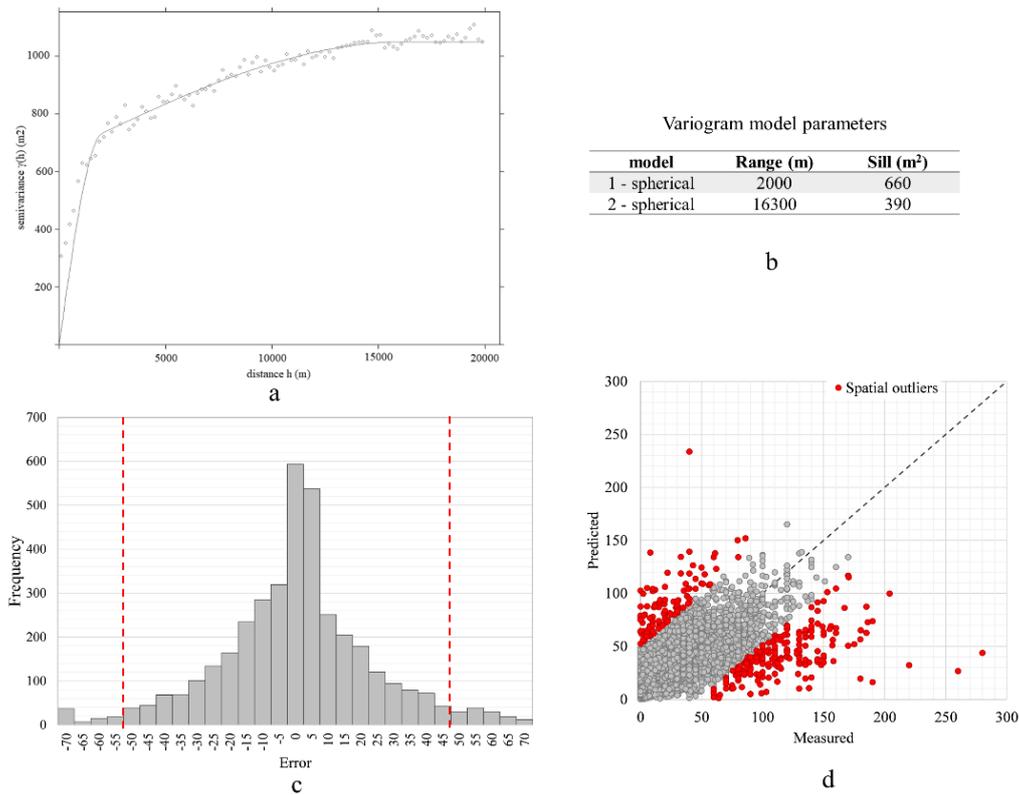


Figura 2-16 Strumenti e parametri dell'analisi dei outliers spaziali - Variogramma sperimentale e variogramma teorico del livello di soggiacenza (a), parametri dei modelli di variogramma (b); Istogramma dei residui (c) e scatter-plot valori misurati / valori stimanti (d).

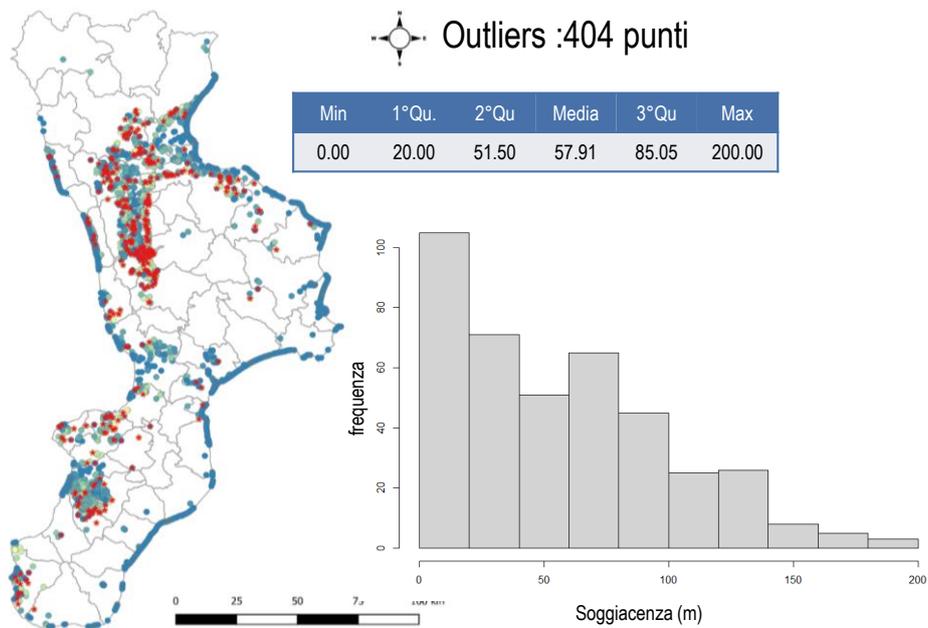


Figura 2-17 Ubicazione e statistica descrittiva dei valori anomali individuati.

2.3.2.3 Soggiacenza della falda

A questo punto, la struttura spaziale del *dataset* viene di nuovo analizzata tramite l'analisi variografica e utilizzata per l'interpolazione tramite Kriging ordinario puntuale. La Figura 2-18 riporta la mappa della soggiacenza della falda in corrispondenza degli acquiferi di interesse. Oltre alla mappa della stima del livello di soggiacenza, l'approccio geostatistico esprime la qualità dell'interpolazione in termini di deviazione standard dell'errore stimato (SDER). Per valutare l'incertezza associata alla stima del livello di soggiacenza è stato assegnato un valore soglia pari al terzo quartile della distribuzione di SDER al fine di evidenziare le aree con elevato errore di stima (indicate in rosso in Figura 2-18). Tale incertezza, riconducibile alla quantità e alla distribuzione dei dati disponibili, fornisce informazioni essenziali per una corretta interpretazione del successivo livello di analisi alla scala locale.

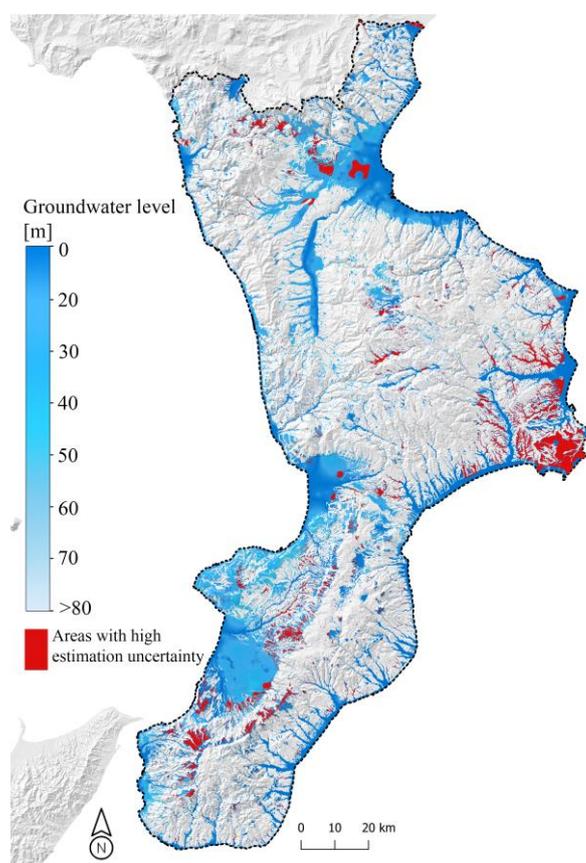


Figura 2-18 Mappa della soggiacenza della falda in corrispondenza degli acquiferi individuati.

2.4 Predisposizione dei layer informativi per il livello di analisi a scala regionale

Nella normativa tecnica nazionale (NTC 2018) e nelle Linee Guida per la Microzonazione sismica vengono identificati i fattori predisponenti e fattori innescanti il fenomeno della liquefazione.

Nella fattispecie sono indicati come fattori predisponenti:

- la litologica in relazione a:
 - Geologia di superficie – presenza in affioramento di terreni non coesivi (limi sabbiosi, sabbie, sabbie limose, sabbie ghiaiose, sabbie argillose e ghiaie sabbiose);
 - Geologia di sottosuolo - successione litologica con orizzonti di terreni non coesivi (limi sabbiosi, sabbie, sabbie limose, sabbie ghiaiose, sabbie argillose e ghiaie sabbiose) entro una profondità di 20 m;
- Il livello della falda acquifera ad una profondità media stagionale inferiore a 20 m dal p.c.

Il fattore innesca considerato è la PGA in superficie amplificata con valori di $a_{max} \geq 0.1g$. In fine è stato introdotto un fattore discriminante riguardante la pendenza, ovvero pendenze della superficie topografica entro i 5°.

La predisposizione litologica delle aree su scala regionale è stata in una prima fase valutata attraverso la geologia di superficie. Utilizzando la carta geologica regionale (1:25.000) realizzata nell'ambito del presente progetto (Attività A2.4) (Figura 2-19A), sono state selezionate le aree caratterizzate dall'affioramento di litotipi granulari, ascrivibili all'intervallo Olocene-recente, costituiti in prevalenza da sabbie ghiaiose, sabbie e limi di ambiente alluvionale, costiero oltre che a depositi granulari derivanti da fenomeni di disfacimento (Figura 2-19B).

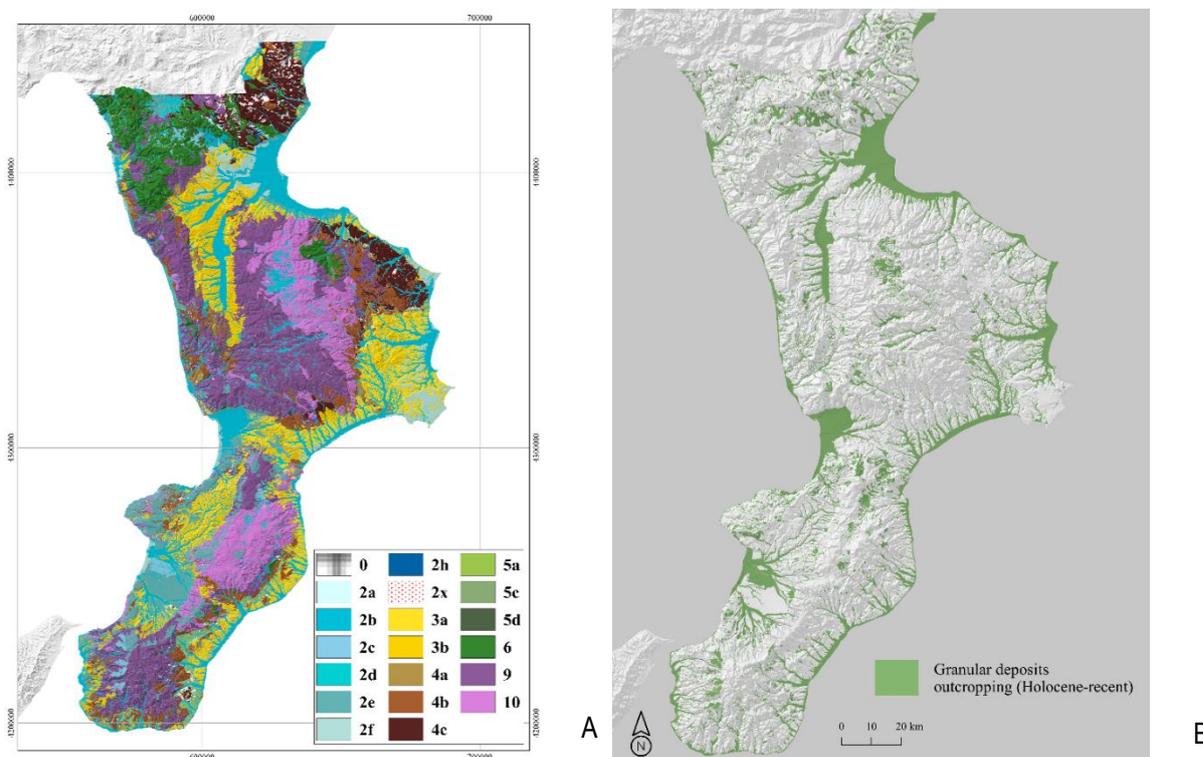


Figura 2-19 A) Carta geologica riclassificata della Regione Calabria 1:25.000 (attività A2.4). 0) Depositi di origine antropica e discariche. Unità sedimentarie quaternarie - 2a) Ghiaie e sabbie (ambienti glaciali); 2b) Ghiaia e sabbia; 2c) Sabbie, argille e ghiaie; 2d) Argille e limi; 2e) Ghiaie e sabbie (depositi eolici, costieri e marini); 2f) Sabbie; 2h) Depositi fortemente cementati; 2x) Depositi franosi indifferenziati. Unità marine e continentali di riempimento di bacino - 3a) Argille, marne e arenarie; 3b) Arenarie e conglomerati. Unità torbiditiche sinorogene (Flysch) - 4a) Argille e arenarie; 4b) arenarie, conglomerati, argille e gessi; 4c) Arenarie, argille e marne. Unità bacinali mesozoico-terziarie - 5a) Argille e marne; 5c) Calcare, marne, argille e arenarie; 5d) Calcari e marne. Unità di piattaforma carbonatica mesozoico-terziaria - 6) Calcari, dolomie, marne e argille. Unità metamorfiche - 9) Scisto, fillite, gneiss, marmo, ecc. Unità cristalline e vulcaniche pre-triassiche -10) Graniti, gabbri, lave, ignimbriti, ecc.). B) Litotipi granulari selezionati comprendenti le categorie 2b, 2c, 2d, 2f.

Nella seconda fase, la valutazione della predisposizione litologica è stata integrata utilizzando i dati provenienti dai sondaggi geognostici elaborati secondo le modalità descritte al paragrafo 2.3. Il processo applicato ha avuto da una parte la finalità di validare la selezione iniziale basata sui soli litotipi in affioramento, dall'altra quella di estendere la selezione includendo ulteriori aree ed allargare lo spettro delle possibili tipologie di deposito. Sulla base delle elaborazioni fatte sui sondaggi geognostici in merito alla presenza di livelli granulari di spessore superiore a 1m entro i primi 20m di profondità, la Figura 2-20 mostra un esempio per la Piana di Gioia Tauro dove l'iniziale selezione dei depositi su base geologica (granulometria ed età), è stata integrata con l'ulteriore aggiunta di aree con livelli granulari nel sottosuolo.

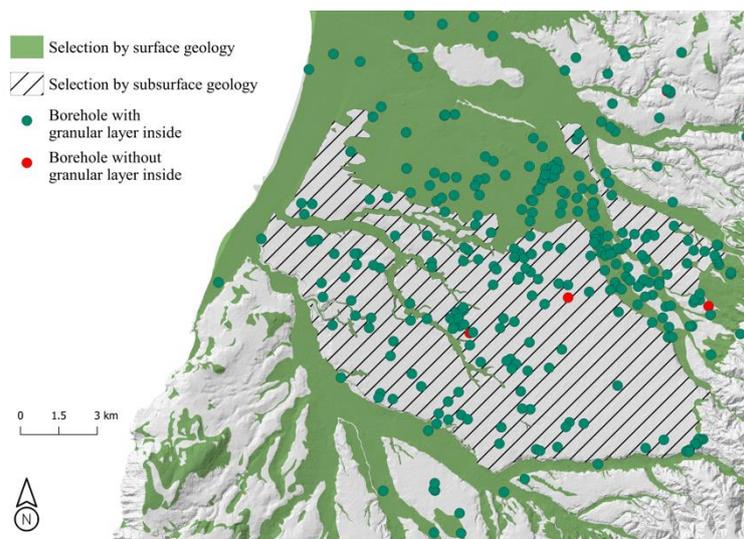


Figura 2-20 Esempio di selezione di tipologie diverse di deposito in relazione all'evidenza in sondaggio di livelli granulari.

È necessario precisare che le aree di Figura 2-20, in questa ed in altre parti della Regione, se confrontate con una carta della geologia di superficie, dal punto di vista cronostratigrafico comprendono in alcuni casi anche depositi pre-olocenici. Sebbene l'utilizzo della sola geologia di superficie ne avrebbe escluso la predisposizione litologica, il maggiore dettaglio derivante dalle stratigrafie di sondaggi, ha evidenziato in corrispondenza di tali aree, la presenza di una coltre di disfacimento granulometricamente compatibile la quale, se saturata, può innescare fenomeni di liquefazione. Tale evenienza è confermata anche dai siti di liquefazione storica alcuni dei quali ubicati in corrispondenza di terrazzi marini pleistocenici ed altri depositi anche pre-quadernari (Figura 2-7).

Secondo l'approccio descritto in precedenza, in riferimento alla profondità della tavola d'acqua, sono state considerate quelle aree ove la soggiacenza è risultata entro i 20m dal p.c. insieme alla relativa incertezza sulla stima (Figura 2-18).

Per la forzante sismica di innesco, è stata considerata la PGA amplificata per un periodo di ritorno di 475 anni ottenuta utilizzando i fattori di amplificazione calcolati per l'Italia secondo la procedura IGAG20 (Falcone et al., 2021). Dalla carta (Figura 2-21) risulta che la totalità del territorio della Regione Calabria è caratterizzata da valori di accelerazione in superficie di riferimento $a_{max} \geq 0.1g$.

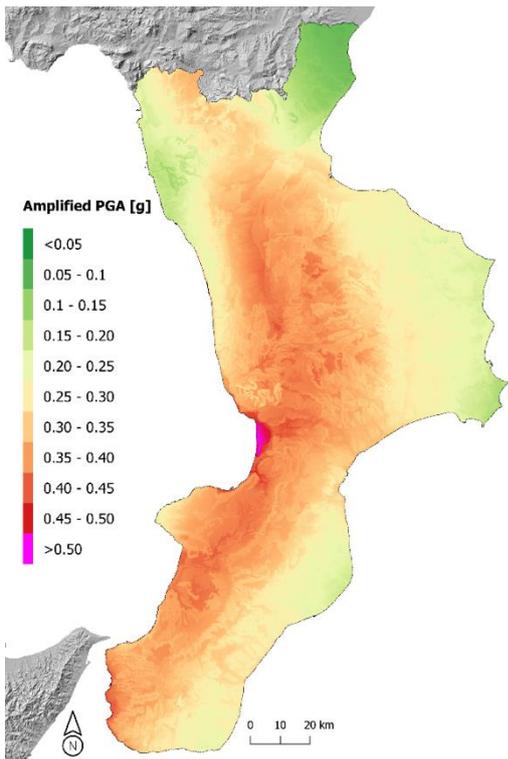


Figura 2-21 Carta delle PGA amplificata per un periodo di riferimento pari a 475 anni (Falcone et Al., 2021 comunicazione personale per AF_PGA).

In fine, il fattore discriminante della pendenza della superficie topografica è stato introdotto con lo scopo di escludere dalla valutazione i versanti e tutte quelle aree in cui la pendenza induce una componente non trascurabile della deformazione laterale ed un'evoluzione del fenomeno in frana. Considerando che i fenomeni di liquefazione e di *lateral spreading* ad essi associati avvengono entro intervalli di pendenza molto bassi dell'ordine di 1% - 5% (Bartlett et Al. 1992), la soglia di inclinazione è stata fissata a 5° (8.74%) al fine di separare le due fenomenologie (Figura 2-22).

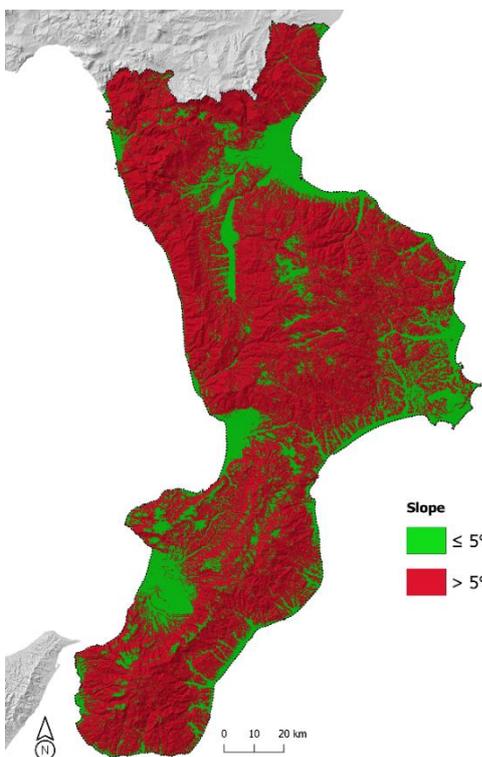


Figura 2-22 Classi di pendenza a scala regionale.

2.4.1 Valutazione della suscettibilità a liquefazione

La Figura 2-23 riporta le informazioni riguardanti i 2 fattori predisponenti (Figura 2-23a,b), il fattore innescante, ovvero la PGA di trigger per un periodo di ritorno di 475 anni (Figura 2-23c) e infine il fattore discriminante della pendenza (Figura 2-23d). I 4 layer sono stati convertiti in raster binari (1 – condizione verificata; 0 – condizione non verificata) e mediante software GIS uniti in un unico raster in cui il verificarsi delle 4 condizioni contemporaneamente consente di individuare le aree con predisposizione alla liquefazione (Figura 2-24).

Inoltre, l'approccio metodologico geostatistico fornisce l'incertezza associata alla valutazione della suscettibilità a liquefazione, distinguendo le aree ad alta e bassa incertezza, mostrate rispettivamente in rosso e azzurro sulla mappa in Figura 2-24a.

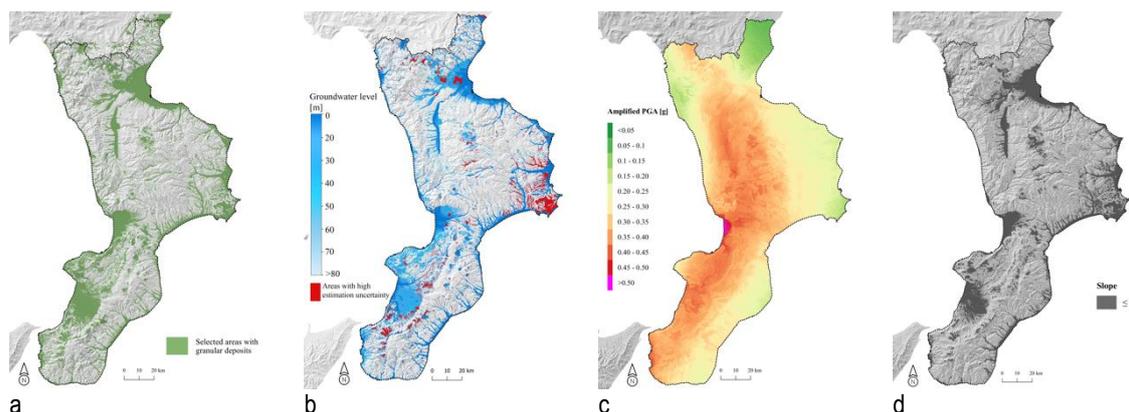


Figura 2-23 a) Mappa delle litologie di interesse; b) Mappa della profondità della falda; c) Mappa della PGA amplificata al sito di riferimento; d) aree con pendenza inferiore o uguale a 5°.

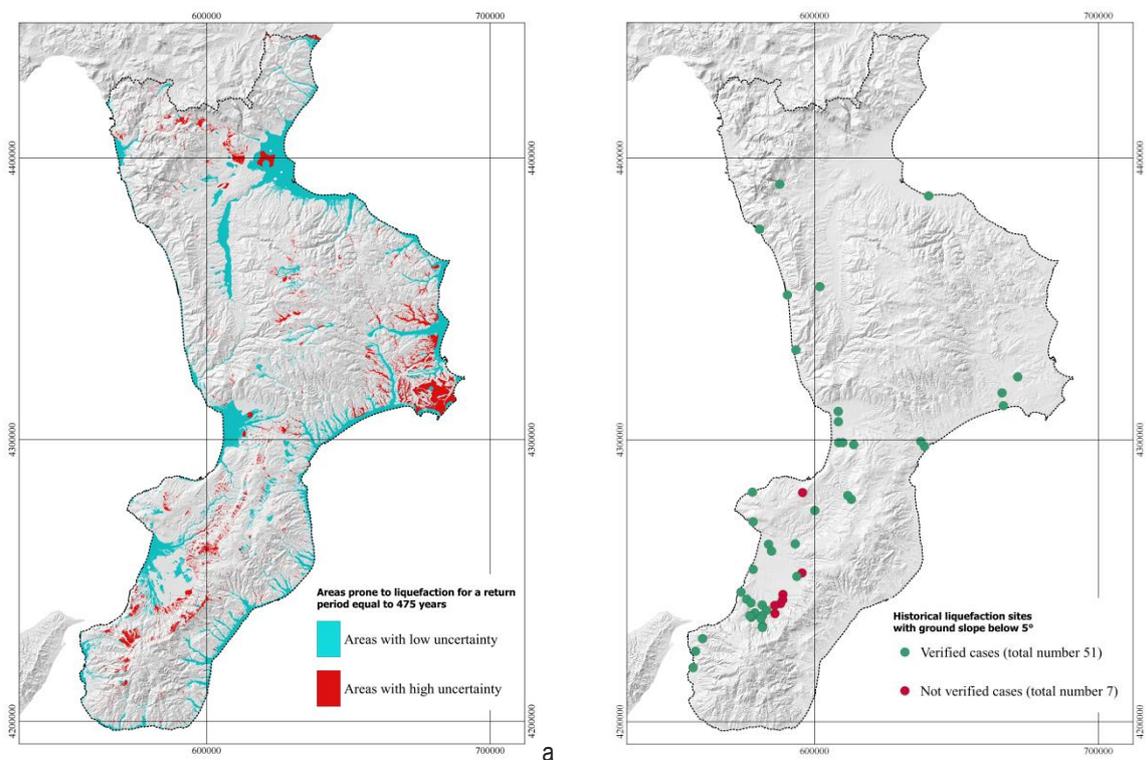


Figura 2-24 a) Mappa delle aree con predisposizione alla liquefazione; b) casi storici di liquefazione in aree con pendenze inferiori a 5° (CEDIT Fortunato et al., 2014).

La risultante mappa di liquefazione della suscettibilità è stata confrontata con le osservazioni storiche di liquefazione riportate in Figura 2-24b, verificatesi in aree con una pendenza della superficie del suolo inferiore alla soglia di 5°. Una percentuale pari all'88% delle osservazioni storiche di liquefazione (51 casi dal Database CEDIT, Fortunato et Alii, 2014) ricade nelle aree soggette a liquefazione come previsto dalla mappa proposta in Figura 2-24a.

2.5 Analisi a scala locale: Indice di predisposizione alla liquefazione territoriale (TPLI)

Le indagini disponibili nel database della regione Calabria sono costituite principalmente da sondaggi. In questo scenario, comune a molte regioni italiane, le informazioni fornite non consentono di applicare in modo affidabile ed estensivo gli approcci di letteratura (illustrati nel §1) basati principalmente su prove CPT, SPT e Vs per valutare la suscettibilità da liquefazione cosismica. Per questo motivo è stato introdotto uno strumento di previsione della predisposizione alla liquefazione a partire dalle informazioni dei sondaggi. Il nuovo indice di predisposizione territoriale (*Territorial Predisposing Liquefaction Index - TPLI*) viene calcolato mediante una procedura semplificata che può essere applicata in contesti simili, come studio preliminare a scala locale.

Seguendo lo schema di Figura 2-11, per ogni sondaggio geognostico, entro i rimi 20m dal p.c., sono stati calcolati lo spessore e la profondità dello strato liquefacibile (spessore saturo) e l'eventuale spessore della crosta (spessore insaturo) (Figura 2-11d)

L'indice di predisposizione territoriale alla liquefazione (TPLI) viene calcolato per ogni strato liquefacibile secondo l'equazione 5.1, dove H_{liq} è lo spessore dello strato liquefacibile e H è la sua posizione rispetto al piano campagna (spessore insaturo).

$$TPLI = \frac{H_{liq}}{20} \cdot (10 - 0.5 \cdot H) \quad (5.1)$$

Il TPLI assume valori compresi tra 0 e 10. La classificazione del livello atteso di predisposizione alla liquefazione è riportata nella seguente tabella.

Livello di predisposizione	Classe di intervallo
Nessuna predisposizione	TPLI =0
Bassa	0<TPLI≤0.6
Media	0.6< TPLI≤1.8
Alta	1.8<TPLI≤4
Molto alta	4< TPLI≤10

Al sondaggio viene assegnato valore di TPLI più alto ovvero il valore calcolato in corrispondenza dello strato con maggiore predisposizione da un punto di vista stratigrafico.

2.5.1 Predisposizione alla liquefazione a scala locale

Nelle aree soggette a liquefazione individuate a scala regionale sono stati estratti 991 sondaggi, in corrispondenza dei quali è stato calcolato il valore di TPLI. Per spazializzare le informazioni puntuali è realizzare mappe di suscettibilità a liquefazione, è stato utilizzato il Kriging ordinario al quale è stata associata una stima della qualità dell'interpolazione valutata entro un valore soglia pari al 3° quartile della distribuzione SDER. Le aree con elevato errore di stima sono riconducibili alla quantità e alla distribuzione dei dati di base disponibili.

