

*Supporto e coordinamento tecnico-scientifico per le attività
di microzonazione sismica dei Comuni della Regione Calabria*

Protocolli di acquisizione dati ed elaborazione relativi alle
attività di Microzonazione Sismica di Livello 3 nei Comuni
della Regione Calabria

A cura del Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni

Aprile 2018

Sommario

Premessa	5
1. Introduzione	6
2. Indagini Geologiche e Geomorfologiche	8
2.1 Generalità su Modello geologico e Carta Geologico-Tecnica.....	8
2.2 Il substrato.....	12
Substrato Geologico (SG).....	13
Substrato Sismico (SS)	15
2.3 I Terreni di Copertura (TC).....	16
2.4 Elementi morfologici superficiali e sepolti pertinenti la pericolosità sismica	17
2.5 Instabilità di versante e liquefazione.....	18
2.6 Sezioni geologiche e geologico-litotecniche.....	19
3. Indagini geofisiche di superficie	22
3.1 Premessa	22
3.2 La pianificazione delle indagini e l'uso del metodo dei rapporti spettrali (HVSr)	22
3.3 La determinazione del profilo di Vs: tecnica MASW	24
3.4 Le incertezze	26
4. Indagini in foro e prove Down-Hole	27
4.1 Premessa	27
4.2 Scelta del sito di prova.....	27
4.3 Precisazioni di carattere generale	28
4.3.1 Modalità tecniche esecutive.....	28
4.3.2 Sondaggi geognostici	28
4.3.3 Fluidi di circolazione	30
4.3.4 Rilievo della falda.....	30
4.3.5 Prelievo, conservazione e trasporto dei campioni	30
4.3.6 Cassette	31
4.3.7 Prove speditive di resistenza sulle carote di terreni coesivi.....	32
4.3.8 Riempimento dei fori di sondaggio in caso di mancato condizionamento	32
4.4 Prove penetrometriche dinamiche SPT (Standard Penetration Test)	32
4.4.1 Caratteristiche dell'attrezzatura.....	33
4.4.2 Preparazione del foro	33
4.4.3 Modalità esecutive	33

4.5 Prove penetrometriche statiche CPT (Cone Penetration Test), con Piezocono (CPTU) e cono sismico (SCPT).....	34
Attrezzatura e modalità esecutive	34
Tarature e controlli.....	35
4.5.1 Penetrometro elettrico.....	35
4.5.2 Prove penetrometriche con piezocono (CPTU).....	35
4.5.3 Prove penetrometriche con cono sismico (SCPTU).....	36
4.6 Posa in opera di tubi per prospezioni sismiche DH	36
4.7 Esecuzione di prospezioni sismiche in foro di tipo Down - Hole.....	39
4.7.1. Caratteristiche delle attrezzature.....	39
4.7.2. Controlli preliminari.....	40
4.7.3. Modalità tecniche esecutive.....	41
4.8 Documentazione.....	41
5. Le Instabilità.....	44
5.1 Premessa	44
5.2 Zone di Attenzione per Frane (ZA_{FR})	45
5.3 Zone di Attenzione per le Faglie Attive e Capaci (ZA_{FAC}).....	46
5.4 Zone di Attenzione (ZA_{LQ}), di Suscettibilità (ZS_{LQ}), e di Rispetto (ZR_{LQ}) per Liquefazione.....	48
5.4.1 Zone di Attenzione (ZA_{LQ})	50
5.4.2 Zone di Suscettibilità per liquefazione (ZS_{LQ})	51
5.4.3 Zone di Rispetto per liquefazione (ZS_{LQ}).....	52
5.4.4 Modalità di rappresentazione e perimetrazione delle Zone di Rispetto per liquefazione (ZS_{FR})... ..	52
6. Modellazione della Risposta Sismica Locale in configurazione 1D.....	55
6.1 Premessa	55
6.2 Modello di analisi e scelta del codice di calcolo	55
6.3 Gestione delle incertezze nella stima della RSL.....	56
6.4 Parametri descrittivi della variabilità.....	57
6.5 Implementazione della variabilità del profilo di Vs nelle analisi di RSL	60
6.6 Calcolo dei valori di FA rappresentativi della singola microzona	63
6.7 Esempio: il caso di S. Gimignano (SI)	64
6.7.1 Approccio probabilistico.....	64
6.7.2 Variabilità dei parametri geotecnici	65
6.7.3 Influenza dei principali parametri geotecnici sulla RSL	68
7. Modellazione della risposta sismica locale in configurazione 2D	71

7.1 Premessa	71
7.2 Scelta del modello di analisi e del codice di calcolo	72
7.3 Scelta delle sezioni e delle verticali da analizzare	74
7.4 Estensione laterale delle sezioni per la modellazione numerica 2D	76
7.5 Definizione del substrato sismico per le simulazioni numeriche	77
7.6 Discretizzazione dei modelli	78
7.7 Validazione modello di sottosuolo in base ai rapporti spettrali.....	78
7.8 Definizione degli accelerogrammi e delle caratteristiche di non linearità dei terreni	79
7.9 Risultati	80
7.10 Riferimenti bibliografici modellazione 2D	81
8. Allegati	82
8.1 Allegato 1 - Scheda Metadati indagini HVSR	82
8.2 Allegato 2 - Scheda Metadati indagini MASW o SR.....	83

Premessa

Il presente documento è stato realizzato sulla base delle attività svolte nell'ambito della Convenzione *“Supporto e coordinamento tecnico-scientifico per le attività di microzonazione sismica dei territori colpiti dagli eventi sismici a far data dal 24 agosto 2016”* tra il Commissario straordinario del Governo per la ricostruzione sisma 2016 e Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche (per il Centro per la microzonazione sismica e le sue applicazioni). Inoltre, tale documento è integrato con le esperienze maturate nell'ambito degli studi di MS svolti nei 138 Comuni del centro Italia colpiti dagli eventi sismici a partire dal 24 agosto 2016.

Per lo svolgimento delle attività da realizzare nei Comuni della Regione Calabria oggetto della MS di Livello 3 è stato predisposto un Gruppo di Lavoro (GdL CNR IGAG) composto da personale del CNR-IGAG e dell'Università degli studi di Catania, Roma e Siena con il compito di affiancare e supportare gli affidatari degli studi al fine di garantire che i prodotti previsti siano conformi a quanto previsto dai documenti tecnici di riferimento per gli studi di Microzonazione Sismica.

1. Introduzione

Scopo del presente documento è fornire un insieme di indicazioni, riguardo alle attività di raccolta dati e relativa elaborazione, per la redazione di carte di Microzonazione Sismica di Livello 3 (MS3). In particolare, si tratta di indicazioni per l'applicazione di procedure finalizzate alla:

- caratterizzazione delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) secondo gli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica¹ distinguendo tre situazioni specifiche: zone stabili, zone stabili soggette ad amplificazione del moto sismico e zone instabili;
- delimitazione delle Zone di Attenzione (ZA) per le instabilità da frana (ZAFR), da faglie attive e capaci (ZAFAC) e per le instabilità legate a fenomeni di liquefazione (ZALIQ); per queste ultime instabilità si forniranno indicazioni anche per la delimitazione delle Zone di Suscettibilità (ZS_{LIQ}) e di Rispetto (ZR_{LIQ});
- valutazione della risposta sismica locale di tutte le MOPS in termini di Fattori di Amplificazione sintetici relativi a tre intervalli di periodi (0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s e 0.7-1.1 s), spettri di risposta elastici ed accelerogrammi in superficie. I Fattori di amplificazione dovranno essere forniti anche per le aree instabili per liquefazione (ZS_{LIQ} e ZR_{LIQ}).

In tutto il processo che porterà al conseguimento degli obiettivi posti nel Disciplinare occorre distinguere fra tre tipi di operatori:

- a. Professionisti incaricati. Si occupano di: i) revisione o costruzione del modello geologico e geologico-litotecnico in prospettiva sismica; ii) direzione lavori delle attività per l'esecuzione delle indagini; iii) definizione del modello geotecnico in prospettiva sismica e modellazione della risposta sismica locale 1D e/o 2D.
- b. Ditte incaricate. Si occupano di realizzare le indagini.
- c. Gruppo di Lavoro CNR IGAG (GdL CNR IGAG). Si occupa di: i) supportare e sorvegliare le attività dei professionisti e delle ditte incaricate; ii) fornire supporto decisionale o prescrizioni particolari durante l'esecuzione delle indagini in sito; iii) fornire al professionista i dati relativi allo scuotimento sismico atteso (moto di input).

I protocolli che seguono riguardano essenzialmente i primi due tipi di operatori (punto a e b) e sono stati redatti considerando che:

- i professionisti e le ditte incaricate posseggono i requisiti di esperienza per condurre efficacemente le attività previste dagli incarichi;
- le metodologie richieste sono immediatamente applicabili a seguito delle attività formative a favore dei professionisti incaricati;
- le indagini prevedono l'uso di attrezzature normalmente disponibili nella pratica professionale.

L'applicazione dei protocolli deve essere compatibile con le effettive risorse economiche messe a disposizione del professionista e delle ditte, e con i limiti temporali previsti per la consegna degli elaborati.

¹ <http://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/7-indirizzi-e-criteri-per-la-microzonazione-sismica>

Nell'elaborazione dei protocolli si è inoltre tenuto conto delle conoscenze acquisite negli studi di microzonazione sismica effettuati nell'ultimo decennio e della relativa documentazione prodotta e disponibile in rete ad uso degli operatori incaricati, con particolare riferimento a:

- Indirizzi e Criteri per la Microzonazione sismica¹
- Microzonazione Sismica dell'area Aquilana²
- Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica³
- Linee guida per la gestione del territorio interessato da faglie attive e capaci⁴
- Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante cosismiche⁵
- Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da fenomeni di liquefazione⁶

Per molte delle metodologie di potenziale utilità per le attività oggetto del presente documento si rimanda alle pubblicazioni sopra elencate. Nei protocolli che seguono ci si concentrerà invece su alcuni aspetti e tecniche di particolare importanza per gli obiettivi degli studi di MS3. Le indicazioni contenute nei protocolli, salvo quelle relative allo scambio dati e alla documentazione richiesta, non hanno carattere prescrittivo: il professionista incaricato potrà infatti scegliere le procedure più idonee alla specifica situazione in cui si trova ad operare, fermo restando il raggiungimento di uno standard minimo di qualità. Si tratta quindi piuttosto di una serie di indicazioni volte a:

- evidenziare possibili criticità;
- delineare procedure rispettose dello stato dell'arte e ridurre possibili margini di errore nella pianificazione delle indagini e nella esecuzione ed interpretazione delle misure;
- ottimizzare il coordinamento complessivo delle attività con l'obiettivo di garantire un buon livello di omogeneità dei risultati ottenuti.

L'utilizzo di metodologie differenti da quelle di seguito indicate può comunque essere concordato con il GdL CNR IGAG, che ha in ogni caso la facoltà di verificare la qualità ed affidabilità degli studi realizzati.

² <http://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/11-microzonazione-sismica-per-la-ricostruzione-dell-area-aquilana>

³ http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB28083

⁴ <http://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/10-linee-guida-per-la-gestione-del-territorio-interessato-da-faglie-attive-e-capaci>

⁵ <http://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/13-linee-guida-per-la-gestione-del-territorio-in-aree-interessate-da-instabilita-di-versante-cosismiche>

⁶ <http://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/14-linee-guida-per-la-gestione-del-territorio-in-aree-interessate-da-fenomeni-di-liquefazione>

2. Indagini Geologiche e Geomorfologiche

2.1 Generalità su Modello geologico e Carta Geologico-Tecnica

Lo scopo fondamentale delle indagini geologiche e geomorfologiche per la Microzonazione Sismica (MS) è la ricostruzione di un “Modello Geologico” del sottosuolo, che comprenda nella terza dimensione la suddivisione del territorio in zone omogenee con caratteristiche geologico-tecniche peculiari (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica; MOPS), facendo così da riferimento per tutte le elaborazioni successive. Il modello geologico non solo definisce e riassume i vincoli essenziali della caratterizzazione in prospettiva sismica dell’assetto geologico e dei lineamenti topografici dell’area di studio nel suo complesso, ma costituisce lo strumento da cui desumere i caratteri specifici del sottosuolo associato alle singole MOPS, da convertire in modello geotecnico da utilizzare per le simulazioni numeriche della risposta sismica locale. Dal modello geologico deve essere possibile desumere la localizzazione delle discontinuità litologiche cui associare contrasti di impedenza sismica potenzialmente responsabili di modifiche del moto del suolo in caso di forti terremoti. Il modello va rappresentato utilizzando la suddivisione dei terreni in unità geologico-tecniche, così come descritte negli Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica e negli Standard di rappresentazione per la redazione della Carta Geologico-Tecnica che, corredata necessariamente da un adeguato numero di profili geologico-tecnici, costituisce l’elaborato cartografico di riferimento dei dati geologici e geomorfologici da cui estrapolare la tipologia e l’estensione delle microzone e le relative geometrie di sottosuolo.

Il modello geologico del sottosuolo ai fini degli studi di MS deve essere il risultato di indagini geologiche e geomorfologiche di terreno, mediante l’esecuzione di rilievi originali e la revisione di quelli esistenti, integrati dalla interpretazione di un numero adeguato di indagini dirette ed indirette di sottosuolo ed eventualmente completati da procedure speditive di campagna per la caratterizzazione geomeccanica dei materiali. La risoluzione del modello geologico deve essere adeguata al livello di approfondimento degli studi di microzonazione eseguiti e la sua affidabilità è funzione diretta del grado di dettaglio delle indagini geologiche e morfologiche condotte e della disponibilità di risultati di indagini dirette e prove geotecniche a supporto delle indagini di terreno. Nella fase iniziale delle attività di Microzonazione Sismica, ovvero per la redazione di carte di Microzonazione Sismica di Livello 1 (MS1), il modello geologico deve essere funzionale alla individuazione di zone a comportamento omogeneo in prospettiva sismica (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica; MOPS), definite sulla base dei caratteri litologici e delle sequenze della stratigrafia di sottosuolo, nella quale figurino la tipologia di substrato geologico e delle sovrastanti coperture, con relativi spessori. Le stratigrafie delle singole MOPS di livello 1 costituiscono una ipotesi preliminare di modello di sottosuolo, con identificazione e localizzazione delle unità interpretabili come bedrock sismico ($V_s > 800$ m/s), assimilabile al substrato di riferimento NTC, e le profondità dei contrasti di impedenza sismica presenti nel sottosuolo. In pratica il modello geologico della MS1 individua preliminarmente gli oggetti del sottosuolo da caratterizzare nelle fasi successive, fornendo uno strumento indispensabile per orientare le campagne di indagine per gli studi di MS3.

Nelle fasi di studio di livello 3, il modello geologico deve contenere tutti gli elementi di ulteriore conoscenza, acquisiti mediante le analisi specifiche condotte appositamente (prove geofisiche, prove in foro), e si deve concretizzare in un modello geologico-tecnico 1D o 2D, in funzione delle condizioni di sottosuolo, dove siano riportati i valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) assegnato ai diversi orizzonti stratigrafici, in maniera da essere facilmente convertibile in un modello geotecnico da utilizzare per le modellazioni delle amplificazioni di sito. Pertanto, le indagini geologiche e geomorfologiche di terzo livello hanno il duplice obiettivo di affinare ulteriormente il modello geologico di sottosuolo proposto negli studi di primo livello, fornendo i vincoli geologici necessari per le procedure di elaborazione ed interpretazione dei dati di misura geofisici (es. procedure di inversione numerica per la restituzione dei profili di V_s nelle singole MOPS), e di valutare la reale rappresentatività dei dati dei sondaggi e delle prove in foro. Il quadro di conoscenze va completato con la contestualizzazione dei risultati delle prove di laboratorio condotte sui campioni raccolti in profondità, nell'ottica della definizione del comportamento dinamico delle diverse tipologie dei terreni presenti nel modello geotecnico, indispensabile nella fase di modellazione numerica.

Il modello geologico sarà sviluppato e dovrà essere coerente con le unità riconosciute e rappresentate nella Carta Geologico-Tecnica che costituisce il documento cartografico in cui sono riversate tutte le informazioni desunte dai rilievi geologici e geomorfologici di superficie relative ai terreni affioranti nelle aree soggette a studi di microzonazione e al loro assetto giaciturale. I contenuti della Carta Geologico-Tecnica devono necessariamente essere coerenti, a loro volta, con le informazioni di sottosuolo derivanti da indagini dirette disponibili, che saranno interpretate attribuendo i terreni attraversati nelle verticali dei sondaggi alle diverse unità geologico-tecniche rappresentate in pianta, costituendo così un riferimento univoco per l'interpretazione delle misure geofisiche 1D/2D. I sondaggi interpretati in termini di unità geologico-tecniche costituiranno i nodi di riferimento per la stesura della griglia di profili geologici, di cui si parlerà estesamente in un paragrafo successivo.

Nella valutazione complessiva della qualità dei dati geologici e geomorfologici pregressi utilizzabili a supporto degli studi di microzonazione, sia di primo livello che di quelli successivi, si devono tenere in considerazione i seguenti aspetti:

1. l'adeguatezza della scala di raccolta e rappresentazione dei dati geologici e morfologici di terreno;
2. l'anno di produzione ed eventuale pubblicazione del dato cartografico;
3. affinità dello studio di provenienza dei dati cartografici utilizzati con gli scopi della microzonazione sismica.

La valutazione dell'adeguatezza della base geologica adottata deve tenere conto anche della quantità e della distribuzione dei dati disponibili per caratterizzare le differenti aree da microzonare. Una stima semiquantitativa per assicurare la qualità degli studi può essere dedotta dai valori assunti da 6 parametri, ognuno dei quali rappresentato da 3 distinti indicatori inseriti nella

matrice proposta in *Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica* per la determinazione della qualità della carta di MS di livello 1, di seguito riportata:

Tab. 1 – Parametri, indicatori e loro valutazione per la determinazione della qualità della carta di MS di livello 1.

Parametro	Peso Parametro	Indicatore (peso=0.33)	Valutazione indicatore (punteggio)			
			Nulla (0)	Bassa (0.33)	Media (0.66)	Alta (1)
Carta geologico-tecnica	1	Anno rilevamento	No data	< 2000		> 2000
		Progetto	No data	Altro	Allegato piano urbanistico	Ad hoc
		Scala rilevamento	No data	50.000-26.000	25.000-11.000	10.000-2.000
Sondaggi a distruzione	0.50	Numero di sondaggi a distruzione	No data	1-5	6-10	>10
		Percentuale di celle occupate da sondaggi a distruzione	No data	1-33%	34-66%	>66%
		Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Sondaggi a carotaggio continuo	1	Numero di sondaggi a carotaggio	No data	1-5	6-10	>10
		Percentuale di celle occupate da sondaggi a carotaggio	No data	1-33%	34-66%	>66%
		Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Indagini geofisiche	0.50	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
		Percentuale di celle occupate da indagini	No data	1-33%	34-66%	>66%
		Percentuale indagini che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Prove geotecniche in situ (Prove Penetrometriche, ecc.) e di laboratorio	0.25	Numero di prove	No data	1-5	6-10	>10
		Percentuale di celle occupate da prove	No data	1-33%	34-66%	>66%
		Percentuale prove che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Misure delle frequenze del sito	0.75	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
		Percentuale di celle occupate da misure	No data	1-33%	34-66%	>66%
		Classe di affidabilità misure (Albarelli et alii)*	No data	Classe A < 33%	Classe A 34-66%	Classe A >66%

I valori, laddove specificato, si riferiscono a celle quadrate di dimensioni di lato pari a 250 m, in cui viene suddivisa l'intera area da microzonare.

Dai parametri contenuti nella matrice è possibile dedurre un Fattore di Qualità (FQ), espresso in percentuale e definito dalla formula:

$$FQ = \left[\frac{100}{\sum_{i=1}^I P_i} \right] \sum_{i=1}^I P_i \left(\sum_{j=1}^{J_i} \frac{S_{ij}}{J_i} \right) = \left[\frac{100}{4} \right] \sum_{i=1}^I P_i \left(\sum_{j=1}^{J_i} \frac{S_{ij}}{J_i} \right)$$

I=Numero di Parametri

J_i=Numero di Indicatori relativi al parametro i-mo

P_i = peso del Parametro i-mo

S_{ij}=Punteggio relativo all'Indicatore j-mo del Parametro i-mo

FQ = Fattore di qualità (%)

Appare evidente che per assicurare la qualità degli studi di livello 3 è necessario che i dati geologici e geomorfologici di terreno, sia pregressi che originali, insieme alla disponibilità di dati di sottosuolo opportunamente distribuiti, tendano ad un punteggio superiore al 75%, che designa la prima classe di qualità degli studi di MS1. Appare altresì evidente che tale risultato non può in alcun modo essere raggiunto se la Carta Geologico-Tecnica non sia stata ottenuta mediante l'utilizzo di dati geologici e geomorfologici di terreno aggiornati (post 2000), raccolti ad una scala adeguata ($\geq 1/10.000$) e mirati specificamente allo studio di microzonazione sismica. È quindi necessario che la Carta Geologico-Tecnica faccia riferimento a rilievi geologici e geomorfologici originali di dettaglio, almeno per quelle aree in cui gli studi pregressi non garantiscano i requisiti di qualità richiesti.

Una volta assicurata la qualità della Carta Geologico-Tecnica, il quadro dei dati geologici di sottosuolo, tra quelli pregressi e di nuova acquisizione, devono garantire il raggiungimento dei minimi di qualità, contribuendo almeno per 2/3 del FQ complessivo. Questo obiettivo deve quindi guidare la progettazione del piano delle indagini previste per l'esecuzione del terzo livello di approfondimento.

La cartografia geologica e geomorfologica di base da utilizzare per redazione della Carta Geologico-Tecnica dovrà contenere gli elementi necessari e sufficienti per una ricostruzione 2D e 3D dei limiti tra le diverse unità geologico-tecniche presenti nel sottosuolo. Nella realizzazione delle cartografie di base o nella rielaborazione di dati cartografici già esistenti, sono della massima importanza quattro elementi chiave:

- 1) la determinazione dei caratteri litologici delle unità geologiche affioranti e presenti nel sottosuolo, per una loro univoca attribuzione alle diverse categorie di unità geologico-tecniche di copertura, con la determinazione dell'ambiente genetico-deposizionale, o del substrato geologico previste negli indirizzi e criteri e negli standard di rappresentazione;
- 2) l'identificazione delle unità con caratteristiche di bedrock sismico ($V_s > 800$ m/s), assimilabile al substrato di riferimento NTC, nelle quali il moto sismico è assunto noto a partire da stime a carattere regionale;
- 3) la determinazione geometrica (sia in pianta che in sezione) delle interfacce rappresentative di possibili contrasti di impedenza sismica, all'interno delle successioni delle unità di copertura, al contatto coperture-substrato geologico e al tetto delle unità con comportamento da substrato sismico di riferimento, potenzialmente responsabili di fenomeni di amplificazione locale del moto sismico;
- 4) l'identificazione delle aree soggette a potenziali fenomeni d'instabilità e deformazione permanente indotti dallo scuotimento sismico (frane, fenomeni di liquefazione, cedimenti differenziali e fagliazione superficiale).