La Figura 2-25 mostra l'esempio per la Piana di Gioia Tauro (a) e Lamezia Terme (b) ove, in corrispondenza delle aree indicate nella fase preliminare come suscettibili a liquefazione (Figura 2-24a), è stato calcolato il valore del TPLI quantificando su una scala che va da “basso” a “molto alto” il grado di predisposizione alla liquefazione. La campitura identifica le aree con maggiore incertezza e verso le quali indirizzare studi di approfondimento mediante la realizzazione di nuove indagini di sito.

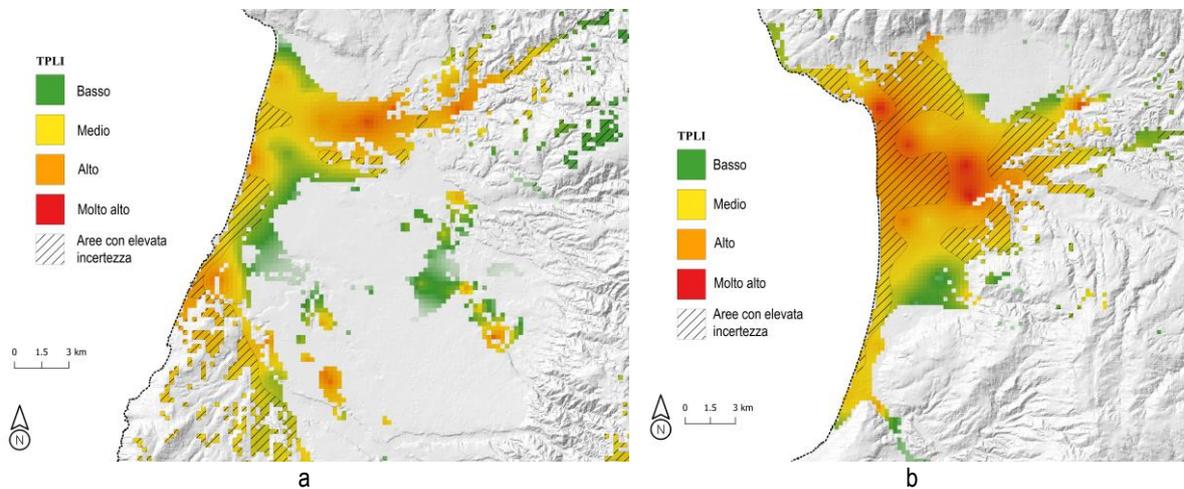


Figura 2-25. Mappa del TPLI a) Piana di Gioia Tauro; b) Piana di Lamezia Terme.

Bibliografia (Sezione 2)

- AGI (2005) Associazione Geotecnica Italiana – Linea guida. Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Patron Editore, Bologna.
- Allocca V., De Vita P., Di Rienzo B., Ferrara L., Giarra A., Mangoni O., Arienzo M. (2018) Hydrogeological and hydrogeochemical study of a volcanic-sedimentary coastal aquifer in the archaeological site of Cumae (Phlegraean Fields, southern Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 185, 105–115.
- Bartlett S. F. and Youd T. L. (1992) Empirical analysis of horizontal ground displacement generated by liquefaction-induced lateral spread. Technical Report NCEER-92-0021.
- Bertalot, D. & Brennan, A. J. 2015. Influence of initial stress distribution on liquefaction-induced settlement of shallow foundations. *Géotechnique*, 65(5): 418–428.
- Bindi D, Pacor F, Luzi L, Puglia R, Massa M, Ameri G, Paolucci R (2011) Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bulletin of Earthquake Engineering* (6):1899{1920
- Bouckovalas, G. D., Tsiapas, Y. Z., Zontanou, V. A. & Kalogeraki, C. G. 2017. Equivalent Linear Computation of Response Spectra for Liquefiable Sites: The Spectral Envelope Method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 143 (4), 04016115–12.
- Brankman, C. M., and L. G. Baise (2008) Liquefaction susceptibility mapping in Boston, Massachusetts, *Environ. Eng. Geosci.* 14, 1–16.
- Carminati E., M. Lustrino, and C. Doglioni (2012) Geodynamic evolution of the central and western Mediterranean: Tectonics vs. igneous petrology constraints, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2012.01.026.
- CFTI5med, 2018. *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)*. Ed.s: Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). doi: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>.
- Chilès JP, Delfiner P (2012) *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*, 2nd edn. Wiley, Hoboken, p 726. ISBN 978-0-470-18315-1
- Commissione Tecnica per la Microzonazione sismica (2017). *Linee Guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazione (LQ), versione 1* Roma. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile.
- CPTI15 (2021) *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 3.0*. ed.s: Rovida A., Locati M., Camassi R., Loli B., Gasperini P., Antonucci A. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.3>.
- Cubrinovski M, Bray JD, Taylor M, Giorgini S, Bradley B, Wotherspoon L, Zupan J. Soil liquefaction effects in the central business district during the February 2011 Christchurch earthquake (2011) *Seismol Res Lett* 2011;82(6):893–904.
- Cuili, (2012) Contributo alla conoscenza delle caratteristiche idrogeologiche della piana di S. Eufemia Lamezia (Calabria) — primi risultati. *Acque sotterranee*, 127, 19–32.

- D'Agostino N, D'Anastasio E, Gervasi A, Guerra I, Nedimović MR, Seeber L, Steckler M. (2011). Forearc extension and slow rollback of the Calabrian Arc from GPS measurements. *Geophysical Research Letters* 38 L17304. DOI:<https://doi.org/10.1029/2011GL048270>.
- De Vita P., Allocca V., Celico F., Fabbrocino S., Mattia C., Monacelli G., Musilli I., Piscopo V., Scalise A.R., Summa G., Tranfaglia G. & Celico P. (2018) Hydrogeology of continental southern Italy. *Journal of Maps*, 14:2, 230-241, DOI: 10.1080/17445647.2018.1454352
- DPC, Dipartimento della Protezione Civile (2018) Commissione tecnica per il supporto e monitoraggio degli studi di Microzonazione Sismica (ex art.5, OPCM3907/10), (2018) WebMs; WebCLE. A cura di: Maria Sole Benigni, Fabrizio Bramerini, Gianluca Carbone, Sergio Castenetto, Gian Paolo Cavinato, Monia Coltella, Margherita Giuffrè, Massimiliano Moscatelli. In: Giuseppe Naso, Andrea Pietrosante, Francesco Stigliano.
- Dumas B., Guérémy P., Lhenaff R., Raffy J. (1982) Le soulèvement quaternaire de la Calabrie meridionale. *Revue Géologie Dynamique et Géographie Physique* 23: 27–40.
- Faccenna C., Funicello F., Giardini D., Lucente P. (2001) Episodic backarc extension during restricted mantle convection in the central Mediterranean. *Earth Planetary Science Letters* 187: 105–116. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00280-1).
- Faccenna, C., C. Piromallo, A. Crespo-Blanc, and L. Jolivet (2004) Lateral slab deformation and the origin of the western Mediterranean arcs, *Tectonics*, 23, TC1012, doi:10.1029/2002TC001488.
- Falcone, G., Acunzo, G., Mendicelli, A., Mori, F., Naso, G., Peronace, E., Porchia, A., Romagnoli, G., Tarquini, E., Moscatelli, M. (2021) Seismic amplification maps of Italy based on site-specific microzonation dataset and one-dimensional numerical approach. *Eng. Geol.* 289, 106170. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106170>
- Fortunato C., Martino S., Prestininzi A., Romeo R.W., Fantini A. and Sarandrea P. (2012) New release of the Italian catalogue of earthquake-induced ground failures (CEDIT). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2, 63-74.
- Galli P, Galadini F, Pantosti D. (2008) Twenty years of paleoseismology in Italy. *Earth–Science Reviews* 88(1): 89–117.
- Galli P. (2000) New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. *Tectonophysics*, 324, 169-187.
- Galli P., Bosi V. (2002) Paleoseismology along the Cittanova fault: Implications for seismotectonics and earthquake recurrence in Calabria (southern Italy). *Journal of Geophysical Research* 107(B3): 2044. <https://doi.org/10.1029/2001JB000234>.
- Ghisetti F. (1981) Upper Pliocene-Pleistocene uplift rates as indicators of neotectonic pattern: aq example from southern Calabria (Italy). *Zeitschrift Geomorphologie* 40: 93–118.
- Ghisetti F. (1992) Fault parameters in the Messina Strait (southern Italy) and relations with the seismogenic source. *Tectonophysics* 210: 117–133.
- Goovaerts P. (1997) *Geostatistics for natural resources evaluation* Oxford University Press, New York (1997)
- Greenfield M. W., Grant A. (2020) Probabilistic regional-scale liquefaction triggering modeling using 3D Gaussian processes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 134 (2020) 106159.
- Guerricchio & Melidoro (1975) *Ricerche di geologia applicata all'archeo- logia della città di Sibari sepolta*. *Geologia Applicata e Idrologia*, vol. X, p. I.

- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. (2018) CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>
- 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, Article number: 80 (2019). doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>
- HAZUS (2013) Federal Emergency Management Agency. Hazus-MH 2.1 technical manual. 2013 [Washington, DC].
- Holzer, T. L., M. J. Bennett, T. E. Noce, A. C. Padovani, and J. C. Tinsley III (2006) Liquefaction hazard mapping with LPI in the greater Oakland, California, area, *Earthq. Spectra* 22, 693–708.
- Holzer, T. L., T. E. Noce, and M. J. Bennett (2009) Scenario liquefaction hazard maps of Santa Clara Valley, northern California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 99, 367–381.
- Ishihara, K. 1985. Stability of natural deposits during earthquakes, *Proceedings of the 11 th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1: 321-376.
- Ishihara, K., Yasuda, S. & Yoshida, Y. 1990. Liquefaction- induced flow failure of embankments and residual strength of silty sands, *Soils and Foundations*, 30(3): 69-80.
- ISPRA – Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia. Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo ai sensi della Legge 464/84. Servizio GEO-APP, Roma, Italy.
- Iwasaki T, Tatsuoka F, Tokida K, Yasuda S (1978) A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan". In: *Proceedings of the 2nd international conference on microzonation*, San Francisco, USA, pp 885–896
- Iwasaki T, Tokida K, Tatsuoka F, Watanabe S, Yasuda S, Sato H (1982) Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. In: *Proceedings of the 3th international conference on microzonation*, Seattle, USA, vol 3, pp 1319–1330
- Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., Yasuda S. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. *Proc. 2and Int. Conf. On Microzonation National Science Foundation*, Washington, Dc.
- Karamitros, D. K., Bouckovalas, G. D. & Chaloulos, Y. K. 2013. Seismic settlements of shallow foundations on liquefiable soil with a clay crust. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 46(C): 64–76.
- Kayen R, Wham B, Grant A, others (2019) Seismological, geological, and geotechnical engineering aspects of the 2018 M W 6.6 hokkaido eastern iburi earthquake. *Geotechnical extreme event reconnaissance*. 2019. <https://doi.org/10.18118/G6CM1K>. GEER-060.
- Liu, L. & Dobry, R. 1997. Seismic Response of Shallow Foundation on Liquefiable Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123(6): 557–567.
- Lu, C. W. 2017. A Simplified Calculation Method for Liquefaction- Induced Settlement of Shallow Foundation. *Journal of Earthquake Engineering* 21(8): 1385-1405.

- Malinverno A, Ryan WBF. (1986) Extension on the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as result of arc migration driven by sinking of the lithosphere. *Tectonics* 5: 227–245. <https://doi.org/10.1029/TC005i002p00227>.
- Minelli L, Faccenna C. (2010) Evolution of the Calabrian accretionary wedge (central Mediterranean). *Tectonics* 29 TC4004. <https://doi.org/10.1029/2009TC002562>.
- Miyauchi T, Dai Pra G, Sylos Labini S. (1994) Geochronology of Pleistocene marine terraces and regional tectonics in the Tyrrhenian coast of south Calabria, Italy. *Il Quaternario* 7(1): 17–34.
- NTC (2018) – Norme Tecniche per le Costruzioni – DM 17 gennaio 2018, Gazzetta Ufficiale, n. 42 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 8, www.cslp.it, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma
- Palano M, Ferranti L, Monaco C, Mattia M, Aloisi M, Bruno V, Cannavò F, Siligato G. (2012) GPS velocity and strain fields in Sicily and southern Calabria, Italy: updated geodetic constraints on tectonic block interaction in the central Mediterranean. *Journal of Geophysical Research* 117 B07401. <https://doi.org/10.1029/2012JB009254>.
- Paoletta L., Spacagna R.L., Chiaro G., Modoni G. (2020) A simplified vulnerability model for the extensive liquefaction risk assessment of buildings. July 2020. *Bulletin of Earthquake Engineering*. DOI: 10.1007/s10518-020-00911-2
- Patacca E, Sartori R, Scandone P. (1990) Tyrrhenian basin and Apenninic arcs: kinematic relations since late tortonian times. *Memorie della Società Geologica Italiana* 45(1): 425–451.
- Pebesma EJ (2004). Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30, 683-691.
- Peronace E., Della Seta M., Troiani F., Galli P., Giaccio B., Messina P., Fredi P. (2018) Testing geomorphic signal of active normal faulting: The case of the Cittanova Fault (Calabria, southern Italy). *Earth Surf. Process. Landforms* 43, 2256–2270. DOI: 10.1002/esp.4384.
- Polemio M. & Luise G. (2007) Conceptual and numerical model of ground- water flow for a coastal plain (Piana di Sibari, Southern Italy), in Ribeiro L., Chambel A. and Condesso De Melo M.T., eds., *Groundwater and Ecosystems*.
- Polemio M., Dragone V. & Romanazzi A. (2013) La risorsa idrica. Sfruttamento, depauperamento dei serbatoi sotterranei e utilizzo razionale nel caso della Calabria. *Rendiconti Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, L'acqua in Calabria: risorsa o problema?* Ed. Aracne, pag. 11–29 . ISBN 978-88-548-6138-1, DOI 10.4399/97888548613811
- Pondrelli S, Salimbeni S, Morelli A, Ekström G, Postpischil, Vannucci G, Boschi E. (2011) European–Mediterranean regional centroid moment tensor catalog: solutions for 2005–2008. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 185(3–4): 74–81.
- Presti D, Billi A, Orecchio B, Totaro C, Faccenna C, Neri G. (2013) Earthquake focal mechanisms, seismogenic stress, and seismotectonics of the Calabrian Arc, Italy. *Tectonophysics* 602: 153–175. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.030>.
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Robertson P.K., Wride C.E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(5):442-459.
- S. F. Bartlett and T. L. Youd, (1992). *Empirical Analysis of Horizontal Ground Displacement Generated by Liquefaction-Induced Lateral Spreads*, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, USA.
- Sarconi M. (1784) *Atlante, Istoria de' fenomeni del tremoto avvenuto nelle Calabrie, e nel Valdemone nell'anno 1783 posta in luce dalla Reale Accademia delle Scienze, e delle Belle Lettere di Napoli, Napoli*.

- Seed, H.B., Idriss, I.M. (1971) - Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 107, No SM9, pp. 1249-1274.
- Serpelloni E, Bürgmann R, Anzidei M, Baldi P, Mastrolembo Ventura B, Boschi E. (2010) Strain accumulation across the Messina Straits and kinematics of Sicily and Calabria from GPS data and dislocation modeling. *Earth and Planetary Science Letters* 298: 347–360.
- Shahir, H. & Pak, A. 2010. Estimating liquefaction-induced settlement of shallow foundations by numerical approach. *Computers and Geotechnics* 37(3): 267–279.
- Sonmez H (2003) Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey). *Environ Geol* 44:862–871
- Technical Commission for Seismic Microzonation (2017) Land Use Guidelines for Areas Affected by Liquefaction (LQ), version 1.0. Department of Civil Protection of the Presidency of the Council of Ministers. Rome. <https://www.centromicrozonazioneismica.it/it/download/category/22-land-use-guidelines-for-areas-affected-by-liquefaction>
- Technical Commission for Seismic Microzonation (2020) Graphic and data archiving standards. Version 4.2. Department of Civil Protection of the Presidency of the Council of Ministers. Rome. http://www.protezionecivile.gov.it/documents/20182/823803/StandardMS_4_2/b29f758c-c15a-4256-a1c9-957ef100dc4b.
- Tonkin & Taylor (2013). Canterbury Earthquakes 2010 and 2011. Land report as at 29 February 2012. 108 pp. Earthquake Commission.
- Tonkin and Taylor Ltd. (2013) Liquefaction Vulnerability Study. Report to Earthquake Commission, T and T ref. 52020.0200/v1.0, prepared by S. van Ballegooy and P. Malan, https://www.eqc.govt.nz/sites/public_files/documents/liquefaction-vulnerability-study-final.pdf
- Tortorici L, Monaco C, Tansi C, Cocina O. (1995) Recent and active tectonics in the Calabrian Arc (southern Italy). *Tectonophysics* 243: 37–49. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00190-K](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00190-K).
- Totaro, C., B. Orecchio, D. Presti, S. Scolaro, and G. Neri (2016), Seismogenic stress field estimation in the Calabrian Arc region (south Italy) from a Bayesian approach, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 8960–8969, doi:10.1002/2016GL070107.
- Van Ballegooy S, Malan P, Lacrosse V, Jacka ME, Cubrinovski M, Bray JD, O'Rourke TD, Crawford SA, Cowan H (2014) Assessment of liquefaction-induced land damage for residential Christchurch. *Earthq Spectra* 30(1):31–55.
- Vannucci G, Gasperini P. (2004) The new release of the database of Earthquake Mechanisms of the Mediterranean Area (EMMA Version 2). *Annals of Geophysics* 47(1): 307–334.
- Westaway R. (1993) Quaternary uplift of southern Italy. *Journal of Geophysical Research* 98: 21741–21772.
- Yanxin Yang, Jianguo Liu, Jianlin Ma and Qinke Wang. A Hybrid Approach Calculating Lateral Spreading Induced by Seismic Liquefaction. *Hindawi Shock and Vibration* Volume 2020, Article ID 3769206, 14 pages <https://doi.org/10.1155/2020/3769206>.
- Youd TL, Tinsley JC, Perkins DM, King EJ, Preston R. (1978) Liquefaction potential map of San Fernando Valley, California. In: *Int. Conf. On microzonation for safer construction*. 2nd, vol. 1; 1978. p. 267–78. San Francisco.

Zhang G, Robertson PK, Brachman RW (2002) Estimating liquefaction induced ground settlements from CPT for level ground. *Can Geotech J* 39(5):1168–1180. <https://doi.org/10.1139/T02-047>

Zhang G, Robertson PK, Brachman RWI (2004) Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test. *J Geotech Geoenviron Eng* 130(8):861–871

SEZIONE 3 - INVERSIONI DI VELOCITA'

1 Fenomenologia del problema

Le inversioni di velocità sono fenomeni complessi che ricorrono in contesti geologici di sottosuolo complessi che un tecnico può incontrare nello svolgimento degli studi di MS. Nell'ambito dell'attività A2.3, le inversioni di velocità vengono trattate dapprima sotto il profilo fenomenologico; pertanto, sulla base di un esteso studio parametrico di risposta sismica locale 1D vengono analizzati i maggiori parametri di controllo del fenomeno. A valle di tale studio, è stata avviata un'attività volta ad individuare gli ambienti geomorfologici e deposizionali in cui si possono riconoscere fenomeni di inversioni di velocità. In funzione di ogni singolo ambiente vengono dapprima individuate delle colonne stratigrafiche 'reali' 1D (in termini di variazioni di spessori dei singoli strati, H_i , e di intervalli di velocità delle onde di taglio, $V_{s,i}$) e poi parametrizzate al fine di realizzare analisi Monte Carlo di RSL in cui viene considerata la variabilità di H_i e di $V_{s,i}$, e della non linearità dei materiali attraverso un'opportuna selezione delle curve di decadimento per il calcolo dell'amplificazione/deamplificazione stratigrafica.

L'obiettivo è quello di fornire elementi di valutazione a supporto dei professionisti per l'individuazione e comprensione del fenomeno delle inversioni di velocità in situazioni geologiche complesse.

È ben noto che l'amplificazione delle onde sismiche che si propagano attraverso una colonna stratigrafica di sottosuolo è funzione delle proprietà dinamiche dei singoli strati e delle caratteristiche fisico-meccaniche della roccia di base. La risposta di un sito con stratigrafia relativamente omogenea o con stratigrafia eterogenea con velocità delle onde di taglio, V_s , che aumenta con la profondità, è stata ampiamente studiata in letteratura attraverso studi sperimentali, numerici ed analitici. Questi studi hanno portato allo sviluppo di procedure e criteri per stabilire le azioni sismiche in funzione delle diverse categorie del sottosuolo. Al contrario, i siti caratterizzati da inversione della velocità delle onde di taglio, quali ad esempio uno strato più rigido che poggia su uno strato più soffice, non ha ricevuto molta attenzione nella letteratura tecnica. Questa particolare condizione stratigrafica può determinare una risposta dinamica complessa influenzando in maniera significativo il moto in profondità e di superficie.

La fenomenologia del problema è stata studiata in via preliminare attraverso un esteso studio di analisi parametriche di risposta sismica locale 1D con approccio lineare equivalente su colonne ideali includenti significative inversioni di velocità.

Lo scopo principale dello studio parametrico è quello di valutare quali fattori influenzano maggiormente la risposta dinamica di una colonna stratigrafica di terreno con inversione di velocità e in quale misura la risposta sismica di tali sistemi stratificati differisce da quella di depositi di sottosuolo omogenei.

1.1 Analisi parametriche di RSL 1D

1.1.1 Definizione della metodologia

Le analisi parametriche di RSL 1D lineari equivalenti sono state condotte sugli schemi di colonna stratigrafica riportati in Figura 3.1, utilizzando il codice di calcolo STRATA (Kottke, Wang, & Rathje, 2003). I fattori che sono stati fatti variare parametricamente includono lo spessore e la velocità dell'onda di taglio di entrambi gli strati soffice (soft) e rigido (stiff) e la PGA al bedrock (quest'ultima può essere particolarmente rilevante negli strati soffici che possono esibire una forte non linearità per forti scuotimenti). In Tabella 3.1 sono sintetizzate le geometrie delle colonne considerate per lo schema 1 (Figura 3.1) e le velocità V_s assegnata agli strati soft e stiff. Per lo schema 1 si è considerato il deposito costituito da due strati sopra un substrato elastico. Lo strato superiore è stato assunto più rigido di quello inferiore. Lo spessore dello strato soffice (h_{soft}) è stato variato in modo da assumere valori pari a $0.25H$, $0.50H$ e $0.75H$ rispettivamente. Per ogni h_{soft}/H , sono stati assunti valori di V_s diversi, in particolare per lo strato superiore rigido $V_{s,stiff} = 360;580$ m/s mentre lo strato soffice $V_{s,soft} = 100;180$ m/s. I valori V_s sono stati selezionati in base alle categorie del sottosuolo (Eurocode 8, 2003) e delle (NTC, 2018). Sono stati esaminati anche i casi limite di depositi di suolo omogeneo rigido ($h_{soft} = 0$) e omogeneo soffice ($h_{soft} = H$) su roccia elastica. In analogia allo schema 1, sono state costruite le colonne parametriche per gli schemi 2 e 3 come riportato in Tabella 3.2 e Tabella 3.3, rispettivamente. In particolare, per lo schema 2, sono state considerate le stesse combinazioni di rapporti di spessore e contrasti di impedenza dello schema 1 alle quali è stato aggiunto un ulteriore strato rigido a contatto con il bedrock sismico che presenta le stesse caratteristiche di spessore e velocità delle onde di taglio dello strato rigido più superficiale. Lo schema 3 invece, è stato studiato per le stesse combinazioni di rapporti di spessore e contrasti di impedenza dello schema 3 invertendo l'ordine degli strati. Venti accelerogrammi non scalati sono stati scelti con valori di PGA compresi tra ($0.2 \leq PGA < 0.4g$) e sono stati selezionati per le analisi parametriche di RSL. Gli accelerogrammi sono stati estratti dal database italiano ITACA (<http://itaca.mi.ingv.it/>) e, per le classi di maggiore energia, anche da quello internazionale del PEER (<https://ngawest2.berkeley.edu/>). I segnali accelerometrici selezionati si riferiscono a stazioni di acquisizione poste su sottosuolo rigido con magnitudo compresa tra 4.5 e 6.9 e distanza epicentrale compresa tra 5 km e 50 km, indipendentemente dallo stile tettonico e dall'ambiente geodinamico. In Tabella viene riportato l'elenco completo degli accelerogrammi utilizzati.

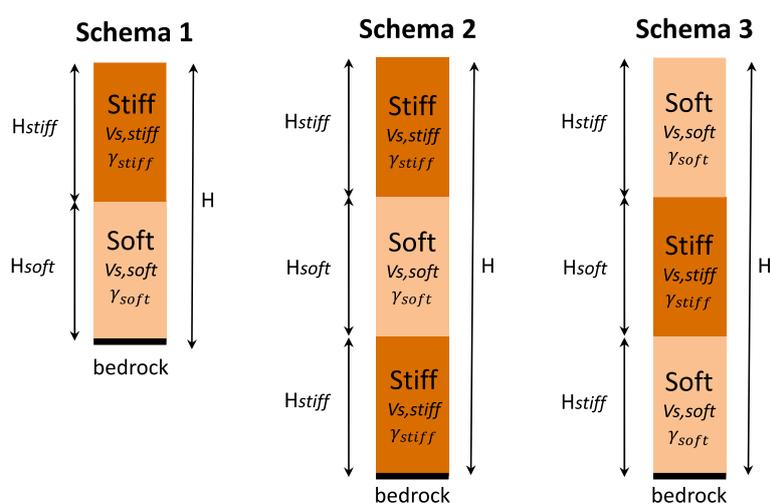


Figura 3.1 Schemi di colonna stratigrafica con inversioni di velocità considerata per le analisi parametriche di RSL 1D.

(a)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)				
stiff	360, 580	30	22.5	15	7.5	0
soft	180, 100	0	7.5	15	22.5	30
bedrock	800	30	30	30	30	30

(b)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)				
stiff	360, 580	50	37.5	25	12.5	0
soft	180, 100	0	12.5	25	37.5	50
bedrock	800	50	50	50	50	50

(c)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)				
stiff	360, 580	70	52.5	35	17.5	0
soft	180, 100	0	17.5	35	52.5	70
bedrock	800	70	70	70	70	70

(d)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)				
stiff	360, 580	100	75	50	25	0
soft	180, 100	0	25	50	75	100
bedrock	800	100	100	100	100	100

Tabella 3.1 Colonne parametriche per Schema 1.

(a)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)	H (m)	H (m)
stiff	360	22.5	15	7.5
soft	180	7.5	15	22.5
stiff	360	22.5	15	7.5
bedrock	800	52.5	45	37.5

(b)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)	H (m)	H (m)
stiff	360	37.5	25	12.5
soft	180	12.5	25	37.5
stiff	360	37.5	25	12.5
bedrock	800	87.5	75	62.5

(c)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)	H (m)	H (m)
stiff	360	52.5	35	17.5
soft	180	17.5	35	52.5
stiff	360	52.5	35	17.5
bedrock	800	122.5	105	87.5

(d)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)	H (m)	H (m)
stiff	360	75	50	25
soft	180	25	50	75
stiff	360	75	50	25
bedrock	800	175	150	125

Tabella 3.2 Colonne parametriche per Schema 2.

(a)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)	H (m)	H (m)
stiff	180	22.5	15	7.5
soft	360	7.5	15	22.5
stiff	180	22.5	15	7.5
bedrock	800	52.5	45	37.5

(b)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)	H (m)	H (m)
stiff	180	37.5	25	12.5
soft	360	12.5	25	37.5
stiff	180	37.5	25	12.5
bedrock	800	87.5	75	62.5

(c)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)	H (m)	H (m)
stiff	180	52.5	35	17.5
soft	360	17.5	35	52.5
stiff	180	52.5	35	17.5
bedrock	800	122.5	105	87.5

(d)

LAYER	Vs (m/s)	H (m)	H (m)	H (m)
stiff	180	75	50	25
soft	360	25	50	75
stiff	180	75	50	25
bedrock	800	175	150	125

Tabella 3.3 Colonne parametriche per Schema 3.

database ITACA – ($0.2 \leq PGA < 0.4$)g

ID	Componente	Durata (s)	Nome stazione	Magnitudo locale	Nome evento	Profondità (km)	Δt (s)	Stazione lat.	Stazione long.
3080579	E	91.91	Avendita	6.1	Centro Italia	9.2	0.005	42.75	13.04
	N	91.91							
3118161	E	193.45	Baregnano	6.1	Centro Italia	9.2	0.005	43.11	13.08
	N	193.45							
3146657	E	63.20	Mobile 5	4.6	Centro Italia	9.9	0.005	42.85	13.18
	N	63.20							
3173018	E	44.26	Castelluccio di Norcia	5.9	Centro Italia	9.9	0.005	42.82	13.20
	N	44.26							
3226054	E	140.00	Lipari	4.8	Porto da ponente vulcano	13.5	0.005	38.44	14.95
	N	140.00							
3373935	E	48.52	Minucciano	4.4	Nord Italia	6.1	0.005	44.17	10.21
	N	48.52							
4255084	E	100.00	L'Aquila V. Aterno	5.9	Centro Italia	8.3	0.005	42.34	13.40
	N	100.00							

database PEER - ($0.2 \leq PGA < 0.4$)g

ID	Componente	Nome stazione	Δt (s)	Nome evento	Data registrazione	di
1078-1	N	Santa Susana	0.005	Catalogna	17.01.1994	
1078-2	N	Santa Susana	0.005	Catalogna	17.01.1994	
5618-1	EW	Iwate	0.01	Giappone	13.06.2008	
5618-1	NS	Iwate	0.01	Giappone	13.06.2008	
5680-1	EW	Iwate	0.01	Giappone	13.06.2008	
5680-2	NS	Iwate	0.01	Giappone	13.06.2008	

Tabella 3.4 Accelerogrammi utilizzati per le analisi parametriche di RSL 1D.

1.1.2 Risultati

Si è scelto di mostrare i risultati preliminari di questo studio parametrico sia nel dominio del tempo che delle frequenze.

Schema 1

Con riferimento allo schema 1, in Figura 3.2 vengono plottate, per esempio, le storie di accelerazione in superficie e confrontate con l'input al bedrock riferito al terremoto 1. La presenza dell'inversione di velocità mostra un effetto di deamplificazione in corrispondenza del picco di accelerazione. Questo effetto è dovuto principalmente alla forte non linearità esibita dallo strato sofficie rispetto allo strato rigido come mostrato in Figura 3.3, in cui si riportano i profili di deformazione massima per tutte le combinazioni geometriche considerate. In Figura 3.4, infine, sono mostrati i fattori di amplificazione nel dominio del tempo, calcolati come rapporto tra accelerazione massima in superficie ed accelerazione massima al bedrock, per tutti i 20 segnali considerati. Si può osservare come l'effetto di deamplificazione, a parità di assegnate condizioni di rigidità dei singoli strati, aumenta con la profondità del bedrock sismico. Nel dominio delle frequenze, invece, viene riportata in Figura 3.5 la funzione di amplificazione relativa al terremoto 1 ($PGA=0.3g$), per il caso di colonna omogenea rigida, omogenea sofficie e colonne con inversioni di velocità ($h_{soft}=0.25H, 0.5H, 0.75H$). Le frequenze più alte sono associate alla colonna più rigida mentre le frequenze più basse alle colonne più soffici.

Dominio del tempo

I casi che presentano inversioni di velocità hanno una frequenza molto prossima a quella individuata per il caso omogeneo sofficie mettendo in luce il fatto che lo strato sofficie controlla la risposta dinamica dell'intera colonna. Inoltre, aumentando lo spessore dello strato sofficie, da $h_{soft}=0.25H$ ad $h_{soft}=0.75H$, l'ampiezza del moto tende a quello della colonna omogenea sofficie. In Figura 3.6 infine, sono plottati i picchi delle funzioni di amplificazione per tutti i 20 segnali considerati. Per ciascuna configurazione geometrica considerati, i picchi si allineano su rette di regressione pressoché lineari, decrescenti con la PGA, che da destra verso sinistra tendono dal caso di colonna omogenea rigida al caso di colonna omogenea sofficie.

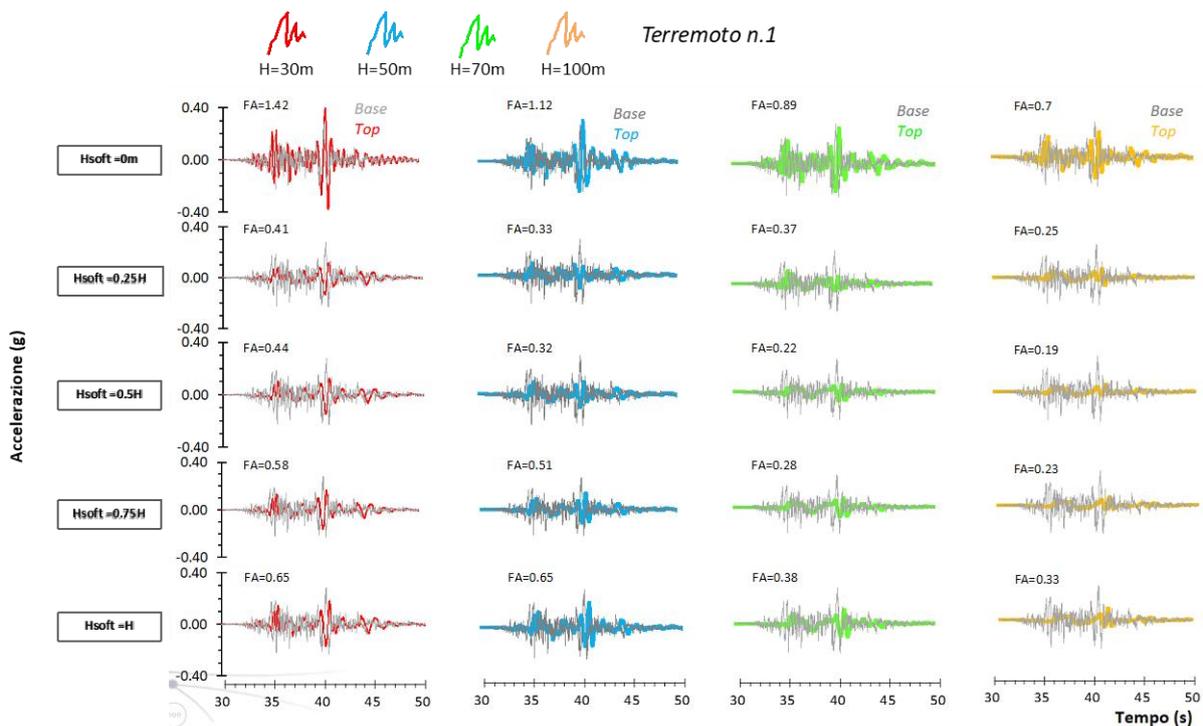


Figura 3.2 Schema 1: storie temporali delle accelerazioni per il terremoto 1 – PGA=0.3g (Vstiff=360m/s, Vsoft=180m/s).

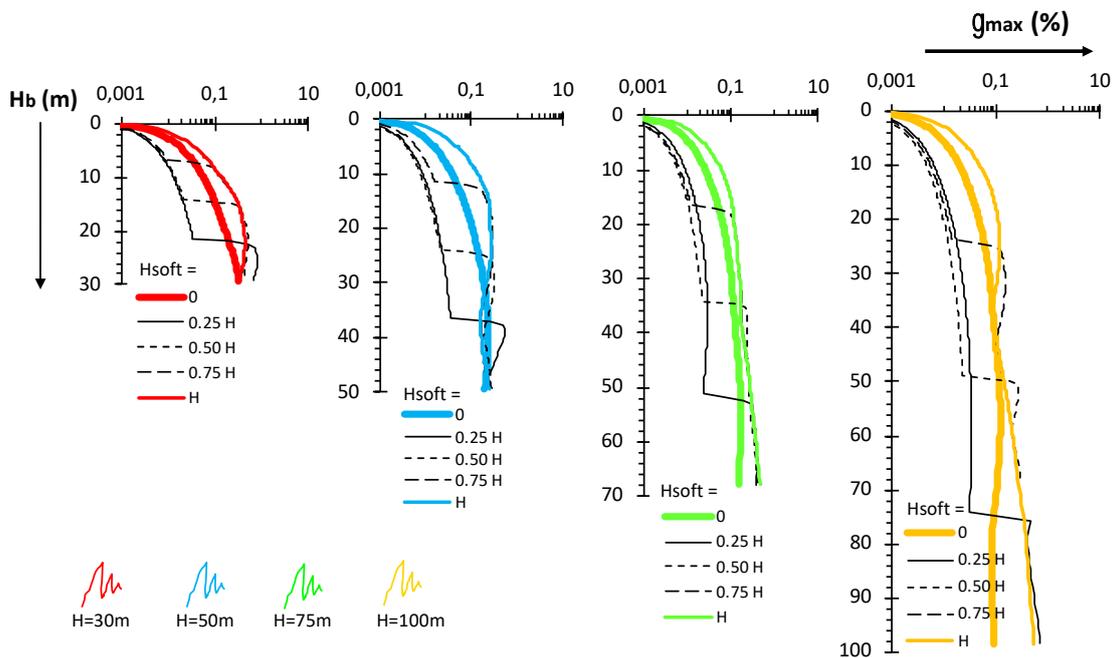


Figura 3.3 2Schema 1: profili di deformazione massima per il terremoto 1 – PGA=0.3g (Vstiff=360m/s, Vsoft=180m/s).

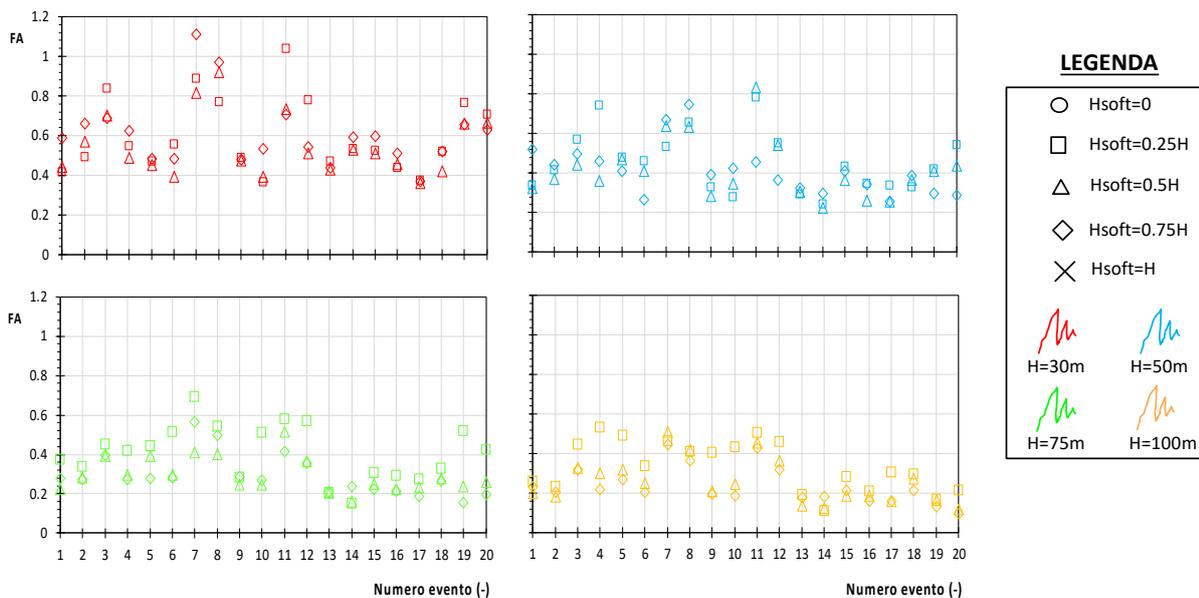


Figura 3.4 Schema 1: fattori di amplificazione nel dominio del tempo per i 20 terremoti ($V_{stiff}=360\text{m/s}$, $V_{soft}=180\text{m/s}$).

Domínio delle frequenze

- Effetto rapporto dello spessore H_{stiff}/H_{soft} ($V_{stiff}=360\text{m/s}$, $V_{soft}=180\text{m/s}$, $l=2$)

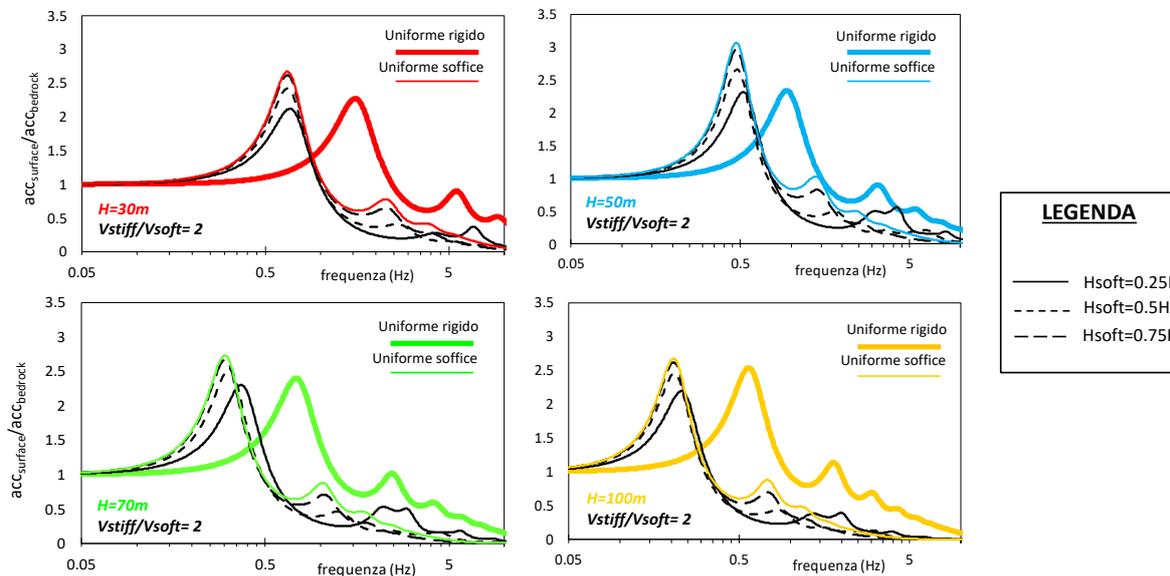


Figura 3.5 Schema 1: funzioni di amplificazione per il terremoto 1 – $PGA=0.3g$ ($V_{stiff}=360\text{m/s}$, $V_{soft}=180\text{m/s}$).

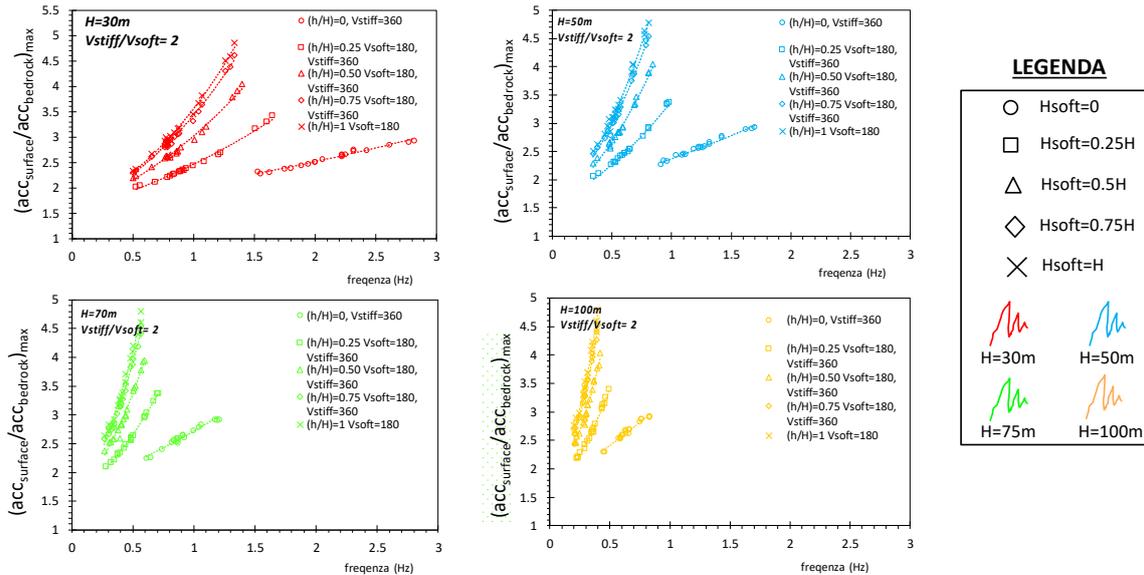


Figura 3.6 Schema 1: valore massimo delle funzioni di amplificazione per i 20 terremoti ($V_{stiff}=360\text{m/s}$, $V_{soft}=180\text{m/s}$).

- Effetto della riduzione della velocità dello strato soffice V_{soft} ($V_{stiff}=360\text{m/s}$, $V_{soft}=100\text{m/s}$, $I=3.6$)

Risultati analoghi sono stati ottenuti variando la velocità dello strato soffice (Figura 3.7 e Figura 3.8) e dello strato rigido (Figura 3.9 e Figura 3.10) rispettivamente. Riducendo la velocità dello strato soffice da 180m/s a 100m/s si osserva una riduzione della frequenza di picco rispetto al caso omogeneo rigido (Figura 3.6 e Figura 3.7). Aumentando la velocità dello strato rigido da 360m/s a 580m/s mantenendo invariata la velocità dello strato soffice uguale a 180m/s, si osserva (Figura 3.9 e Figura 3.10) come questo incremento di velocità ha poco effetto in termini di variazione di frequenza per le colonne con inversione di velocità che mantengono la frequenza pressoché invariata rispetto al caso $V_{s,stiff}=360\text{m/s}$ e $V_{s,soft}=180\text{m/s}$, così come accade anche considerando il caso $V_{s,stiff}=580\text{m/s}$ e $V_{s,soft}=100\text{m/s}$ (Figura 3.11).

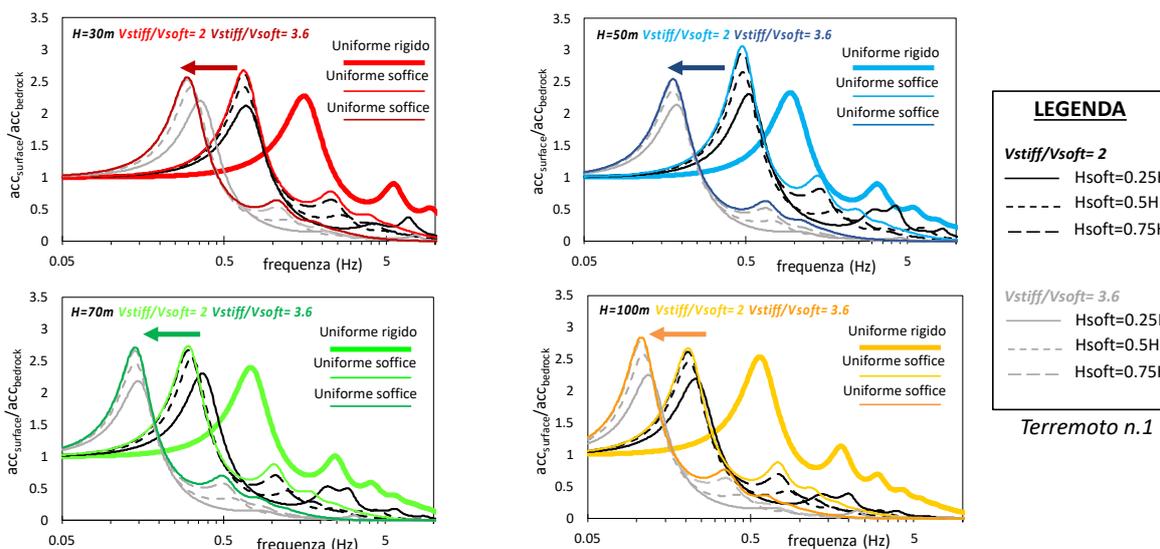


Figura 3.7 Schema 1: funzioni di amplificazione per il terremoto 1 – $PGA=0.3g$ ($V_{stiff}=360\text{m/s}$, $V_{soft}=100\text{m/s}$).

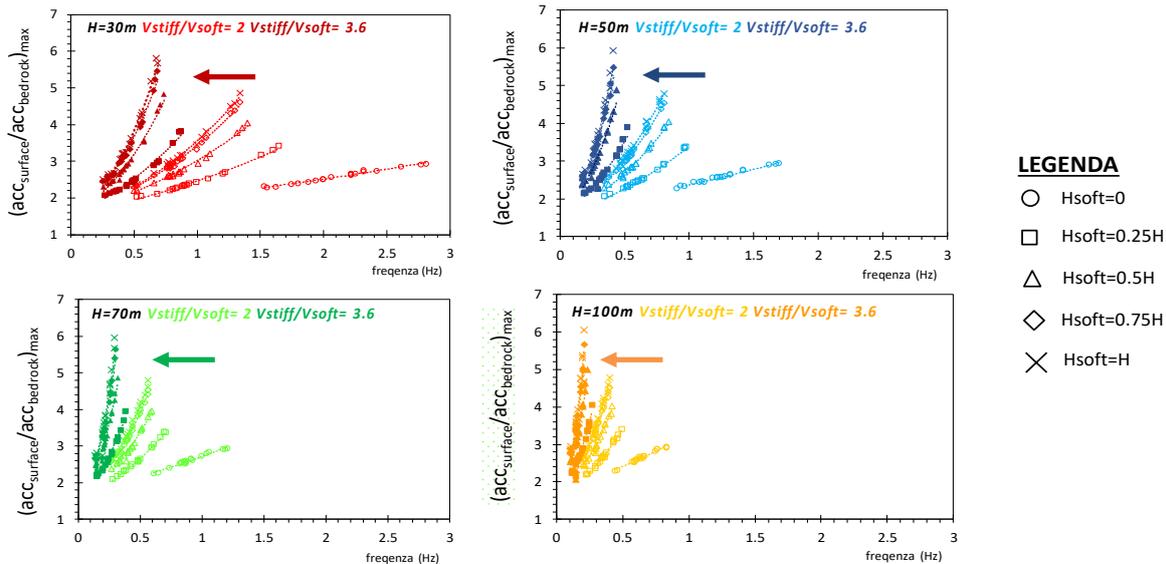


Figura 3.8 Schema 1: valore massimo delle funzioni di amplificazione per i 20 terremoti ($V_{stiff}=360\text{m/s}$, $V_{soft}=100\text{m/s}$).

- Effetto dell'incremento della velocità dello strato rigido V_{stiff} ($V_{stiff}=580\text{m/s}$, $V_{soft}=180\text{m/s}$, $I=3.2$)

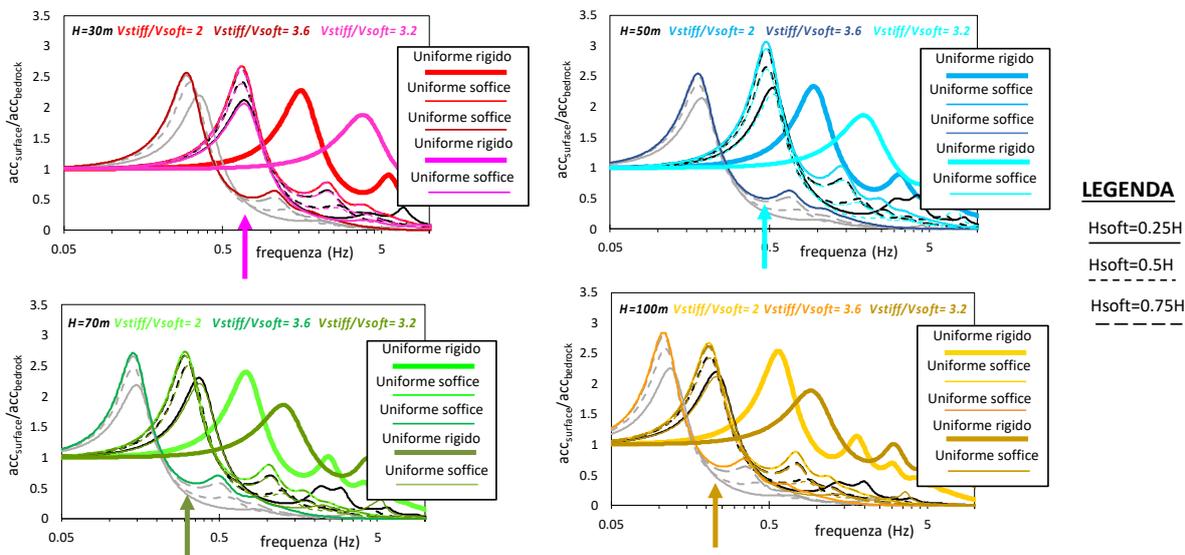


Figura 3.9 Schema 1: funzioni di amplificazione per il terremoto 1 – $PGA=0.3g$ ($V_{stiff}=580\text{m/s}$, $V_{soft}=180\text{m/s}$).

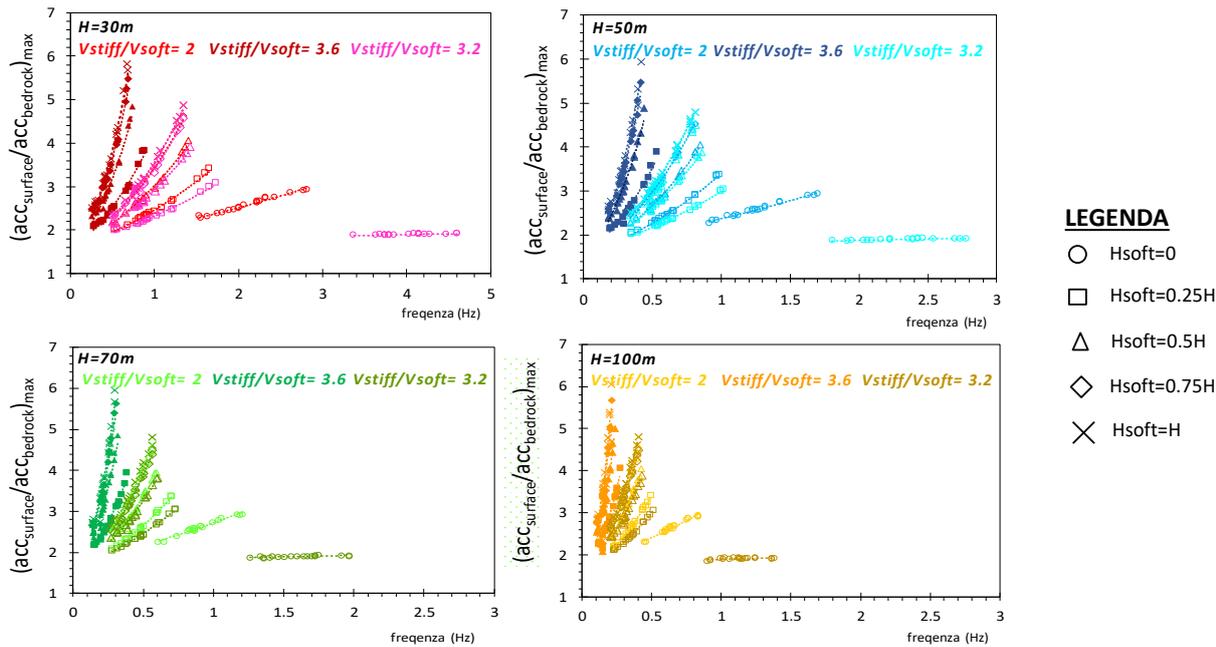


Figura 3.10 Schema 1: valore massimo delle funzioni di amplificazione per i 20 terremoti ($V_{stiff}=580m/s$, $V_{soft}=180m/s$).

- Effetto dell'incremento della velocità dello strato rigido V_{stiff} ($V_{stiff}=580m/s$, $V_{soft}=100m/s$, $I=5.8$)

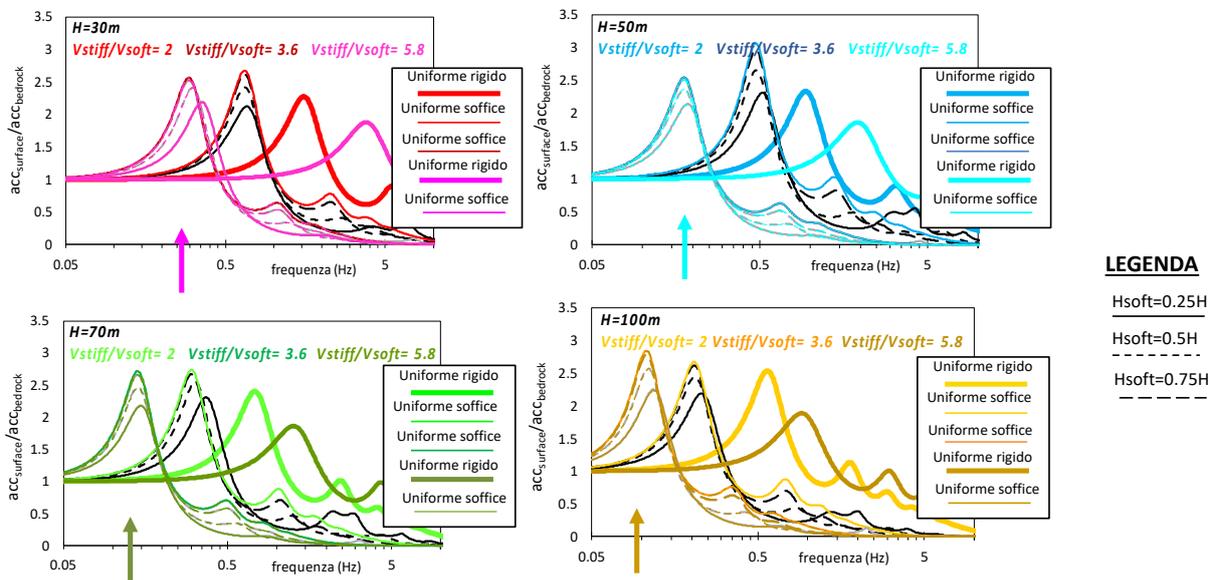


Figura 3.11 Schema 1: funzioni di amplificazione per il terremoto 1 – $PGA=0.3g$ ($V_{stiff}=580m/s$, $V_{soft}=100m/s$).

Schema 2

Con riferimento allo schema 2 (Figura 3.1), la presenza di uno strato rigido al di sotto dello strato soffice non comporta significative variazioni in termini di frequenza di picco ed amplificazione. In Figura 3.12 e Figura 3.13 si riportano, per esempio, i risultati relativi a $V_{stiff1}=360\text{m/s}$, $V_{soft2}=180\text{m/s}$, $V_{stiff3}=360\text{m/s}$.