Il raggiungimento di questi obiettivi presuppone che la raccolta dei dati di terreno preveda:

- i) la ricostruzione dell'assetto geometrico delle unità del substrato geologico, con la valutazione dello stato di integrità o meno degli ammassi rocciosi; ii) la mappatura dettagliata dei depositi di copertura recenti e la loro suddivisione sulla base dei caratteri granulometrici e della posizione e significato nell'ambito del paesaggio; iii) l'identificazione delle morfologie superficiali indicative di

fenomeni di instabilità; iv) l'identificazione di elementi geomorfologici di rilevanza ai fini di processi amplificativi di sito.

Nel caso di studi di livello avanzato (MS di livello 2 e 3), si procederà partendo dalla revisione critica della cartografia e del modello geologico di primo livello. Questa fase si baserà sull'analisi critica degli elementi costitutivi di tale modello, ovvero la: a) definizione di substrato, b) definizione di Terreni di Copertura, c) verifica e eventuale integrazione nella MS3 delle superfici limite delle Unità Geologiche corrispondenti al Substrato Geologico e ai Terreni di Copertura d) verifica e eventuale integrazione in MS3 degli elementi geomorfologici superficiali e sepolti influenti sulla pericolosità sismica, e) verifica ed eventuale integrazione in MS3 delle geometrie e delle caratteristiche degli elementi di instabilità relativi a movimenti gravitativi, fenomeni di liquefazione/compattazione e subsidenza, presenza di faglie attive e capaci. Le integrazioni con dati originali dovranno essere ispirate al raggiungimento di livelli del FQ, come specificato in precedenza. Nel caso di aree di studio di piccola estensione areale, va comunque garantito che i rilievi di terreno utilizzabili allo scopo della microzonazione e rappresentati nella Carta Geologico-Tecnica per la MS e nelle relative sezioni coprano "areali significativi", ossia aree con estensione tale da illustrare esaurientemente le situazioni geologiche (stratigrafia e geometria dei corpi geologici) e morfologiche locali condizionanti la risposta sismica, secondo le modalità indicate nel paragrafo 3.4.2 delle istruzioni tecniche degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS). L'estensione dell'"areale significativo" deve inoltre tenere conto, includendole, le estensioni delle tracce delle sezioni geologiche da utilizzare ai fini delle modellazioni 2D, di cui si parlerà estesamente nei paragrafi successivi.

Di seguito sono brevemente definiti gli elementi indispensabili per ricostruire l'assetto geometrico tridimensionale degli orizzonti risonanti del sottosuolo ed evidenziate le possibili criticità da affrontare nel corso della realizzazione del Modello Geologico di riferimento degli studi di MS.

2.2 Il substrato

Un Modello Geologico ai fini della MS si basa sulla suddivisione di ordine principale tra Unità Geologiche corrispondenti al Substrato Geologico e quelle riferibili ai Terreni di Copertura, con la ricostruzione quanto più precisa possibile della geometria della superficie d'interfaccia tra gli orizzonti litologici assegnati alle due categorie. In prima approssimazione tale superficie dovrebbe corrispondere al contatto tra le unità assimilabili al "substrato di riferimento" delle NTC e i terreni superficiali a bassa velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio (V_s), cui si associa il contrasto d'impedenza sismica principale che condiziona in maniera predominante la risposta sismica locale. L'individuazione di tale superficie è indispensabile nella conversione del modello geologico in modello geotecnico e nelle successive fasi di modellazione. Nella realizzazione del modello geologico è quindi necessario rendere la suddivisione tra Substrato e Coperture, basata su dati geologici e geomorfologici di base, funzionale alle specificità e alle finalità ultime degli studi di microzonazione, attribuendo alle due categorie un significato essenzialmente geologico-tecnico. In particolare, come ben specificato in Indirizzi e Criteri e negli Standard di rappresentazione, possono

rientrare tra le unità di copertura solo i terreni sciolti, anche se fortemente addensamenti, e argille non consolidate, mentre tutte le tipologie litologiche compatte vanno catalogate utilizzando le codifiche previste per le unità appartenenti al Substrato Geologico. Pertanto, la suddivisione Substrato/Coperture non coincide necessariamente con quella normalmente riportata nelle carte geomorfologiche di base, dove la suddivisione tra “substrato” e “formazioni superficiali” è indipendente dal grado di cementazione ed età, ma dipende solo da considerazioni sull’evoluzione morfologica di una determinata area. Non esiste neanche una corrispondenza immediata tra unità di ambiente marino ed unità di ambiente continentale desumibile dalle carte geologiche, ma deve essere necessariamente operata, in corso di realizzazione degli studi, sulla base delle definizioni di seguito riportate.

Substrato Geologico (SG)

Ai fini degli studi di microzonazione sismica vanno attribuiti al Substrato Geologico (SG), utilizzando gli specifici codici previsti dagli Standard, tutti gli orizzonti o corpi rocciosi compatti affioranti in superficie o presenti in sottosuolo, in quanto ricoperti da sedimenti superficiali sciolti, che costituiscono invece i terreni di copertura (TC). Rientrano tra le tipologie di rocce ascrivibili al SG le rocce cristalline di origine magmatica plutonica e metamorfica, le rocce sedimentarie delle successioni meso-cenozoiche, gran parte delle rocce vulcaniche. Sono altresì da attribuire al SG tutti i terreni di età quaternaria che abbiano subito compattazione per processi diagenetici, prima della loro esumazione ed esposizione in superficie o le formazioni superficiali recenti che, sebbene si siano sviluppate in connessione con l’evoluzione del paesaggio, risultano oggi ben cementate.

Le unità del SG riportate nella Carta Geologico-Tecnica e nei relativi profili non sono necessariamente assimilabili al Substrato di Riferimento previsto dalle norme NTC ($V_s > 800$ m/s) o “Substrato sismico”, del quale viene richiesta l’individuazione nel Modello Geologico per gli studi di MS3. Le rocce che costituiscono il SG possono, almeno nei livelli superficiali, non avere, infatti, il requisito di rigidità richiesto per essere ritenute substrato sismico, a causa dei caratteri litologici originari o per fenomeni di alterazione e/o fatturazione che, in questo caso, vanno comunque segnalati utilizzando i codici specifici previsti dagli standard con l’indicazione di Substrato Alterato (SF, ad es. per fratturazione o deformazione tettonica, alterazione meteorica ecc.). Gli attuali standard non prevedono comunque una distinzione in termini di rappresentazione nella Carta Geologico-Tecnica e nei relativi profili, tra le unità di substrato sulla base del loro comportamento sismico, in termini di velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio (V_s). Tale distinzione va quindi esplicitata direttamente nel modello geologico, associando alle geometrie degli orizzonti di sottosuolo i valori di V_s dedotti dalle inversioni dei risultati delle analisi geofisiche. Nel caso in cui il substrato geologico comprenda terreni superficiali con $V_s < 800$ m/s (di seguito indicato come substrato geologico “lento”), molto frequente in aree di affioramento di successioni argilloso-sabbiose di età post-Tortoniana, nei profili geologico-tecnici non è immediatamente visualizzata la superficie di contrasto d’impedenza principale tra “substrato sismico” e terreni di copertura, necessaria a completare il modello geologico da convertire in modello geotecnico. In questi casi la profondità della superficie deve essere determinata mediante l’utilizzo dei dati geofisici che comunque andranno contestualizzati in termini di modello geologico. In particolare, va verificato se la profondità della superficie che separa il substrato geologico “lento” da quello assimilabile al

substrato “sismico” di riferimento, ricavata dalle inversioni dei dati geofisici, si attesti in corrispondenza di un determinato limite geologico, eventualmente rappresentabile nei profili geologico-tecnici. Un caso classico potrebbe essere un contatto discordante alla base di successioni marine recenti, poco consolidate, poggianti su un substrato antico fortemente diagenizzato. Nel caso invece di un progressivo raggiungimento delle velocità da “bedrock sismico” all’interno della medesima formazione, la profondità va determinata puntualmente senza alcuna possibilità di associarla ad elementi visualizzabili indipendentemente nel modello. Nella conversione del modello geologico di sottosuolo in quello geotecnico, l’integrazione del dato geologico con quello geofisico è inoltre necessaria per verificare l’esistenza effettiva di significativi contrasti di impedenza al contatto tra le unità del SG “lento” e i sovrastanti terreni di copertura, in corrispondenza dell’interfaccia tra substrato e terreni di copertura. Considerato che anche questi ultimi, in caso di particolari condizioni di cementazione e di miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità, potrebbero costituire un efficiente substrato sismico, è raccomandabile che già nella formulazione del Modello Geologico di sottosuolo realizzato in MS1 o comunque in fase di pianificazione delle indagini per gli studi di MS3, il geologo evidenzi ipotesi di previsione del comportamento atteso in termini di Vs delle diverse unità classificate sia come TC sia come SG. Le indagini condotte durante gli studi di MS3 devono infatti integrare adeguatamente le indagini e i dati già esistenti (MS1 e indagini di nuova acquisizione) per vincolare in maniera esaustiva il comportamento sismico dei diversi orizzonti presenti nel modello geologico finale, a prescindere dalla loro assegnazione nella Carta Geologico Tecnica. A completamento delle indagini per la MS3, l’obiettivo principale della revisione del Modello Geologico realizzato in MS1 dovrà consistere nella indicazione di quali unità litostratigrafiche rappresentate nella cartografia geologico-morfologica di base possano essere convertite in unità geologico-tecniche assimilabili, per il loro comportamento, al Substrato di Riferimento. Questo obiettivo primario deve guidare la progettazione del piano delle indagini, con la selezione delle tipologie ed ubicazioni delle indagini geotecniche e geofisiche più opportune, per ottenere i dati analitici a supporto della stima qualitativa della rigidità dei materiali fornita in fase di realizzazione della MS1.

In sintesi, nella realizzazione della carta geologico-morfologica di base, per le unità da assegnare al SG, dovranno essere definite caratteristiche fondamentali quali:

- litologia;
- età assoluta o relativa e, dove è possibile, correlazione con formazioni o altre unità cronostatigrafiche già descritte in letteratura;
- caratteristiche fisiche: colore, tessitura, tipo di stratificazione, resistenza (stimata a partire da indagini speditive quali la sclerometria), variabilità laterali e verticali;
- distribuzione, grado ed estensione delle zone intensamente fratturate;
- presenza di eventuali discordanze.

Con il passaggio alla Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica (CGT_MS) dovranno essere individuate, all’interno delle unità litostratigrafiche definite nella Cartografia Geologico-Geomorfologica di base, le diverse unità litotecniche attribuibili al SG contraddistinte dalle relative caratteristiche fisico-meccaniche.

In particolare, i parametri specifici necessari a caratterizzare gli ammassi rocciosi del substrato, possono essere riassunti come segue:

- assetti giaciturali, con particolare attenzione al rapporto stratificazione/versante;
- spessore degli strati;
- individuazione e stima dello spessore delle unità pelitico-marnose, con particolare attenzione agli ammassi caotici che possono anche contenere olistoliti di altri litotipi;
- nelle alternanze di litotipi, rapporto tra peliti/marne e altri litotipi, con particolare attenzione ai casi in cui le peliti/marne siano prevalenti;
- nel caso di rocce granulari, definizione del grado di cementazione e, per brecce e conglomerati, rapporto clasti-matrice;
- grado di alterazione e di fratturazione dell'ammasso roccioso, con particolare riguardo alle rocce di faglia e fasce cataclastiche.

Substrato Sismico (SS)

Il Substrato Sismico (SS) è individuabile negli ammassi rocciosi o terreni molto rigidi, caratterizzati da una velocità delle onde di taglio $V_s \geq 800$ m/s. Il substrato si intende affiorante quando direttamente esposto in superficie o ricoperto da uno strato superficiale di alterazione (alterazione meteorica, pedologica fisica e chimica) o copertura di spessore inferiore ai 3 m. Un SS affiorante, in condizioni topografiche sub-pianeggianti può essere assimilato alla categoria di terreno di tipo A della NTC, definito convenzionalmente dalle seguenti condizioni:

- V_{S30} (velocità equivalente delle onde S nei primi 30 metri di sottosuolo) superiore a 800 m/s;
- velocità delle onde S regolarmente crescente con la profondità.

Quando in corrispondenza di un affioramento di materiali rigidi che soddisfano i requisiti suddetti e dove non sono rilevati effetti locali di amplificazione o modificazioni in frequenza del moto sismico rispetto a quello misurato o stimato in profondità, si parla di *Substrato di Riferimento*; si presuppone quindi che al di sotto di questo non esistano forti contrasti di impedenza sismica e che i materiali che lo compongono siano rigidi ed abbiano un comportamento meccanico di tipo lineare (mezzo continuo con comportamento visco-elastico).

È pertanto sempre opportuno verificare che i caratteri da SS delle unità affioranti si conservino anche in profondità, con un profilo di velocità stabilmente al di sopra della V_s limite di 800 m/s. La presenza in sottosuolo di inversioni di velocità, dovuta all'appoggio dei terreni affioranti "veloci" su un substrato "lento", potrebbero infatti comportare alterazioni del moto del suolo in superficie che vanno opportunamente modellate sulla base di un modello geologico che rappresenti in maniera adeguata la geometria della superficie di interfaccia tra le unità di substrato a differente comportamento. Paradossalmente, il comportamento da "bedrock sismico" potrebbe caratterizzare anche alcuni terreni di copertura. In questo caso, le inversioni di velocità potrebbero essere anche di notevole entità e confinate nei primi metri del sottosuolo.

Nel caso in cui non affiori, il SS è costituito da unità geologiche di substrato, non alterate e non deformate pervasivamente, alla base di terreni meno rigidi o di sedimenti sciolti, caratterizzate da una velocità delle onde di taglio $V_s \geq 800$ m/s.

In ogni caso, il substrato sismico ed il substrato geologico in generale non va rappresentato come un “unicum”, anzi è necessario caratterizzare al meglio l’assetto geometrico tridimensionale degli orizzonti risonanti, individuando con cura i limiti stratigrafici o tettonici, siano questi ritenuti certi o incerti, tra le diverse unità e definendo il loro assetto giaciturale. Stessa cura va prestata nella ricostruzione delle tracce in superficie e della prosecuzione in profondità dei contatti tettonici e delle faglie, dei quali è utile conoscere anche i caratteri cinematici, mentre è obbligatorio valutarne lo stato di attività per il riconoscimento di eventuali faglie attive e capaci. È inoltre fondamentale conoscere l’assetto geomorfologico e la storia evolutiva delle forme del paesaggio per comprenderne le principali criticità in termini di azione degli agenti morfogenetici ed individuare le aree soggette a fenomeni di instabilità.

2.3 I Terreni di Copertura (TC)

I Terreni di Copertura (TC) comprendono gli orizzonti superficiali costituiti da rocce sciolte, a diverso grado di addensamento, in genere a bassa rigidità (in letteratura trattati spesso anche con il termine generico di “coperture”) di età prevalentemente quaternaria la cui evoluzione è legata ai diversi stadi di evoluzione e modellamento del paesaggio. I terreni di copertura possono essere associati a processi legati all’azione dei differenti agenti morfogenetici quali acque correnti superficiali, gravità, carsismo, degradazione meteorica etc. Questi depositi generalmente poggiano in netta discordanza sui terreni appartenenti al Substrato geologico (SG), e sono caratterizzati da frequenti variazioni, verticali e laterali, di spessore, litologia e composizione. Alcuni di questi depositi sono associati a evidenti forme superficiali (es. conoide alluvionale, falda detritica ecc.) che ne designano l’origine e la geometria complessiva. In tali casi le variazioni di spessore e di litologia possono essere messe in relazione alle diverse posizioni dei depositi nell’ambito della forma complessiva. In altri casi, le variazioni di spessore e delle litofacies sono da imputare alla presenza di morfologie sepolte colmate dai depositi stessi e delle quali non vi è alcuna evidenza superficiali. In tali condizioni, la variabilità laterale deve necessariamente essere messa in evidenza da un numero adeguato di dati di sottosuolo. Pertanto, nel corso del rilevamento dei TC, massima cura dovrà essere posta nella ricostruzione della superficie di interfaccia con il Substrato, evidenziando eventuali irregolarità dovute a paleotopografie sepolte nelle quali possono svilupparsi effetti amplificativi, dovuti sia alle forti variazioni laterali che alla geometria irregolare dell’interfaccia SG/TC (o SS/TC), da riprodurre con modelli 2D.

Le Unità e/o le Formazioni classificate come TC dovranno essere caratterizzate ed analizzate in funzione della loro tipologia, del contesto deposizionale, dell’assetto stratigrafico, dello spessore etc. A tal proposito ci si deve assicurare che gli studi di MS1 forniscano una adeguata caratterizzazione delle coperture tale da evidenziare l’eventuale (possibile) presenza al loro interno di strati con significativi contrasti di impedenza sismica (che possono dar luogo a fenomeni di amplificazione in corrispondenza di determinate frequenze) che nelle ulteriori fasi di indagine previste nello studio di MS di livello 3, potranno essere individuati e caratterizzati con maggiore precisione. In caso contrario è necessaria una integrazione preventiva all’esecuzione degli studi di MS3.

Si ricorda che per i terreni di copertura non è prevista una categoria di alternanza di litotipi e pertanto nelle successioni verticali vanno evidenziati e differenziati dagli altri solo gli orizzonti litologici omogenei che raggiungano almeno uno spessore di almeno 3 m. In caso contrario, in presenza di una alternanza di livelli omogenei con spessori inferiori o se esistono intercalazioni di spessore inferiore ai 3 m all'interno di una sequenza omogenea, si classifica la formazione designandola sulla base della litologia prevalente. Variazioni laterali dei rapporti reciproci tra litologie in alternanza potrebbero quindi produrre una variazione di designazione all'interno del medesimo corpo sedimentario o orizzonte litostratigrafico.

Particolare cura dovrà essere dedicata all'analisi dei caratteri geologici e geotecnici delle tipologie di TC suscettibili di fenomeni di liquefazione o di subsidenza legata alla attività sismica.

La caratterizzazione dei TC deve necessariamente essere condotta attraverso la raccolta di dati riguardanti la natura e la disposizione dei litotipi presenti, con l'individuazione di:

- materiali a grana grossa, definendone la tessitura (anche mista), il grado di cementazione e lo stato di addensamento;
- materiali a grana fina (limi, argille), indicandone la consistenza;
- depositi torbosi o fortemente organici, definendone eventuali elementi utili alla loro caratterizzazione;
- terreni di origine antropica (es., terreni di riporto, discariche, terrapieni, ecc.), definendone eventuali elementi utili alla loro caratterizzazione;
- spessore dei diversi strati;
- variabilità laterale e verticale dei terreni anche attraverso la definizione del principale ambiente deposizionale.

2.4 Elementi morfologici superficiali e sepolti pertinenti la pericolosità sismica

Il confronto con il professionista incaricato riguardo alle caratteristiche morfologiche dell'area dovrà portare alla formulazione di ipotesi relative alla possibilità di deformazioni superficiali permanenti associate ad elementi che possano generare movimenti sismici (es. faglie capaci), oppure ad elementi morfologici suscettibili di incremento della relativa pericolosità in relazione a movimenti sismici; in questo senso si pensi agli elementi tettonici, alle cavità sotterranee anche di origine antropica ed alle varie tipologie di scarpate.

In particolare, per gli Elementi tettonico-strutturali, particolare attenzione deve essere rivolta a:

- osservazioni strutturali di dettaglio degli specchi di faglia che interessano le rocce del substrato, anche per prevederne l'andamento in profondità;
- osservazione delle evidenze morfologiche di scarpate di probabile origine tettonica e di dislocazioni di superfici erosive o di corpi deposizionali quaternari;
- rilevamento del maggior numero di dati che riguardano faglie attive e capaci, sia da letteratura sia ex-novo, basandosi, ad esempio, sulle evidenze di rotture cosismiche associabili ad eventi storici.

In particolare, per gli elementi geomorfologici, particolare attenzione deve essere data ai seguenti aspetti:

- presenza di morfologie caratteristiche e suscettibili di amplificazioni quali scarpate, creste e picchi, raccomandando la loro classificazione secondo criteri morfogenetici (agente responsabile del modellamento), morfodinamici (stato di attività) e morfometrici (dimensioni);
- movimenti franosi che dovranno essere distinti per tipologia prevalente di movimento e stato di attività (vedi anche paragrafo successivo);
- cavità e sprofondamenti di origine naturale;
- forme e cavità legate all'attività antropica.

2.5 Instabilità di versante e liquefazione

Per quanto attiene alle tematiche idrauliche e idrogeologiche, il confronto con il professionista incaricato dovrà vertere principalmente sulla possibilità che l'area possa essere interessata da frane, in particolare da flussi detritici o *debris flow* (per i quali andrà considerata una eventuale coincidenza tra le condizioni sismiche ed idrauliche che possano scatenare tali fenomeni) o da possibili effetti di liquefazione. In questo senso la formazione e la consulenza sarà orientata alla verifica delle tipologie di frana segnalate nell'area e riportate nelle cartografie e nelle banche dati ufficiali disponibili, così come alla eventuale necessità di eseguire indagini e/o studi di maggiore dettaglio ove si ritenesse indispensabile (ed anche ragionevolmente ed economicamente possibile) il recupero dei terreni interessati dai fenomeni franosi.

Indicazioni sulle modalità di rilevamento geologico e geotecnico di coperture, ammassi rocciosi o frane già esistenti, potenzialmente instabili per effetto di azioni sismiche, nonché sui prodotti cartografici nei quali dovranno essere indicate le instabilità rilevate, saranno forniti in maggior dettaglio nel Capitolo successivo. Va sottolineato che anche per zone soggette a fenomeni di instabilità per liquefazione (con le limitazioni descritte in precedenza), allo scopo di consentire la modellazione della risposta sismica locale secondo le indicazioni riportate nei capitoli 6 e 7, è necessario definire apposite colonne stratigrafiche rappresentative che dovranno essere riportate nella relazione geologico tecnica a corredo della MS3.

Per quanto riguarda la cartografia e la caratterizzazione dei versanti soggetti a fenomeni gravitativi, questi ultimi andranno approfonditi:

- raccogliendo le informazioni reperite negli archivi esistenti sulla tematica di interesse (es. IFFI, PAI, cartografie geologico-geomorfologiche esistenti, Piani Regolatori e Strutturali etc.);
- analizzando criticamente le geometrie, le tipologie e lo stato di attività;
- effettuando, dove ritenuto necessario, rilievi di campagna *ex-novo* per determinare le geometrie corrette e le forme associate;
- cartografando le forme associate, sia lineari sia puntuali, utili a definire il tipo prevalente di movimento e lo stato di attività, quali le scarpate di frana principali e secondarie, la presenza di gradini, fessurazioni, contropendenze etc.;
- effettuando sezioni topografiche e geologiche speditive e di dettaglio per ipotizzare le principali geometrie e gli spessori coinvolti.