Dominio delle frequenze

- Effetto della presenza del terzo strato rigido ($V_{s, stiff1}=360\text{m/s}$, $V_{s, soft2}=180\text{m/s}$, $V_{s, stiff3}=360\text{m/s}$)

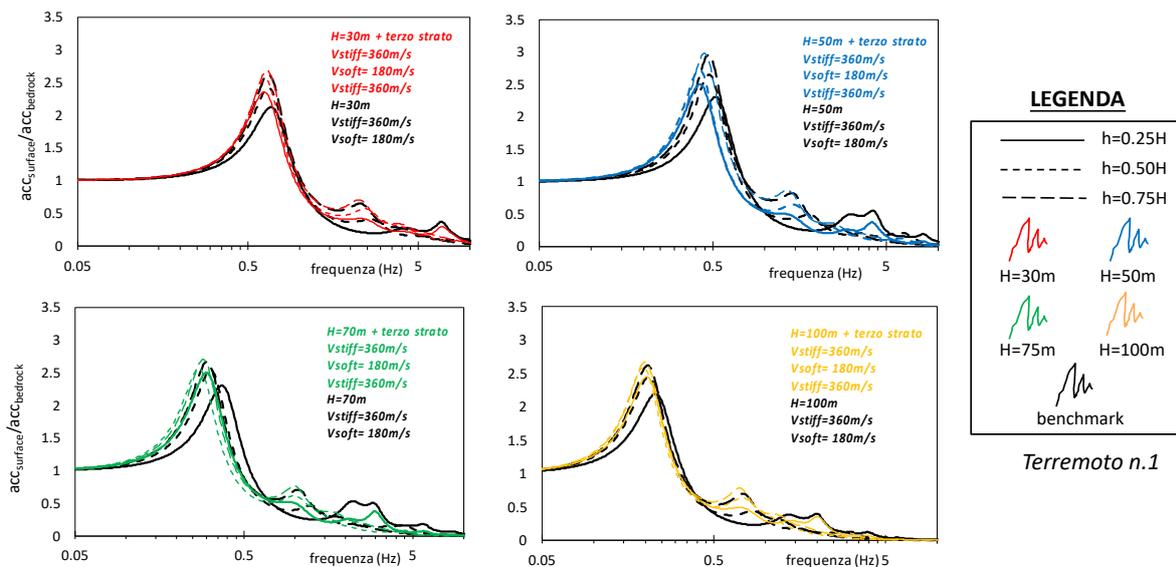


Figura 3.12 Schema 2: funzioni di amplificazione per il terremoto 1 – $PGA=0.3g$ ($V_{s, stiff1}=360\text{m/s}$, $V_{s, soft2}=180\text{m/s}$, $V_{s, stiff3}=360\text{m/s}$).

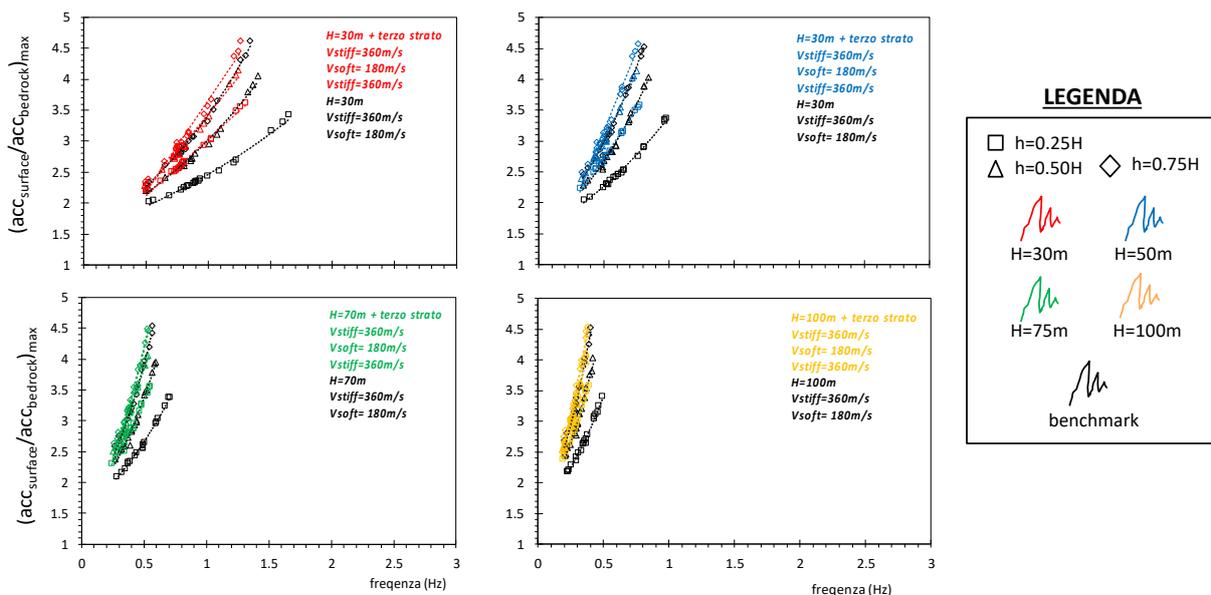


Figura 3.13 Schema 2: valore massimo delle funzioni di amplificazione per i 20 terremoti ($V_{s, stiff1}=360\text{m/s}$, $V_{s, soft2}=180\text{m/s}$, $V_{s, stiff3}=360\text{m/s}$).

Schema 3

Con riferimento allo schema 3 (Figura 3.1), la presenza di uno strato soffice tra due strati rigidi produce un effetto di deamplificazione funzione dello spessore e velocità dello strato soffice. In Figura 3.14 ad esempio si riportano i fattori di amplificazione per ciascuno dei 20 terremoti considerati, relativi alla sequenza di velocità $V_{s,soft1}=180\text{m/s}$, $V_{s,stiff2}=360\text{m/s}$, $V_{s,soft3}=180\text{m/s}$.

Dominio del tempo

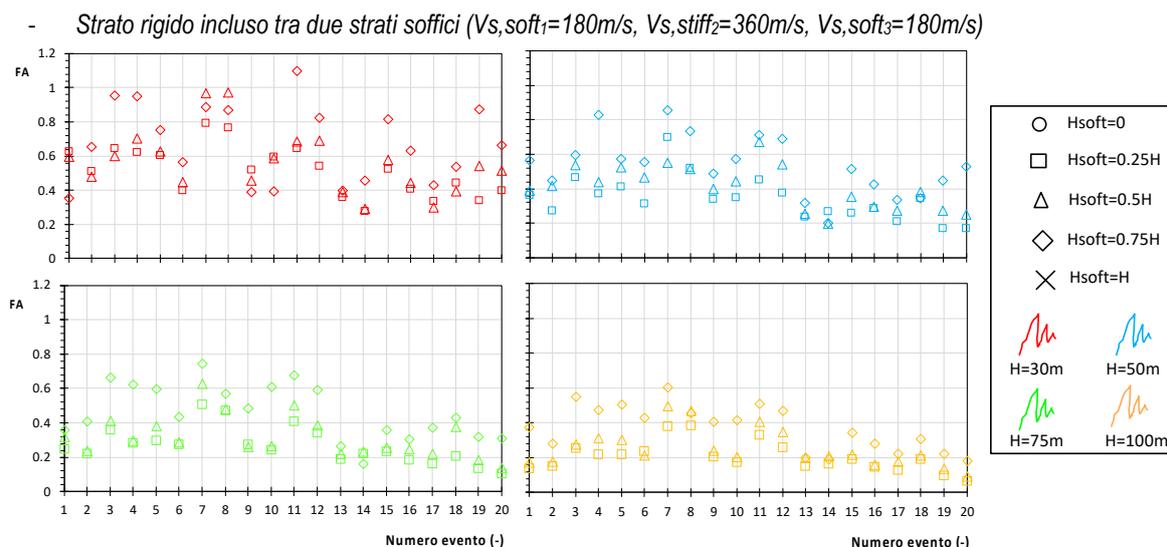


Figura 3.14 Schema 3: fattori di amplificazione nel dominio del tempo per i 20 terremoti ($V_{s,soft1}=180\text{m/s}$, $V_{s,stiff2}=360\text{m/s}$, $V_{s,soft3}=180\text{m/s}$).

Mettendo a confronto lo schema 3 (curve rosse in Figura 3.15 e in Figura 3.16) con lo schema 2 (curve nere in Figura 3.15 e in Figura 3.16) a parità di velocità dello strato soffice e rigido, si può osservare come la condizione geometrica dello schema 2 con $h_{soft}=0.75H$, cioè quella equivalente alla condizione più soffice, tende alla condizione geometrica dello schema 3 con $h_{stiff}=0.25H$, sia in termini di ampiezza che frequenza. In generale, lo schema 3 esibisce una risposta in frequenza più bassa rispetto allo schema 2, ed inoltre un incremento della velocità dello strato rigido non influenza particolarmente la risposta dinamica della colonna (Figura 3.17).

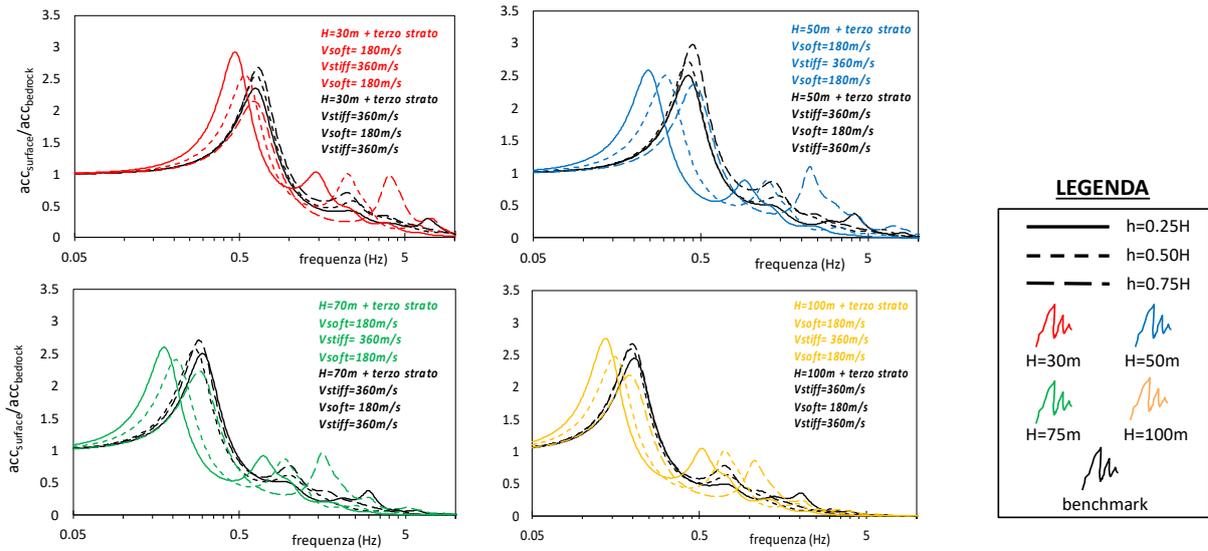


Figura 3.15 Schema 3: funzioni di amplificazione per il terremoto 1 – $PGA=0.3g$ ($V_{s,soft1}=180m/s$, $V_{s,stiff2}=360m/s$, $V_{s,soft3}=180m/s$).

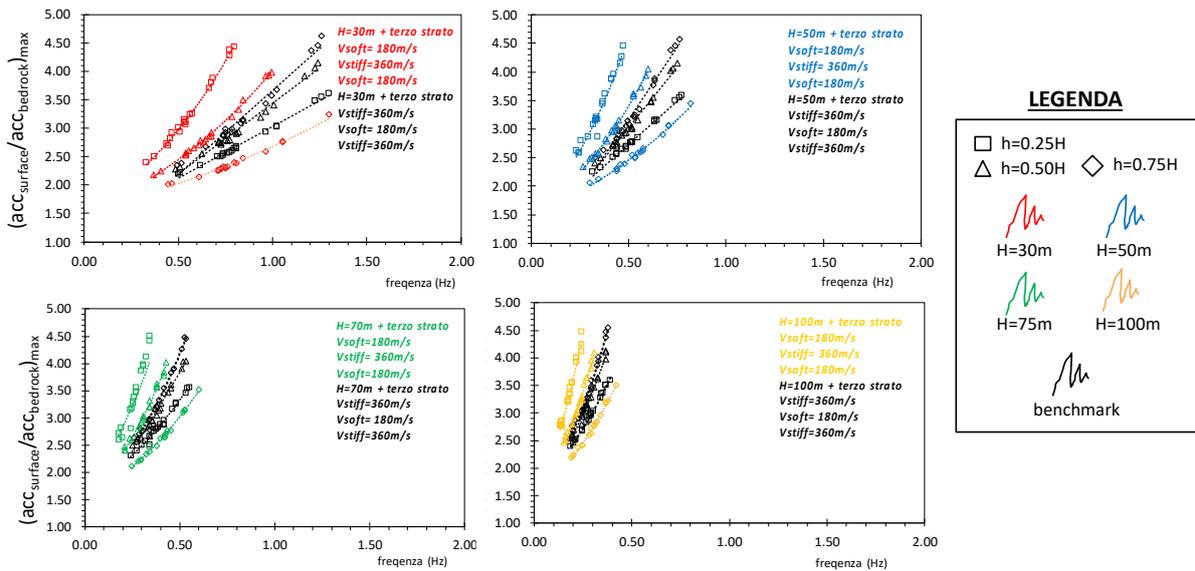


Figura 3.16 Schema 3: valore massimo delle funzioni di amplificazione per i 20 terremoti ($V_{s,soft1}=180m/s$, $V_{s,stiff2}=360m/s$, $V_{s,soft3}=180m/s$).

- Strato rigido incluso tra due strati soffici ($V_{s,soft1}=180\text{m/s}$, $V_{s,stiff}=800\text{m/s}$, $V_{s,soft3}=180\text{m/s}$)

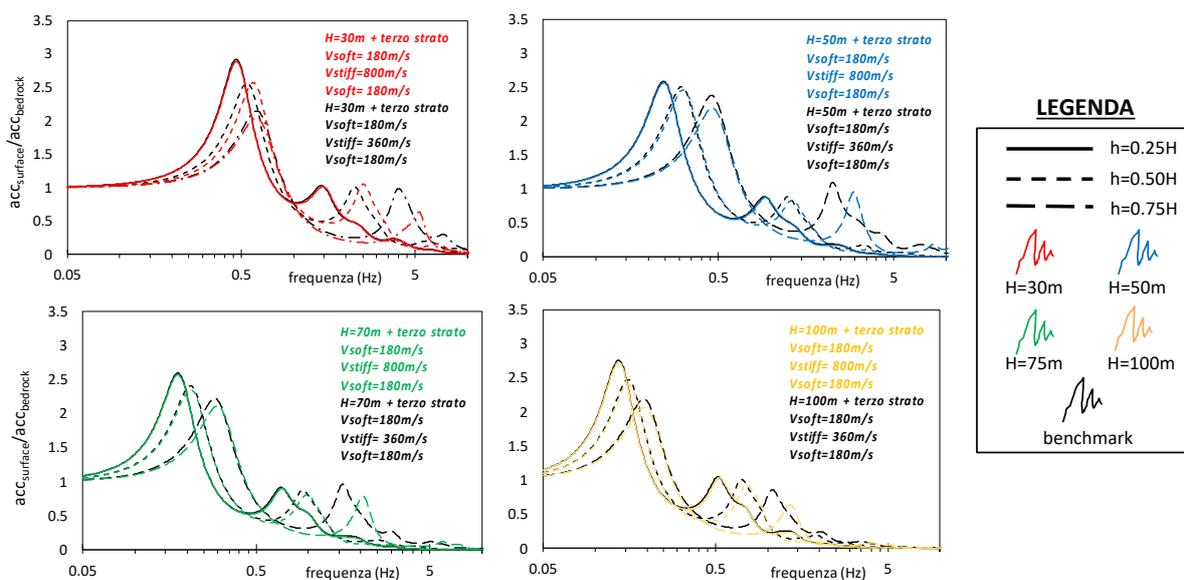


Figura 3.17 Schema 3: funzioni di amplificazione per il terremoto 1 – $PGA=0.3g$ ($V_{s,soft1}=180\text{m/s}$, $V_{s,stiff}=800\text{m/s}$, $V_{s,soft3}=180\text{m/s}$).

Confronto tra schema 1, schema 2 e schema 3 e conclusioni preliminari

Confrontando la risposta dinamica degli schemi 1, 2 e 3 nel dominio dei periodi, a parità di velocità degli strati soffici e rigido, si può osservare in Figura 3.18, che, come esempio, si riferisce solamente al caso del terremoto 1, come per tutti e tre i casi considerati l'effetto dell'inversione di velocità produce in generale un effetto di deamplificazione per bassi e medi periodi ed un effetto di amplificazione per alti periodi.

I risultati preliminari di questo studio parametrico hanno messo in evidenza i **fattori** che maggiormente controllano gli effetti locali di amplificazione/deamplificazione in presenza di un'inversione di velocità che sono:

- rapporto di spessore tra lo strato rigido e soffice;
- velocità delle onde di taglio dello strato soffice;
- livello deformativo massimo raggiunto dallo strato soffice (-> che è funzione della PGA di input e della non linearità del materiale soffice).

Gli **effetti** della variazione di tali fattori che controllano il fenomeno in presenza di inversione di velocità sono direttamente correlati a:

- Variazione della frequenza principale del banco;
- Amplificazione o deamplificazione massima attesa in funzione del periodo.

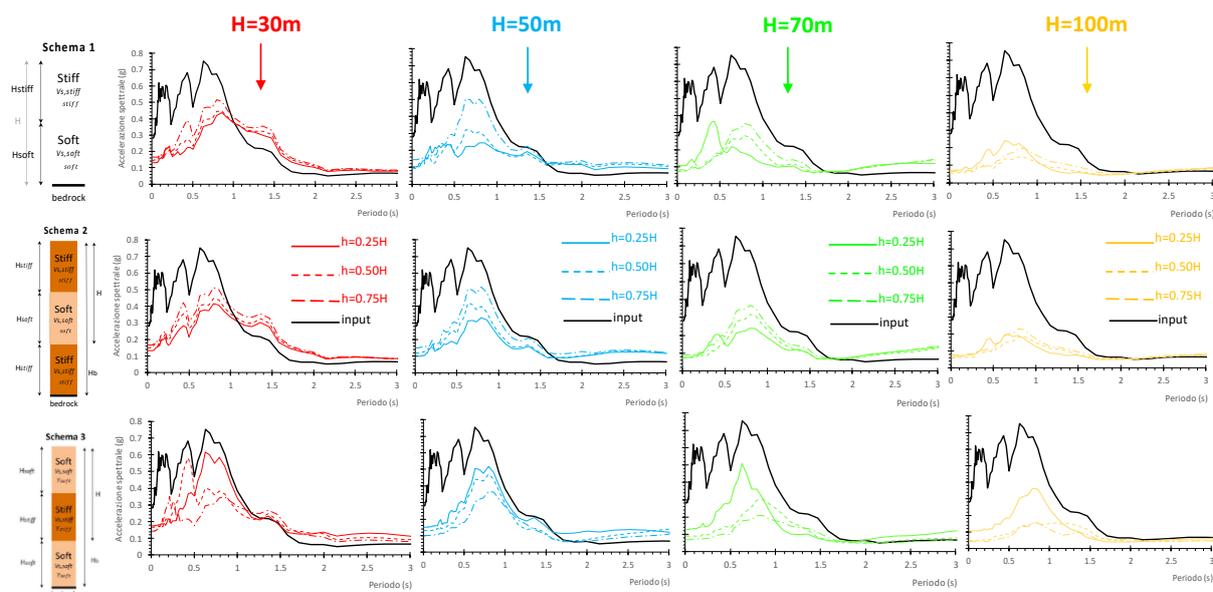


Figura 3.18 Confronto tra schema 1, 2 e 3: spettri di risposta per il terremoto 1 – $PGA=0.3g$ ($V_{s,soft}=180m/s$, $V_{s,stiff}=360m/s$)

2 Inversioni di velocità nell'ambito degli studi di MS

Nell'ingegneria geotecnica sismica, il profilo di velocità delle onde di taglio, V_s , è uno dei parametri chiave che governa la propagazione delle onde nel sottosuolo, controlla le frequenze di risonanza ed i fenomeni di modifica del moto in superficie e in profondità. In generale, la risposta sismica di profili di sottosuolo che presentano un incremento della rigidezza con la profondità, ovvero un profilo di velocità delle onde di taglio crescente con la profondità, può essere valutata mediante le prescrizioni di norma, in accordo con l'NTC18 e l'EC08 in materia di progettazione, o mediante approcci semplificati proposti nel Livello 2 di MS (e.g. abachi per valutare i fattori di amplificazione per diversi intervalli di periodo) in accordo con gli ICMS08 in materia di microzonazione sismica.

In assenza di siti con incremento della rigidezza con la profondità, ovvero in presenza di profili di sottosuolo con inversioni di velocità singole o multiple, le prescrizioni di norma e gli approcci semplificati proposti per la microzonazione sismica non sono a rigore applicabili, essendo in presenza di situazioni geologiche complesse per cui occorre la necessità di eseguire specifiche analisi di risposta sismica locale, mono- o bi- dimensionali in funzione del modello di sottosuolo.

Con riferimento ai diversi livelli di microzonazione sismica, in Figura 3.19 viene mostrata la procedura da adottare nei livelli 1 e 3 di MS in presenza di aree con inversioni singole o multiple di velocità, distinguendo il caso in cui sono presenti o meno indagini pregresse nell'area in esame.

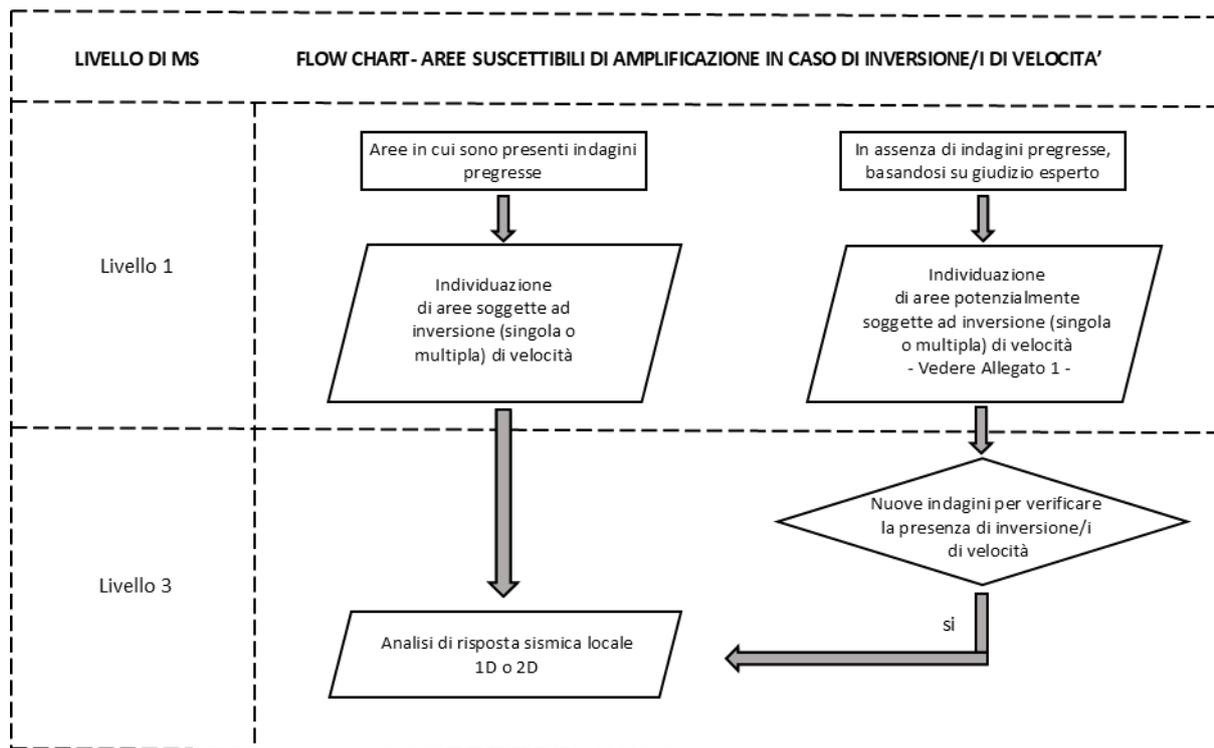


Figura 3.19 Flow chart per riconoscere le aree suscettibili di amplificazione in presenza di inversioni singole o multiple di velocità nel livello 1 di MS e quantificare l'amplificazione sismica per il livello 3.

Nel livello 1 dovranno essere individuate le aree con inversioni di velocità (singole o multiple) sulla base delle informazioni provenienti da indagini pregresse. In caso di assenza di indagini pregresse, si procede all'individuazione di dette aree sulla base del giudizio esperto. Le aree con inversioni di velocità saranno oggetto di analisi di risposta sismica locale nel livello 3 di MS. Le aree in cui si possono avere potenziali inversioni di velocità dovranno essere verificate attraverso nuove indagini nel livello 3 di MS; le aree per cui viene verificata tale condizione saranno oggetto di analisi di risposta sismica locale nel livello 3 di MS.

2.1 Livello 1 di MS

Nel livello 1 degli studi di MS, andranno individuate le aree che sono interessate o che potrebbero essere interessate da inversioni di velocità. Nel caso in cui nell'area in esame sono presenti indagini specifiche pregresse per cui è possibile ricostruire il profilo di sottosuolo, si definisce *Inversione Singola di Velocità* del profilo delle Vs in profondità, una situazione litostratigrafica assimilabile allo schema di Figura 3.20 (i.e. strato rigido superficiale poggiate su strato soffice) in cui si verificano, contemporaneamente, le seguenti due condizioni sugli spessori e le velocità degli strati interessati:

1) CONDIZIONE SUGLI SPESSORI DEGLI STRATI:

Se $H_{\text{rigido}} > H_{\text{soffice}} \rightarrow H_{\text{soffice}} \geq 5\text{m}$ e $H_{\text{soffice}} \geq 0.15H$

Se $H_{\text{soffice}} > H_{\text{rigido}} \rightarrow H_{\text{rigido}} \geq 5\text{m}$ e $H_{\text{rigido}} \geq 0.15H$

2) CONDIZIONE SULLE VELOCITA' DEGLI STRATI:

$V_{s,\text{rigido}} \geq 300\text{ m/s}$

$V_{s,\text{soffice}} \leq 460\text{ m/s}$

$(V_{s,\text{rigido}} - V_{s,\text{soffice}}) \geq 150\text{ m/s}$

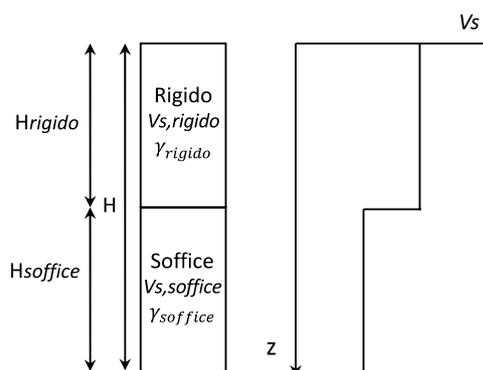


Figura 3.20 Definizione di inversione singola di velocità ai fini di MS: caso di strato rigido su strato soffice poggiante su substrato rigido.

Oltre alla condizione stratigrafica di Figura 3.20 (che si può incontrare ad esempio in contesti geologico-deposizionali quali i terrazzi marini e fluviali, le rupi e gli espandimenti lavici, i plateau di travertini su materiali soffici ed altri), sono da considerarsi condizioni geologiche particolari anche i profili di velocità con inversioni multiple con forti contrasti di impedenza, tipici ad esempio degli ambienti geomorfologici e deposizionali vulcanici. In questo caso, le inversioni di velocità multiple non devono rispettare la condizione sugli spessori degli strati prevista in caso di singola inversione di velocità ma vanno individuate sulla base di giudizio esperto.

Laddove non sono disponibili indagini specifiche pregresse, vanno individuate le aree in cui è possibile che si verifichino inversioni di velocità singole o multiple, sulla base di considerazioni sugli ambienti geomorfologici e deposizionali. Si rimandano al paragrafo successivo i possibili criteri per l'individuazione delle aree che potrebbero essere interessate da inversioni di velocità sulla base di sole considerazioni geologiche.

Ad esempio, viene mostrato il caso dello studio di microzonazione sismica della Città di Rieti realizzato nel 2013 (Data Base della Microzonazione Sismica, *DB-MS*, disponibile per la consultazione su www.webms.it, realizzato da CNR-IGAG per il Dipartimento della Protezione Civile nazionale). La Figura 3.21 riporta uno stralcio della carta delle *MOPS* che mostra l'area orientale della conca reatina in corrispondenza della quale è stata individuata la *MOPS SA08*, caratterizzata da uno strato di travertini con uno spessore variabile intorno ai 100 m poggiante sui depositi limoso-sabbiosi fluvio-lacustri con spessori superiori a 100 m. La presenza di indagini geognostiche e geofisiche pregresse caratterizzanti tale *MOPS* consentono di confermare l'esistenza di un'inversione singola di velocità e verificare le condizioni 1 e 2 proposte in Figura 3.20.