Nei casi più sensibili, si suggerisce infine un'analisi multi-temporale a partire dalle foto aeree più antiche (in genere, 1954) per valutarne i tassi di evoluzione e lo stato di attività.

A questo scopo si utilizzeranno anche le informazioni derivate dall'analisi del Modello Digitale del Terreno, nel dettaglio disponibile, suddividendo i fenomeni di instabilità in:

- Frane in roccia - La fenomenologia sarà definita tramite un'analisi strutturale delle giaciture evidenziando scivolamenti planari, di cunei 3D, ribaltamenti o crolli. Gli accumuli di frana osservabili dovranno essere rilevati associando una descrizione delle dimensioni dei blocchi e identificando, dove possibile, le aree sorgenti. Alla loro caratterizzazione si dovrà accompagnare la cartografia delle forme associate e, dove possibile, una stima speditiva di alcuni parametri degli ammassi rocciosi, quali orientazione, frequenza, estensione e tipo di discontinuità.
- Frane in terra - Dovranno essere identificati e mappati gli indicatori di instabilità di tipo geomorfologico, includendo effetti sulla componente antropica. Dovranno essere identificati e mappati fenomeni di instabilità già esistenti sia nel caso che essi siano inventariati in cataloghi (es. IFFI e PAI) sia nel caso che essi vengano osservati nel corso del rilevamento. Nel caso di flussi detritici (*debris flow*) dovranno essere rilevati i depositi e le aree di alimentazione degli stessi.

Per quanto riguarda la liquefazione, anche in questo caso indicazioni più dettagliate sono fornite nel capitolo 5.

Per la definizione e delimitazione delle Zone di Attenzione (ZA), delle Zone di Suscettibilità (ZS) e di Rispetto (ZR) riferite alle diverse tipologie di instabilità riconosciute da ICMS e nelle rispettive linee guida (ovvero frane, liquefazione, faglie attive e capaci), l'indirizzo condiviso è che i professionisti incaricati si occupino della sola perimetrazione delle ZA ad esclusione delle zone d'instabilità per liquefazione, per le quali bisognerà realizzare gli approfondimenti di livello 3 finalizzati alla perimetrazione delle ZS e ZR. In tal senso, indicazioni specifiche e criteri di identificazione, perimetrazione e cartografia delle ZA, ZS e ZR, sono fornite nel capitolo 5. Nel caso di aree a franosità diffusa (o DGPV – Deformazioni Gravitative Profonde di Versante) si suggerisce di sostituire le ZA_{FR} con una MOPS già a partire dalle carte di MS1.

2.6 Sezioni geologiche e geologico-litotecniche

Le sezioni geologiche e le sezioni geologico-tecniche, da esse derivate, costituiscono lo strumento per visualizzare il modello geologico di sottosuolo di riferimento in tutte le fasi degli studi di MS finalizzate alla determinazione della risposta sismica locale. Se la carta geologico-tecnica è il documento rappresentativo della distribuzione dei terreni in superficie, le sezioni geologiche devono invece rappresentare la distribuzione delle diverse unità nel sottosuolo, lungo transetti che siano effettivamente significativi per sintetizzare le caratteristiche locali dell'assetto geologico e geomorfologico. Una ottimale rappresentazione della variabilità 3D del sottosuolo viene garantita eseguendo una griglia di profili geologici, orientati parallelamente ed ortogonalmente ai lineamenti geologico-morfologici caratteristici, di forma adeguata a quella del contorno delle aree da

investigare, con maglia di dimensioni dipendenti dalla complessità del sottosuolo da modellizzare e, nel caso di studi di livello 3, dalle dimensioni della microzona. In ogni caso, la griglia di profili dovrà essere particolarmente concentrata sulle aree di maggiore interesse per le attività di MS. In particolare, è consigliabile l'utilizzo delle griglie di profili in ciascuna delle aree individuate per gli studi di MS, in cui ricadano gli abitati principali. Considerando i dati delle indagini svolte ai fini della MS, le sezioni geologiche possono essere tramutate in altrettanti profili geologico-tecnici, in cui i terreni del sottosuolo vengono differenziati e rappresentati in funzione dei loro caratteri fisico-meccanici in prospettiva della risposta sismica locale. Appare evidente che, una volta fissata, la griglia di profili geologici da eseguire può costituire un valido riferimento per pianificare la distribuzione sul territorio delle indagini rivolte a ricostruire i profili geologico-tecnici, mediante la definizione della geometria dell'interfaccia substrato-copertura e la distribuzione nel sottosuolo delle diverse tipologie delle coperture, con le relative Vs. I profili geologico-litotecnici costituiranno la base per la definizione dei modelli geotecnici da utilizzare nelle modellazioni 2D.

Per la modellazione numerica nella MS3 saranno scelte le sezioni geologiche-litotecniche più significative e rappresentative delle aree a maggiore criticità dal punto di vista della risposta sismica in superficie. Maggiori dettagli circa le modalità di realizzazione grafica delle sezioni vengono rimandate alla fase preliminare della "Modellazione della risposta sismica locale in configurazione 2D" descritta nel capitolo 7.

I criteri di tracciamento delle sezioni geologiche vengono di seguito riassunti:

- le sezioni dovranno attraversare i centri abitati per una porzione rappresentativa delle dimensioni del centro abitato stesso. Nel caso di centri abitati con distribuzione fortemente asimmetrica o di dimensioni notevoli potranno essere ubicate più sezioni rappresentative di dimensioni adeguate a rappresentare l'effettiva variabilità dell'assetto di sottosuolo;
- le dimensioni longitudinali delle sezioni scelte per l'analisi bidimensionali (2D) dovranno essere tali da minimizzare, in corrispondenza della zona del centro abitato, gli effetti delle riflessioni totali delle onde che incidono sulle frontiere laterali della modellazione bidimensionale. Per questo è importante estendere la sezione in modo tale che le frontiere laterali si trovino ad una distanza almeno pari alla dimensione del tratto in corrispondenza del centro abitato attraversato. In pratica, se la sezione attraversa un centro abitato per un tratto di lunghezza X, è opportuno che la sezione abbia una lunghezza pari a $X+X+X=3X$, con l'abitato posto al centro della sezione;
- le sezioni dovranno essere ubicate in modo da caratterizzare la massima eterogeneità in termini di Terreni di Copertura e Substrato del Modello Geologico al di sotto del centro abitato, ovvero le sezioni dovranno essere realizzate fino ad una profondità tale da intercettare il Substrato Sismico (se identificabile) o quello Geologico;
- se l'eterogeneità è approssimativamente 1D (successione di strati orizzontali o sub-orizzontali) le sezioni potranno essere più corte; altrimenti, in caso di forti eterogeneità laterali, con configurazioni 2D o 3D (es. contatti sepolti molto acclivi, presenza di scarpate verticali sepolte ecc.) sarà necessario ubicare le sezioni in modo tale da rappresentare al meglio anche tali eterogeneità;
- le sezioni dovranno essere ubicate tenendo conto delle possibili morfologie sepolte o delle morfologie superficiali (ad es. presenza di riempimenti vallivi, contatti bruschi con i versanti,

scarpate di terrazzo, scarpate strutturali etc.). Nel caso di valli sepolte caratterizzate da un rapporto $H/L > 1/4$ (con H profondità e L semi-larghezza della valle) potrebbe essere necessario estendere le sezioni oltre le estremità della valle per minimizzare gli effetti delle riflessioni laterali nella modellazione;

- nel caso di centri abitati posti su Terreni di Copertura che riempiono morfologie sepolte è raccomandabile, dove il contrasto laterale sia significativo e l'eterogeneità 2D e/o 3D attesa sia importante, tracciare le sezioni lateralmente fino ad intercettare il Substrato Sismico (si veda in proposito anche paragrafo 3.4.2 delle Istruzioni Tecniche degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica- ICMS).

È fortemente raccomandato proiettare, lungo i profili, le intersezioni dei limiti delle MOPS degli studi di MS1. Questa pratica costituisce uno strumento di enorme efficacia per controllare la congruenza tra dato geologico-tecnico ed estensione e caratterizzazione delle MOPS. L'estensione della MOPS non dipende esclusivamente dalle estensioni delle formazioni affioranti, ma spesso è il risultato dell'intersezione tra più livelli discontinui posti in posizione stratigrafica differente, ben visualizzabili nei profili geologico-tecnici. Alla stessa maniera, la caratterizzazione litostratigrafica delle MOPS è il risultato di una successione verticale che comprende terreni sepolti sotto la formazione affiorante la cui presenza, seppure comunque desumibile dalla Carta Geologico Tecnica e dai dati di sottosuolo, è immediatamente verificabile lungo i profili geologico-tecnici. In particolare, sarà facilmente verificabile:

- la correttezza dell'estensione delle MOPS lungo la direzione del profilo;
- la congruenza tra la litostratigrafia assegnata alla MOPS, sia in termini di litologie che di spessore, e quella rappresentata nel profilo;
- l'effettiva omogeneità laterale delle caratteristiche stratigrafiche delle singole MOPS;
- l'effettiva distinzione delle caratteristiche stratigrafiche tra MOPS adiacenti;
- la possibilità o meno di risolvere con una modellazione 1D, piuttosto che 2D, il comportamento della MOPS, in funzione della variabilità al suo interno.

3. Indagini geofisiche di superficie

3.1 Premessa

Le indagini geofisiche di superficie hanno i seguenti obiettivi:

- l'individuazione e la caratterizzazione di fenomeni di risonanza sismica potenzialmente rappresentativi di fenomeni di amplificazione del moto sismico;
- la ricostruzione del profilo di velocità delle onde S all'interno delle diverse MOPS ovvero della definizione dei valori di V_s da attribuire ai diversi corpi geologici presenti (sismostratigrafia); questa parametrizzazione va estesa anche alle zone instabili per liquefazione, per i quali saranno validi gli stessi modelli di risposta 1D o 2D delle MOPS stabili e suscettibili di amplificazione.

Accanto a questi due obiettivi principali, tecniche di prospezione di tipo geofisico possono anche contribuire al completamento ed alla validazione del modello geologico soprattutto per quanto riguarda le geometrie sepolte dei corpi geologici. Laddove questo secondo obiettivo viene raggiunto attraverso l'impiego di una molteplicità di approcci (sismica attiva in onde P, prospezione geoelettrica, ecc.), i primi e più importanti obiettivi sono raggiunti utilizzando solo alcune possibili procedure.

Per quanto riguarda la stima dei fenomeni di risonanza la tecnica è quella basata sulla misura dei rapporti spettrali medi del campo di vibrazioni ambientali (tecnica di Nakamura o HVSR). Per quanto riguarda invece la ricostruzione dei valori di V_s nel sottosuolo, sono di grande interesse sia i metodi basati sulla misura diretta delle onde di taglio (sismica a rifrazione in SH) sia quelli basati sulla stima della velocità di propagazione delle onde Superficiali sia in configurazione attiva (MASW) che passiva (ESAC, ReMi).

La scelta delle tecniche di indagine più appropriate alle diverse situazioni è a carico del professionista incaricato. Questi, in accordo col GdL del CNR IGAG, predispongono il piano delle indagini individuando nel contempo le tecniche geofisiche più opportune in funzione del modello geologico, dei dati di tipo geofisico già disponibili, della profondità di esplorazione richiesta, della strumentazione disponibile e dell'esperienza maturata. Nell'ambito di questo piano viene anche determinata la possibile localizzazione delle prove sismiche in foro (DH) previste per il territorio indagato.

3.2 La pianificazione delle indagini e l'uso del metodo dei rapporti spettrali (HVSR)

Per la pianificazione delle misure si suggerisce un approccio in due fasi.

La prima fase, di tipo esplorativo, è essenzialmente basata sull'esecuzione di misure di vibrazioni ambientali a stazione singola con la tecnica dei rapporti spettrali a integrazione delle misure eventualmente esistenti (per una descrizione di dettaglio del metodo HVSR si rimanda ai *Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica* già citati). Esito di questa campagna è la costruzione di una carta delle frequenze di picco della curva HVSR, in scala almeno 1:10000. Scopo di questa prima fase è supportare il modello geologico con una valutazione del

livello di omogeneità delle diverse MOPS (ed eventualmente delle aree instabili con le limitazioni descritte in precedenza) indeterminate su base geologica. Questa campagna fornirà una stima delle frequenze di risonanza che caratterizzano l'area esplorata mettendo in evidenza le situazioni dove sembrano esistere contrasti di impedenza maggiori e fornendo indicazioni di massima sulla profondità di questi contrasti. La scelta della densità e della distribuzione dei punti di misura dipenderà dal livello di eterogeneità messo in evidenza dal modello geologico. Comunque si suggerisce come minimo una copertura con distanze fra i punti di misura dell'ordine di 400-600 metri, con densità maggiori (200-300 m) laddove richiesto dalle specifiche situazioni. In questo genere di analisi potrebbe essere utile determinare le aree caratterizzate da frequenze di risonanza appartenenti ai tre diversi domini di frequenza indicati nel disciplinare come più rappresentativi ai fini degli studi di Microzonazione Sismica (2.0-10.0 Hz, 1.25-2.50 Hz e 0.91-1.43 Hz, corrispondenti ai tre intervalli di periodi 0.1-0.5s, 0.4-0.8s, 0.7-1.1s). Per una descrizione di protocolli sperimentali relativi alle misure HVSR si rimanda nuovamente alla pubblicazione *Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione* ed ai riferimenti in essa contenuti in quella pubblicazione. Qui si sottolineano soprattutto alcuni aspetti critici che l'operatore dovrà tenere in considerazione:

- si tratta di misure relative a grandezze osservabili (le vibrazioni ambientali) caratterizzate da ridotti valore di ampiezza: si dovrà quindi porre la massima attenzione nel garantire un buon accoppiamento dello strumento di misura (velocimetro tri-direzionale) con il terreno, alle condizioni ambientali durante la misura e al possibile influsso di sorgenti di disturbo;
- dato che le misure hanno come obiettivo la determinazione di proprietà medie del campo di vibrazioni ambientali, la scelta di una opportuna durata delle registrazioni è importante: si suggerisce una durata complessiva non inferiore a 20-30 minuti con una frequenza di campionamento superiore ai 100 cps;
- dato l'impatto assai significativo delle procedure di post-processing sui valori dei rapporti spettrali H/V, allo scopo di garantire una effettiva confrontabilità dei risultati ottenuti nella stessa area, si raccomanda la scelta di modalità di analisi (lisciamento, finestatura, rimozione dei transienti ecc.) omogenee; in particolare, si raccomanda l'impiego di procedure di lisciamento degli spettri su finestre mobili con passo dipendente dalla frequenza (p.es. Konno-Ohmachi con $b=40$, finestre triangolari con ampiezza pari al 5% della frequenza centrale, ecc.); l'eventuale rimozioni dei transienti va effettuata con cautela valutando il loro eventuale impatto sui risultati dell'analisi; quando gli spettri di ampiezza sono calcolati con un metodo di accumulo (stacking) dei valori ottenuti su sotto-finestre della serie campionata, si suggerisce per ciascuna finestra una dimensione temporale di 20-30 sec⁷ e comunque tale che il numero complessivo di finestre considerate per la stima finale (ovvero dopo l'eventuale rimozione dei transienti) non inferiore a 20⁸;

⁷ si ricorda che la dimensione della finestra limita il potere risolutivo dello spettro: in pratica, la minima differenza osservabile fra due armoniche dello spettro in frequenza è pari all'inverso della dimensione della finestra. Quindi, la scelta di finestre di piccole dimensioni implica una minore risoluzione dello spettro e quindi una minore capacità di indetificare la frequenza del picco di risonanza.

⁸ Il numero di finestre condiziona la rappresentatività statistica dello spettro. In pratica, maggiore è il numero di finestre e minore è l'incertezza sull'ampiezza della singola ordinata spettrale e quindi del corrispondente valore della curva

- l'elaborazione delle misure dovrà essere tale da garantire stime dei valori spettrali nell'intervallo di frequenze 0.2-20 Hz con circa 200 valori equi-spaziati in scala logaritmica;
- prima di procedere all'analisi dei risultati della campagna di misure HVSR, è opportuno effettuare una analisi di qualità secondo i criteri riportati nei *Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione* procedendo alla ripetizione delle misure quando necessario a valutare la loro effettiva ripetibilità;
- tutte le misure HVSR infine considerate attendibili ed oggetto di interpretazione dovranno essere corredate da Fogli Campagna per l'Acquisizione HVSR (in formato testo, uno per ciascuna misura secondo quando riportato nell'Allegato 1), una descrizione delle procedure di post-elaborazione adottate, un file in formato digitale ASCII con i valori dei rapporti spettrali medi per le diverse frequenze e relativo intervallo di confidenza, le registrazioni, un file in formato ASCII o altro standard sismologico (p.es. SAC) delle registrazioni.

Nella seconda fase, in funzione del modello geologico e dei risultati ottenuti nella prima fase, si procederà all'esecuzione delle misure volte alla stima dei profili di Vs da attribuire alle diverse MOPS incluse le aree instabili secondo quanto descritto in precedenza. Idealmente, allo scopo di consentire l'applicazione delle procedure di calcolo della risposta sismica locale, questi profili dovranno estendersi in profondità fino al raggiungimento del substrato sismico.

Per il raggiungimento di questi scopi si potrà fare riferimento a due famiglie di tecniche: tecniche in onde di volume (rifrazione in SH) e alle tecniche basate sulla misura delle velocità di fase delle onde superficiali sia in configurazione attiva (MASW) o passiva (ESAC, ReMi, ecc.). Per una trattazione esaustiva delle tecniche a rifrazione in SH si rimanda per una trattazione esaustiva agli allegati tecnici dei Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica citati sopra.

3.3 La determinazione del profilo di Vs: tecnica MASW

Per quanto riguarda le tecniche in Onde Superficiali, si tratta più frequentemente di procedure volte alla determinazione della curva di dispersione delle Onde di Rayleigh mediante analisi di correlazione di misure effettuate su antenne sismiche del segnale prodotto da una sorgente artificiale (MASW) o di vibrazioni ambientali (ESAC, ReMi, ecc.). Le prime sembrano le più diffuse nella pratica professionale e quindi di maggiore interesse per le indagini qui considerate. Al netto di quanto già riportato in proposito nella documentazione citata, si pone qui l'accento su alcuni aspetti di maggiore importanza nell'applicazione della tecnica MASW:

HVSR. In termini più precisi, la deviazione standard sul valore dell'ordinata spettrale decresce come $n^{-1/2}$ dove n , è il numero di finestre. D'altro canto, a parità di durata complessiva della misura, più lunghe sono le sottofinestre (per aumentare la risoluzione spettrale come indicato nella nota 9) e minore è il numero di sottofinestre e quindi peggio definita è l'ampiezza spettrale. I valori indicati per la durata delle finestre e del loro numero rappresentano un ragionevole compromesso fra le due esigenze per durate ragionevoli della misura complessiva.

- la strumentazione deve essere adeguata agli scopi adottando sismografi digitali con adeguata dinamica (> 20 Bit) dotati di un sufficiente numero di canali (idealmente almeno di 24 canali) e geofoni verticali con frequenza propria ≤ 4.5 Hz;
- La durata della registrazione deve essere sufficiente per catturare l'intero segnale utile orientativamente ≥ 2 sec) con una frequenza di campionamento ≥ 512 Hz;
- l'energizzazione deve essere condotta con un sistema di trigger caratterizzato da un errore ≤ 1 ms;
- al fine di garantire il dato ottimale per l'interpretazione MASW i dati relativi alle sorgenti reciproche (ai due estremi dello stendimento) devono essere acquisiti separatamente con energizzazione singola e con ripetizione di energizzazione e relativa somma di segnale;
- in linea di massima la spaziatura fra i geofoni non dovrebbe essere superiore ai 3 m; tuttavia, disponendo di attrezzature con meno di 24 canali, questa distanza inter-geofonica potrebbe dare origini a stendimenti troppo corti che potrebbero limitare il potere risolutivo per le lunghezze d'onda più grandi; in questi casi può essere utile ripetere la misura con distanze inter-geofoniche maggiori (5 m per esempio) e combinare i risultati delle due misure;
- allo scopo di ridurre il disturbo prodotto dalle onde di volume generate dalla sorgente, sarebbe opportuno eseguire le energizzazioni ad una certa distanza dal primo sensore ($> 5-10$ m).

Le registrazioni raccolte andranno accompagnate da una fase di pre-elaborazione nella quale vengono rimosse le tracce caratterizzate da maggiore disturbo. Si procederà quindi ad effettuare:

- il calcolo degli spettri di velocità/slowness di Rayleigh (intervallo di frequenze 5-50 Hz);
- la somma degli spettri di velocità in configurazione reciproca;
- si procederà alla valutazione della massima profondità di indagine raggiunta $h_{\max} = VR/(2f_{\min})$, e della minima profondità degli strati superficiali $h_{\min} = VR/(2f_{\max})$ in funzione della minima e della massima frequenza considerata ($f_{\min}$ ed $f_{\max}$ rispettivamente) e delle rispettive velocità di fase VR;
- la lettura della curva di dispersione per l'identificazione della curva corrispondente al modo fondamentale e degli eventuali superiori a partire dagli spettri di velocità di Rayleigh.

I risultati ottenuti verranno documentati depositando i prodotti delle elaborazioni MASW in formato digitale ASCII, includendo i Fogli campagna relativi misure Rifrazione/MASW uno per ciascuno stendimento (Allegato 2) e le letture delle curve di dispersione. I dati originali delle misure effettuate andranno depositati in forma di file ASCII o altro formato sismologico standard (p.es., SAC, SEG-Y, ecc.).

Allo scopo di determinare i profili di Vs relativi a ciascuna misura delle curve di dispersione dovranno essere applicate procedure di inversione numerica. Per le difficoltà di tipo matematico del modello fisico che stabilisce una relazione fra le caratteristiche del sottosuolo e la curva di dispersione, le procedure di inversione partono dall'assunto che il sottosuolo sia caratterizzato da una successione verticale di strati piano paralleli omogenei al loro interno (modello 1D) e quindi possono essere applicate solo in configurazioni del sottosuolo di questo tipo. Inoltre, nella relativamente semplice situazione 1D, il modello per la risoluzione del problema diretto è

caratterizzato da marcate non linearità e questo produce una forte ambiguità nelle soluzioni del problema inverso. Questa non linearità richiede l'impiego di procedure di inversione a carattere maggiormente esplorativo (p.es. Algoritmi Genetici) rispetto ai metodi standard (Gradiente). Soprattutto queste ultime producono risultati che sono fortemente condizionati dalla scelta del modello iniziale e quindi esplorano in modo assai ridotto lo spazio delle soluzioni. Inoltre, molte configurazioni sismo-stratigrafiche risultano compatibili con il dato osservativo. Per ridurre il livello di ambiguità della soluzione del problema inverso, è quindi necessario introdurre vincoli aggiuntivi al problema inverso. Il modello geologico gioca in questo senso un ruolo di primo piano permettendo di delimitare lo spazio di ricerca dei parametri incogniti (segnatamente lo spessore degli strati ed i valori di V_s di ciascuno di questi). Anche i risultati di misure indipendenti (gravimetria, resistività, profili di V_p) possono giocare un ruolo importante ed il loro uso va fortemente incoraggiato soprattutto nel caso in cui queste misure possano agevolmente essere effettuate senza significativi costi aggiuntivi (vedi i dati dei primi arrivi in onde P deducibili anche dalle registrazioni condotte con la tecnica MASW). Un ruolo importante in questo senso è giocato dalle misure delle curve HVSr. Queste misure possono essere invertite anche da sole ma i relativi risultati presentano livelli di ambiguità ancora maggiori rispetto all'inversione delle curve di dispersione. Per utilizzare questo ulteriore vincolo ai fini della determinazione del profilo di V_s è possibile fare riferimento a procedure di inversione congiunta a carattere più esplorativo quali quelle implementate, per esempio, nei codici di calcolo GEOPSY e HV-inv. Comunque, prima di procedere all'impiego di questi codici avanzati è opportuno condurre analisi di tipo speditivo ed approssimato (e per questo relativamente più robuste) analizzando esaminando direttamente il dato sperimentale mediante abachi, modelli semplificati (leggi di potenza), rappresentazioni delle curve di dispersione in forma di valore della velocità di fase in rapporto alla relativa lunghezza d'onda.

3.4 Le incertezze

Al fine di permettere una migliore valutazione dei risultati delle inversioni in rapporto ai vincoli geologici, sarebbe opportuno effettuare una valutazione del livello di incertezza che caratterizza il profilo di V_s ottenuto per una singola zona. Questa incertezza è legata sia dalla mancata univocità del modello di sottosuolo sia alle eventuali variazioni laterali nella stessa microzona. Allo scopo di valutare questa incertezza sarebbe opportuno ripetere la procedura di inversione più volte collezionando i modelli che producono un analogo livello di adattamento ai dati sperimentali. L'insieme di queste soluzioni e di quelle ottenute dalle altre misure effettuate nella stessa microzona potranno essere utilizzate per definire i limiti di confidenza associati al profilo di V_s da utilizzare per la modellazione della risposta sismica locale della microzona analizzata. Per una trattazione più articolata delle modalità di implementazione delle incertezze si rimanda al Capitolo 6 (paragrafi 6.5 e 6.6) dove viene descritta una procedura compatibile con le procedure numeriche per la valutazione della risposta sismica locale 1D (in particolare il codice STRATA).

4. Indagini in foro e prove Down-Hole

4.1 Premessa

Il contenuto di questo capitolo si riferisce all'esecuzione delle indagini geognostiche in situ previste nell'ambito degli studi di microzonazione sismica di livello 3 da effettuarsi nei Comuni calabresi.

In particolare, le specifiche tecniche riportate nel seguito riguardano le attività di: i) realizzazione di sondaggi a carotaggio continuo (ciascuno della lunghezza complessiva di almeno 35m); ii) prelievo di campioni indisturbati per indagini di laboratorio; iii) esecuzione di prove SPT; iv) condizionamento dei fori di sondaggio per l'esecuzione di prove sismiche di tipo Down Hole (DH).

A questo scopo vengono richiamate le maggiori criticità riscontrabili in campagna e le procedure più adeguate ad evitare errori che possano compromettere l'esecuzione delle prove e il loro esito, fermo restando che le Ditte incaricate che eseguiranno le attività in sito dovranno operare in ottemperanza alle Leggi, ai regolamenti vigenti e alle prescrizioni delle Autorità competenti.

4.2 Scelta del sito di prova

La scelta del sito in cui allestire i fori per le prove sismiche di tipo Down - Hole (in seguito DH) dovrà avvenire in concerto con il GdL del CNR IGAG. Essa dovrà essere effettuata in modo da garantire la massima rappresentatività dei risultati in rapporto alle caratteristiche del territorio oggetto della microzonazione sismica e tenere conto della logistica necessaria all'esecuzione delle indagini, ivi compresa la sicurezza dei differenti operatori che si avvicenderanno sul sito. Non è superfluo ricordare che, ad esempio, occorrerà posizionarsi in aree facilmente accessibili con strumenti e mezzi per l'esecuzione delle prove DH.

L'indisponibilità di misure geofisiche di superficie pregresse, ottenute lungo stendimenti 1D e 2D attivi e/o passivi, che consentano la definizione di profili di velocità delle onde di taglio (V_s), o l'impossibilità di acquisirne ex-novo in determinati punti (per motivi legati all'eventuale presenza di geometrie bidimensionali e alla logistica), potranno essere elementi guida per individuare la collocazione dei fori da attrezzare ai fini dell'esecuzione delle prove DH. In pratica, andrebbe favorita una localizzazione nella quale siano presenti le principali unità stratigrafiche/geofisiche e il substrato sia raggiungibile e rappresentativo per la definizione del substrato sismico. Viceversa, i risultati ottenuti dalle misure DH potranno fornire un elemento di confronto importante con le misure geofisiche di superficie, laddove esse siano presenti per tutti i litotipi da caratterizzare.

Nel caso di geometrie sepolte profonde (con profondità del substrato molto superiore a 35m e pertanto non investigabili completamente tramite le prove DH oggetto del presente protocollo), l'ubicazione potrà essere scelta in maniera tale da poter pervenire alla caratterizzazione completa della verticale tramite inversione congiunta con la forma della curva HVSr, facendo uso del profilo di DH come vincolo e/o eventualmente della curva di dispersione di una prospezione sismica su antenna sismica ricavata per lo stesso sito.

L'ubicazione delle prove, inoltre, dovrebbe essere stabilita tenendo conto di un contesto ed una scala più ampia di quelli del singolo Comune in modo da poter utilizzare in maniera organica, ai fini della caratterizzazione del sottosuolo, più DH eseguite in più Comuni limitrofi. In altre parole, il GdL

del CNR IGAG, potrà stabilire di ubicare i DH in modo da ottenere profili di Vs per tutte le tipologie di coperture presenti nelle aree oggetto di microzonazione sismica.

4.3 Precisazioni di carattere generale

Nell'esecuzione delle attività concernenti le indagini geognostiche e le prospezioni sismiche in fori di sondaggio sono inclusi oneri e costi occorrenti per: il prelievo di campioni indisturbati di terreno che, a giudizio del Professionista incaricato, debba essere sottoposto ad analisi geotecniche di laboratorio; l'ottenimento dei permessi di lavoro e stazionamento; l'accesso alle zone o ai punti di lavoro con il personale e le attrezzature necessarie; le opere di ripristino delle condizioni precedenti l'esecuzione dei lavori; il risarcimento di eventuali danni a terzi; la cartografia necessaria; i carburanti e ogni altro materiale di consumo; l'organizzazione logistica e del personale; le attrezzature accessorie; l'interpretazione, la restituzione e la documentazione fotografica e cartografica dei lavori eseguiti e quanto altro non elencato, che sia direttamente o indirettamente necessario per l'esecuzione finita e a perfetta regola d'arte di tutti i lavori.

Il Professionista incaricato si impegna a visitare preventivamente i siti valutando le problematiche connesse con lo svolgimento a regola d'arte dei lavori d'indagine.

I lavori di indagine geognostica dovranno essere realizzati con personale, modalità operative e attrezzature conformi alle prescrizioni contenute nel presente documento, senza apportare variazioni che non siano state preventivamente concordate e approvate dal GdL del CNR IGAG.

4.3.1 Modalità tecniche esecutive

Le modalità operative delle indagini oggetto delle presenti prescrizioni tecniche, sono conformi, per quanto possibile, alle "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche" A.G.I., 1977.

4.3.2 Sondaggi geognostici

I sondaggi hanno lo scopo di fornire una campionatura completa dei litotipi che attraversano, al fine di ricostruire la successione degli strati, di effettuare il prelievo di almeno un campione indisturbato da sottoporre ad analisi geotecniche di laboratorio, di eseguire prove SPT e di effettuare la posa in opera delle tubazioni per le prospezioni sismiche DH.

Le perforazioni saranno eseguite a carotaggio continuo; la Ditta è tenuta a disporre di attrezzature idonee ad eseguire sondaggi a rotazione e ad impiegare carotieri semplici o doppi scelti secondo la natura litologica dei terreni e delle rocce.

Il diametro minimo a fondo foro dovrà essere sufficiente per prelevare campioni indisturbati del diametro non inferiore a 85 mm e comunque ad attrezzare il foro con tubo in PVC pesante, di diametro interno 79 mm.

La profondità che in linea di massima dovrà essere raggiunta da ciascun sondaggio è fissata a 35 m dal piano campagna. Il GdL del CNR IGAG potrà in ogni caso disporre che il foro sia arrestato a profondità minore di quella indicata inizialmente. I metri non utilizzati potranno essere mutuati in altre indagini, preferibilmente altri sondaggi, previa comunicazione e concordemente con quanto indicato dal GdL del CNR IGAG.

In fase di esecuzione dei sondaggi, dovrà essere assicurata la perfetta stabilità delle pareti e del fondo foro, in maniera tale da arrecare al terreno il minimo disturbo in fase di perforazione e da garantire la corretta predisposizione del foro per la successiva esecuzione della prova DH.

A tale scopo, a meno di indicazioni diverse da parte del GdL del CNR IGAG, le pareti del foro dovranno essere stabilizzate con tubi metallici con funzioni di rivestimento provvisorio aventi le seguenti caratteristiche:

- spessore tubo = 8÷10 mm;
- diametro interno = 101÷147 mm (vedi anche paragrafo 4.5);
- lunghezza spezzoni = 150÷200 cm.

La Ditta potrà proporre l'impiego di rivestimenti con diverse caratteristiche, in relazione al tipo di attrezzatura di perforazione prescelta, concordandone l'uso con il Professionista incaricato.

Per evitare il disturbo del terreno da campionare, la posa in opera del rivestimento provvisorio dovrà sempre seguire la perforazione.

La Ditta ha l'obbligo di fornire il carotaggio dei fori o dei tratti di foro precisati dal Professionista incaricato su approvazione del GdL del CNR IGAG, adottando tutte le cautele, le attrezzature e gli accorgimenti necessari per ottenere la massima percentuale di recupero; in particolare, con riguardo alla natura e alle caratteristiche dei terreni attraversati, le percentuali di recupero, valutate per ogni singola battuta di carotaggio (di lunghezza massima di 1.5 m) dovranno essere comprese tra:

- il 55 % e il 70 % per i terreni sciolti in genere (sabbia, ghiaia, ecc.);
- l'85 % e il 90 % per i terreni coesivi (argille, argille marnose, ecc.);
- il 70 % e il 90 % per le rocce in genere (calcari, calcari marnosi, arenarie, conglomerati, gessi, anidriti, rocce ignee, rocce metamorfiche, ecc.), in dipendenza del grado di fratturazione (il 70 % in rocce molto alterate e/o fratturate e il 90% per rocce integre o con basso grado di fratturazione e/o alterazione).

Qualora il recupero, per cause di imperizia o inadempienza accertata da parte del Professionista incaricato dovesse risultare inferiore alle percentuali sopra indicate, si potrà prevedere una riduzione dell'importo in fase di contabilità finale ovvero potrà richiedere un aumento della profondità del sondaggio per una lunghezza pari al tratto con percentuale di recupero inadeguata.

È utile che del corredo permanente della sonda facciano parte i seguenti strumenti portatili:

- scandaglio a filo graduato, per la misura della quota di fondo foro raggiunta dalla perforazione;
- sondina piezometrica elettrica;
- penetrometro tascabile, con fondo scala > 0.5 MPa (5 kg/cm²);
- scissometro tascabile con fondo scala non inferiore di 100 kPa.

4.3.3 Fluidi di circolazione

Qualora consentito, il fluido di circolazione nelle fasi di perforazione e di rivestimento, potrà essere costituito da:

- acqua;
- fango bentonitico;
- fanghi polimerici biodegradabili entro 24 ore.

La Ditta potrà proporre l'uso di fluidi diversi dai sopra elencati, subordinandone comunque l'uso alla preventiva approvazione da parte del Professionista incaricato, con la condizione che in ogni caso il fluido prescelto, oltre ad esercitare le funzioni di raffreddamento, asportazione detriti ed eventuale sostentamento, non pregiudichi la qualità del carotaggio e l'esito delle prove geotecniche.

La circolazione di fluidi dovrà essere attuata nelle modalità strettamente indispensabili al raffreddamento degli utensili e al sostegno dell'eventuale instabilità del foro, ciò al fine di evitare un disturbo eccessivo delle condizioni originarie o un eccessivo sovracarotaggio.

In alcuni casi, e per tratti limitati di perforazione, il Professionista incaricato potrà richiedere l'avanzamento del carotaggio a secco, al fine di limitare ulteriormente il disturbo delle pareti del foro. In tali casi sarà cura della Ditta mantenere alla più opportuna distanza dal fondo foro le camicie di rivestimento.

4.3.4 Rilievo della falda

Nel corso della perforazione verrà sistematicamente rilevato il livello della falda nel foro. Le misure verranno eseguite ogni sera, al termine del lavoro e ogni mattina, prima di riprendere l'attività, con annotazione di quanto segue:

- livello acqua nel foro rispetto al p.c.;
- quota del fondo foro;
- quota della scarpa del rivestimento;
- data e ora della misura.

Tali annotazioni devono comparire anche nella documentazione definitiva del lavoro.

4.3.5 Prelievo, conservazione e trasporto dei campioni

La Ditta, nel caso in cui il Professionista incaricato ritenga necessario provvedere al prelievo di campioni indisturbati, alla profondità e con modalità concordate con il GdL del CNR IGAG, dovrà recapitare il campione in laboratorio e garantire le modalità di conservazione più opportune in relazione alla natura dei terreni. Tutti i campioni appena prelevati dovranno essere riposti in luogo riparato dal gelo e dal sole, possibilmente umido, in attesa di essere inviati al laboratorio.

Il campione del tipo indisturbato dovrà essere prelevato con campionatori a pistone, a pressione od a rotazione con doppia parete e scarpa avanzata, a seconda che si tratti di terreni coesivi poco consistenti (i primi due) o terreni molto consistenti e rocce lapidee (il terzo) e dovrà avere dimensioni utili non inferiori a 85 mm di diametro e 500 mm di lunghezza.

La Ditta è tenuta ad avere in cantiere entrambi i campionatori semplici e almeno uno dei campionatori doppi e ad utilizzarli fino al raggiungimento di fatto dei suoi limiti operativi.

Per il campionamento e il mantenimento dei campioni dovranno essere utilizzate fustelle metalliche preferibilmente nuove o in ottimo stato di conservazione (senza ammaccature significative, con particolare riguardo alla scarpa tagliente). Le fustelle contenenti i campioni dovranno essere sigillate alle due estremità con appositi tappi a tenuta, bloccati da nastri adesivi, previo trattamento di protezione delle due estremità del campione mediante colaggio o pennellatura di paraffina fusa.

Tutti i campioni prelevati dai fori di sondaggio, dovranno essere accompagnati da una etichetta da applicare al contenitore, non degradabile per umidità, in cui sono indicati: Comune, località, Professionista incaricato, Ditta esecutrice, numero identificativo del campione, profondità di prelievo, orientamento e data di prelievo.

L'eventuale ed ulteriore prelievo di campioni rimaneggiati verrà condotto a discrezione del Professionista incaricato, selezionando dal carotaggio sistemato nella cassetta catalogatrice il tratto da destinare al laboratorio. Dal campione selezionato devono essere eliminate parti alterate dal prelievo (dilavate, "cotte", disturbate); successivamente, il campione viene inserito in un doppio sacchetto di plastica e contraddistinto con un cartellino indelebile, inserito fra i due sacchetti. Il campione viene poi riposto in luogo riparato dal gelo e dal sole prima di essere inviato al laboratorio.

Infine, per i tratti di sondaggio in cui il Professionista incaricato ravvisasse la necessità di una ricostruzione stratigrafica più dettagliata del sottosuolo con la sola determinazione di alcune proprietà intrinseche dei materiali (limiti di Atterberg, granulometria, peso specifico del solido, calcimetria) ed eventualmente del contenuto d'acqua, è consentito il prelievo di campioni disturbati o a disturbo limitato, mediante l'impiego di normali campionatori a pressione, secondo i terreni.

4.3.6 Casette

Le cassette per la conservazione del materiale estratto durante il carotaggio dovranno essere pronte in cantiere prima dei lavori. Esse dovranno essere dotate di 5 scomparti interni della lunghezza di 1 m ciascuno, munite di coperchio e dovranno contenere l'intera campionatura dei sondaggi, in modo tale che ogni scomparto contenga una sola successione di spezzoni di carota.

Ogni cassetta dovrà essere segnata sull'esterno del coperchio con il numero d'ordine del sondaggio e con le quote di prelievo cui il contenuto si riferisce. Il materiale di perforazione deve essere disposto nelle cassette catalogatrici rispettando la profondità effettiva di prelievo e lasciando eventuali spazi vuoti in mancanza di materiale (campioni o difetto di recupero/dilavamento).

Se nella successione di carote si rilevasse una sensibile variazione della natura del terreno, dovrà essere evidenziata, mediante apposito tassello di legno interposto, la quota in cui nel sondaggio è riscontrata tale variazione. Il tratto tra le quote di inizio e fine prelievo del campione indisturbato deve essere lasciato vuoto all'interno del relativo scomparto, con indicazione della sigla del campione prelevato.

Le cassette dovranno essere fotografate secondo le modalità specificate nel paragrafo 4.7 e le foto dovranno essere allegate alla relazione illustrativa finale.

Il trasporto delle cassette fino al luogo di conservazione e/o smaltimento sarà concordato da Professionista incaricato e Ditta e dovrà essere realizzato con modalità e tempi che saranno definiti in accordo tra le parti.

4.3.7 Prove speditive di resistenza sulle carote di terreni coesivi

Sui terreni di natura coesiva potranno essere eseguite anche le prove di resistenza al penetrometro tascabile e/o scissometro tascabile sulla carota appena estratta e scortecciata con frequenza di 1 prova ogni 20 cm (purché il materiale non sia fortemente disturbato). I risultati dovranno essere annotati in un'apposita colonna del rapporto stratigrafico.

4.3.8 Riempimento dei fori di sondaggio in caso di mancato condizionamento

Ad ultimazione della perforazione, qualora non si possa procedere al condizionamento con tubazioni di rivestimento per l'esecuzione di prospezioni sismiche DH, il foro di sondaggio dovrà essere riempito con una miscela cementizia costituita dai seguenti componenti nelle proporzioni elencate (parti in peso):

- acqua: 100
- cemento: 30
- bentonite: 5

L'inserimento della miscela nel foro di sondaggio sarà eseguito dal fondo, in risalita, con apposita batteria di tubi o con manichetta flessibile.

4.4 Prove penetrometriche dinamiche SPT (Standard Penetration Test)

La prova consiste nella infissione a percussione, secondo una procedura standardizzata, di un campionatore a pareti grosse di dimensioni standard (campionatore Raymond) nel fondo di un foro di sondaggio ad una profondità prestabilita con registrazione del numero di colpi necessari alla penetrazione del campionatore di una quantità prefissata (NSPT).

Normative e specifiche di riferimento:

- ISSMFE Technical Committee (1988);
- Standard Penetration Test (SPT): International Reference Test Procedure
- Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, Associazione Geotecnica Italiana (AGI) 1977.

La prova sarà effettuata dalla Ditta alle profondità concordate dal Professionista incaricato.

La Ditta dovrà in ogni caso attenersi a quanto di seguito specificato.

4.4.1 Caratteristiche dell'attrezzatura

Per la prova dovrà essere usato un tubo campionatore Raymond, in acciaio indurito, apribile longitudinalmente, di diametro esterno 51 ± 1 mm, diametro interno 35 ± 1 mm e lunghezza minima (esclusa la scarpa tagliente terminale) di 457 mm.

La scarpa terminale, rastremata a tagliente negli ultimi 19 mm per favorire la penetrazione e costituita anch'essa di acciaio indurito, dovrà essere riparata o sostituita quando sbeccata o distorta.

Le aste di perforazione dovranno avere un peso non superiore a 10 kg per metro lineare; dovranno essere dritte, ben avvitate in corrispondenza dei giunti e con flessione totale della batteria pronta per la prova $< 1\%$.

Il dispositivo di battitura, in acciaio, dovrà avere un peso totale non superiore a 115 kg; sarà dotato di una testa di battuta in acciaio, che dovrà essere strettamente avvitata all'estremità della batteria di aste, e di un dispositivo di guida e sgancio automatico di un maglio (o massa battente), anch'esso in acciaio, del peso di 63.5 ± 0.5 kg. Al maglio dovrà essere assicurata una corsa in caduta libera di 760 ± 10 mm, con attriti trascurabili. Non è ammesso l'uso del cabestano manovrato con la fune. Nel caso di terreni molto compatti o ghiaiosi, e previa autorizzazione da parte del Professionista incaricato, la Ditta potrà utilizzare, in sostituzione della scarpa del campionatore Raymond, una punta conica del diametro di 51 ± 1 mm e apertura angolare di 60° . Le tre fasi di penetrazione di 15 cm ciascuna andranno comunque eseguite, annotando il numero di colpi in maniera analoga alla prova standard. Anche la condizione di rifiuto sarà identificata con criterio analogo a quello della prova standard.

4.4.2 Preparazione del foro

Il fondo foro deve essere opportunamente pulito e sostanzialmente indisturbato alla quota di prova, senza un apprezzabile gradiente idraulico verso l'alto. Nel caso che la prova venga eseguita al di sotto del livello della superficie piezometrica o con acqua in pressione, il livello del fluido nel foro deve essere sempre mantenuto al di sopra del livello idrostatico.

Il rivestimento metallico provvisorio del foro, se utilizzato, non deve essere infisso al di sotto della profondità di prova.

Dopo la pulizia, la quota del fondo foro deve essere controllata con apposito scandaglio confrontandola con quella raggiunta con la manovra di perforazione; se la differenza tra le due misure supera i 7 cm si deve procedere ad una nuova pulizia del foro.