In questo caso, la *MOPS* in oggetto, nel livello 1 di MS, può essere indicata come "area interessata da inversioni di velocità" e sarà oggetto di studio di risposta sismica locale nel successivo livello 3 di MS.

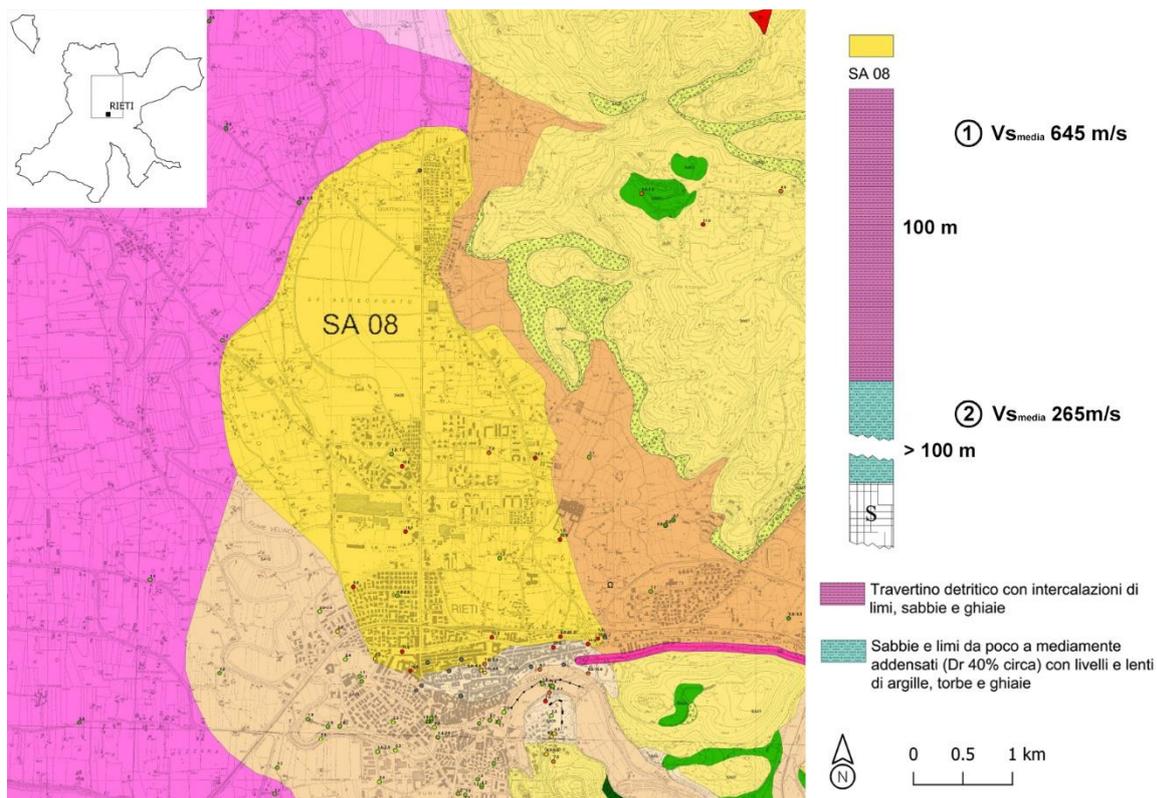


Figura 3.21 Studio di microzonazione sismica della Città di Rieti: stralcio della carta delle MOPS relativa all'area est della conca Reatina (da DB-MS, www.webms.it).

2.2 Livello 3 DI MS

Le aree, individuate nel livello 1 di MS con l'ausilio di indagini pregresse e interessate da inversioni di velocità sono oggetto di studio di risposta sismica locale nel livello 3 di MS;

Le aree, individuate nel livello 1 di MS su base geologico/deposizionale e potenzialmente interessate da inversioni di velocità dovranno essere verificate nel livello 3 di MS con nuove indagini. Le aree verificate per cui si riscontrano inversioni di velocità sono oggetto di studi di risposta sismica locale nel livello 3 di MS.

Le inversioni di velocità, in funzione degli specifici rapporti di spessore, rapporti di velocità, azione sismica e non linearità nel comportamento dinamico dello strato soffice, possono dar luogo anche ad effetti di deamplificazione che interessano tipicamente i bassi periodi.

3 Individuazione di contesti geologici con potenziali inversioni di velocità

Laddove non sono disponibili indagini specifiche pregresse, nel livello 1 di MS vanno individuate le aree potenzialmente caratterizzate da inversioni di velocità singole o multiple, sulla base di considerazioni sul contesto geologico-geomorfologico e deposizionale. Vengono qui individuati alcuni tra i principali contesti geologici e deposizionali nel territorio italiano che generalmente esibiscono importanti inversioni dei profili di V_s :

1) TERRAZZI FLUVIALI E MARINI

- STRATO RIGIDO: → TERRAZZE FLUVIALI: depositi alluvionali terrazzati costituiti principalmente da ghiaie sabbiose e limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo. Vengono esclusi i depositi più fini (sabbie e limi) in quanto, essendo caratterizzati da V_s più basse, difficilmente possono dar luogo a fenomeni di inversioni di velocità. TERRAZZI MARINI (Figura 3.22): depositi marini terrazzati costituiti da breccie, conglomerati e calcareniti poco cementate. Vengono esclusi i casi di depositi più fini (sabbie e limi) in quanto essendo caratterizzati da V_s più basse difficilmente possono dar luogo a fenomeni di inversioni di velocità.
- STRATO SOFFICE: depositi di argilla e marne argillose plio-pleistoceniche.

È il caso, ad esempio, dell'area di Floridia in Sicilia come riportato in Figura 3.22 (modificato da Panzera et al., 2019).

2) RUPI ED ESPANDIMENTI LAVICI

- STRATO RIGIDO: tufi e rocce laviche;
- STRATO SOFFICE: depositi di argilla e marne argillose plio-pleistoceniche.

È il caso, ad esempio, della rupe di Orvieto mostrata in Figura 3.23, Gerace e Bisaccia (Lanzo et al., 2004) e Catania (Catalano et al., 2017).

Per la diversa natura geologica, geomorfologica e di dinamica deposizionale, i contesti geologici così individuati presentano differenti proprietà geometriche e geotecniche. È stata condotta pertanto un'analisi dettagliata di numerosi dati disponibili da studi di microzonazione sismica in tali configurazioni (estrapolati dalla banca dati degli studi di MS, *DB-MS*, disponibile per la consultazione su www.webms.it e messo a punto dal CNR IGAG per il Dipartimento di Protezione Civile Nazionale, DPC 2018) al fine di identificare, sia per lo strato rigido che per quello soffice, 1) la variazione, in termini di valore minimo e massimo, sia della velocità delle onde di taglio, V_s , che degli spessori degli strati soffice e rigido, H_{stiff} e H_{soft} e 2) il peso dell'unità di volume di ciascuno strato, γ strato. In particolare, gli studi di MS dei comuni del centro Italia, della Sicilia e della Calabria sono stati utilizzati per il caso dei terrazzi fluviali e marini; il contesto di Orvieto e lo studio di MS di Catania sono stati considerati per il caso delle rupi ed espandimenti lavici. La Tabella 3.5 sintetizza gli intervalli di valori così identificati per le proprietà geometriche e geotecniche di ciascun contesto geologico considerato. Si rimarca che i criteri di definizione dell'inversione di velocità ai fini di MS proposti in §9, si basano sui risultati di tale parametrizzazione.

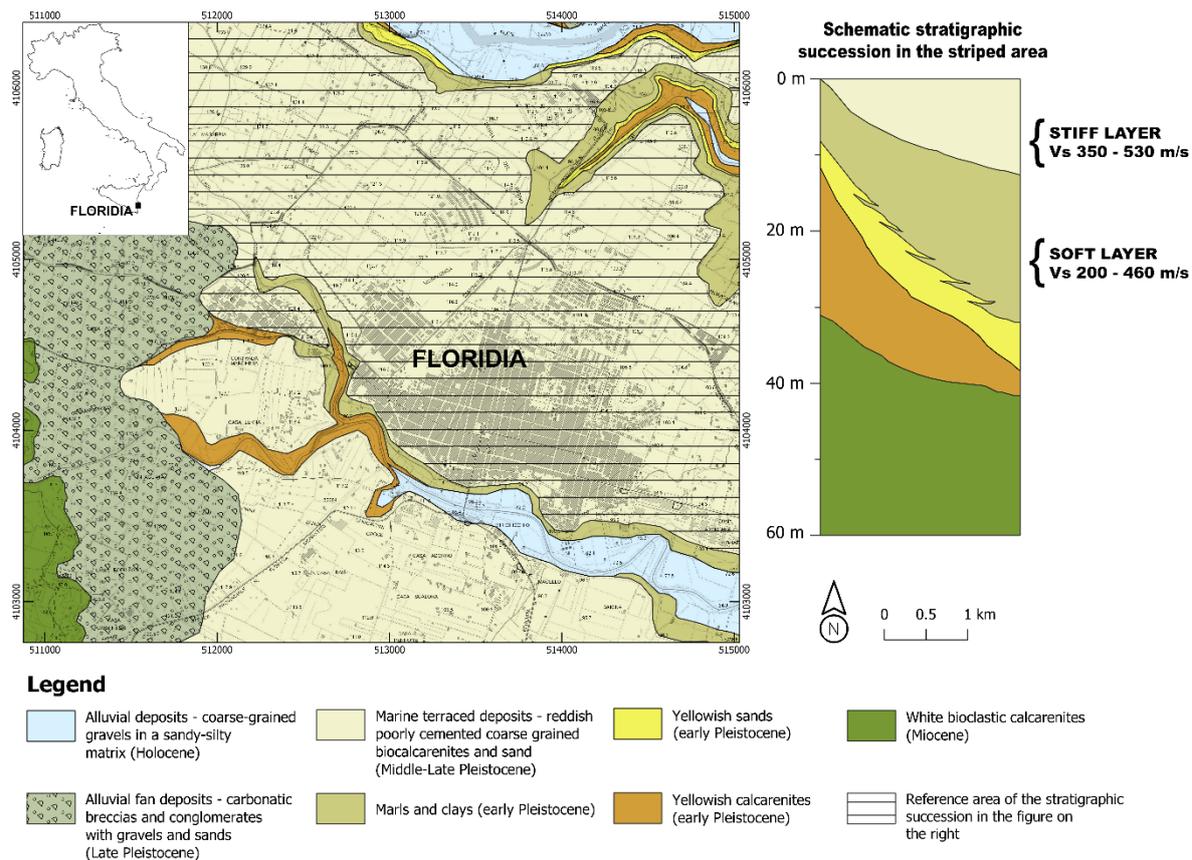


Figura 3.22 Esempio di successione stratigrafica con inversioni di velocità relativa ai terrazzi marini. Nell'esempio l'area di Florida in Sicilia (da Fabozzi et al. 2020).

Tabella 3.5 Caratterizzazione geometrica e meccanica degli strati rigidi e soffici, nel caso di inversioni di velocità, per 1) terrazzi fluviali e marini, 2) rupi ed espandimenti lavici nel territorio italiano.

	PROPRIETA' DEGLI STRATI	STRATO RIGIDO (stiff)	STRATO SOFFICE (soft)
TERRAZZI MARINI E FLUVIALI	H _{min} -H _{max} (m)	5-20	10-30
	V _{s,min} -V _{s,max} (m/s)	320-530	200-460
	γ _{strato} (kN/m ³)	21	19
	Curve G/G ₀ -γ e D-γ	Rollins et al., 1998 upper-medium-lower bound	Vucetic & Dobry, 1991 PI 0-15-30
RUPI ED ESPANDIMENTI LAVICI	H _{min} -H _{max} (m)	15-50	10-30
	V _{s,min} -V _{s,max} (m/s)	600-1000	200-460
	γ _{strato} (kN/m ³)	15	19
	Curve G/G ₀ -γ e D-γ	Pagliaroli et al., 2014 (curve tufi)	Vucetic & Dobry, 1991 PI 0-15-30

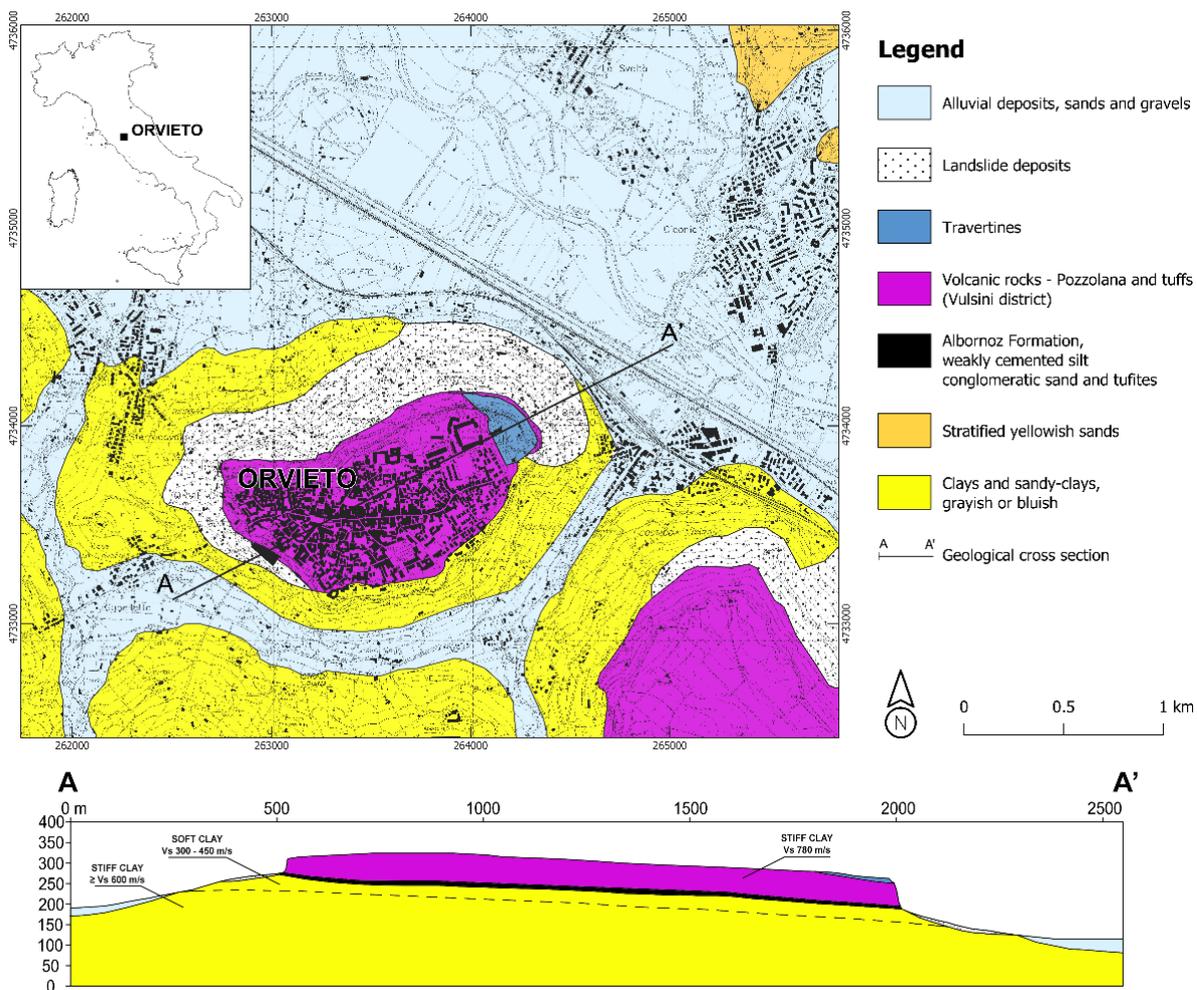


Figura 3.23 Esempio di successione stratigrafica con inversione di velocità relativo alla rupe vulcanica di Orvieto (da Fabozzi et al. 2020).

4 Analisi stocastiche di RSL 1D in presenza di singola inversione di velocità

La parametrizzazione proposta in Tabella 3.5 è stata adottata per eseguire una serie di analisi stocastiche di risposta sismica locale lineare equivalente, eseguite con il codice STRATA (Kottke *et al.*, 2013), per colonne 1D definite combinando il minimo e il massimo valore di H_{stiff} e H_{soft} per un totale di quattro diverse configurazioni geometriche. Per tenere conto della naturale variabilità del profilo V_s negli intervalli identificati in Tabella e delle incertezze relative alla non linearità degli strati di terreno rigido e soffre, sono state eseguite simulazioni Monte Carlo. Per ciascuna configurazione geometrica di colonna stratigrafica 1D sono stati generati cento profili di V_s , usando il modello di campo casuale di Toro (1995), descritto da una distribuzione log-normale, mentre le incertezze dovute alla non linearità del terreno sono state considerate adottando il modello di Darendeli (2001) in cui si assume che la variabilità intorno al valore medio fissato come target sia normalmente distribuita attraverso i valori della media (m) e della deviazione standard (σ). Pertanto, è stato selezionato un set di curve $G/G_0-\gamma$ e $D-\gamma$ di letteratura, come mostrato in Tabella 3.5. In particolare, per lo strato soffre sono state utilizzate le curve di Vucetic & Dobry (1991) con una variazione dell'indice di plasticità, IP, compreso tra 0 e 30 (IP = 15 rappresenta la curva target) nel caso di terrazzi fluviali e di rupi ed espandimenti lavici. Per lo strato rigido, invece, nei casi di terrazzi fluviali e marini (la curva media è la curva target) sono state adottate le curve di Rollins *et al.* (1998), *lower-medium-upper bound*; le curve relative al tufo di Pagliaroli *et al.* (2014) sono state utilizzate per identificare il fuso di variazione di $G/G_0-\gamma$ e $D-\gamma$ per i casi di rupi ed espandimenti lavici.

In Figura 3.24 vengono mostrati, per ciascuna configurazione geometrica 1D, i cento profili di V_s randomizzati per ciascun contesto geologico studiato, mentre in Figura 3.25 viene mostrata la variabilità considerata per tenere in conto l'effetto della non linearità di ciascun materiale.

Una volta definite le proprietà geometriche e meccaniche del set di colonne 1D per ciascun dominio geologico, sono stati selezionati tre gruppi di 20 accelerogrammi reali non scalati, registrati su terreni rigidi affioranti per tre diversi livelli di PGA : Classe 1 ($PGA < 0,1$ g), Classe 2 ($0,1 \text{ g} \leq PGA < 0,2$ g), Classe 3 ($0,2 \text{ g} \leq PGA < 0,4$ g) rispettivamente. In questo modo sono state definite $3 \times 4 = 12$ configurazioni geometriche, per ciascuna di queste sono stati considerati 100 profili di V_s , per un totale di 1200 colonne. Un numero di analisi pari a $1200 \text{ colonne} \times 60 \text{ segnali} = 72000$ è stato eseguito di cui si riportano i principali risultati.

I risultati sono stati elaborati in termini di profili di deformazione di taglio, γ_{max-z} e spettri di risposta, $T-Sa$. La Figura 3.26 e la Figura 3.27 mostrano rispettivamente i profili di γ_{max-z} e gli spettri di risposta in accelerazione $T-Sa$ per la Classe 3 di PGA , associati ai terrazzi fluviali e marini per esempio, come l'involuppo del valore minimo e massimo raggiunto. In Figura 3.28 è possibile apprezzare un effetto di attenuazione dell'azione sismica in superficie a bassi periodi ed una tendenza all'amplificazione a periodi più alti; questo comportamento di deamplificazione tende ad essere maggiormente enfatizzato quando $H_{soft} > H_{stiff}$ e con l'aumento di H_{soft} .

Questo comportamento mette in luce, in generale, l'effetto che il contrasto di rigidità dovuto all'inversione del profilo V_s ha sul comportamento sismico della colonna in condizioni 1D.

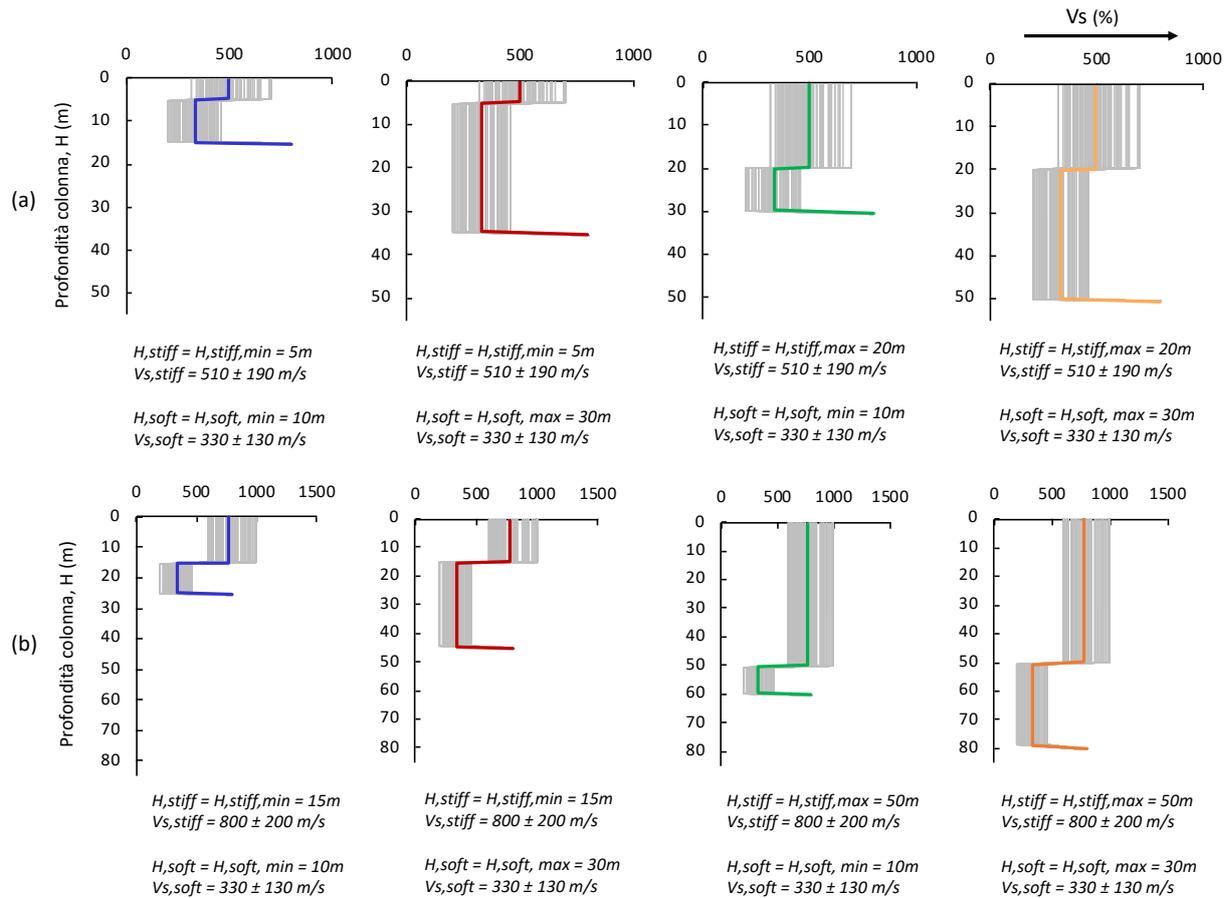


Figura 3.24 Input per analisi di risposta sismica 1D Monte Carlo: profili Vs randomizzati per depositi di terrazzi marini e fluviali (da Fabozzi et al. 2020).

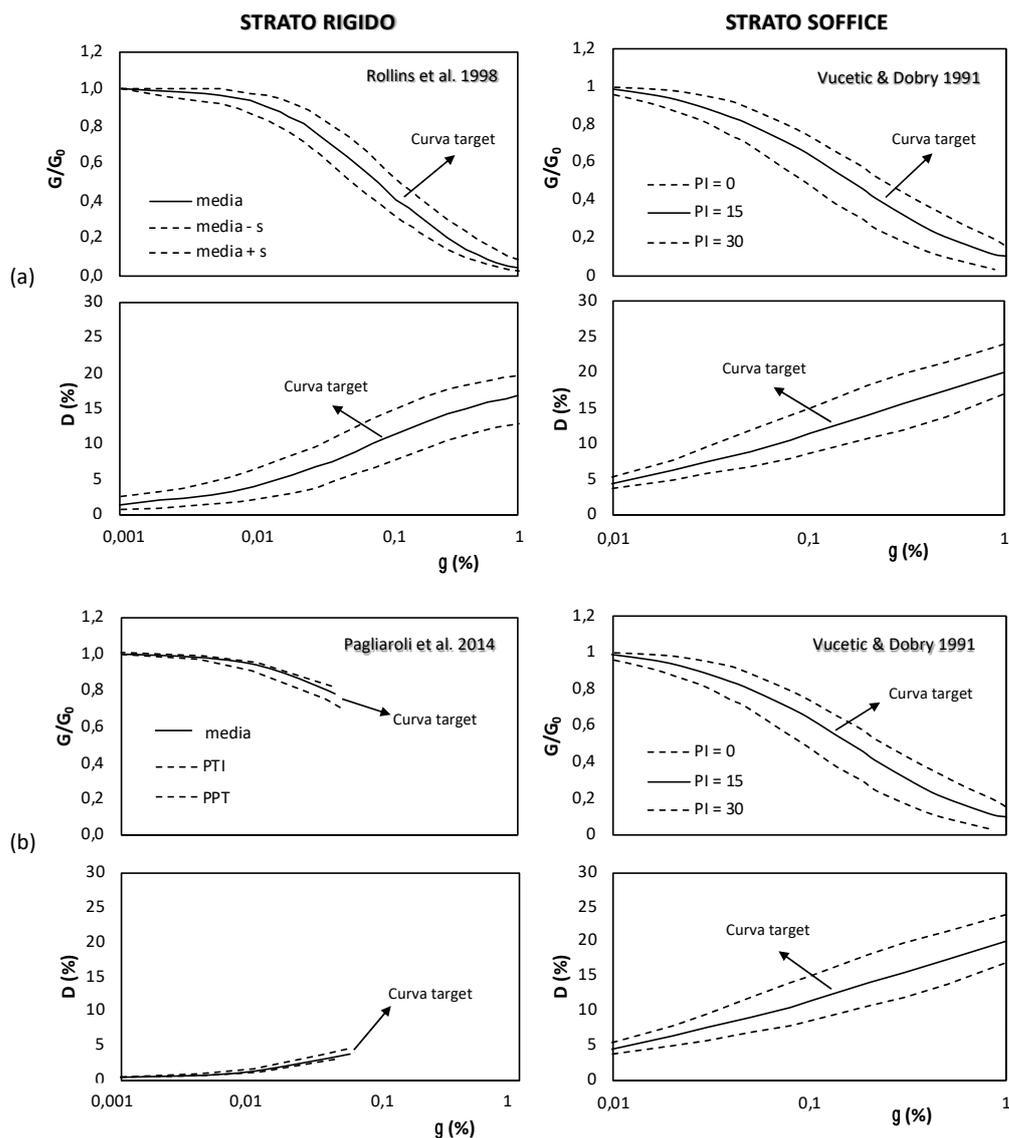


Figura 3.25 Input per analisi di risposta sismica 1D Monte Carlo: variabilità delle curve G/G_0 - γ e D - γ per depositi di terrazzi marini e fluviali (da Fabozzi et al. 2020).

In generale, si può osservare come lo strato più rigido esercita un'azione di contrasto sullo strato più soffice che esibisce, al tempo stesso, un livello di deformazione più elevato (vedere la Figura 3.26) rispetto al caso di profilo di V_s crescente con la profondità; lo strato soffice rappresenta quindi il reale fattore di controllo del comportamento della colonna 1D in queste complesse condizioni geologiche attraverso la variazione di $V_{s,soft}$ e H_{soft} .

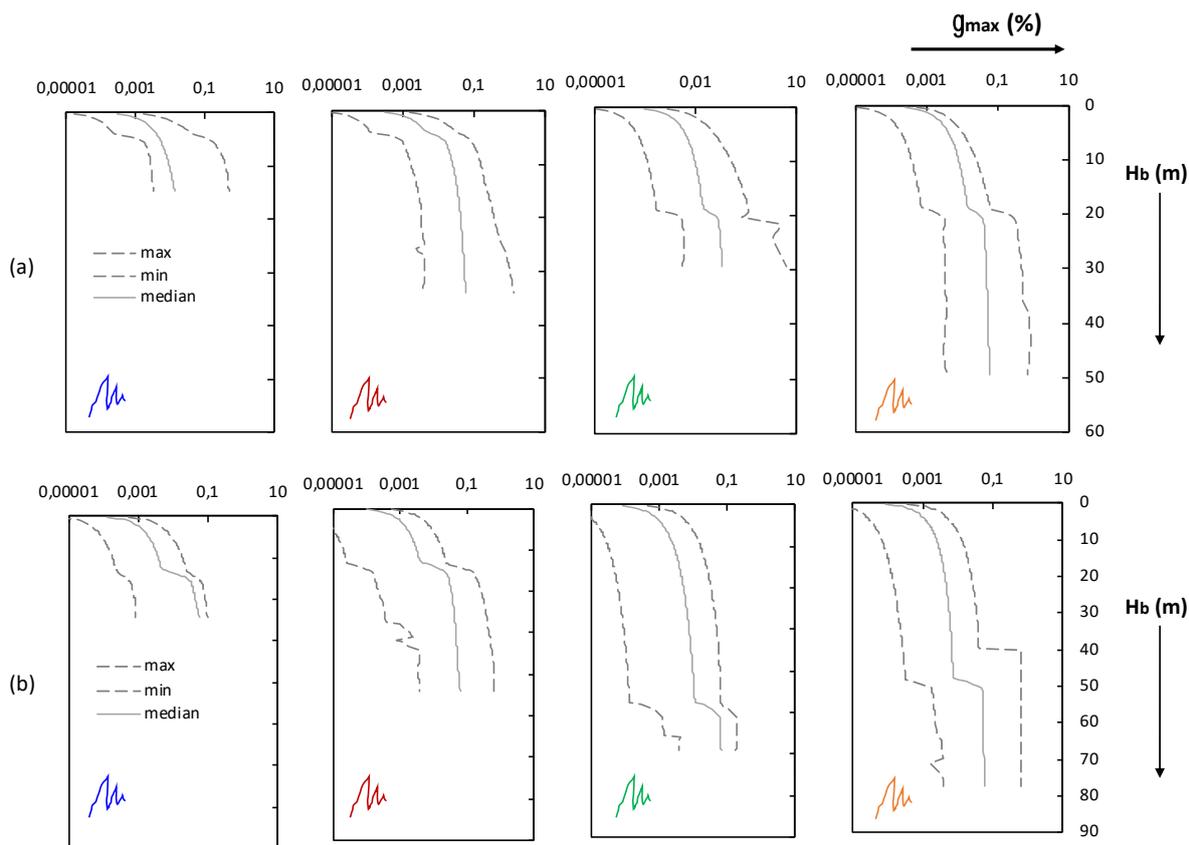


Figura 3.26 Output analisi di RSL 1D Monte Carlo: profili γ_{max-z} per depositi di terrazzi marini e fluviali per la Classe 3 di PGA (da Fabozzi et al. 2020).

Infine, un confronto tra i contesti geologici sopra definiti e le tre diverse classi *PGA* è proposto in Figura 3.28 in termini di accelerazione spettrale, S_a , e rapporto spettrale, $S_{a,output,superficie} / S_{a,input,outcrop}$.

In generale, si può osservare che nel caso di orizzonti rigidi vulcanici (curva verde) l'effetto dell'inversione del profilo V_s è più evidente rispetto al caso di orizzonti rigidi clastici (curva blu chiaro). In media, l'accelerazione spettrale degli orizzonti rigidi vulcanici è sempre inferiore agli orizzonti rigidi clastici. Rispetto al segnale di input all'outcrop, si possono osservare rilevanti effetti di deamplificazione negli orizzonti rigidi vulcanici; la quantità di questa deamplificazione aumenta con il livello *PGA* di input a causa della non linearità dello strato soffice che raggiunge un rapporto spettrale di circa 0,6 per la Classe *PGA* 3. L'intensità dell'input controlla il livello di deformazione raggiunto nello strato di terreno soffice e quindi rappresenta un importante fattore di controllo del fenomeno amplificativo in presenza di inversioni. Sono presenti effetti di deamplificazione anche negli orizzonti rigidi clastici ma principalmente per *PGA* Class 2 e 3 e per periodi inferiori a 0,2 s. In corrispondenza di periodi più elevati, si verificano effetti di amplificazione per qualsiasi valore di input *PGA* che raggiunge un rapporto spettrale superiore a 1.5 a periodi più elevati.

I risultati ottenuti possono essere considerati rappresentativi di condizioni monodimensionali; quindi, qualsiasi effetto morfologico può modificare il comportamento previsto per cui sono consigliate analisi 2D.

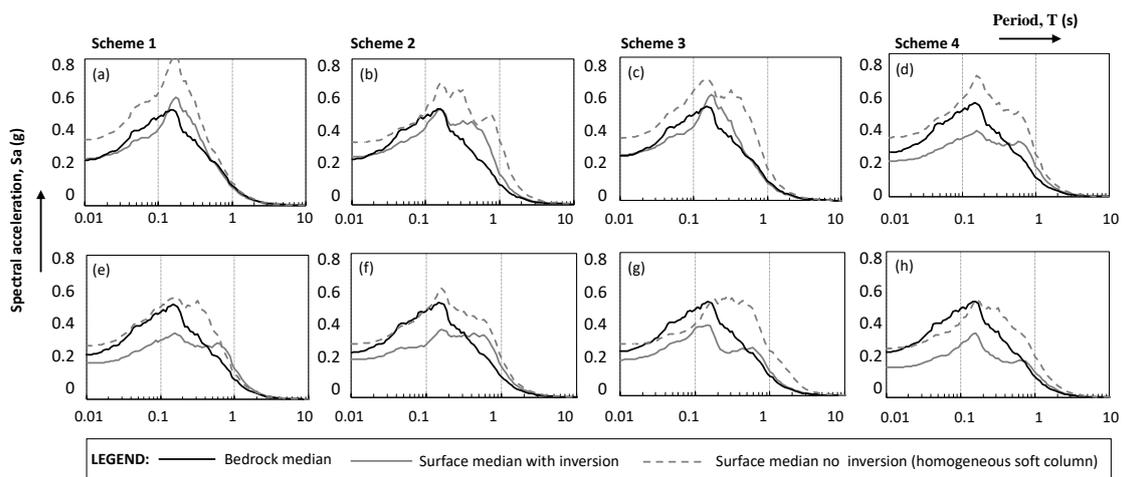
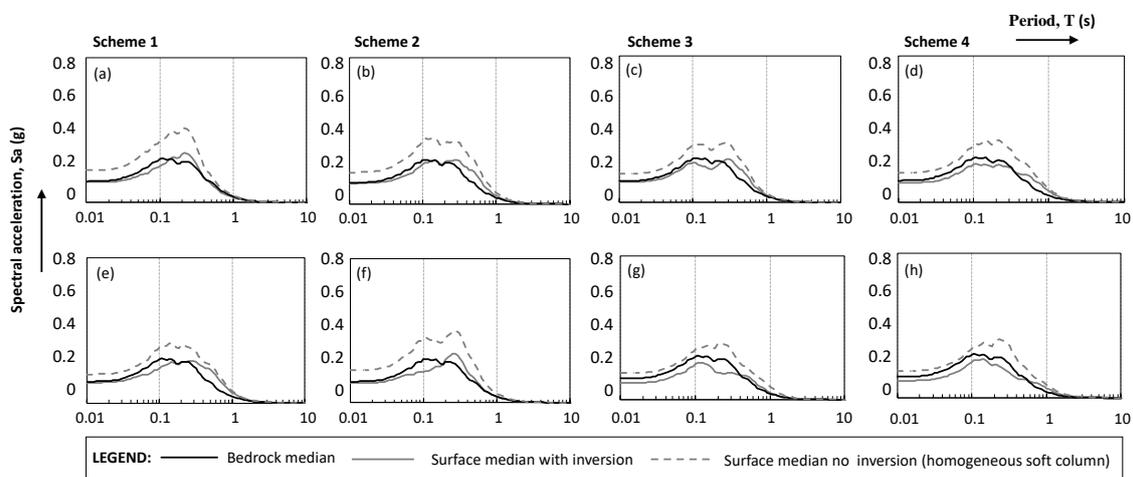
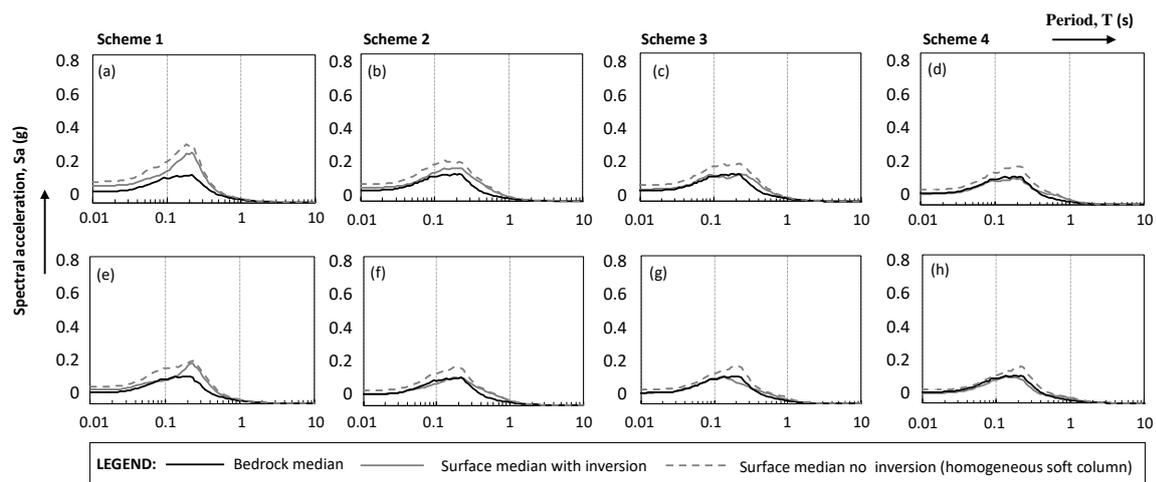


Figura 3.27 Output analisi di RSL 1D Monte Carlo: spettri di risposta per depositi di terrazzi marini e fluviali (a,b,c,d) e rupi ed espandimenti lavici (e,f,g,h). (da Fabozzi et al. 2020).

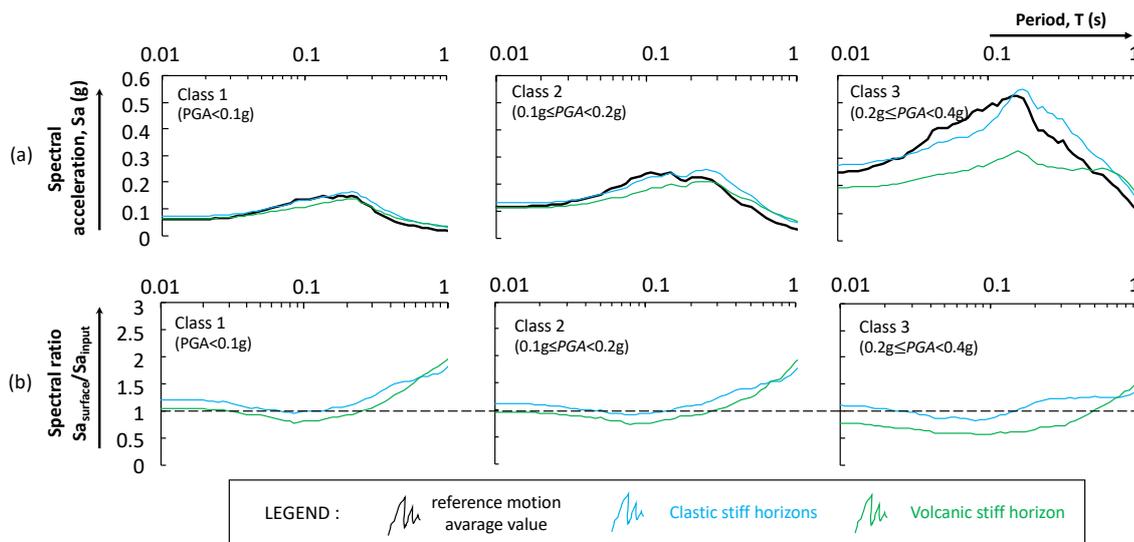


Figura 3.28 Output analisi di RSL 1D Monte Carlo: confronto tra terrazzi marini e fluviali e rupi ed espandimenti lavici per le 3 Classi di PGA in termini di (a) spettri di risposta in accelerazione e (b) rapporti spettrali. (da Fabozzi et al. 2020).

In prospettiva di MS, l'amplificazione viene quantificata attraverso i fattori di amplificazione, AF, definiti come il rapporto tra l'accelerazione in superficie e quello di input all'outcrop. Il moto viene solitamente espresso in termini di parametri di picco o, più frequentemente, in termini di parametri integrali (Pagliaroli, 2018), come l'integrale delle accelerazioni spettrali o pseudo-velocità in un intervallo di periodo prescritto. Le equazioni (7) descrivono gli AF adottati negli studi di MS di livello 3 condotti nell'Italia centrale dopo la sequenza sismica 2016-2017 (Pergalani et al., 2019) in cui gli indici "i" e "o" si riferiscono agli spettri di riferimento (input) e allo spettro amplificato in superficie (output) rispettivamente.

$$AF_{0.1-0.5} = \frac{\int_{0.1}^{0.5} Sa_o dT}{\int_{0.1}^{0.5} Sa_i dT} ; AF_{0.4-0.8} = \frac{\int_{0.4}^{0.8} Sa_o dT}{\int_{0.4}^{0.8} Sa_i dT} ; AF_{0.7-1.1} = \frac{\int_{0.7}^{1.1} Sa_o dT}{\int_{0.7}^{1.1} Sa_i dT} \quad (7)$$

I 3 AF sopra riportati, sono stati calcolati per i casi di inversioni del profilo Vs studiati nel presente lavoro e rappresentati in Figura 3.29. Gli AF sono rappresentati da istogrammi calcolati come valori medi delle diverse configurazioni geometriche adottate per i due domini geologici, raggruppati per intervalli di periodi e classi PGA. È evidente l'effetto della deamplificazione ($AF < 1$) nei primi due intervalli del periodo, specialmente per gli orizzonti rigidi vulcanici, che aumenta con l'aumentare della classe PGA, mentre un l'effetto di amplificazione ($AF > 1$) è più evidente nell'intervallo di periodi più alti.

In generale, queste complesse situazioni geologiche sembrano non generare allarmanti effetti di amplificazione, almeno per i casi studiati. Questo risultato potrebbe incoraggiare in futuro l'uso di abachi, definiti ad hoc per ciascun dominio geologico (vale a dire un approccio semplificato a livello 2 di MS).

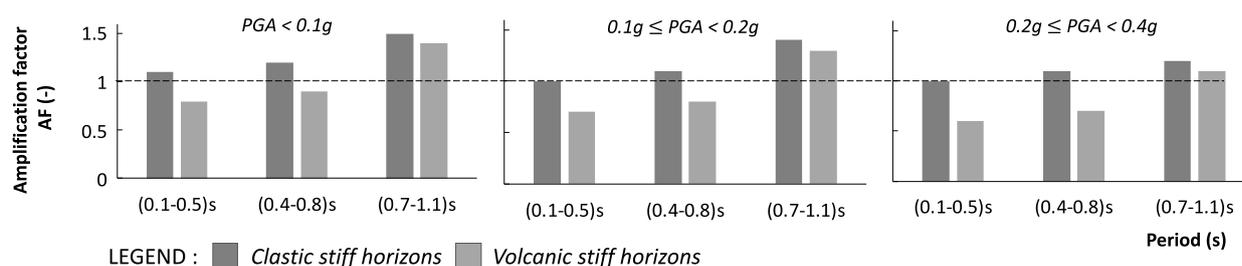


Figura 3.29 Fattori di amplificazione in prospettiva di MS: inversioni di velocità in orizzonti rigidi clastici e vulcanici per la Classe 1, Classe 2 e Classe 3 di PGA, per i 3 intervalli di periodo (0.1-0.5)s, (0.4-0.8)s and (0.7-1.1)s (modificato da Fabozzi et al. 2020).

5 Inversioni di velocità in ambiente vulcanico

Un altro contesto geologico in cui sono ricorrenti inversioni di velocità, singole o multiple, sono gli ambienti vulcanici che vengono qui studiati, in via preliminare, separatamente dalle situazioni geologiche precedenti.

I risultati degli studi di MS1 effettuati nelle aree vulcaniche etnee hanno evidenziato alcune problematiche strettamente connesse alle peculiarità dei prodotti vulcanici, caratterizzati da successioni con repentine variazioni verticali delle litofacies. In tali aree l'interazione tra vulcanismo e morfogenesi definisce dunque una varietà di geometrie tridimensionali di sottosuolo (es. valli, pendii, scarpate o versanti terrazzati sepolti) che causano improvvise discontinuità dei livelli stratigrafici, e ne influenzano anche le loro caratteristiche litologiche e meccaniche (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020a). Pertanto, ai fini degli studi di MS in aree vulcaniche, per la definizione del modello geologico di sottosuolo, è di fondamentale importanza riconoscere e ricostruire i possibili passaggi tra terreni e rocce caratterizzati da diversa proprietà quali rigidità, densità e resistenza. Nei contesti urbani che ricadono in aree perivulcaniche o di piedimonte degli edifici vulcanici, dove la complessità di sottosuolo è in generale più comune, si ha spesso la sovrapposizione di colate laviche su orizzonti sabbioso-ghiaiosi che possono rappresentare depositi marini terrazzati come riscontrato ad Aci Castello, depositi alluvionali di piana costiera sepolti come ad esempio a Catania, o depositi marini e/o alluvionali di riempimento di paleovalli dove si ha la sovrapposizione di più colate di riempimento di paleovalli. Tali successioni poggianti su un substrato geologico pre-vulcanico argilloso sono state schematizzate e modellate, essendo state considerate condizioni geologiche comuni in ambiente peri-vulcanico. Nel dettaglio le due colonne stratigrafiche di tipo 1D di riferimento per tali condizioni, ricostruite considerando le sigle delle unità geologico-tecniche utilizzate negli studi di MS (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020b) e parametrizzate, sono rappresentate in Tabella 3.6.

Nella prima colonna si ha la sovrapposizione di lave di copertura (LC in Tabella 3.6) che rappresentano un orizzonte *hard* caratterizzato da alti valori di V_s (700-1400 m/s; Tabella 3.7) che si sovrappone a depositi alluvionali o marini terrazzati incoerenti costituiti principalmente da ghiaie e sabbie con limo (GW/GM/SW/SM in Tabella 3.6) a più bassa velocità (300-650 m/s; Tabella 3.7), poggianti su un substrato geologico argilloso (CO in Tabella 3.6; Argille grigio-azzurre del Pleistocene inferiore-medio) con velocità medie (400-700 m/s; Tabella 3.7) spesso centinaia di metri e che a una certa profondità viene considerato come bedrock sismico ($V_s > 800$ m/s).

La seconda colonna differisce dalla prima per la presenza di un orizzonte di scorie alternate a lave (AL in Tabella 3.6) caratterizzato da velocità minori, all'interno dell'orizzonte LC, per cui raffigura una condizione in cui si hanno due inversioni di velocità con la profondità.

Tabella 3.6 Alternanze con inversioni di velocità tipiche di contesti vulcanici.

Alternanze colonna 1	
LC	Litoide di copertura (hard)
GW/GM/SW/SM	alluvioni o terrazzo
CO	substrato geologico argilloso
bedrock	bedrock sismico
Alternanze colonna 2	
LC	litoide di copertura (hard)
AL	scorie alternate al lave (soft)
LC	Litoide di copertura (hard)
GW/GM/SW/SM	alluvioni o terrazzo
CO	substrato geologico argilloso
bedrock	bedrock sismico

In questa fase è stato studiato il comportamento della colonna stratigrafica tipo 1, attraverso uno studio parametrico di analisi di risposta sismica locale 1D lineari equivalenti, effettuato con il codice di calcolo Strata. In Tabella 3.7 in particolare, sono riportate le caratteristiche geometriche e geo-meccaniche considerate per ciascuno strato della colonna considerata: si osserva come, sia in termini di velocità che di spessori degli strati, è stata considerata la loro variabilità in termini di valori massimi e minimi che è stata implementata in maniera deterministica, ovvero definendo un numero di combinazioni pari alla variabilità considerata. La non linearità dei materiali è stata considerata solo per il secondo e terzo strato per cui sono state riportate le curve di Cavallaro et al. 2001 (Figura 3.30) e Cavallaro et al. 2018 (Figura 3.31) rispettivamente. Per il primo strato invece si è assunto un comportamento lineare. Infine, sono stati utilizzati i segnali selezionati già in precedenza per la classe di PGA compresi tra ($0.2 \leq PGA < 0.4g$) riportati in Tabella 3.4.

Tabella 3.7 Alternanze colonna tipo 1: geometrie e proprietà geomeccaniche.

#	γ (kN/m ³)	Variazioni di velocità (m/s)	Variazioni di spessore (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	2-20	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300-650	2-20	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	400-700	10-50	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-

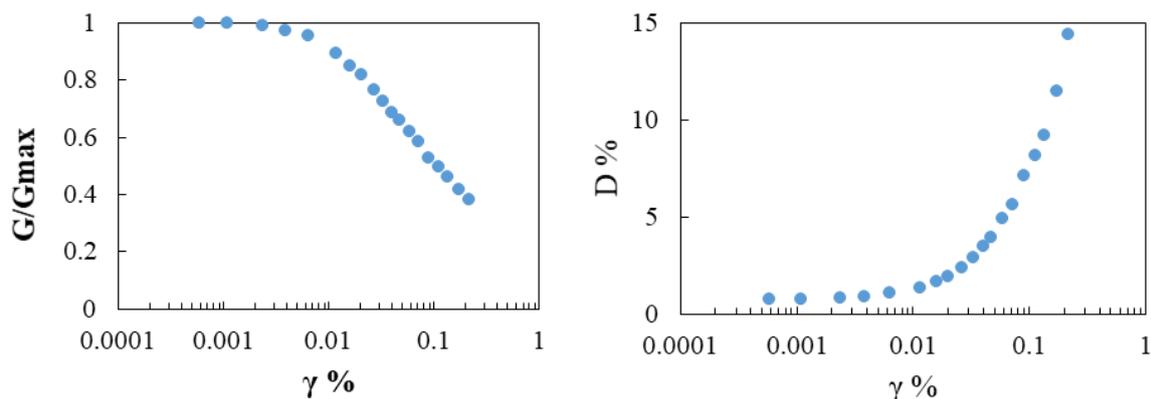


Figura 3.30 Curve di decadimento di Cavallaro et al. 2001 utilizzate per il secondo strato.

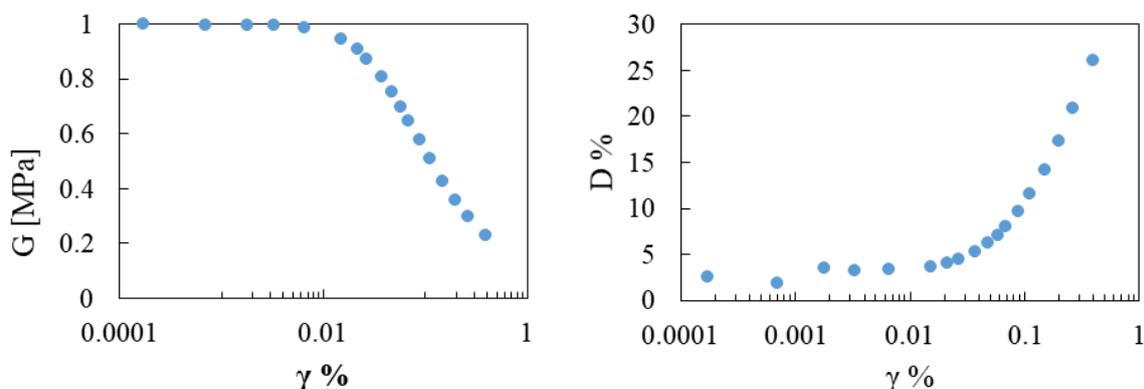


Figura 3.31 Curve di decadimento di Cavallaro et al. 2017 utilizzate per il terzo strato.

Con riferimento allo schema proposto per la colonna tipo 1, è stato effettuato un primo set di analisi (CASO 1), in cui mantenendo fissi i valori di spessore del secondo e terzo strato e pari rispettivamente ai valori massimi indicati in Tabella 3.7, mantenendo fissi i valori di V_s pari al valore minimo per il secondo strato e al valore massimo nel terzo, è stato fatto variare lo spessore del primo strato nell'intervallo min-max identificato, mantenendo fissa la velocità posta pari al valore massimo. In Tabella 3.8 sono riepilogati i parametri utilizzati nelle analisi del CASO 1 mentre in Figura 3.32 sono mostrati i profili messi a confronto per un totale di 8 profili analizzati.

Tabella 3.8 Colonna tipo 1_caso 1.

CASO 1	γ (kN/m ³)	Velocità, V_s (m/s)	Spessore strati (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	1400	0-2-3-4-5-10-15-20	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300	20	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	700	50	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-

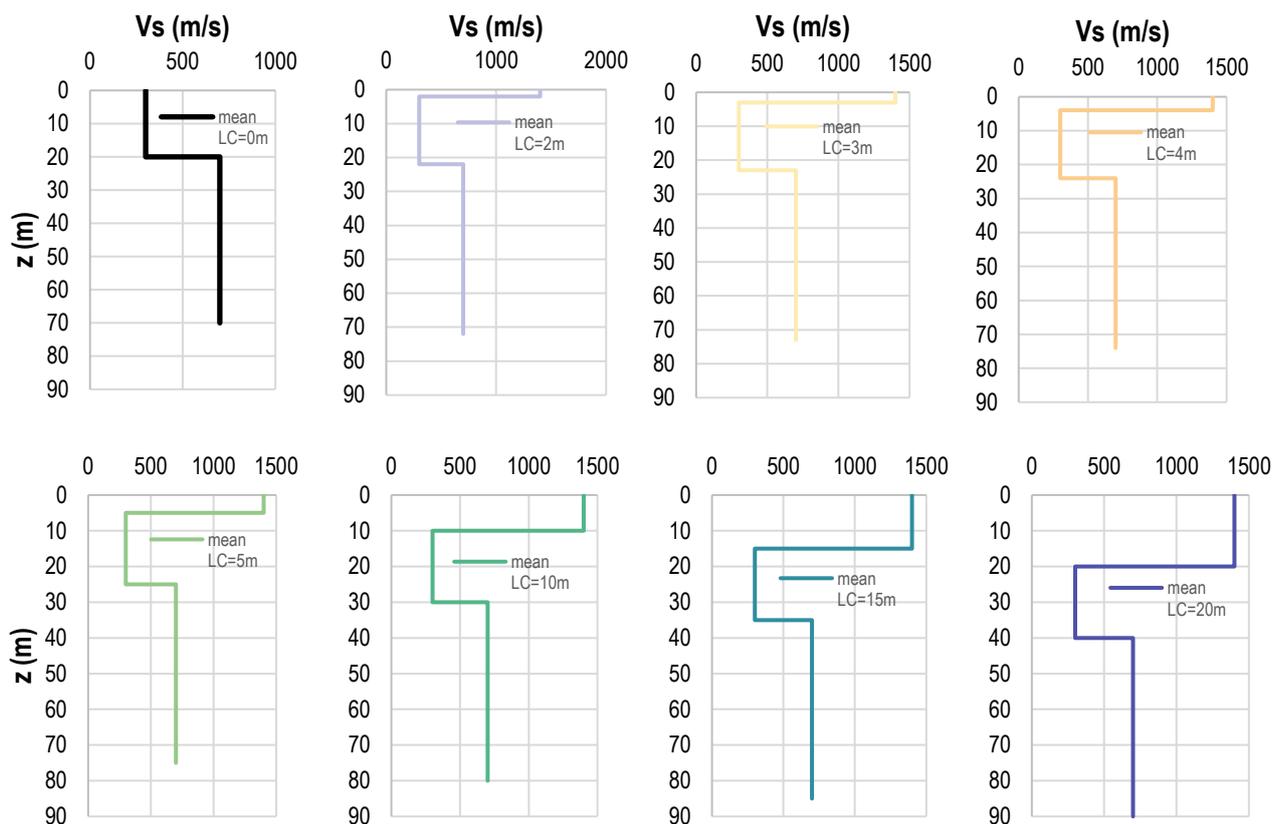


Figura 3.32 Profili di velocità colonne tipo 1_caso 1.

In questo modo è stato messo a confronto il caso in cui non è presente lo strato rigido di superficie (litoide di copertura, LC, curva nera) e che pertanto non presenta un'inversione di velocità, con i casi in cui è presente lo strato LC in superficie e per il quale si studia l'effetto del suo spessore.

In Figura 3.33 vengono mostrati i risultati di tutte le analisi effettuate per il CASO 1 in termini di funzione di amplificazione (in grigio curve relative ai venti segnali utilizzati, in nero la curva media) mentre in Figura 3.34a,b il confronto tra le curve medie calcolate per le 8 colonne analizzate.