4.4.3 Modalità esecutive

La prova si esegue infiggendo a percussione a fondo foro il campionatore per tre tratti consecutivi, ciascuno di 15 cm, annotando separatamente il numero di colpi necessario per la penetrazione in ciascun tratto. L'indice della prova, NSPT, è dato dalla somma del numero di colpi relativo agli ultimi due tratti (ovvero necessari all'infissione negli ultimi 30 cm). L'infissione nel primo tratto viene

arrestata in ogni caso dopo 50 colpi. Si identifica la condizione di rifiuto quando nei due tratti successivi si ha un avanzamento minore o uguale di 30 cm con un numero di colpi pari 100. In tal caso viene annotata la lunghezza di infissione (in cm) corrispondente ai 100 colpi. La frequenza di battitura in tutte le fasi della prova non deve essere superiore a 30 colpi al minuto.

Al termine delle operazioni di infissione si procederà ad estrarre ed aprire il campionatore, misurare e descrivere il campione prelevato, trascurando l'eventuale parte alta costituita da detriti, e quindi sigillarlo in un contenitore cilindrico a tenuta d'aria (sacchetto o barattolo di plastica).

A ciascun contenitore andrà fissata un'etichetta contenente le seguenti informazioni:

- cantiere;
- n° del sondaggio;
- n° del campione;
- profondità della prova;
- lunghezza del campione;
- data della prova;
- n° di colpi per ogni singolo tratto di 15 cm.

4.5 Prove penetrometriche statiche CPT (Cone Penetration Test), con Piezocono (CPTU) e cono sismico (SCPT)

La prova CPT consiste essenzialmente nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta conica di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa a velocità costante nel terreno.

Lo sforzo per la penetrazione viene applicato per mezzo di un dispositivo di spinta che agisce su una batteria di aste cave alla cui estremità inferiore e collegata la punta.

Attrezzatura e modalità esecutive

La punta utilizzata nella realizzazione della prova deve essere dimensionata secondo gli standard europei e precisamente deve essere costituita da un corpo cilindrico con una estremità conica avente un diametro alla base di 37,5 mm, un angolo di apertura al vertice di 60° ed una superficie di 10 cm². Il manicotto deve avere una superficie laterale compresa fra 150 e 200 cm²; le aste cave devono avere il diametro esterno di 36 mm e, preferibilmente, una lunghezza di 1000 mm.

Il dispositivo di misura dello sforzo per la penetrazione caratterizza il penetrometro che è di tipo elettrico, nel quale lo sforzo è misurato mediante dispositivi elettrici (ad es. estensimetri) montati direttamente nella punta.

Il dispositivo di spinta deve essere in grado di esercitare sulla batteria di aste cave una spinta di progetto non inferiore a 10 t, con una corsa preferibilmente di un metro, nel caso del penetrometro elettrico; la penetrazione della batteria deve avvenire a una velocità costante e pari a 2 cm/s (+/- 0,5 cm/s), indipendentemente dalla resistenza opposta dal terreno. Il dispositivo di spinta deve essere ancorato e/o zavorrato in modo da non muoversi rispetto al piano di lavoro durante l'infissione e deve essere posizionato in modo da garantire la verticalità iniziale della spinta sulle aste cave, con una deviazione della verticale <2%.

La penetrazione deve essere continua in relazione alla lunghezza delle aste, nel caso del penetrometro elettrico, o discontinua ogni 20 cm in relazione alle annotazioni delle misure di resistenza, nel caso del penetrometro meccanico.

La prova deve essere interrotta unicamente al raggiungimento del fondo scala strumentale.

Tarature e controlli

La ditta incaricata delle indagini deve procedere all'effettuazione delle tarature e di tutti i controlli, sulla strumentazione utilizzata, previsti dalla normativa di riferimento (AGI, 1977), riportando una copia della relativa certificazione nella Relazione Finale.

Valutazione a metro di prova effettivamente realizzata, con differenziazione di prezzo per tipo di punta utilizzata (nel caso delle CPT: elettrico) e per tipo di prova (CPT, CPTU, SCPTU) per qualsiasi profondità di prova, comprendendo nel prezzo la taratura e controllo della strumentazione, l'elaborazione delle prove oltre tutti gli oneri, prescrizioni e forniture che verranno descritte in seguito.

Nel caso delle prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU, SCPTU) è previsto un prezzo, con valutazione a ore (frazione di ora approssimata all'ora successiva) per realizzazione di prova di dissipazione.

4.5.1 Penetrometro elettrico

Con la punta elettrica devono essere registrati, direttamente in cantiere, i seguenti grafici:

- grafico continuo della resistenza alla punta (RP) con la profondità;
- grafico continuo della resistenza laterale locale (RL) con la profondità;
- grafico continuo o per punti (almeno ogni metro) della deviazione dalla verticale.

La ditta esecutrice delle indagini deve elaborare i suddetti grafici per tener conto delle profondità effettive a seguito delle deviazioni della verticale e deve quindi fornire la seguente documentazione:

- copia dei grafici di cantiere;
- grafici (derivanti dall'elaborazione dei dati di cantiere) degli andamenti rispetto alla profondità delle grandezze RP, RL, RLT (resistenza laterale totale e RP/RL).

4.5.2 Prove penetrometriche con piezocono (CPTU)

La prova CPTU viene realizzata con il duplice scopo di misurare la resistenza alla penetrazione della punta conica nel terreno (vedi "penetrometro elettrico") e di determinare con continuità la pressione dinamica dell'acqua nei pori (u) presente nell'intorno del cono, la quale viene dissipata più o meno rapidamente in relazione alla permeabilità del terreno.

Il piezocono differisce da una comune punta elettrica per il fatto di avere un filtro poroso posizionato

sulla faccia o alla base del cono. Tale filtro deve essere rigido in maniera da garantire che la pressione interstiziale non sia influenzata dalla compressione dello stesso contro il terreno. La sua struttura deve essere adeguata a impedire l'intasamento da parte delle particelle di terreno e deve essere resistente all'usura; può essere costituito da plastica porosa, materiale ceramico o acciaio inossidabile. La permeabilità del filtro deve essere pari a circa 10^{-2} cm/s.

Prima di ogni indagine, grande attenzione deve essere dedicata alla preparazione dell'elemento poroso e del cono, i quali vanno disaerati, assemblati con cura in ambiente saturo e protetti fino al contatto con l'acqua di falda.

Si raccomanda l'utilizzo di un sacchetto di gomma sottile a protezione del filtro prima di procedere con la discesa della batteria di aste di spinta.

Il filtro deve essere sostituito al termine di ogni verticale CPTU. La dimensione e la posizione del filtro poroso alloggiato sul cono devono essere chiaramente specificati.

Oltre ai risultati forniti da un comune penetrometro elettrico (RP, RL, RLT e RP/RL rispetto alla profondità) la prova CPTU deve fornire la registrazione in continuo della pressione dinamica dei pori nel volume di roccia intorno alla punta conica.

4.5.3 Prove penetrometriche con cono sismico (SCPTU)

Questo strumento è un piezocono elettrico standard all'interno del quale sono inseriti dei geofoni, o accelerometri, che permettono la registrazione di segnali sismici generati artificialmente.

Come per le prove CPTU, l'indagine in esame consiste nell'infissione nel terreno del piezocono per la misura dei classici parametri RP (resistenza di punta), RL (resistenza laterale) ed u (pressione neutra interstiziale); a differenza delle tecniche down-hole e cross-hole, che richiedono una o più perforazioni, attrezzature e procedure speciali, la prova SCPTU consente una rapida e diretta determinazione delle velocità delle onde sismiche (VP e VS).

Il cono sismico adoperato deve rispettare le caratteristiche standard dettate dalle normative ASTM e la stessa prova deve essere eseguita seguendo le normative tecniche standard di una comune prova CPTU.

Ad ogni metro di profondità, in concomitanza con la sosta per l'aggiunta di un'altra asta, o eventualmente a profondità prestabilite a seconda delle necessita progettuali, viene sospesa l'infissione del piezocono e, tramite adeguato sistema di energizzazione situato a p.c., vengono generate delle vibrazioni artificiali nel terreno.

Durante le fasi di generazione delle onde sismiche, si raccomanda di svincolare la batteria di aste di spinta dal penetrometro, in modo tale da evitare che le vibrazioni del penetrometro stesso si trasmettano al geofono triassiale. È importante energizzare il terreno colpendo la piastra su entrambe le terminazioni così da generare onde sismiche di taglio con opposta polarizzazione. Ripetere l'energizzazione più volte potrà servire ad individuare ed eliminare registrazioni erranee.

Tipicamente la prova deve iniziare 2-3 m sotto il p.c. così da minimizzare le interferenze con le onde di superficie e creare uno spazio sufficiente tra sorgente e ricevitore.

4.6 Posa in opera di tubi per prospezioni sismiche DH

L'esecuzione della prospezione sismica DH richiede la preparazione di un foro di sondaggio, rivestito da tubazione metallica provvisoria, di diametro sufficiente a permettere l'installazione nel foro di un

tubo in PVC munito di cannetta laterale per eseguire la cementazione dello stesso procedendo da fondo foro verso la superficie.

Il rivestimento metallico provvisorio dovrà avere un unico diametro in modo che il foro abbia diametro costante per tutta l'altezza, e dovrà essere estratto per sfilamento senza l'aiuto della rotazione. Le caratteristiche del rivestimento provvisorio sono state descritte nel paragrafo 4.3.2.

Il tubo di rivestimento definitivo dovrà essere a sezione circolare, in PVC atossico (o ABS). Dovrà avere spessore ≥ 4 mm e diametro interno maggiore o uguale di 79 mm. Si può ritenere che i tubi di rivestimento da 3" rispettino questa caratteristica. Dovrà essere costituito da spezzoni con lunghezza minima di 3 metri, dotati di filettatura maschio/femmina per l'assemblaggio (l'uso di giunti "a bicchiere" non è consentito). Il tubo di rivestimento dovrà essere munito di tappo di testa e fondo foro.

La posa in opera della tubazione dovrà avvenire in accordo con le seguenti modalità:

- lavaggio accurato con acqua pulita del foro di sondaggio;
- montaggio del tappo di fondo sul primo spezzone di tubo (quello più profondo) e fissaggio dell'estremità inferiore della cannetta per l'iniezione della miscela cementizia; nel caso in cui il tappo di fondo sia provvisto di apposita valvola di fondo unidirezionale per l'iniezione della miscela tale operazione non sarà necessaria;
- inserimento del primo spezzone di tubo nel foro (in terreni sotto falda il tubo dovrà essere riempito di acqua per contrastare la spinta idrostatica e favorirne l'affondamento);
- bloccaggio del tubo mediante apposita morsa e collegamento allo spezzone successivo mediante il giunto filettato; sigillatura del giunto con mastice e nastro adesivo;
- allentamento della morsa per permettere di calare il tubo nel foro (riempiendolo d'acqua se necessario) fissando nel contempo la cannetta di iniezione;
- ripetizione delle operazioni indicate nei due punti precedenti fino al completamento della colonna, annotando la lunghezza dei tratti di tubo;
- cementazione del tubo in PVC, da eseguire a bassa pressione (pressione di iniezione massima 200 kPa) attraverso la cannetta di iniezione o attraverso la valvola di fondo, osservando la risalita fino a piano campagna della miscela cementizia all'esterno del tubo;
- estrazione per fasi successive del rivestimento di perforazione provvisorio, operando solo a trazione e senza rotazione, non appena la miscela appare in superficie.

La rimozione del rivestimento provvisorio dovrà avvenire estraendo spezzoni di 6-9 m (in relazione alla natura del terreno e alle eventuali indicazioni del GdL del CNR IGAG) ed eseguendo di volta in volta il rabbocco della miscela cementizia da fondo foro per mantenere il livello costante a piano campagna. Solo dopo l'estrazione dell'ultimo spezzone il rabbocco della miscela potrà essere eseguito da testa foro. Qualora si noti l'abbassamento del livello della miscela il rabbocco dovrà continuare nei giorni successivi. Nella fase finale della cementazione, ove siano presenti al piano di campagna pavimentazioni o fondazioni rigide, si provvederà a sostituire la miscela cementizia con sabbia sciolta attorno alla tubazione.

Terminata la fase di cementazione, si dovrà provvedere ad un accurato lavaggio con acqua pulita dell'interno del tubo in PVC.

Dopo il lavaggio e a presa avviata, dovrà essere verificata la continuità del foro e l'integrità della tubazione calando sul fondo e ritirando un attrezzo di dimensioni analoghe al geofono.

Al termine di tutte le operazioni sopra descritte, si provvederà all'installazione a testa foro di un chiusino di protezione in acciaio verniciato; il chiusino dovrà essere provvisto di un coperchio con chiusura antigelo, di lucchetto e chiavi che dovranno essere conservate dal Professionista incaricato o al Comune. Nel caso di installazione in luoghi aperti al traffico veicolare o pedonale (strade, piazzali, marciapiedi), in luogo del chiusino standard, dovrà essere installato idoneo chiusino carrabile in ghisa, posto in opera a filo della pavimentazione esistente.

Il tubo installato dovrà infine essere preparato per le prove DH riempiendolo di acqua su indicazione del Professionista incaricato (il tubo dovrà pertanto risultare impermeabile sul fondo e lungo le pareti, in modo da poter mantenere acqua nel foro al livello del piano di campagna per tutta la durata delle prospezioni sismiche). Qualora, a giudizio del Professionista incaricato, il rivestimento posto in opera dovesse risultare non idoneo all'esecuzione delle prospezioni sismiche DH perché non rispondente ai requisiti richiesti nelle presenti specifiche tecniche, la Ditta dovrà a suo onere provvedere a rimuovere la tubazione e procedere ad una nuova installazione.

Dovrà essere presentato un breve rapporto sull'installazione del tubo di rivestimento definitivo in PVC, contenente una descrizione delle modalità di iniezione, quantità e composizione della miscela iniettata nell'intercapedine, nonché la segnalazione di eventuali anomalie riscontrate (es. eccessiva dispersione della boiaccia dopo la rimozione del rivestimento provvisorio, ecc.).

In cantiere, il Professionista incaricato, prima dell'installazione, controllerà che:

- gli spezzoni di tubo e i manicotti non presentino lesioni o schiacciate dovute al trasporto, soprattutto nelle parti terminali;
- le estremità dei tubi e dei giunti non presentino sbavature che possano compromettere il buon accoppiamento dei vari spezzoni;
- la cannetta per l'iniezione della miscela di cementazione da applicare all'esterno del tubo sia integra ed efficiente.

La miscela di cementazione dovrà essere costituita da acqua, cemento e bentonite, accuratamente mescolati (con apposito miscelatore) nelle seguenti proporzioni:

- 100 litri di acqua;
- 30 kg di cemento;
- 5 kg di bentonite.

In alcuni casi può essere necessario aumentare le dosi di cemento e/o bentonite nella miscela di iniezione rispetto a quanto indicato al punto precedente (ad es. in presenza di materiali ghiaiosi sciolti e/o sotto falda o di roccia molto fratturata).

Le operazioni di cementazione, se eseguite con cura, possono rendersi agevoli con l'utilizzo di cannetta di iniezione di diametro 15 mm e tubi di rivestimento provvisorio di diametro interno 127 mm; tuttavia, nelle situazioni che richiedono l'uso di una miscela di iniezione più densa rispetto a quella indicata nei protocolli (v. capoverso precedente), e quindi di una cannetta di iniezione di diametro maggiore ($d=20$ mm), si consiglia l'uso di tubi di rivestimento provvisorio di diametro interno 147 mm.

4.7 Esecuzione di prospezioni sismiche in foro di tipo Down - Hole

La prova consiste nella misurazione dei tempi di arrivo di impulsi sismici generati in superficie ad un ricevitore posto all'interno di un foro di sondaggio verticale, adeguatamente rivestito come indicato nei paragrafi precedenti.

La prova consente la misura diretta delle velocità di propagazione V_p delle onde di compressione (onde P) e V_s delle onde di taglio (onde S). Potrà essere utilizzata una sonda singola o doppia costituita da geofoni tridirezionali.

Le modalità operative dovranno essere conformi, per quanto possibile, alle "ISRM Commission on Testing Methods (1988) - Suggested Methods for Seismic Testing Within and Between Boreholes - Part 2: Suggested Method for Seismic Testing Within a Borehole".

4.7.1. Caratteristiche delle attrezzature

L'attrezzatura di prova dovrà essere costituita dalle seguenti componenti:

- - sistema di energizzazione;
- - 1 o 2 ricevitori tridirezionali;
- - sismografo registratore;
- - dispositivo di segnalazione di partenza automatica del segnale (trigger);
- - apposito software per l'elaborazione dei dati.

Il sistema di energizzazione dovrà essere adeguato ad ottenere la migliore risoluzione possibile dalla prova, tenuto conto delle caratteristiche dei terreni e dello stato di "rumore di fondo"; normalmente tale sistema può essere costituito da una massa battente manovrata a mano.

Potranno essere utilizzati anche un percussore oleodinamico agente all'interno di una piccola cassaforma interrata, oppure altri dispositivi concordati con il GdL del CNR IGAG.

È onere e responsabilità della Ditta dimensionare correttamente il sistema di energizzazione in funzione della natura e delle caratteristiche dei terreni, che sono da considerarsi noti, in quanto le misure sono successive alla perforazione.

In particolare, il sistema di energizzazione costituito da una massa battente manovrata a mano (mazza da 10 kg), agente a percussione in diverse direzioni su un massello di legno, cls o teflon, ben saldato al terreno, dovrà essere collocata ad una distanza adeguata dalla bocca del foro in funzione della migliore risoluzione dell'indagine stessa.

Il punto di energizzazione verrà posto ad una distanza dal foro tale da poter considerare rettilinei i raggi sismici dal punto stesso alle varie posizioni del geofono e contemporaneamente minimizzare la generazione delle onde di tubo o di Stonely nel tubo. Tale distanza, in genere compresa tra i 3 m e i 5 m, andrà misurata accuratamente. Il punto di energizzazione deve essere mantenuto fisso durante tutta la prova in un foro.

I ricevitori tridirezionali, in numero di 1 o 2, dotati di appropriate caratteristiche di frequenza e sensibilità tali da potere ricevere in maniera adeguata il treno d'onde prodotto dalla sorgente, dovranno essere calati nel foro.

Ogni ricevitore dovrà potere essere reso solidale con la tubazione di rivestimento del foro tramite un dispositivo di bloccaggio meccanico o pneumatico e, possibilmente, dovrà avere un sistema che garantisca l'isorientazione dei ricevitori (es. tramite aste di orientazione).

Il/i ricevitore/i dovranno essere collegati, secondo la loro lunghezza, in modo di mantenere costante la distanza verticale e l'orientazione relativa (in modo che i trasduttori orizzontali siano paralleli) e in modo tale da potere anche controllare dalla superficie l'orientazione assoluta.

Il sismografo registratore, con convertitori A/D del segnale campionato a 24 bit, dovrà essere in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda con tempo di campionamento dei segnali digitali compreso tra 0.025 e 0.5 ms.

Esso dovrà essere dotato di filtri, guadagni AGC che potranno essere utilizzati in fase di visualizzazione dei segnali ma non applicati al segnale che sarà registrato.

Il trigger consiste preferibilmente in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la sorgente viene attivata, consentendo a un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato ad un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica.

In alternativa, il trigger per l'attivazione del sistema di acquisizione dati che fornisce il tempo zero di registrazione potrà essere realizzato con: a) geofono starter; o b) cella di carico.

Nel caso del geofono starter, esso deve essere posto nelle immediate vicinanze della zona di impatto.

L'attivazione del circuito per individuare l'istante di energizzazione deve, all'atto delle sollecitazioni ripetute, consentire una differenza di chiusura non superiore a 0.5 ms.

La finestra di registrazione non deve essere inferiore a 0.5 secondi con tempo di registrazione pre-trigger di almeno 10 ms.

I dati devono essere registrati per ciascuna energizzazione in fase P e per le due (destra e sinistra) in fase S. Devono infine essere restituiti come materiale allegato agli studi di microzonazione sismica di livello 3 in formato ASCII, SEG2 o SEG-Y standard o come eventualmente indicato dal GdL del CNR IGAG, insieme con un foglio di campagna esplicativo delle profondità di misura.

Il software per l'elaborazione dei dati a posteriori dovrà essere in grado di fornire i valori di velocità delle onde di compressione e di taglio per ogni stazione di misura.

4.7.2. Controlli preliminari

In fase di esecuzione della prospezione sismica DH:

- dovrà essere verificato che il/i sensore/i sia/siano orientato/i parallelamente alla direzione di generazione delle onde S;

- dovrà essere verificata l'esecuzione di una battuta destra e una battuta sinistra, in modo da poter garantire una lettura chiara del tempo di primo arrivo delle onde S tramite lettura dell'inversione di polarità;
- dovrà essere verificato l'accoppiamento tra sonda con il rivestimento in pozzo mediante i) trazione del cavo di bloccaggio della sonda e ii) ispezione del segnale sismico che deve essere privo di componenti mono-frequenziali.

Questo tipo di prova è poco sensibile alla deviazione dell'asse del foro dalla verticale, per cui non si rendono necessari controlli di verticalità.

4.7.3. *Modalità tecniche esecutive*

La misura DH deve essere effettuata dopo almeno 30 giorni dal termine delle operazioni di rivestimento e cementazione.

Le modalità di esecuzione della prova dovranno essere le seguenti:

- posizionamento e bloccaggio del ricevitore in corrispondenza del primo punto di prova;
- generazione dell'impulso (è ammessa anche la somma di più impulsi relativi a più energizzazioni; in quest'ultimo caso si deve sempre registrare oltre alla forma d'onda sommata anche almeno una relativa alla singola energizzazione);
- registrazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione e delle onde di taglio;
- generazione dell'impulso in opposizione di fase al precedente con identica posizione geofonica in foro (è ammessa anche la somma di più impulsi come precedentemente specificato) e registrazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione e delle onde di taglio;
- ripetizione delle medesime operazioni lungo tutta la verticale d'indagine con le misure che avranno frequenza di 1 misura ogni metro di sondaggio.

Una volta terminata le operazioni di rivestimento e cementazione l'interno dei tubi deve essere lavato con acqua pulita e lasciato pieno d'acqua.

4.8 Documentazione

Il Professionista incaricato è tenuto a comunicare tempestivamente al GdL del CNR IGAG, a richiesta, lo stato di avanzamento dei sondaggi e delle prove in situ, consegnando il rapportino di perforazione aggiornato alla data della richiesta.

Al termine dei sondaggi la Ditta è tenuta a fornire al Professionista incaricato il rapporto di perforazione, completo di una breve relazione redatta da un Geologo comprendente la\le verticale\i rappresentante\i in scala la\le stratigrafia\e di dettaglio rilevata\e, accompagnata\e da una planimetria, pure in scala, con ubicazione dei sondaggi (l'ubicazione, determinata con precisione, va anche georeferenziata). Il Professionista incaricato è tenuto a comunicare tempestivamente anche al GdL del CNR IGAG questo rapporto.