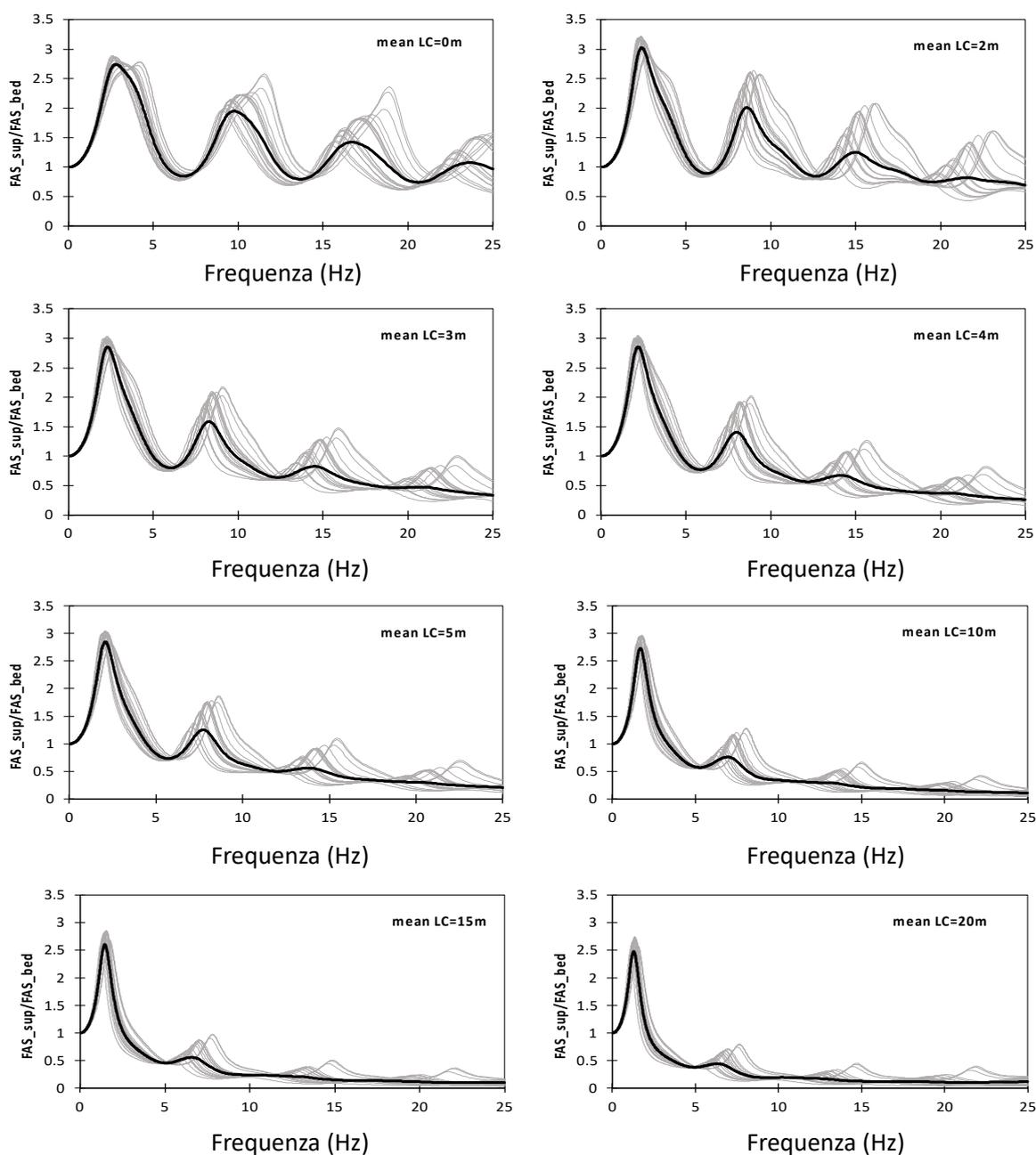
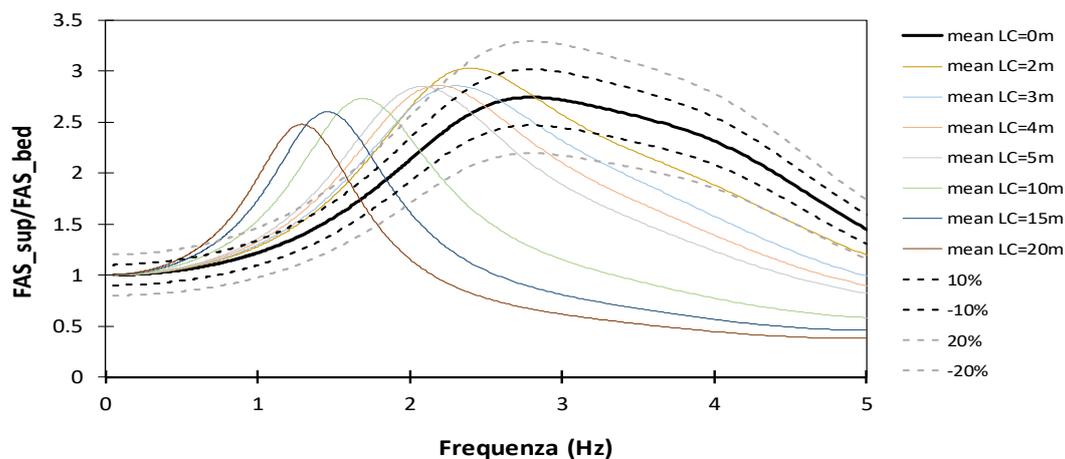


Figura 3.33 CASO 1: funzioni di amplificazione.

Si può osservare come la presenza dello strato rigido in superficie sposta la frequenza del primo modo di vibrare verso frequenze più basse rispetto al caso in cui non c'è inversione (curva nera) e questo effetto è sempre più evidente man mano che lo strato LC aumenta di spessore: si passa da circa 3Hz nel caso in cui non c'è inversione a poco meno di 1.5 nel caso in cui viene modellato lo spessore massimo di LC (Figura 3.34b). Anche in termini di ampiezza massima in corrispondenza della frequenza del primo modo di vibrare si osserva una riduzione con l'aumento dello spessore di LC (Figura 3.34b).

(a)



(b)

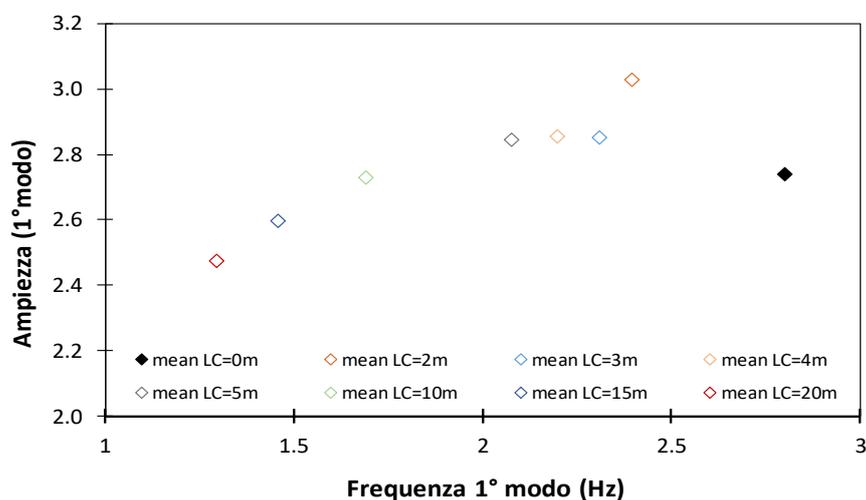


Figura 3.34 CASO 1: (a) confronto tra le funzioni di amplificazione medie e (b) tra i valori di ampiezza in corrispondenza delle frequenze del primo modo di vibrare.

Analoghe considerazioni possono essere fatte in termini di periodo, andando a guardare i confronti tra gli spettri di risposta in superficie (Figura 3.35 e Figura 3.36). Gli spettri di risposta si spostano verso gli alti periodi abbattendo le accelerazioni spettrali man mano che viene aumentato lo spessore di LC. In Figura 3.36°, in particolare, viene riportato il confronto tra gli spettri di risposta medi, in Figura 3.36b il confronto tra i rapporti spettrali calcolati tra spettri in superficie e al bedrock per tutte le otto colonne analizzate, in Figura 3.36c, infine, il confronto tra gli spettri calcolati nel caso in cui è presente lo strato LC e il caso in cui non è presente.

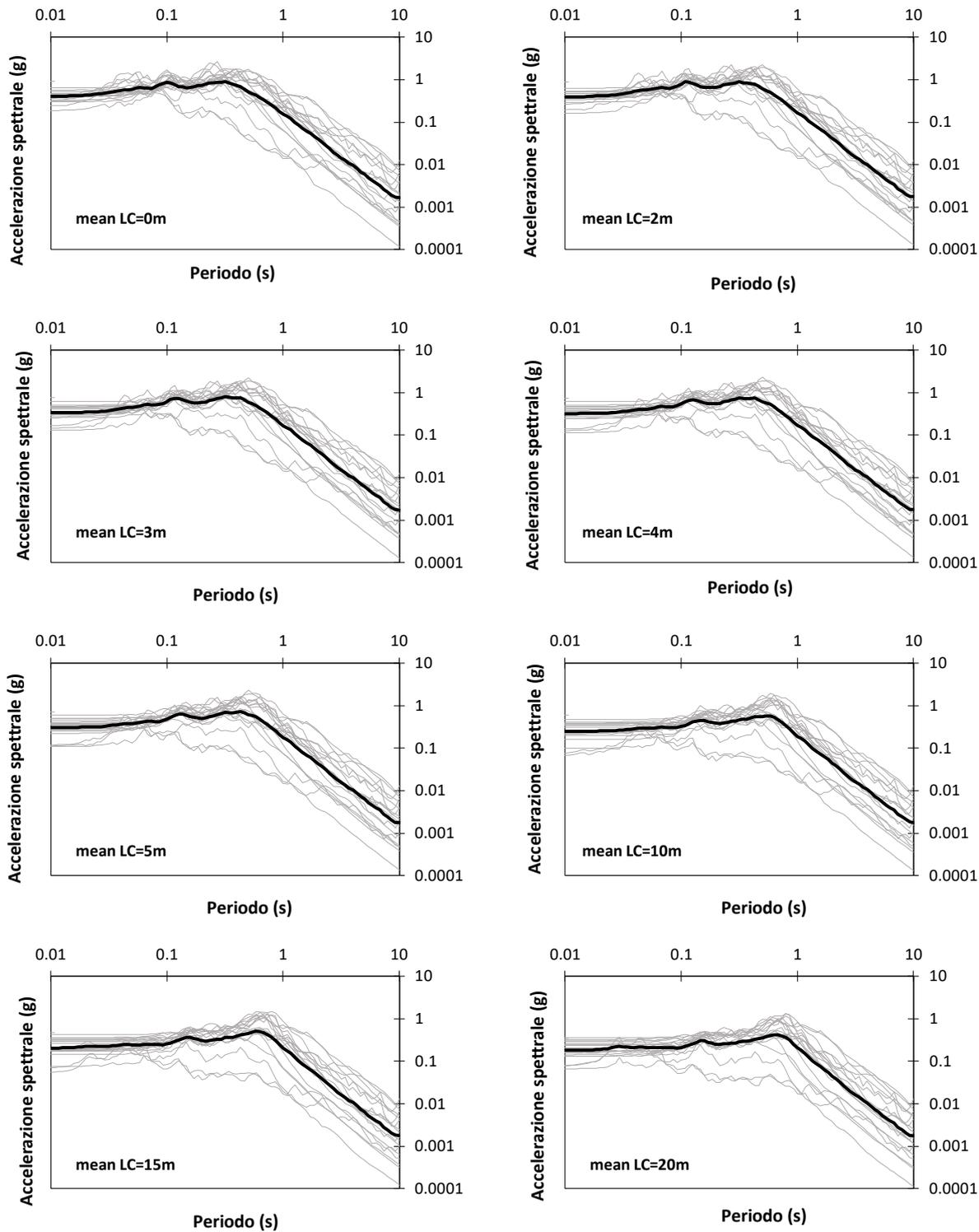
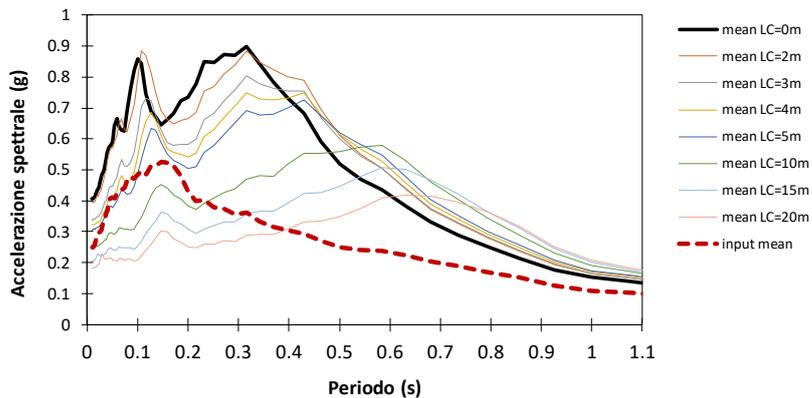
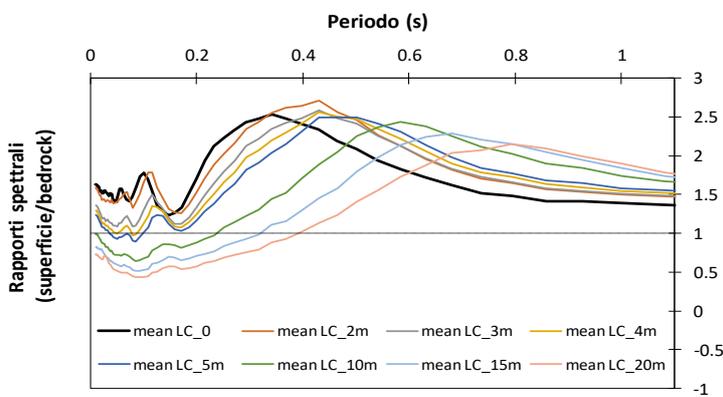


Figura 3.35 CASO 1: spettri di risposta.

(a)



(b)



(c)

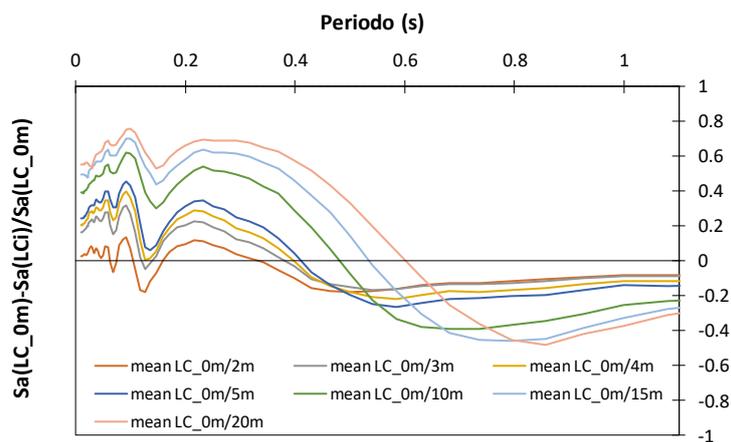


Figura 3.36 CASO 1: confronto (a) tra gli spettri di risposta medi, (b) tra i rapporti spettrali calcolati tra spettri in superficie e al bedrock, (c) tra gli spettri calcolati nel caso in cui è presente lo strato LC e il caso in cui non è presente.

Sempre con riferimento allo schema proposto per la colonna tipo 1, è stato effettuato un secondo set di analisi (CASO 2). Questo caso si differenzia dal CASO 1 per aver considerato, per il secondo e terzo strato, il valore minimo degli spessori, mantenendo invece invariate le altre proprietà. In Tabella 3.9 sono riepilogati i parametri utilizzati nelle analisi del CASO 2 mentre in Figura 3.37 sono mostrati i profili messi a confronto per un totale di 8 profili analizzati.

Tabella 3.9 Colonna tipo 1_caso 2

CASO 2	γ (kN/m ³)	Velocità, Vs (m/s)	Spessore strati (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	1400	0-2-3-4-5-10-15-20	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300	2	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	700	10	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-

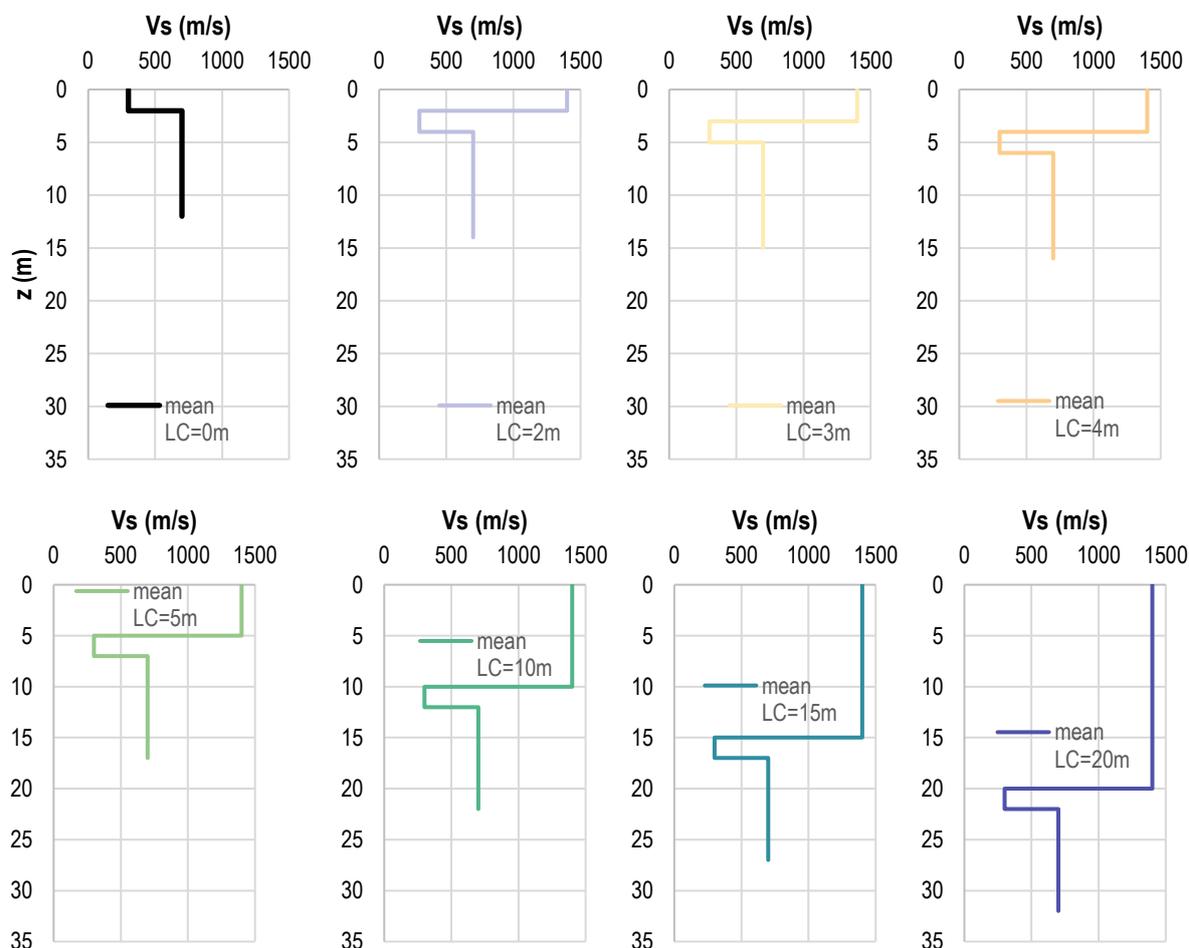


Figura 3.37 Profili di velocità colonna 1_caso 2.

Per sintesi, si riportano in Figura 3.38 direttamente i risultati in termini confronto tra le funzioni di amplificazioni medie delle otto colonne analizzate (Figura 3.38a) e i corrispondenti confronti in termini di valori di ampiezza massima in corrispondenza della frequenza del primo modo di vibrare della colonna (Figura 3.38b).

In generale si osserva come, rispetto al CASO 1, la colonna LC=0 del CASO 2 risulta essere più rigida a causa del ridotto spessore dello strato più deformabile; ne consegue un valore di f_{max} più alto (Figura 3.38a) a cui corrisponde un valore di ampiezza più basso. Confrontando le due colonne in termini di spettri di risposta (Figura 3.38b), si vede come nel CASO 2 la colonna senza inversione raggiunge valori di accelerazione spettrale più bassa rispetto alla corrispondente colonna del CASO 1.

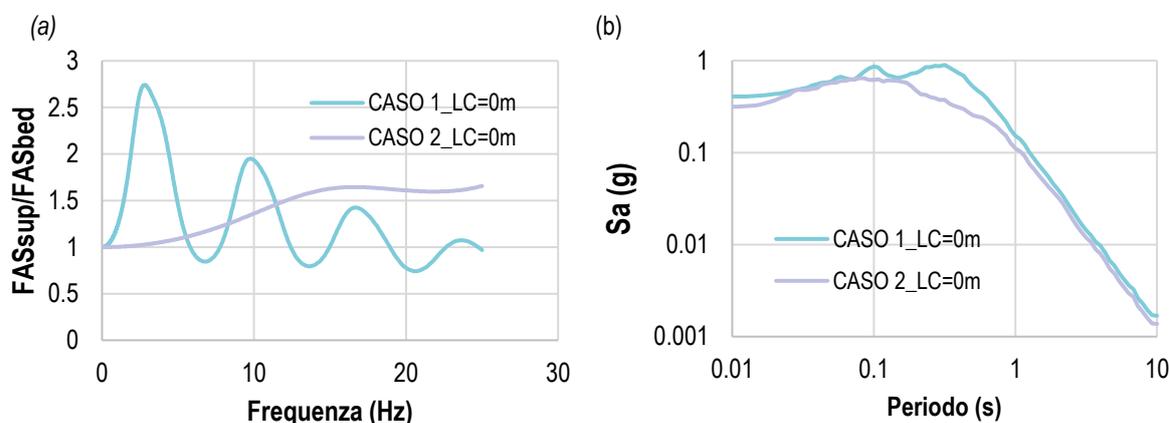
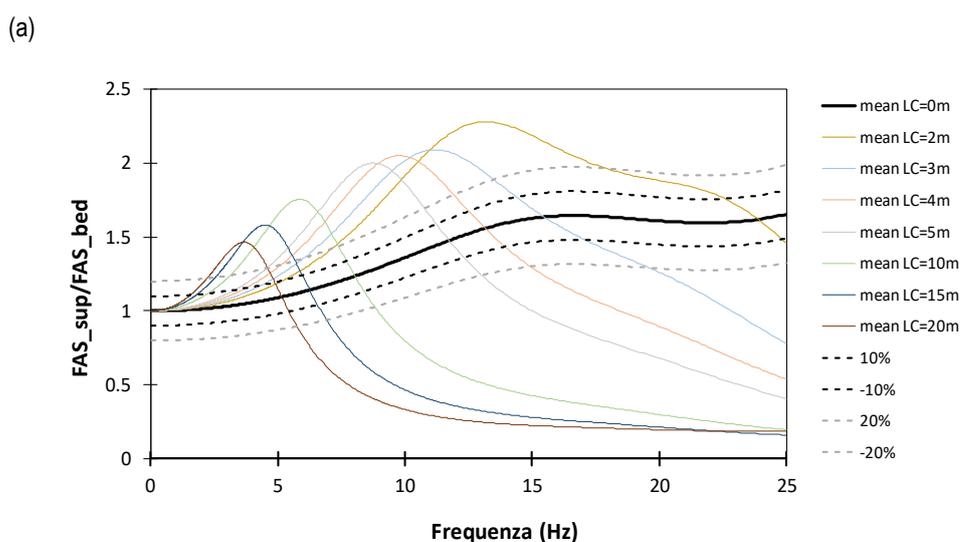


Figura 3.38 Confronto tra la colonna LC=0m del CASO 1 e del CASO 2 in termini di (a) funzione di amplificazione e (b) spettro di risposta.

Tornando al CASO 2 e ragionando in termini di funzione di amplificazione (Figura 3.39), si osserva come, andando dal caso LC=0m a cui corrisponde un valore di f_{max} circa pari a 15Hz a caso LC=20m a cui corrisponde un valore di f_{max} poco superiore a 3Hz, ci sia un'importante scostamento del valore della frequenza del primo modo di vibrare rispetto alla colonna di riferimento senza inversione. Questa variazione della frequenza massima è evidentemente maggiore se confrontato con quanto accade per il CASO 1 per cui si è osservato uno scostamento minore. In termini di ampiezza, anche in questo caso c'è un effetto di abbassamento delle ampiezze all'aumentare dello spessore di LC che tendono comunque a mantenersi mediamente più alte rispetto al caso LC=0m, ma non si osservano importanti scostamenti rispetto al CASO 1 come per f_{max} .



(b)

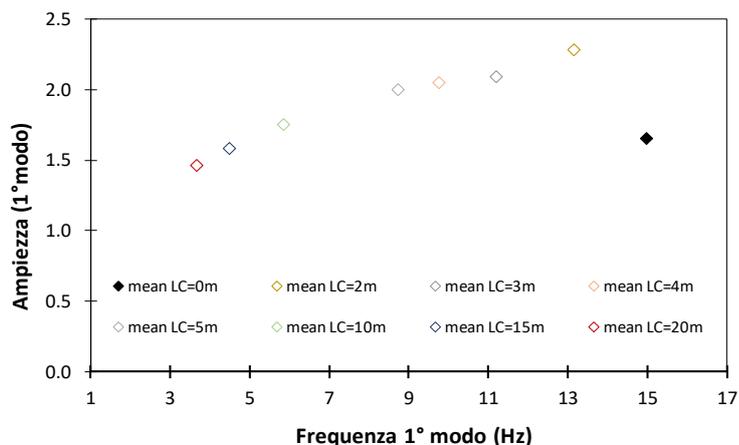
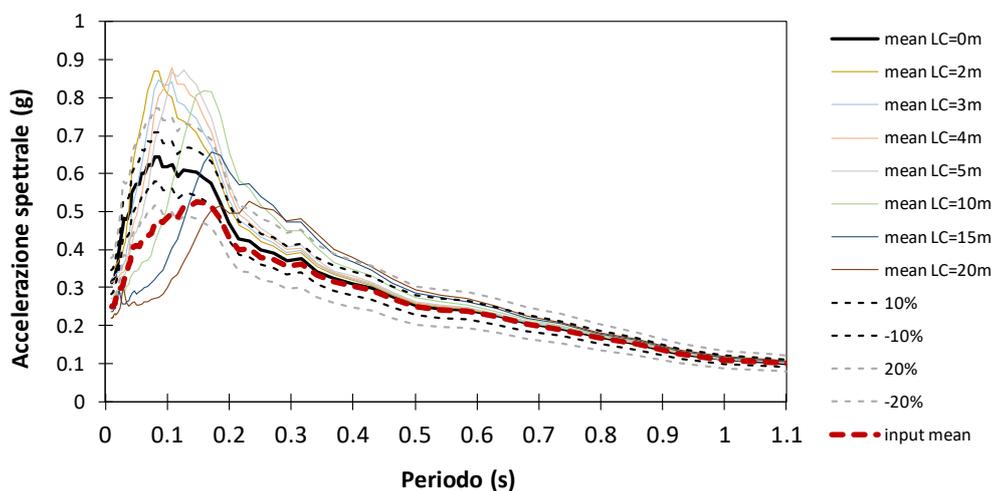


Figura 3.39 CASO 2: (a) confronto tra le funzioni di amplificazione medie e (b) tra i valori di ampiezza in corrispondenza delle frequenze del primo modo di vibrare.

Guardando i risultati in termini di spettri di risposta (Figura 3.40a), a differenza di quanto accade per il CASO 1 (Figura 3.36a) in cui si osserva un importante decremento delle accelerazioni spettrali dei casi con $LC \neq 0m$ rispetto al caso $LC=0m$ cioè in assenza di inversione, dovuto proprio alla presenza dell'inversione di velocità, nel CASO 2 invece questo effetto è molto più attenuato soprattutto per i valori più bassi dello spessore di LC. Un decremento di S_a importante rispetto al caso $LC=0$ si ha per i valori di spessore di LC più alti, a bassissimi periodi (mediamente fino a 2s).

(a)



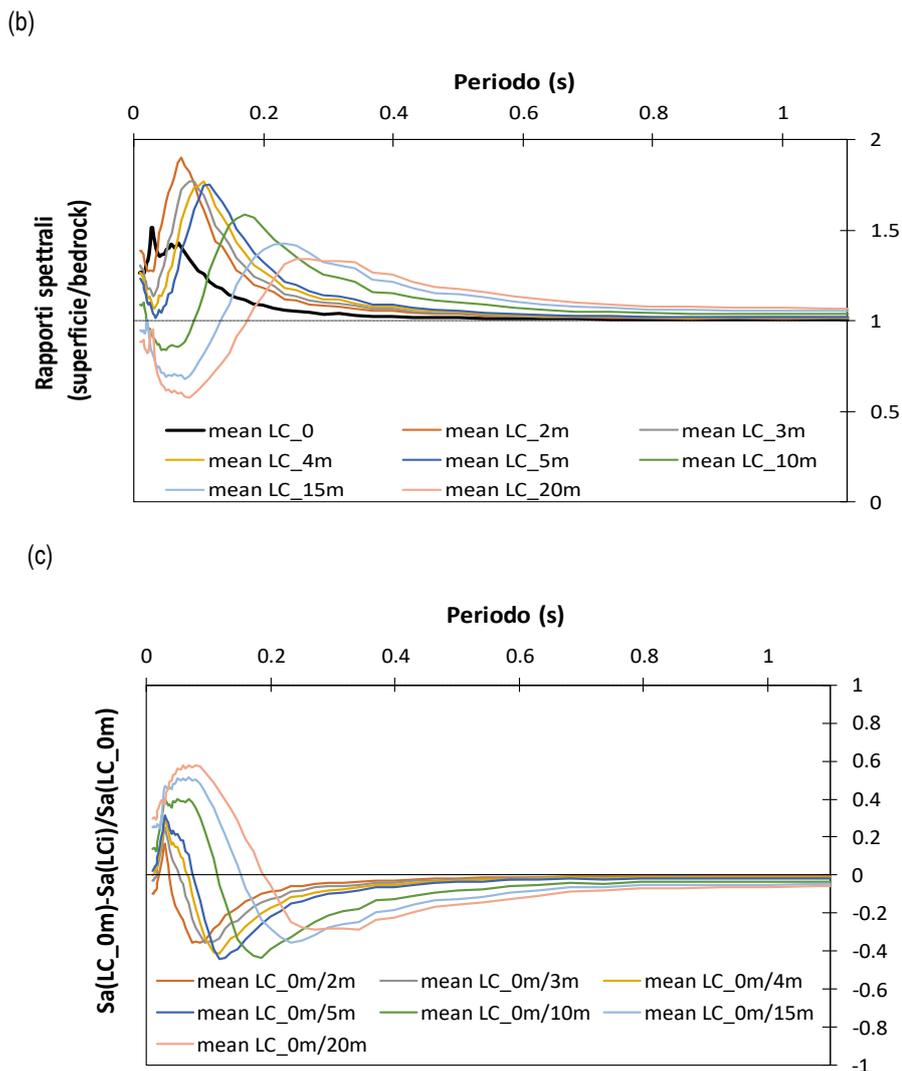


Figura 3.40 CASO 2: confronto (a) tra gli spettri di risposta medi, (b) tra i rapporti spettrali calcolati tra spettri in superficie e al bedrock, (c) tra gli spettri calcolati nel caso in cui è presente lo strato LC e il caso in cui non è presente.

Si passa ad analizzare un terzo caso, il CASO 3 della colonna tipo 1, in cui si mantengono fissi le velocità e gli spessori del primo e terzo strato mentre viene variato lo spessore del secondo strato per cui si mantiene fissa la velocità V_s (Tabella 3.10).

Tabella 3.10 Colonna tipo 1_caso 3.

CASO 3	γ (kN/m ³)	Velocità, V_s (m/s)	Spessore strati (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	1400	20	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300	0-2-3-4-5-10-15-20	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	700	50	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-

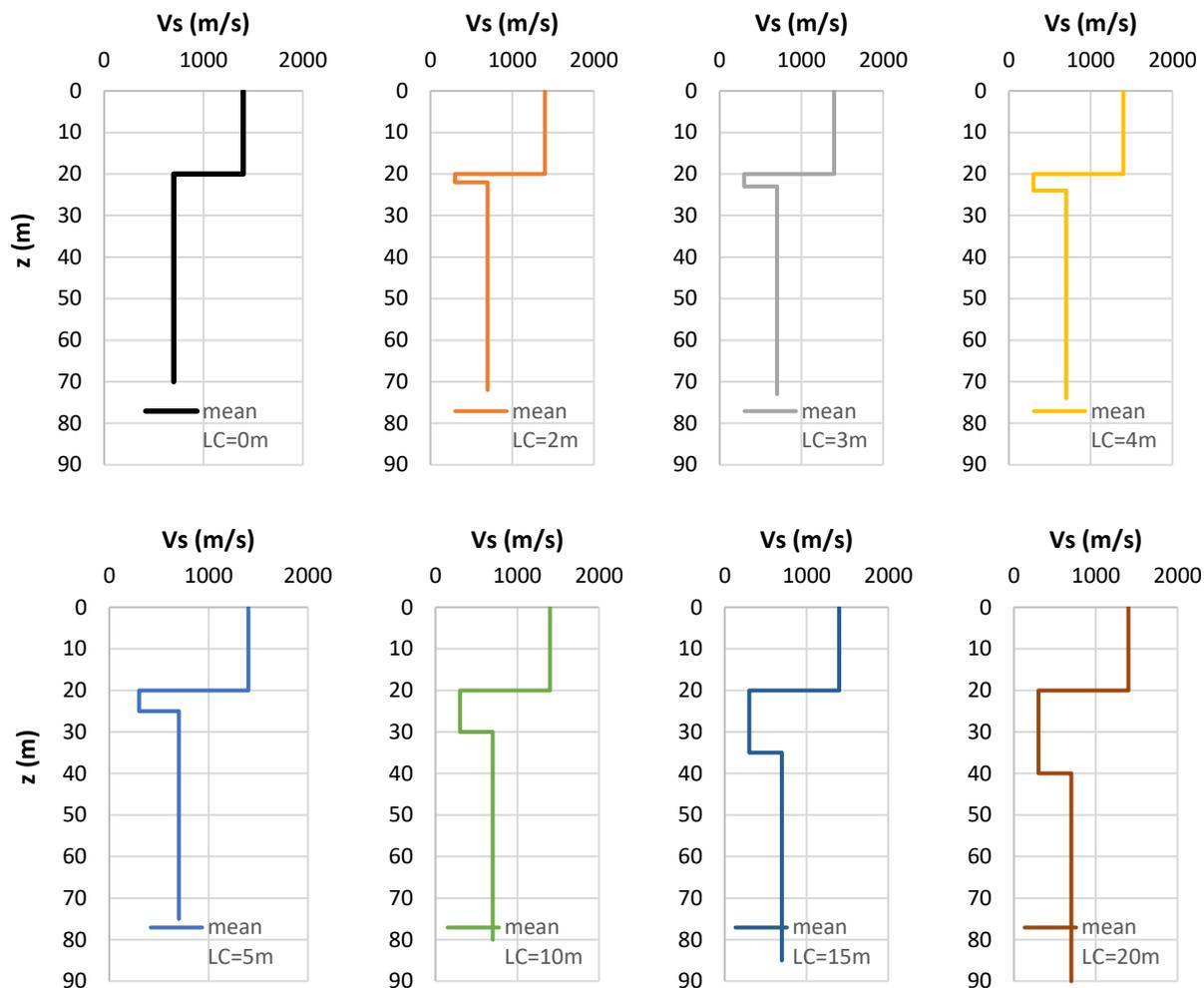
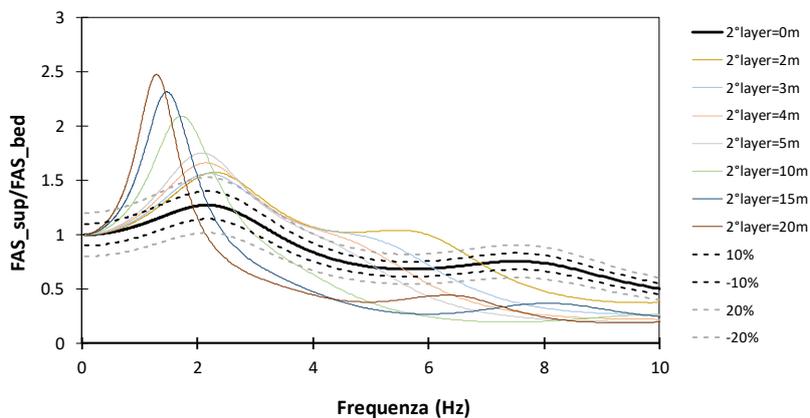


Figura 3.41 Profili di velocità colonna tipo 1_caso 3.

Anche in questo caso osserviamo (Figura 3.42) uno spostamento della frequenza principale verso le alte frequenze ma con valori di ampiezza massima che, a differenza dei CASI 1 e 2, tendono a decrescere con la riduzione dello spessore del secondo strato più deformabile rispetto al caso in cui si considera nullo lo spessore del secondo strato, quindi nel caso in cui non consideriamo l'inversione di velocità. Osserviamo la stessa tendenza anche in termini di spettri di risposta (Figura 3.43), uno spostamento verso gli alti periodi dello spettro con un aumento dell'ampiezza man mano che viene aumentato lo spessore del secondo strato.

(a)



(b)

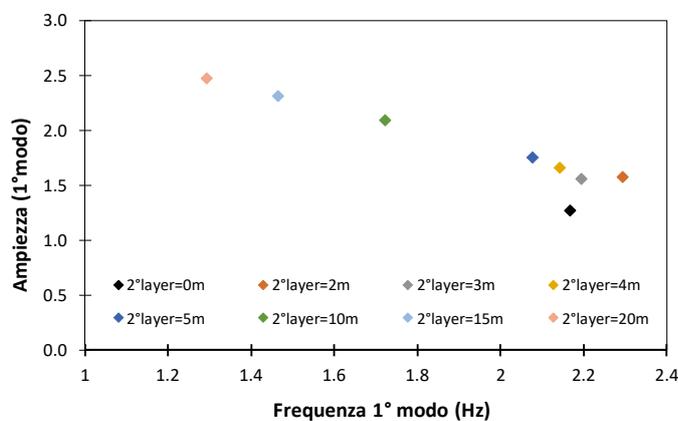
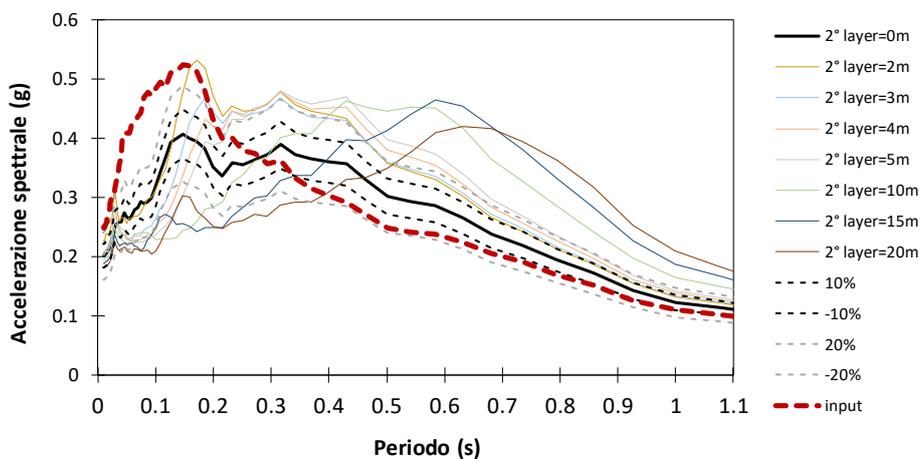
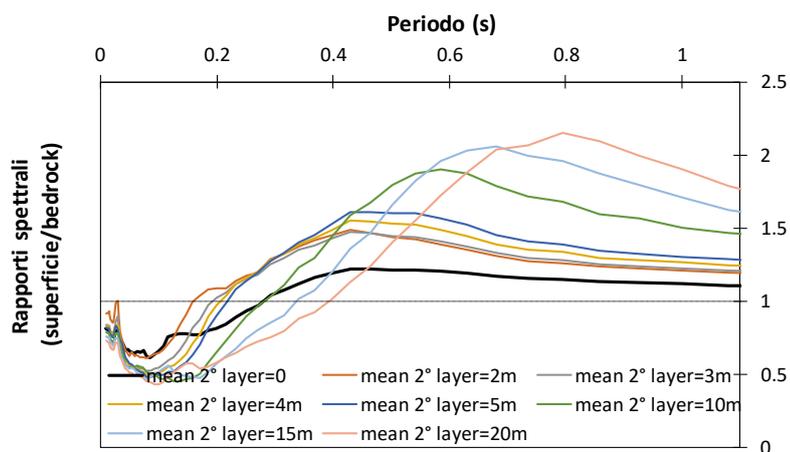


Figura 3.42 CASO 3: (a) confronto tra le funzioni di amplificazione medie e (b) tra i valori di ampiezza in corrispondenza delle frequenze del primo modo di vibrare.

(a)



(b)



(c)

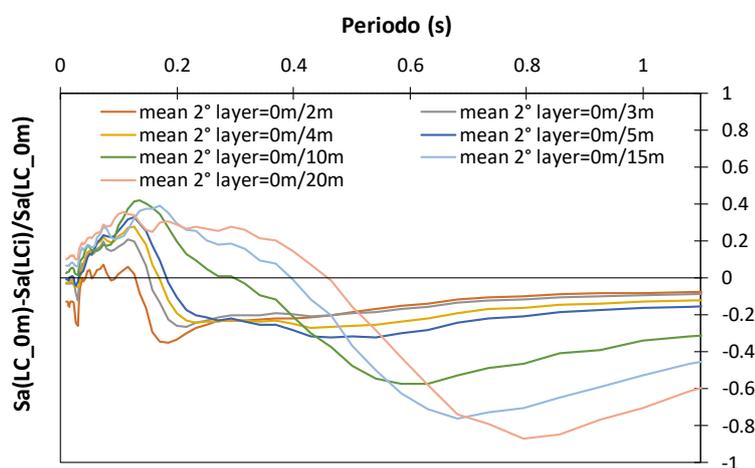


Figura 3.43 CASO 2: confronto (a) tra gli spettri di risposta medi, (b) tra i rapporti spettrali calcolati tra spettri in superficie e al bedrock, (c) tra gli spettri calcolati nel caso in cui è presente lo strato LC e il caso in cui non è presente.

Sono stati infine calcolati i fattori di amplificazione per i tre casi analizzati (Figure 3.44-3.45-3.46), per i tre intervalli di periodo 0.1s-0.5s, 0.4s-0.8s, 0.7s-1.1s. Per i tre casi si osserva tendenzialmente: nell'intervallo di periodi (0.1s-0.5s), una riduzione di FA a partire dal caso senza inversione (istogramma nero) fino al caso con inversione considerando il massimo spessore dello strato a spessore variabile, fino a raggiungere valori minori dell'unità (deamplificazione) nei casi a cui sono associati gli spessori più alti dello strato LC (CASO 1 e 2) o del secondo strato (CASO 2). Nell'intervallo (0.4s-0.8s) non si osservano sensibili oscillazioni di FA tra i vari casi rispetto al caso senza inversione, con una leggera tendenza all'incremento di FA, infine nell'intervallo (0.7s-1.1s) si osserva un aumento di FA dal caso dal caso senza inversione fino all'ultimo caso.

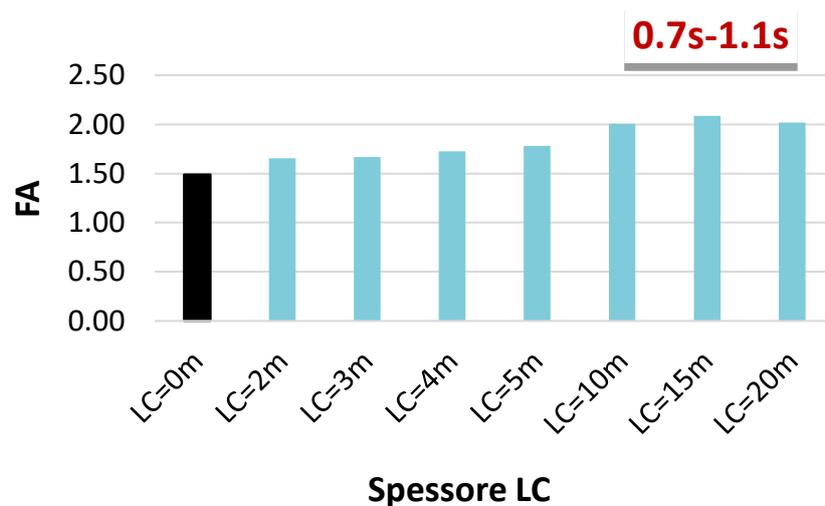
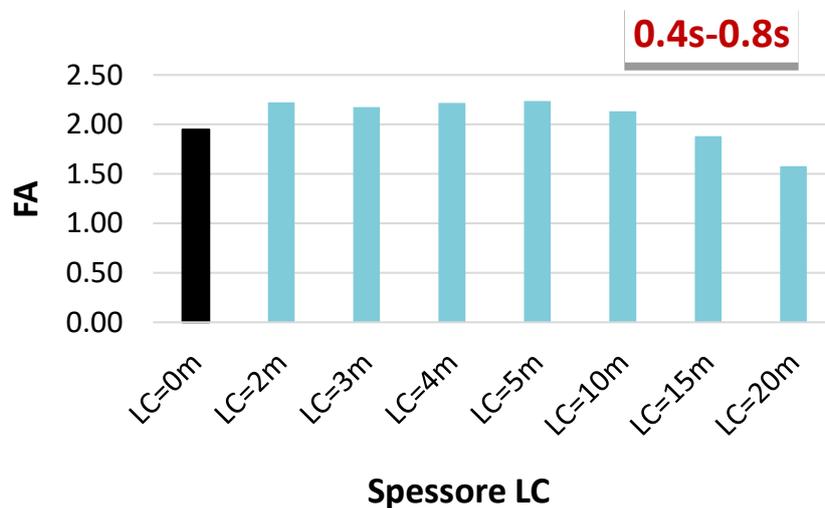
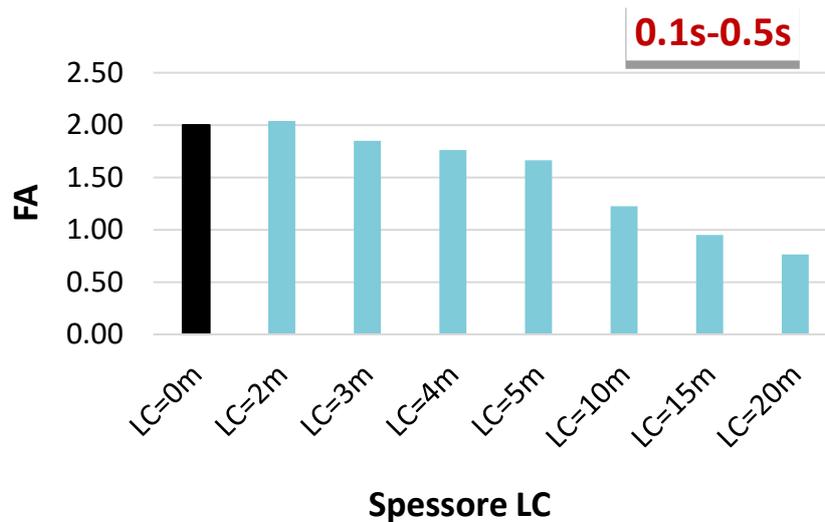
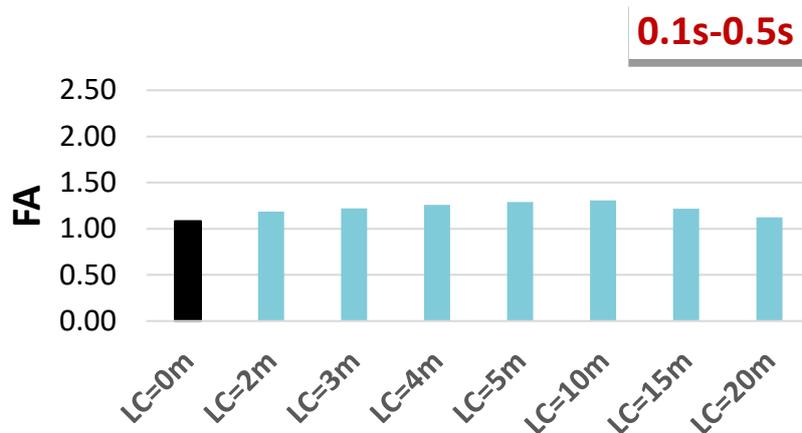
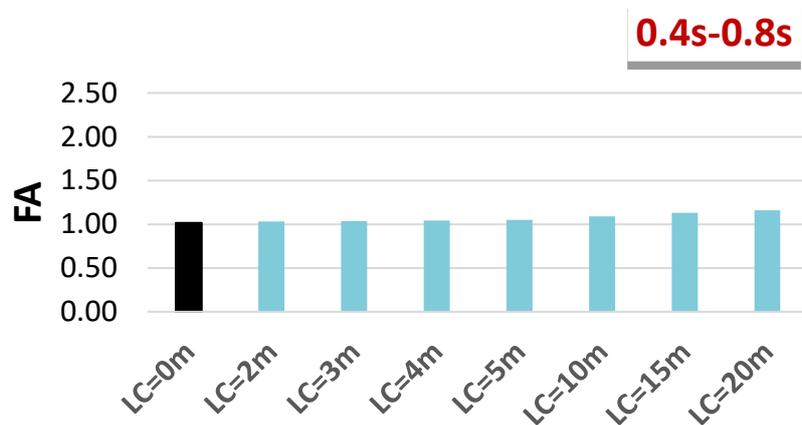


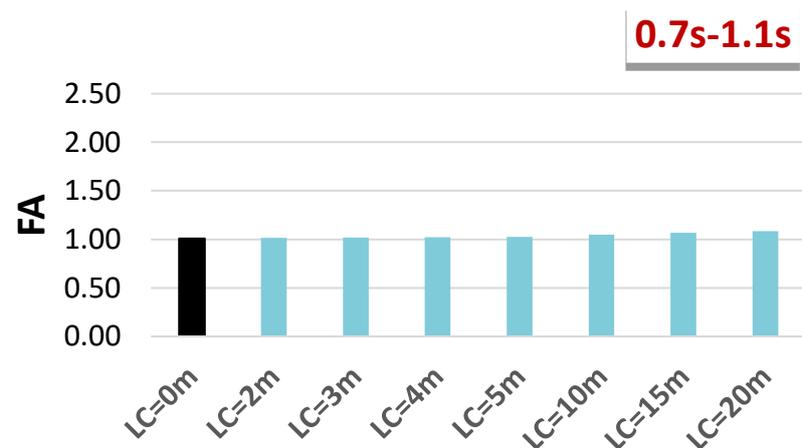
Figura 3.44 CASO 1: fattori di amplificazione.



Spessore LC



Spessore LC



Spessore LC

Figura 3.45 CASO 2: fattori di amplificazione.

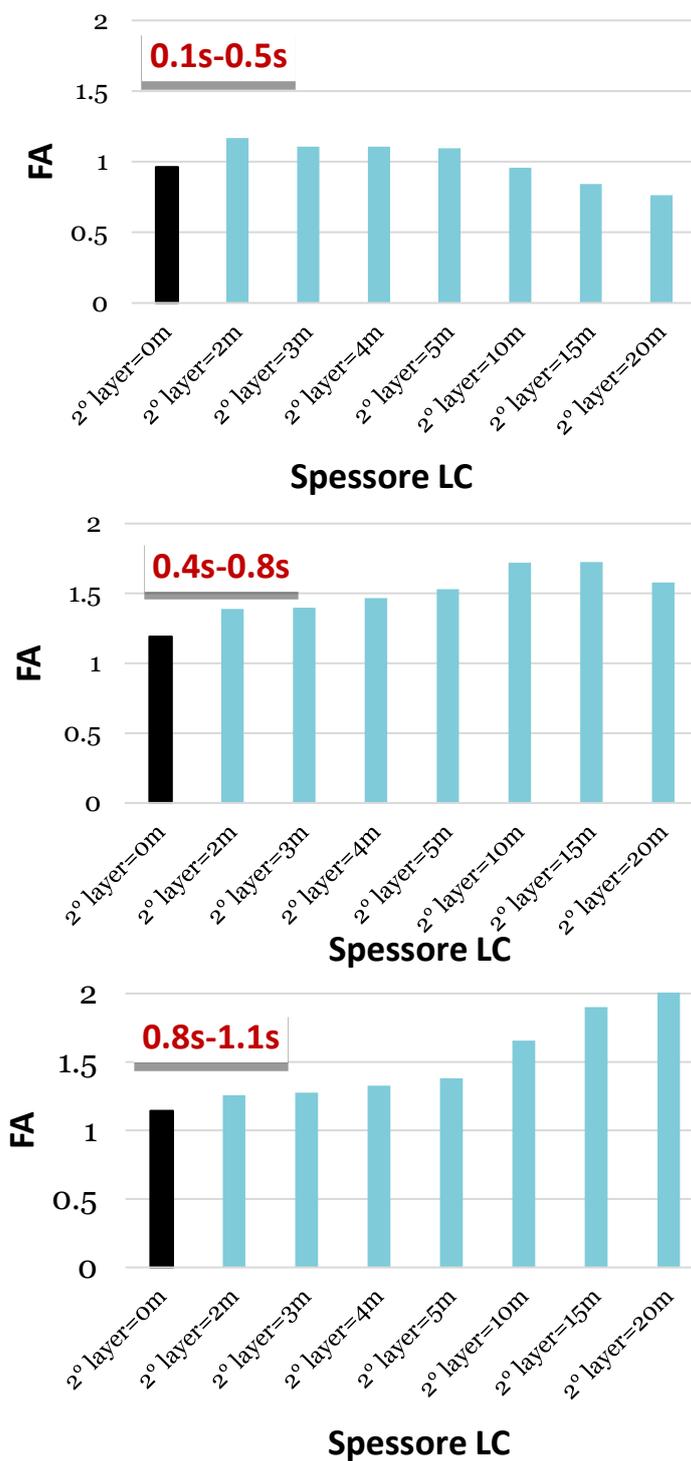


Figura 3.46 CASO 3: fattori di amplificazione.

Bibliografia (Sezione 3)

- Catalano S., Pavano F., Romagnoli G., Tortorici G. (2017). Late Quaternary tectonics and active ground deformation in the Catania urban area (eastern Sicily): New constraints from a geological investigation. *Tectonophysics* 712:200-207. DOI: 10.1016/j.tecto.2017.05.033.
- Cavallaro, A., Grasso, S., Maugeri, M. A dynamic geotechnical characterisation of soil at Saint Nicola alla Rena Church site damaged by the southeastern Sicily earthquake of 13 December 1990. Conference: Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Satellite Conference “Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes”, ISBN: 975-7180-06-8At: Istanbul.
- Cavallaro, A., Castelli, F., Ferraro, A., Grasso, S., Lentini, V. (2018). Site response analysis for the seismic improvement of a historical and monumental building: the case study of Augusta Hangar. *Bull Eng Geol Environ* 77, 1217–1248 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1170-9>
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica (a). Linee guida per la realizzazione della carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica con adattamento ai contesti vulcanici. Versione 1.0 Roma, 2020 (In fase di approvazione).
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica (b). Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. Dipartimento della protezione civile. Versione 4.2beta. - Roma: [s.n.], 2020. - Vol. (In fase di approvazione).
- Darendeli, M. B. (2001). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Austin, Texas: The University of Texas.
- DPC, Dipartimento della Protezione Civile; 2018: Commissione tecnica per il supporto e monitoraggio degli studi di Microzonazione Sismica (ex art.5, OPCM3907/10), (2018) – WebMs; WebCLE. A cura di: Maria Sole Benigni, Fabrizio Brammerini, Gianluca Carbone, Sergio Castenetto, Gian Paolo Cavinato, Monia Coltella, Margherita Giuffrè, Massimiliano Moscatelli, Giuseppe Naso, Andrea Pietrosante, Francesco Stigliano. www.webms.it.
- Eurocode 8. (2003). Design for structures for earthquakes resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- Fabozzi S., Catalano S., Falcone G., Pagliaroli A., Peronace E., Porchia A., Romagnoli G., Moscatelli M. (2020) Stochastic approach to study the site response in presence of shear wave velocity inversion: application to seismic microzonation studies in Italy. *Engineering Geology* <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105914>.
- Kottke A. R., Wang X., Rathje E. M. (2013). Technical Manual for Strata. Geotechnical Engineering Center Department of Civil, Architectural, and Environmental Engineering, University of Texas, 89 pp.
- Lanzo G., Olivares L., Silvestri F., Tommasi P. (2004). Seismic response analysis of historical towns rising on rock slabs overlying a clayey substratum. V International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York, April 13-17 (2004).
- NTC (2018). Norme Tecniche per le Costruzioni. Italia: Ministero Delle Infrastrutture.
- NTC (2018). Aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni”, NTC (2018) - DM 17 gennaio 2018. Gazzetta Ufficiale, n. 42 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 42, <http://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/02/20/42/so/8/sg/pdf>.

- Pagliaroli A., Lanzo G., Tommasi P., Di Fiore V. (2014). Dynamic characterization of soils and soft rocks of the Central Archeological Area of Rome. *Bull Earthquake Eng* (2014) 12:1365–1381 DOI 10.1007/s10518-013-9452-5.
- Pagliaroli A. (2018). *Key issues in Seismic Microzonation studies: lessons from recent experiences in Italy*. *Rivista Italiana di Geotecnica - Italian Geotechnical Journal*, n. 1/2018, pp. 5-48, DOI: 10.19199/2018.1.0557-1405.05.
- Panzerà F., Romagnoli G., Tortorici G., D'Amico S., Rizza M., Catalano S. (2019). Integrated use of ambient vibrations and geological methods for seismic microzonation. *Journal of Applied Geophysics* Vol 170 November 2019, 103820. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103820>.
- Pergalani F. *et alii* (1999) - Seismic microzoning of the area struck by Umbria - Marche (Central Italy) Ms 5.9 earthquake of 26 September 1997 - *Soil Dynamics and Earth. Engineer.* 18 (1999) 279 – 296.
- Pergalani F., Pagliaroli A., Bourdeau C., Compagnoni M., Lenti L., Lualdi M., Madiari C., Martino S., Razzano R., Varone C., Verrubbi V. (2019) Seismic microzoning map: approaches, results and applications after the 2016–2017 Central Italy seismic sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI: 10.1007/s10518-019-00640-1.
- Rathje E.M., Kottke A.R., Trent W.L. (2010). Influence of input motion and site property variabilities on seismic site response analysis. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 136:607-619.
- Rollins, K. M., Evans, M., Diehl, N. & Daily W. (1998). Shear modulus and damping relationships for gravels. *J. Geotech. Geoenviron. Engng* 124, No. 5, 396–405.
- Toro, G. R. (1995). Probabilistic models of site velocity profiles for generic and site-specific ground-motion amplification studies, report prepared by Risk Engineering, Inc. for Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.
- Vucetic M. & Dobry M. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *ASCE, Journal of Geotech. Eng.*, 117, 89-107 (1991).