I log stratigrafici dovranno essere disegnati su appositi moduli divisi in colonne, nelle quali dovranno essere riportati almeno i seguenti dati:

- spessore degli strati incontrati durante il sondaggio;
- profondità delle variazioni di litologia;
- scala grafica;
- descrizione della natura dei terreni;
- rappresentazione simbolica della natura dei terreni;
- diametro del foro;
- modalità di carotaggio;
- percentuali di carotaggio per ogni strato;
- livello dell'acqua nel foro a fine turno e a fine perforazione;
- profondità e risultati delle prove con penetrometro o scissometro tascabile eseguite sulle carote estratte.

Relativamente alle prove SPT, il rapporto che dovrà riportare:

- profondità di inizio della prova;
- penetrazione iniziale per peso proprio delle aste del campionatore;
- numero dei colpi necessari per l'infissione del tratto preliminare e dei tratti di prova;
- lunghezza e descrizione geotecnica del campione estratto;
- osservazioni e note eventuali.

Relativamente ad ogni campione prelevato, indisturbato o rimaneggiato, il rapporto dovrà riportare:

- la denominazione del foro da cui è estratto e il numero identificativo del campione;
- la quota del prelievo;
- la lunghezza del campione (nominale nel caso di campioni indisturbati);
- la natura del campione;
- la modalità del prelievo;
- la data del prelievo;
- la data di spedizione e/o consegna al laboratorio presso il quale sono eseguite le prove meccaniche e/o dinamiche.

Il rapporto di perforazione dovrà essere completo di una documentazione fotografica del materiale carotato al fine di ottenere una descrizione più completa degli aspetti fisici del materiale.

La tecnica di fotografia dovrà quindi rappresentare nel modo più chiaro e completo possibile il prodotto delle attività svolte.

A tal fine si dovranno seguire le seguenti indicazioni:

- le cassette verranno fotografate singolarmente, con pellicola a colori o fotocamera digitale, entro breve tempo dal loro completamento (max 24 ore) e comunque prima di modificazioni dovute all'essiccamento;
- si richiede una visione chiara delle carote contenute, scegliendo le condizioni di illuminazione ottimali (evitando luci ed ombre) e un adeguato numero di pixel;
- si raccomanda una foto presa dall'alto e scattata da una distanza non superiore a 2 m;
- eventuali attività di rimaneggiamento delle carote, al fine di verificare dati di consistenza o plasticità di tipo speditivo, dovranno essere immediatamente seguite da riprese fotografiche;
- le carote litoidi dovranno essere lavate;

- si richiede la completa leggibilità di tutte le indicazioni esistenti sulla cassetta (sigla sondaggio, profondità progressive, testimoni di campionamenti ecc.);
- nelle fotografie dovrà essere visibile la tavola cromatica di riferimento.

Nel rapporto documentale non dovranno essere inserite più di n.2 foto per pagina (formato A4), con risoluzione massima di stampa.

Relativamente alla relazione della prova geofisica in foro di tipo DH, elaborata in base ai risultati delle indagini svolte, devono essere preferibilmente indicati:

- sezione indicante i dati sismici tempo-profondità-ampiezza delle tracce sismografiche delle onde di compressione (Energizzazione P);
- sezione indicante i dati sismici tempo-profondità-ampiezza delle tracce sismografiche delle onde di taglio (Energizzazione S destra e sinistra);
- gli algoritmi di calcolo impiegati, tabelle e tavole ad integrazione e chiarimento delle analisi. In particolare, i valori delle letture dei tempi di arrivo, riportati per ogni profondità di indagine;
- le velocità delle onde di compressione e di taglio per ogni profondità di indagine;
- le velocità delle onde di compressione e di taglio dei sismostrati individuati;
- il coefficiente di Poisson;
- le risultanze finali ed interpretative;
- osservazioni e note eventuali.

5. Le Instabilità

5.1 Premessa

Nel presente paragrafo si vuole fornire un indirizzo all'applicazione delle Linee Guida in relazione alle instabilità sismoindotte, annesse ad Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS) e scaricabili dal sito ufficiale del DPC all'URL: <http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/verbali.wp>.

Alla base del documento vi è la condivisa intenzione di garantire la corretta definizione delle Zone di Attenzione (ZA) per i fenomeni di instabilità, da parte dei professionisti incaricati degli studi di MS, ad esclusione delle zone potenzialmente instabili per fenomeni di liquefazione. Nell'ambito delle attività indicate nei disciplinari, si prevede infatti che i professionisti incaricati raggiungano il livello 3 (ovvero l'identificazione di Zone di Suscettibilità, ZS, e/o di Rispetto, ZR, ai sensi della Figura 5.1) soltanto per le instabilità per liquefazione, mentre ci si limiti alla definizione delle zone di attenzione per le restanti instabilità (instabilità di versante e faglie attive e capaci). Per ulteriori elementi sulla definizione data da ICMS nelle Linee Guida per le instabilità sismoindotte alle diverse Zone di Attenzione, Suscettibilità e Rispetto si rimanda ai successivi paragrafi.

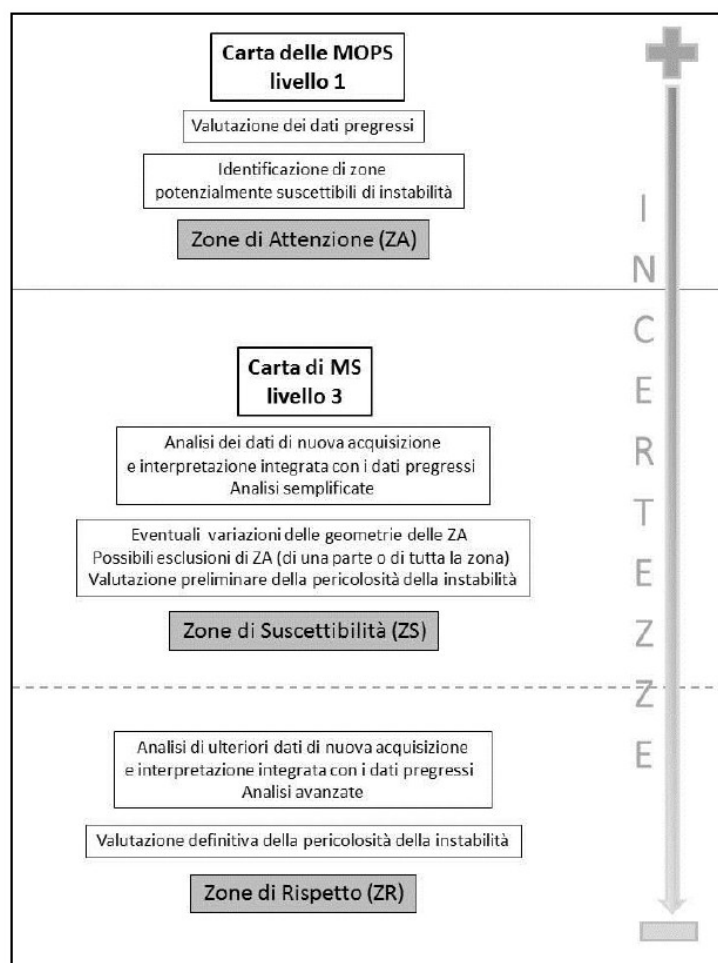


Figura 5.1 - Schema illustrativo del tipo di zona di instabilità (ZA, ZS, ZR) nelle carte MOPS e MS. La raccolta dati e le analisi permettono di ridurre le incertezze dal livello 1 al livello 3 (da ICMS - Linee Guida per le zone di instabilità).

Si ritiene, inoltre, che le ZA debbano essere dettagliate e supportate dal giudizio esperto dei professionisti incaricati limitatamente alle aree previste per le analisi di MS3; si prevede, in tal caso, la revisione delle perimetrazioni già fornite in eventuali precedenti studi di MS1. Questa attività di revisione è da considerarsi obbligatoria solo per le aree dove sono previste analisi di MS3.

Di seguito, si forniscono con maggior dettaglio indicazioni sulla perimetrazione delle ZA che dovrà essere effettuata dai professionisti incaricati per le diverse tipologie di instabilità considerate nelle linee guida di ICMS.

5.2 Zone di Attenzione per Frane (ZA_{FR})

In accordo con le Linee Guida allegate a ICMS e relative alle instabilità per frana (Figura 3.1), le zone di Attenzione (ZA_{FR}) sono zone nelle quali i dati a disposizione indicano la presenza di condizioni predisponenti l'instabilità in esame ma non sono sufficienti, in quantità e tipologia, per definire se l'instabilità possa effettivamente verificarsi in caso di evento sismico; è possibile, tuttavia, ad esempio attraverso la consultazione di inventari, cataloghi e documenti esistenti (tra cui IFFI, PAI e rapporti tecnici predisposti da gruppi collaboranti con il Centro MS, p.es. CERI, ISPRA,⁹) stabilire se in occasione di eventi sismici passati, nonché di quelli più recenti, si siano verificati eventuali fenomeni di instabilità.

All'interno delle zone previste per le MS di livello 3, la perimetrazione cartografica delle ZA_{FR} dovrà essere condotta secondo la seguente procedura:

- acquisizione integrale delle perimetrazioni PAI + IFFI come dato pregresso;
- rilevamento geologico, geomorfologico e geomeccanico, e verifica in sito delle perimetrazioni PAI+IFFI;
- eventuale rettifica (mai in difetto) delle aree PAI+IFFI e conseguente nuova perimetrazione;
- restituzione di un unico layer comprendente la nuova perimetrazione.

Per ciò che attiene il punto b), si richiede che vengano effettuati rilievi georiferiti in corrispondenza delle seguenti tipologie di contesti effettivamente o potenzialmente instabili: 1) coperture; 2) corpi di frana; 3) ammassi rocciosi fratturati. Il suddetto rilevamento dovrà essere condotto attraverso l'osservazione di forme tipicamente connesse a zone sorgente e/o zone di accumulo per frane in terra e roccia.

Per ciò che attiene il punto c), le operazioni di ripermetrazione dei corpi di frana PAI+IFFI dovrà avvenire solo in eccesso, ovvero solo nel caso in cui il rilevamento evidenzia una lacuna nelle instabilità indicate nei dati pregressi e/o una sottostima della loro estensione. Ciò può essere imputato all'evoluzione stessa dei processi gravitativi in atto (nel caso che i prodotti pregressi siano significativamente datati) o anche a lacune informative esistenti negli stessi. Non si ritiene, invece, ammissibile l'eliminazione di elementi instabili già inventariati nei prodotti ufficiali pregressi che, come tali, pongono un vincolo sovraordinato da parte dei PAI alle carte di MS3 nell'uso del territorio.

⁹ CEDIT - http://www.ceri.uniroma1.it/index_cedit.html; IFFI - <http://193.206.192.136/cartanetiffi/>.

Per ciò che attiene il punto d), i professionisti incaricati sono tenuti a segnalare esplicitamente nelle relazioni di accompagnamento le discrepanze riscontrate tra i due layer informativi fornendo, come annesso alle relazioni, una carta che evidenzi le differenze cartografiche rilevate. In definitiva, prescindendo da quanto indicato dalle linee guida (Figura 5.2), nell'ambito delle attività previste dai disciplinari i professionisti incaricati dovranno riportare nelle carte di MS di livello 3 solo le ZA_{FR} .

Livello di MS	Carta	Zone di instabilità di versante	Elementi informativi	Analisi e metodi
1	MOPS	Zone di Attenzione (ZA_{FR})	Minimi Dati pregressi	-
2	MS	Zone di Attenzione (ZA_{FR})	-	<i>Non si effettuano studi sulle instabilità di versante</i>
3	MS	Zone di Suscettibilità (ZS_{FR})	Specifici	Semplificate (<i>sensu</i> AGI, 2005) Metodi pseudostatici per frane in terra Metodi semplificati per definire la suscettibilità e la <i>runout distance</i> per frane di crollo
3	MS	Zone di Rispetto (ZR_{FR})	Specifici	Dinamiche semplificate o avanzate (<i>sensu</i> AGI, 2005). Metodi degli spostamenti e calcolo <i>runout distance</i>

Figura 5.2 – Livelli, carte e corrispondenti tipi di zone di instabilità di versante.

Per ciò che attiene le frane in roccia, secondo quanto previsto dalle linee guida ICMS (Figura 5.3), le ZA_{FR} nella loro perimetrazione dovranno contenere informazioni sulle aree di invasione (*runout distance*) dedotte da evidenze geomorfologiche (distribuzione dei depositi di frana) ed eventualmente supportate da valutazioni quantitative semplificate di natura empirico-statistica.

Metodi	Parametro	ZONE	CARTA	LIVELLO MS
Analisi inventari Metodi empirici	<i>Runout distance</i>	ZA_{FR} (Zona di Attenzione)	MOPS	1
<i>Non si effettuano studi sulle instabilità</i>		ZA_{FR} (Zona di Attenzione)	MS	2
Valutaz. attività RHAP-MS	FR_{att} Soglia	ZS_{FR} (Zona di Suscettibilità)	MS	3
Metodi empirici	<i>Runout distance</i>			
Spostamenti	<i>Runout distance</i> FRR	ZR_{FR} (Zona di Rispetto)	MS	3

Figura 5.3 - Schema riassuntivo per la verifica delle condizioni per l'individuazione delle zone per le frane di crollo.

5.3 Zone di Attenzione per le Faglie Attive e Capaci (ZA_{FAC})

La microzona omogenea che sarà riportata nella carta delle MOPS relativa alle FAC sarà costruita in modo da comprendere la supposta traccia del piano di rottura principale e i probabili fenomeni deformativi del terreno correlati al piano di rottura principale. Questa zona sarà denominata ZA_{FAC} .

(Zona di Attenzione per FAC) e rimanderà obbligatoriamente a livelli di approfondimento specifici, propri del livello 3 previsto da ICMS.

Per individuare una FAC devono essere verificate almeno due delle condizioni preliminari di seguito citate ovvero:

- l'area oggetto di studi di MS ricade in area epicentrale di terremoti storici con $M_w > 5.5$ (cfr. CPT15¹⁰);
- la letteratura scientifica disponibile già riporta la presenza di faglie all'interno di formazioni tardo-pleistoceniche-oloceniche;
- sono segnalate evidenze di attività recente delle faglie rilevate sul campo da geologi, durante i rilievi geologico-tecnici per la stesura delle carte di MS.

Solo con approfondimenti di livello 3 di MS una FAC potrà essere distinta in certa (tipo_a) ed incerta (tipo_b) in base ad una valutazione di robustezza e chiarezza degli elementi geologici e geomorfologici a essa associati. Tale distinzione dovrà guidare alla scelta ed all'applicazione di metodi diagnostici di livello 3, di tipo paleosismologico.

Le Faglie Potenzialmente Attive e Capaci (FPAC), eventualmente individuate con l'ausilio di dati di letteratura o durante i rilievi di terreno, verranno, invece, riportate nella sola Carta Geologico Tecnica per la Microzonazione Sismica mentre non andranno riportate nella carta delle MOPS (livello 1). Nei successivi approfondimenti di livello 3 tali faglie verranno investigate con indagini paleosismologiche al fine di identificarne l'eventuale attività negli ultimi 40.000 anni.

I professionisti, pertanto, dovranno definire la traccia superficiale delle FAC e FPAC mediante un adeguato rilevamento geologico e geomorfologico, e investigarne le geometrie sepolte mediante apposite indagini geofisiche e geognostiche. Per ciò che concerne le Zone di FAC, il professionista dovrà perimetrare le ZA_{FAC} nella Carta delle MOPS e nella Carta di MS, basando le perimetrazioni sulla verifica dei dati pregressi, sull'acquisizione di nuove indagini geofisiche e geognostiche e sulla base di apposito rilevamento geologico e geomorfologico. Nel caso delle FAC questi dati dovranno consentire di verificare almeno 2 delle condizioni preliminari sopra elencate, nel caso delle FPAC la traccia della faglia sarà mantenuta in via ipotetica nella sola Carta Geologico-Tecnica.

¹⁰ Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), 2016. CPT15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT15>

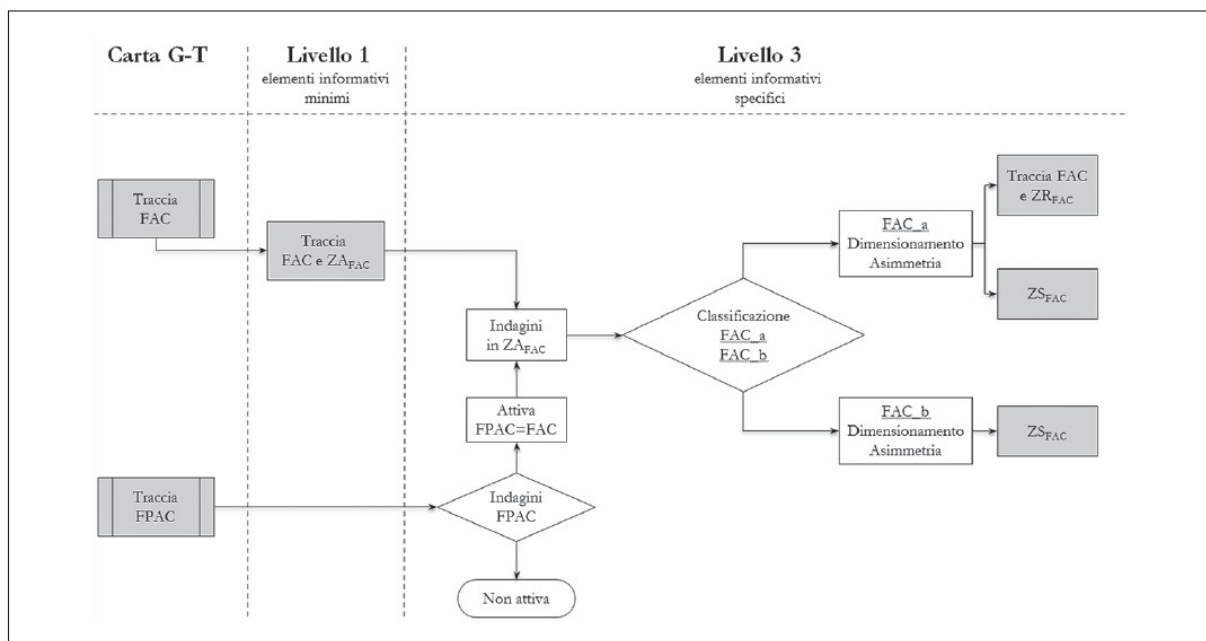


Figura 5.4 - Procedure di dimensionamento delle zone di faglia nei differenti livelli di approfondimento degli studi di MS.

5.4 Zone di Attenzione ($Z_{A_{LQ}}$), di Suscettibilità ($Z_{S_{LQ}}$), e di Rispetto ($Z_{R_{LQ}}$) per Liquefazione

I livelli di approfondimento che si possono distinguere per l'identificazione delle zone potenzialmente interessate da liquefazione sono di seguito riassunti:

- Livello 1 (Carta delle MOPS) - per l'individuazione di Zone di Attenzione per la liquefazione ($Z_{A_{LQ}}$) nella quale sono sintetizzati gli elementi informativi minimi (condizioni stratigrafiche, profondità della superficie libera della falda idrica, elementi paleogeografici, etc.);
- Livello 3 (Carta di MS) - sono distinte due modalità di approfondimento delle analisi in funzione di due tipi di zone previste:
 - Zone di Suscettibilità a liquefazione ($Z_{S_{LQ}}$), da identificare con elementi informativi specifici e metodi di calcolo semplificati;
 - Zone di Rispetto per liquefazione ($Z_{R_{LQ}}$), da identificare con elementi informativi specifici e metodi di calcolo semplificati e avanzati.

In Figura 5.5 è rappresentato un diagramma di flusso che illustra il percorso metodologico, descritto nei paragrafi che seguono, per l'identificazione dei tre tipi di zone di liquefazione. Come si vede, nel livello 3 è previsto il calcolo dell'Indice del potenziale di Liquefazione (IL, definito nel paragrafo 5.4.2) la cui determinazione richiede specifiche analisi ed indagini più approfondite.

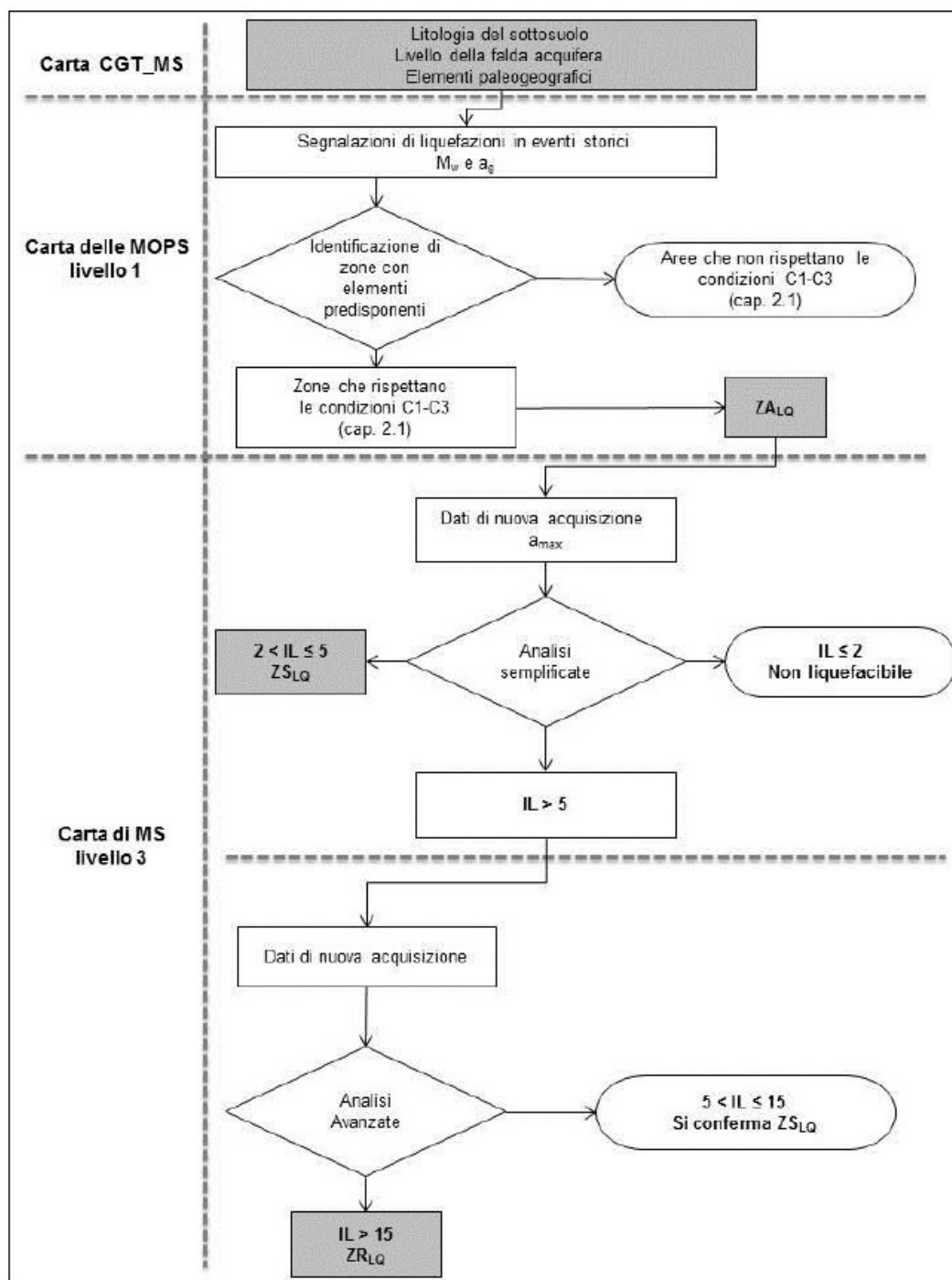


Figura 5.5 – Diagramma di flusso che illustra il percorso metodologico (attraverso i livelli di MS) per la definizione delle zone di liquefazione (cfr. Linee Guida per le Instabilità annesse a ICMS).

In Figura 5.6 è riportata una Tabella, tratta dalle linee Guida per la Liquefazione, che sintetizza le considerazioni fin qui effettuate.

Livello di MS	Carta	Zone di liquefazione	Elementi informativi	Metodi
1	MOPS	Zone di Attenzione (ZA_{LQ})	Minimi	-
3	MS	Zone di Suscettibilità (ZS_{LQ})	Specifici	Semplificati (<i>sensu</i> AGI, 2005)
3	MS	Zone di Rispetto (ZR_{LQ})	Specifici	Avanzati (<i>sensu</i> AGI, 2005)

Figura 5.6 – Livelli, carte e corrispondenti tipi di zone per liquefazione.

5.4.1 Zone di Attenzione (ZA_{LQ})

In mancanza di un prodotto ufficiale di perimetrazione delle ZA_{LQ} , si suggerisce una perimetrazione più conservativa (dunque più ampia) dove ritenuta consistente con i dati geologici e geotecnici disponibili. Tra le condizioni predisponenti la liquefazione è da ritenersi prioritaria la presenza di depositi sciolti limoso-sabbiosi sotto falda nei primi 20 m di sottosuolo, documentabili in base a relazioni tecniche disponibili e/o sulla base di specifiche indagini condotte per il livello 3 di MS. Inoltre, come suggerito dalle stesse linee guida di ICMS, tale perimetrazione potrà essere supportata da evidenze storiche riportate in cataloghi accreditati che dovranno essere citati nelle relazioni tecniche.

In accordo a quanto indicato nelle specifiche linee guida, la zonazione delle instabilità per liquefazione deve essere condotta in modo da:

- evitare che negli studi di MS siano individuate zone suscettibili a liquefazione in assenza dati/informazioni sufficientemente affidabili per la loro perimetrazione;
- definire procedure standard per individuare le zone di liquefazione in funzione della tipologia, della qualità delle indagini svolte e dei metodi di analisi;
- riportare eventuali incertezze dei dati utilizzati;
- definire il sistema di rappresentazione delle zone di liquefazione.

La Carta Geologico-Tecnica per la microzonazione sismica deve fornire anche elementi utili ad individuare l'eventuale presenza di condizioni locali predisponenti la liquefazione quali elementi paleogeografici (tra cui paleo alvei, anche sepolti) ed eventuali elementi antropici di interesse (tra cui gli argini fluviali), finalizzati alla delimitazione delle ZA_{LQ} .

La cartografia geologico-tecnica deve altresì guidare alla individuazione delle aree nelle quali si possa ipotizzare la presenza di terreni sciolti limoso-sabbiosi, saturi, nei primi 20 m di sottosuolo. Tale individuazione dovrà essere accompagnata da una descrizione specifica affinché possano essere condotti, negli studi di livello 3, gli approfondimenti necessari a verificare l'effettiva presenza di condizioni predisponenti il fenomeno della liquefazione, arrivando in questo modo alla perimetrazione delle ZS_{LQ} e delle ZR_{LQ} (Figura 5.4).

Nell'ambito delle attività previste dai disciplinari, ai fini della perimetrazione delle aree liquefacibili negli studi di MS3, i professionisti incaricati dovranno integrare e verificare, eventualmente modificando in eccesso o in difetto, la delimitazione delle ZA_{LQ} presenti nelle carte delle MOPS già ufficializzate.

Per ciò che attiene le modalità di perimetrazione delle ZA_{LQ} , essa si basa su elementi informativi minimi. Pertanto, la perimetrazione di tali zone identificherà i limiti delle aree nelle quali si verificano le seguenti due condizioni codificate da ICMS:

- C1. nella successione litologica sono presenti orizzonti di terreni non coesivi saturi (limi sabbiosi, sabbie, sabbie limose, sabbie ghiaiose, sabbie argillose e ghiaie sabbiose) ad una profondità inferiore a 20 m dal p.c.;
- C2. la falda acquifera si trova ad una profondità media stagionale inferiore a 15 m dal p.c.

Per quanto riguarda la valutazione della condizione C1, poiché può essere fatta sulla base di dati pregressi, tra i quali non sempre sono presenti indicazioni strettamente granulometriche, si può far riferimento anche alla sola descrizione litologica. Laddove siano disponibili dati granulometrici, la condizione C1 dovrà essere verificata sulla base del confronto con i fusi granulometrici riportati in ICMS. Anche per la condizione C2 si può far riferimento a dati pregressi.

Nel caso non sia verificata anche solo una delle due condizioni suddette, la zona è da considerare non suscettibile di liquefazione.

La procedura di perimetrazione prevede che:

- nell'ambito della elaborazione della Carta delle MOPS e della Carta di MS3, le ZA_{LQ} siano individuate tra quelle suscettibili di amplificazione (ovvero le zone nelle quali sono verificate le condizioni C1 e C2);
- una ZA_{LQ} possa essere costituita da una o da più zone suscettibili di amplificazione anche confinanti;
- per la ZA_{LQ} dovrà essere specificata anche la successione litostratigrafica nei primi 20 m.

5.4.2 Zone di Suscettibilità per liquefazione (ZS_{LQ})

L'acquisizione dei risultati di specifiche indagini in sito e prove di laboratorio hanno i seguenti obiettivi:

- stimare l'accelerazione massima in condizioni di *free-field* (a_{max}) attraverso modellazione numerica della risposta sismica locale;
- definire con dati più accurati la geometria della zona nella quale è possibile il verificarsi della liquefazione;¹¹
- attribuire alla zona in esame, mediante analisi semplificate, un indice del Potenziale di Liquefazione (IL)¹² medio¹³; a seconda del valore assunto da IL è possibile individuare tre classi secondo la Tabella seguente:

¹¹ In particolare, si raccomanda, ove possibile, l'utilizzo di prove in sito CPT a punta elettrica (CPTE o CPTEU) in quanto i metodi semplificati fanno riferimento a questo tipo di prove e, in genere, la determinazione di IL da prove CPT a punta meccanica fornisce valori sottostimati.

¹² L'indice del potenziale di Liquefazione IL è definito dalla seguente relazione: $I_L = \int_0^{20} F(z) w(z) dz$

con z , profondità dal piano campagna in metri e $w(z)=10-0.5z$. Ad una quota z il fattore $F(z)$ vale: $F=1-F_L$ se $F_L \leq 1.0$; $F=0$ se $F_L > 1.0$; dove F_L è il fattore di sicurezza alla liquefazione alla quota considerata.

¹³ Per IL medio si intende la media degli IL calcolati in tutte le verticali ricadenti nella zona.

IL	Classi
$0 < IL \leq 2$	Nulla - Basso
$2 < IL \leq 15$	Moderato - Alto
$IL > 15$	Molto Alto

- definire le aree di ZS_{LQ} ($IL \leq 15$);
- definire le aree di ZR_{LQ} ($IL > 15$); su tali zone è opportuno condurre ulteriori indagini al fine di confermare le ZR_{LQ} .

Le zone identificate nel livello 1 come ZA_{LQ} e per le quali le verticali analizzate con analisi semplificate forniscono $2 < IL \leq 15$, sono Zone di Suscettibilità alla liquefazione (ZS_{LQ}).

Le zone identificate nel livello 1 come ZA e per le quali le verticali analizzate con analisi semplificate forniscono $IL > 15$, sono Zone di Rispetto (ZR_{LQ}). Effettuando ulteriori indagini sarà possibile confermare se tali zone siano ZS_{LQ} o ZR_{LQ} .

5.4.3 Zone di Rispetto per liquefazione (ZS_{LQ})

Le Zone di Rispetto per liquefazione possono essere individuate mediante metodi dinamici avanzati. La raccolta dei dati in situ, le prove in laboratorio e le analisi dinamiche avanzate hanno i seguenti obiettivi:

- valutare l'accelerazione massima in superficie in condizioni di *free-field* (con maggiore affidabilità rispetto a quanto fatto per la identificazione della ZS_{LQ});
- rivalutare il parametro IL medio per le zone con $IL > 15$, con ulteriori dati e/o con analisi dinamiche semplificate o avanzate;
- valutare o rivalutare i possibili effetti sulle opere e fornire indicazioni in merito ai possibili interventi per la mitigazione del rischio.

Le aree nelle quali risulta $IL > 15$ sono da considerarsi ZR_{LQ} .

5.4.4 Modalità di rappresentazione e perimetrazione delle Zone di Rispetto per liquefazione (ZS_{FR})

5.4.4.1 ZS_{LQ} (Carta di MS)

La Zona di Suscettibilità (ZS_{LQ}) non necessariamente coincide con la Zona di Attenzione (ZA_{LQ} ; figura 5.7). La perimetrazione della ZS_{LQ} sarà realizzata sulla base di:

- CGT_MS rielaborata sulla base delle nuove indagini ad una scala di grande dettaglio (1:5000-1:1000);
- risultati di analisi semplificate per il calcolo di CRR e CSR, attraverso prove e indagini differenti, con vari livelli di incertezza.

La procedura di perimetrazione delle ZS_{LQ} (Figura 5.8), partendo dalla ZA_{LQ} definita nel livello 1, prevede:

- rivalutazione delle informazioni contenute nella CGT_MS;
- calcolo della a_{max} in superficie con metodi numerici;
- valutazione degli IL sulla base dei risultati delle verticali studiate e verifica che sia $IL > 2$;
- geometria delle ZS_{LQ} ;
- calcolo di IL medio della zona ZS_{LQ} .

Le ZS_{LQ} saranno caratterizzate oltre che dagli IL medi, da un fattore di amplificazione.

Nel caso in cui $IL > 15$, la zona è classificata come ZR_{LQ} .

Per le modalità di rappresentazione delle ZS_{LQ} si vedano gli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b.

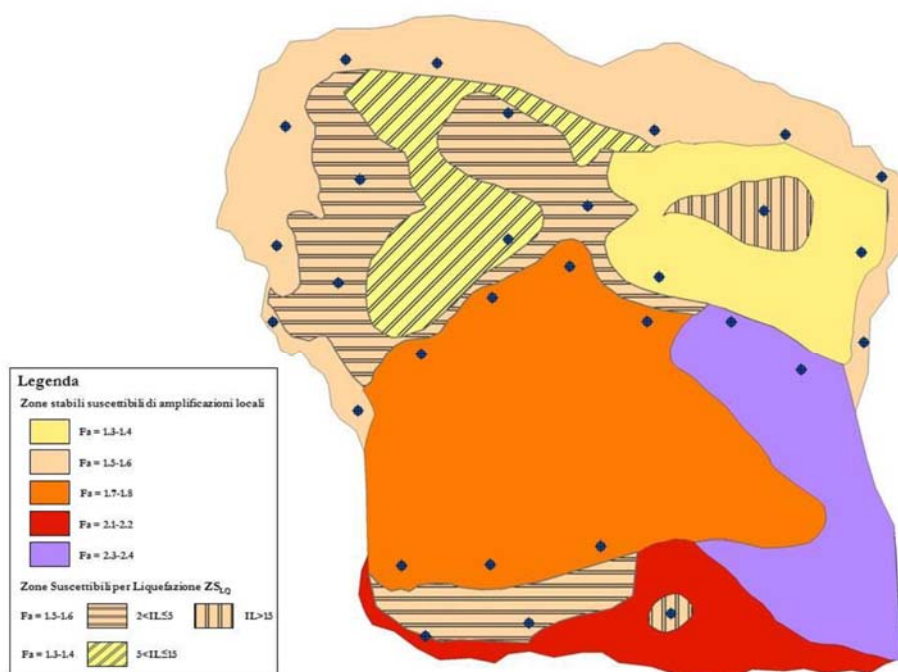


Figura 5.7 –Schema esemplificativo di una Carta di MS con alcune ZS_{LQ} ($IL > 2$). I punti in blu rappresentano la localizzazione i cui risultati hanno permesso la perimetrazione delle ZS_{LQ} (il simbolo utilizzato un'indagine generica e non ha nessun riferimento con la simbologia degli Standard di archiviazione e di rappresentazione MS). Il retino delle ZS_{LQ} indica la classe di IL medio, il colore dello sfondo indica la classe del parametro di amplificazione.

5.4.4.2 ZR_{LQ} (Carta di MS)

La perimetrazione della ZR_{LQ} (Figura 5.8) si realizzerà sulla base delle posizioni delle verticali di indagini e di analisi per le quali il valore di IL è risultato > 15 .

La procedura di perimetrazione delle ZR_{LQ} avviene contemporaneamente alla individuazione delle ZS_{LQ} .

Sulle verticali delle indagini e analisi presenti all'interno della ZR_{LQ} sarà necessario applicare una delle metodologie di analisi dinamica di suscettibilità alla liquefazione:

- analisi dinamica semplificata in termini di tensioni totali o efficaci;
- analisi dinamica avanzata.

Si determineranno:

- calcolo del moto sismico del sito (compresi i fattori di amplificazione);
- valutazione degli IL sulla base dei risultati delle verticali studiate e verifica che sia > 15 ;
- geometria delle ZR_{LQ} ;
- calcolo dell'IL medio della zona ZR_{LQ} ;

Le ZR_{LQ} saranno caratterizzate oltre che dagli IL medi, anche da un fattore di amplificazione.

Nel caso in cui si verifichi che IL è minore o uguale a 15, la zona viene riportata ZS_{LQ} .

Per le modalità di rappresentazione delle ZR_{LQ} si vedano gli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b.

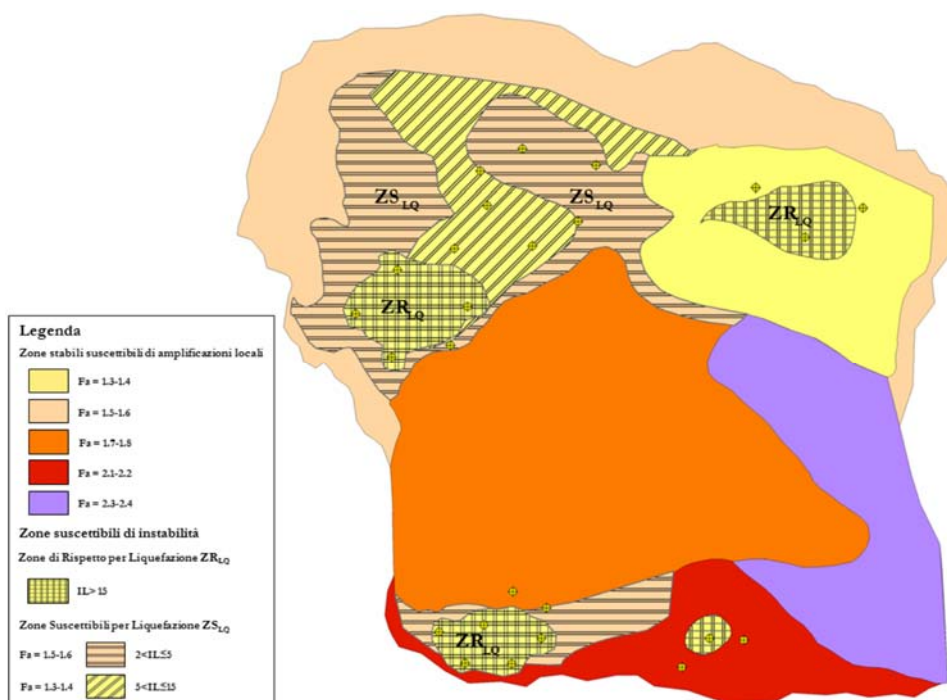


Figura 5.8 –Schema esemplificativo una Carta di MS con alcune ZS_{LQ} ($2 < IL \leq 15$) e ZR_{LQ} ($IL > 15$) I punti gialli indicano la localizzazione delle indagini eseguite i cui risultati sono stati utilizzati per la perimetrazione delle ZR_{LQ} (il simbolo utilizzato indica un'indagine generica e non ha nessun riferimento con la simbologia degli Standard di archiviazione e di rappresentazione MS). Il colore dello sfondo delle zone indica la classe del parametro di amplificazione.

6. Modellazione della Risposta Sismica Locale in configurazione 1D

6.1 Premessa

Obiettivo delle analisi numeriche previste nei disciplinari e dal livello 3 di approfondimento della microzonazione sismica è la determinazione di alcuni parametri rappresentativi della Risposta Sismica Locale (RSL) in tutte le microzone, sia coincidenti che inglobate all'interno delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) definite come stabili e soggette a fenomeni di amplificazione o instabili per fenomeni di liquefazione (ZS_{LQ} e ZR_{LQ}).

I risultati determinati sulla base delle analisi 1D di RSL per gli studi di livello 3 sono:

- Spettri di risposta elastici in accelerazione, calcolati per uno smorzamento del 5%, mediando l'output ricavato dai 7 input sismici forniti dal CNR IGAG. Si potrà restituire la mediana degli spettri di risposta elastici in accelerazione al 5% dello smorzamento, almeno fino a 1.1s;
- Fattori di Amplificazione (FA) relativi a tre intervalli di periodi (0.1-0.5s, 0.4-0.8s e 0.7-1.1s), assegnati a ciascuna microzona;
- Carte di microzonazione di livello 3 per ognuno dei tre intervalli di periodi (0.1-0.5s, 0.4-0.8s e 0.7-1.1s).

In particolare, i valori delle terne di FA ottenuti nei tre intervalli di periodi 0.1-0.5s, 0.4-0.8s e 0.7-1.1s e i nomi degli spettri restituiti in formato .txt andranno a popolare rispettivamente i campi "FHa_01_05", "FHa_04_08", "FHa_07_11" e "SPETTRI" degli shapefile "Stab" ed "Instab" contenuti nella cartella MS23 della struttura di archiviazione. Le modalità di archiviazione degli spettri, possono essere reperite alla pag. 76 degli Standard 4.0 (paragrafo 2.1.8.6), se non diversamente specificato dal GdL del CNR IGAG o da ss.mm.ii. degli Standard stessi.

6.2 Modello di analisi e scelta del codice di calcolo

La modellazione sarà effettuata dall'incaricato utilizzando uno fra i codici di calcolo disponibili (Skake91, STRATA, EERA, Deepsoil, ProShake ecc.), che operano nel dominio delle frequenze e modellano il comportamento non lineare dei terreni mediante il metodo lineare equivalente. In questi modelli, il sottosuolo è schematizzato mediante una successione di strati orizzontali sovrapposti omogenei (modelli 1D). In questi codici i principali dati richiesti in ingresso sono:

- Lo scuotimento sismico (accelerogramma) su basamento sismico affiorante ovvero su un sito di riferimento rigido e superficie topografica orizzontale (Categoria di sottosuolo A e Categoria topografica T1 secondo la classificazione NTC08, corrispondente ad un ammasso roccioso o terreno rigido con superficie suborizzontale e valori della velocità media delle onde S nei primi 30 metri almeno pari a 800 m/s); questo scuotimento è detto anche 'moto di input' o 'moto di riferimento' e deve essere assegnato al codice di calcolo come 'rock outcropping input motion' (indicato anche come '2A' nel codice STRATA);
- Il profilo di velocità delle onde S (V_s) fino alla profondità corrispondente al basamento sismico ovvero al tetto di un ammasso roccioso o terreno rigido caratterizzato da valori di V_s almeno pari a 800 m/s; più in generale si deve identificare come profondità di riferimento quella del tetto del primo strato della successione che presenta valori di velocità delle onde

S maggiori di 750-800 m/s con uno spessore ritenuto sufficientemente significativo in relazione al modello geologico del sito;

- Le curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato G/G_0 e del rapporto di smorzamento D , in funzione della deformazione di taglio, per ciascuno dei materiali presenti nel modello di sottosuolo.

Un elemento chiave delle analisi numeriche 1D è il livello di discretizzazione necessaria ad una corretta modellazione del sottosuolo. In pratica, si tratta di definire lo spessore massimo Δh_{max} dei diversi strati presenti nel modello. Se uno strato omogeneo della successione ha uno spessore maggiore del valore Δh_{max} necessario ad ottimizzare la modellazione, questo dovrà essere suddiviso in una serie di sottostrati con le stesse caratteristiche. Un valore ragionevole di Δh_{max} è fornito dalla relazione:

$$\Delta h_{max} = \frac{V_s}{(6 \div 8)f_{max}}$$

dove V_s è la velocità delle onde di taglio nello strato in questione, f_{max} è la massima frequenza significativa del segnale di ingresso, ovvero la massima frequenza che dovrà essere risolta nel modello numerico (valore consigliato: 20 Hz). Se, per esempio, V_s è dell'ordine 200 m/s dovrà essere $\Delta h_{max} \approx 1\text{m}$. Per dettagli circa gli altri dati richiesti in input e le procedure di calcolo si rimanda al manuale del codice di calcolo di volta in volta utilizzato.

6.3 Gestione delle incertezze nella stima della RSL

In generale, il risultato di un'analisi di RSL è affetto da incertezze di diversa origine (variabilità intrinseca delle diverse grandezze in gioco, imperfetta esecuzione delle prove, errori di misura, approssimazione del comportamento dei terreni mediante modelli semplificati, ecc.) che riguardano: lo scuotimento sismico, il modello geotecnico e il codice di calcolo utilizzato. Supponendo di poter trascurare l'incertezza legata al modello di calcolo, l'incertezza legata al terremoto atteso viene messa in conto, nel caso specifico, selezionando 7 accelerogrammi rappresentativi della pericolosità sismica di riferimento (ovvero relativa a condizioni di basamento sismico affiorante e con superficie orizzontale). Vengono di conseguenza effettuate 7 diverse stime della RSL, determinando 7 diversi accelerogrammi in superficie (uno per ogni accelerogramma di input), 7 corrispondenti spettri di risposta elastici in pseudo-accelerazione e 7 diverse terne di fattori di amplificazione (FA). Come descritto più oltre, sulla base di queste 7 valutazioni viene poi assegnata alla singola MOPS (o alla zona instabile secondo i criteri sopra indicati) una sola terna di fattori di amplificazione (FA), ciascuno calcolato come valore mediano dei 7 valori relativi ad ognuno dei tre intervalli di periodo indicati (0.1-0.5s, 0.4-0.8s e 0.7-1.1s). Una ulteriore fonte di incertezza nella RSL deriva, come già detto, dal modello geotecnico, ovvero dalle caratteristiche lito-stratigrafiche, morfologiche e geotecniche della zona indagata. In particolare, le principali incertezze riguardano il profilo $V_s(h)$ di velocità delle onde S in funzione della profondità h , le curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato (G/G_0) e di incremento del fattore di smorzamento (D) dei materiali presenti, e la profondità del basamento sismico. La determinazione univoca di queste grandezze presenta infatti alcune difficoltà legate ai seguenti aspetti:

1. il profilo $V_s(h)$ è derivato da misure (curva di dispersione, curva HVSR, ecc.) affette da incertezze dovute alle condizioni sperimentali;
2. anche se le misure effettuate fossero di tipo ideale (ovvero prive di incertezze sperimentali), il carattere fortemente non lineare delle relazioni fra il profilo di V_s e gli osservabili rende non univoco il risultato; ad esempio, nel caso di una procedura di inversione, molte configurazioni del sottosuolo (tutte ugualmente compatibili con la geologia locale) sono in grado di spiegare le stesse osservazioni;
3. all'interno della singola microzona possono esistere vari profili $V_s(h)$ a causa di variazioni di spessore delle coperture o della eterogeneità (variabilità intrinseca) di queste ultime;
4. i campioni raccolti e analizzati in laboratorio potrebbero non essere pienamente rappresentativi o non sufficienti a caratterizzare tutti materiali presenti;
5. le curve di rigidezza normalizzata e smorzamento sono incerte perché frutto di misure di laboratorio in numero limitato;
6. la profondità del basamento sismico potrebbe non essere stata raggiunta e verificata con indagini dirette, ma solo stimata con indagini indirette o estrapolata.

Sebbene di diversa natura, tutti i fattori elencati producono una molteplicità di valori possibili per le stesse grandezze e anche se, per una determinata Microzona, le condizioni 'reali' del profilo di V_s , delle curve di decadimento e smorzamento e della profondità del basamento sismico sono ignote, questo non significa che nulla si possa dire riguardo a queste caratteristiche della microzona. Tutte le misure in forma diversa concorrono a definire dei limiti 'plausibili' per i valori dei diversi parametri, ovvero compatibili con le osservazioni. Si tratta di definire questi limiti a partire dall'insieme dei valori stimati: tutti i valori all'interno di questi limiti saranno giudicati possibili e quindi utilizzabili per la stima della risposta sismica locale. Ovviamente, a ciascun profilo di V_s , a ciascun andamento delle curve di decadimento e smorzamento, a ciascun valore di profondità del basamento sismico, corrisponderà una diversa stima della risposta sismica locale.

Bisognerà quindi valutare l'impatto di questa variabilità sulle valutazioni finali. Ignorare le possibili variazioni della RSL legate alle incertezze sperimentali, alle procedure di inversione ed alla variabilità della situazione lito-stratigrafica, potrebbe portare a sottovalutazioni dello scuotimento atteso e quindi della pericolosità sismica locale.

Per ogni singola zona l'analisi di RSL viene quindi sviluppata in due fasi. Nella prima vengono valutati gli effetti indotti sulla risposta sismica locale dalla variabilità presente nel profilo di V_s , nelle curve $G/G_0-\gamma$ e $D-\gamma$ e nella profondità del sottosuolo di riferimento, considerando ogni singolo accelerogramma di riferimento: al termine di questa fase devono essere identificati 7 accelerogrammi e 7 spettri di risposta, 'rappresentativi' di ciascuno dei 7 possibili scenari di pericolosità sismica. Nella seconda fase, considerando l'insieme dei risultati ottenuti, deve essere definita un'unica terna di valori di FA, ciascuno relativo ad un singolo intervallo di periodi.

6.4 Parametri descrittivi della variabilità

Per gestire la variabilità di una certa grandezza è opportuno richiamare alcuni concetti di tipo statistico, ovvero alcuni concetti utili a descrivere la variabilità di una certa 'popolazione' (insieme di

tutte le possibili unità che costituiscono l'oggetto di studio) a partire dall'osservazione di un sottoinsieme di unità estratte dalla popolazione ('campione statistico'). Immaginiamo che esista un valore 'vero' della grandezza misurata (per esempio il valore di V_s ad una profondità h) e che lo scarto fra il valore misurato e quello 'vero' sia dovuto ad una perturbazione 'casuale' (ovvero imprevedibile). Il valore di riferimento (cioè il valore 'vero') può essere immaginato come il valore misurato in condizioni 'ideali', senza fattori perturbanti. Ipotizziamo ora che la perturbazione possa produrre con la stessa probabilità un valore più grande o più piccolo del valore di riferimento e che le perturbazioni molto grandi siano assai meno probabili di quelle piccole. Con queste assunzioni si può immaginare che eseguendo tante misure, la loro distribuzione in frequenza assuma la forma della tipica curva a 'Campana' (curva di Gauss) come quella rappresentata in Figura 6.1. La probabilità che la misura ricada all'interno di un intervallo $[x_1, x_2]$ è data dall'area sotto la curva compresa tra x_1 e x_2 , mentre l'area sottesa dalla curva è 1 (probabilità 100% che la misura sia relativa ad un elemento della popolazione). Il valore di riferimento corrisponde al baricentro della distribuzione in frequenza (la cosiddetta 'media' della distribuzione) che coincide anche con il valore mediano (ovvero il valore che divide in due l'insieme dei valori misurati).

Questa distribuzione ammette tutti i valori della grandezza (inclusi quelli negativi) ed è caratterizzata da due parametri rappresentativi: la media μ e la deviazione standard σ . La media è il valore centrale (il valore di riferimento) mentre la deviazione standard descrive la 'larghezza' della campana ovvero definisce il livello di dispersione dei dati osservati: maggiore è il valore della deviazione standard e maggiore è l'effetto dei fattori di disturbo che producono valori più lontani dal valore di riferimento. Per esempio, dalla curva di Figura 6.1 si vede che l'84.1% dei valori potenzialmente misurabili è minore di $\mu + \sigma$ (area della curva tra $-\infty$ e $\mu + \sigma$), mentre ben il 97.7% è più piccolo del valore $\mu + 2\sigma$. La stessa distribuzione può essere utilizzata per definire le probabilità che dalla misura risulti un valore maggiore di quello di riferimento. Per esempio, potremmo dire che esiste una probabilità di circa il 16% che il valore di V_s sia maggiore di $\mu + \sigma$.

In questo contesto, dal punto di vista pratico, il problema diventa quello di stimare i due parametri μ e σ della distribuzione in Figura 6.1. Se disponiamo di N valori sperimentali, una stima di μ può essere fornita dalla media aritmetica degli N valori. Ad esempio, se immaginiamo di avere N valori di V_s tutti relativi allo stesso periodo di 1s (il pedice i indica il valore ottenuto per il periodo di 1s in corrispondenza dell' i -mo profilo di velocità fra gli N disponibili), la media aritmetica m , è data da:

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{s_i} \quad [1]$$

mentre una stima della deviazione standard è data dalla grandezza s definita dalla relazione:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{s_i} - m)^2} \quad [2]$$

In generale m ed s sono diversi da μ e σ , ma tendono ad avvicinarsi sempre di più al crescere di N . Si potrebbe quindi dire (per N grande) che m è prossimo al valore 'vero' e che esiste una probabilità del 16% di osservare un valore di V_s maggiore o uguale a $m + s$.

In realtà la distribuzione in Figura 6.1 è poco adatta a rappresentare la distribuzione di probabilità di molte delle grandezze di interesse ai fini della RSL. Per esempio, la curva in Figura 6.1 ammette anche valori negativi e questo è inammissibile per i valori di V_s o del Fattore di amplificazione FA. In

questi casi la descrizione della popolazione dei valori possibili è meglio descritta da una distribuzione asimmetrica di tipo log-normale (Figura 6.2).

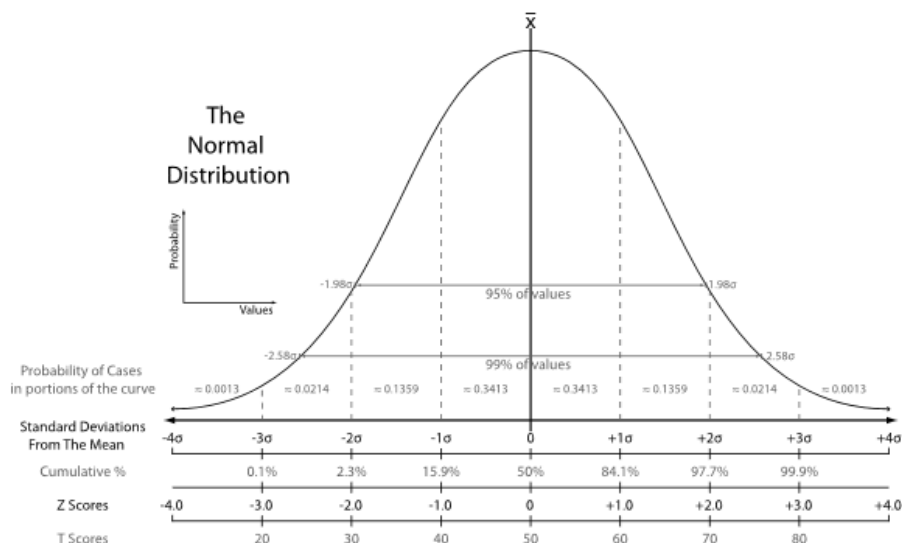


Figura 6.1 - Possibile distribuzione teorica dei valori di una data grandezza (Distribuzione di Normale o di Gauss). In ascissa i valori possibili (in termini di scarto dal valore medio μ , espresso in unità di deviazione standard σ) ed in ordinata la loro frequenza relativa (teorica). In altri termini, in ascissa ci sono i valori di Z dove $Z=(x-\mu)/\sigma$ (detta variabile normale standardizzata) e x è il valore sperimentale.

Nel caso della distribuzione log-normale i parametri di interesse sono m_{ln} e s_{ln} che, con riferimento ad esempio all'insieme N di valori Vs_i , possono essere stimati come segue

$$m_{ln} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(Vs_i) \quad [3]$$

$$s_{ln} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\ln(Vs_i) - m_{ln}]^2} \quad [4]$$

Dove $\ln$ indica il logaritmo naturale (in base e) dell'argomento.

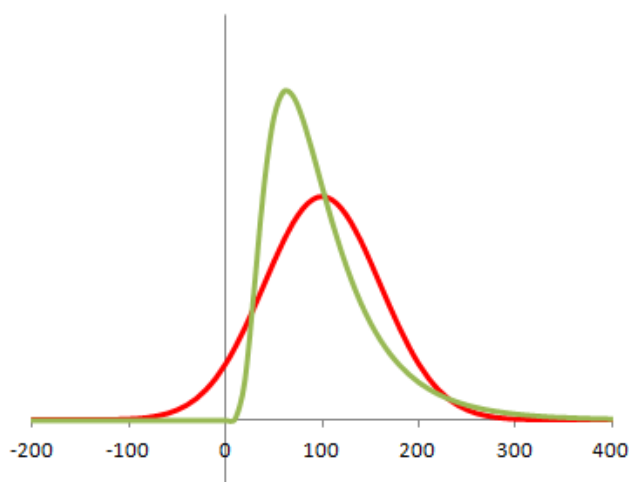


Figura 6.2 - Andamento della distribuzione log-normale (in verde) confrontata con l'andamento di una distribuzione Normale o di Gauss quale quella in Figura 6.1.

Si dimostra che, in questo caso, il valore di riferimento Vs_{rif} sarà

$$Vs_{rif} = e^{m_{ln}} \quad [5]$$

che rappresenta la mediana della distribuzione (che in questo caso, essendo la curva asimmetrica è diversa dalla media). Fra i parametri m e s nelle formule [1] e [2] e i parametri m_{ln} e s_{ln} nelle formule [3] e [4] esistono le seguenti relazioni

$$m_{ln} = \ln\left(\frac{m^2}{\sqrt{s^2+m^2}}\right); \quad s_{ln}^2 = \ln\left(1 + \frac{s^2}{m^2}\right); \quad s_{ln} = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{s^2}{m^2}\right)}$$

Esistono anche delle relazioni inverse nella forma

$$m = e^{m_{ln} + \frac{1}{2}s_{ln}^2}; \quad s^2 = e^{2m_{ln} + s_{ln}^2} (e^{s_{ln}^2} - 1)$$

Anche nel caso di una distribuzione log-normale è possibile definire la probabilità che la misura superi un dato valore. Per esempio, esiste una probabilità del 16% che si verifichi un valore uguale o superiore a $e^{(m_{ln} + s_{ln})}$. Questo valore rappresenta un massimo ragionevole dei valori misurati. Solitamente è detto 84° percentile perché esiste una probabilità dell'84% che si misuri un valore più basso di questo. Formalmente si potrebbe scrivere

$$Vs_{84^\circ} = e^{m_{ln} + s_{ln}} \quad [6]$$

Va notato che questo tipo di descrizione può essere utilizzato anche per descrivere la variabilità associata al singolo dato sperimentale. Per esempio, l'incertezza sperimentale associata ai rapporti spettrali H/V determinati su sotto-finestre della serie sperimentale può essere rappresentata utilizzando le formule [1] e [2] o le formule [3] e [4].

6.5 Implementazione della variabilità del profilo di Vs nelle analisi di RSL

Supponiamo di avere determinato N profili di Vs (tutti giudicati ugualmente plausibili sulla base delle informazioni disponibili) per una determinata microzona. Gli N profili possono essere frutto di diverse inversioni effettuate a partire dagli stessi osservabili variando i vincoli o le procedure di inversione, oppure dedotti invertendo osservabili diversi oppure costituiti da un insieme dei due gruppi.

È possibile ora generare un singolo profilo di Vs di riferimento a partire dagli N profili di Vs ottenuti dalle misure. A questo scopo, conviene discretizzare ogni profilo definendo il valore di Vs per ogni metro fino ad una profondità adeguata al problema in esame (Figura 6.3).

Il procedimento può essere ripetuto per i diversi profili di Vs all'interno (per esempio) di un foglio di calcolo EXCEL. A questo punto, può essere costruito un nuovo insieme di colonne contenenti i valori del logaritmo naturale di Vs che possono essere utilizzati per calcolare i valori di m_{ln} e s_{ln} come in Figura 6.4.

In alternativa, si può parametrizzare anche la variabilità del profilo di Vs identificando un massimo ed un minimo 'ragionevoli' corrispondenti ai due valori che racchiudono il 68% della probabilità di occorrenza. Gli estremi di questo intervallo $[e(m_{ln} - s_{ln}), e(m_{ln} + s_{ln})]$ corrispondono alle penultime due colonne in Figura 6.4. Infine, per ciascuno strato, si possono definire dei limiti assoluti di

variazione considerando il massimo ed il minimo fra gli N valori ottenuti (ultime due colonne in Figura 6.4).

Spessore (m)	Vs	Prof (m)	Vs (m/s)
2	180	1	180
8	230	2	180
3	330	3	230
7	500	4	230
		5	230
		6	230
		7	230
		8	230
		9	230
		10	230
		11	330
		12	330
		13	330
		14	500
		15	500
		16	500
		17	500
		18	500

Figura 6.3 - Rappresentazioni alternative del profilo di Vs.

A questo punto la variabilità del profilo di Vs può essere messa in conto procedendo in due modi. Il primo (tendenzialmente meno conservativo, ma più veloce) consiste nell'assumere il profilo di Vs corrispondente alla media logaritmica ($e^{m_{ln}}$) come unico profilo rappresentativo. In base allo stesso criterio si potranno quindi scegliere singole curve di decadimento e di smorzamento 'rappresentative' ed effettuare il calcolo con il codice di calcolo (STRATA o equivalenti) applicando il moto di riferimento dove il profilo di Vs(h) supera gli 800 m/s. Per ogni scenario di scuotimento, ovvero per ciascun accelerogramma di riferimento, sarà possibile quindi ottenere in output un singolo accelerogramma, con relativo spettro di risposta in pseudo-accelerazione, ed una singola terna di fattori di amplificazione. Ripetendo l'operazione per tutti e 7 gli scenari di scuotimento sarà possibile ottenere quanto richiesto dall'Ordinanza per la singola microzona.

Prof	Vs 1	Vs 2	Vs 3	ln(Vs 1)	ln(Vs 2)	ln(Vs 3)	m _{ln}	s _{ln}	e ^(min)	e ^(mig-sin)	e ^(mig+sin)	Min	Max
1	180	180	220	5.193	5.193	5.394	5.260	0.1159	192	171	216	180	220
2	180	180	220	5.193	5.193	5.394	5.260	0.1159	192	171	216	180	220
3	230	180	300	5.438	5.193	5.704	5.445	0.2555	232	179	299	180	300
4	230	180	300	5.438	5.193	5.704	5.445	0.2555	232	179	299	180	300
5	230	180	300	5.438	5.193	5.704	5.445	0.2555	232	179	299	180	300
6	230	180	300	5.438	5.193	5.704	5.445	0.2555	232	179	299	180	300
7	230	260	300	5.438	5.561	5.704	5.568	0.1330	262	229	299	230	300
8	230	260	340	5.438	5.561	5.829	5.609	0.1999	273	223	333	230	340
9	230	260	340	5.438	5.561	5.829	5.609	0.1999	273	223	333	230	340
10	230	260	340	5.438	5.561	5.829	5.609	0.1999	273	223	333	230	340
11	330	400	340	5.799	5.991	5.829	5.873	0.1035	355	320	394	330	400
12	330	400	340	5.799	5.991	5.829	5.873	0.1035	355	320	394	330	400
13	330	400	450	5.799	5.991	6.109	5.967	0.1566	390	334	456	330	450
14	500	400	450	6.215	5.991	6.109	6.105	0.1116	448	401	501	400	500
15	500	400	450	6.215	5.991	6.109	6.105	0.1116	448	401	501	400	500
16	500	400	450	6.215	5.991	6.109	6.105	0.1116	448	401	501	400	500
17	500	400	450	6.215	5.991	6.109	6.105	0.1116	448	401	501	400	500
18	500	400	450	6.215	5.991	6.109	6.105	0.1116	448	401	501	400	500

Figura 6.4 - Realizzazione di un profilo di riferimento (ultima colonna) avendo a disposizione 3 profili di Vs (Vs 1, Vs 2 e Vs 3)

Un altro approccio (più conservativo, ma anche un po' più complesso) tiene conto, nella fase di analisi della RSL, della variabilità di $V_s(h)$, delle curve di rigidezza normalizzata e smorzamento e della profondità del substrato rigido di riferimento. In questo caso è possibile sfruttare una opzione presente nel codice STRATA che consente di eseguire numerose analisi della RSL (il numero di simulazioni deve essere fissato dall'utente e sufficientemente elevato; di norma per garantire una soluzione stabile sono necessarie alcune centinaia di simulazioni, meglio 1000) per ogni singolo scenario di scuotimento, variando casualmente l'andamento del profilo $V_s(h)$, delle curve di decadimento e smorzamento, e della profondità del basamento sismico, all'interno dei vincoli imposti dall'utente (metodo stocastico Monte Carlo). In particolare, è possibile assegnare ad ogni strato (ad esempio di spessore pari ad 1m come in tabella 4) un valore rappresentativo ($e^{m_{ln}}$) ed una variabilità definita dal parametro s_{ln} e dai limiti assoluti di cui sopra. In questo caso, il moto di riferimento può essere assegnato alla profondità dove $e^{m_{ln}-s_{ln}}$ supera gli 800 m/s, fissando anche per questo un intervallo di variabilità. Allo stesso modo è possibile implementare la possibile variabilità associata ai valori delle curve di non linearità dei terreni utilizzando la parametrizzazione disponibile nel codice STRATA. In questo modo si otterrà in output un numero di accelerogrammi (e di relativi spettri di risposta $Sa_i(T)$) pari al numero di simulazioni effettuate combinando casualmente i valori di $V_s(h)$, G/G_0 - γ , D - γ e la profondità del basamento sismico. In questo caso il codice STRATA fornirà come risultato, per ciascuno dei 7 scenari di riferimento, sia l'insieme degli spettri di risposta sia le ordinate relative allo spettro mediano $\overline{Sa}(T)$ dove

$$\overline{Sa} = e^{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(Sa_i)} \quad [7]$$

essendo Sa_i l'ordinata dello spettro i -esimo in corrispondenza del singolo periodo T . Lo spettro di risposta (mediano) di riferimento $\overline{Sa}(T)$ potrà essere considerato rappresentativo di quello scenario di scuotimento. Utilizzando questo secondo approccio il problema può essere quello di identificare l'accelerogramma rappresentativo della RSL corrispondente allo specifico scenario di scuotimento. Infatti, ad ogni spettro di risposta calcolato corrisponderà un singolo accelerogramma, mentre non esiste alcun accelerogramma associabile direttamente allo spettro di risposta mediano $\overline{Sa}(T)$. Una possibile soluzione consiste nel ricavare l'accelerogramma rappresentativo della RSL considerando i singoli spettri di risposta e scegliendo quello che più somiglia allo spettro $\overline{Sa}(T)$. A questo scopo si può procedere come segue:

1. si esportano su un foglio EXCEL tutti gli spettri di risposta calcolati in forma di colonne (le righe corrispondono ai singoli valori di Sa_i per un dato periodo);
2. si calcolano i logaritmi naturali dei singoli valori di Sa_i per i diversi periodi (analogamente a quanto fatto per ottenere la tabella in Figura 6.4) e si confronta un dato spettro $Sa_i(T)$ con lo spettro $\overline{Sa}(T)$ calcolando il parametro L^2 dato da:

$$L^2 = \sum_{T=T_0}^{T_f} [\ln(Sa) - \ln(\overline{Sa})]^2 \quad [8]$$

dove la sommatoria è estesa all'intervallo di periodi di maggiore interesse (p.es. $T_0=0.1s$, $T_f=1.1s$).

Si esegue lo stesso calcolo (facilmente implementabile in un foglio EXCEL) per tutti gli spettri calcolati per un determinato scenario di scuotimento e si seleziona come rappresentativo per quello scenario l'accelerogramma corrispondente allo spettro di risposta per il quale L_2 è minimo.

6.6 Calcolo dei valori di FA rappresentativi della singola microzona

Il calcolo del singolo valore di FA si effettua come segue. Per una singola microzona viene identificato lo spettro di risposta rappresentativo della risposta sismica locale $Sa_o(T)$ (accelerogramma di output) mediante una delle procedure descritte nel paragrafo precedente e lo spettro di risposta $Sa_i(T)$ associato allo scenario di scuotimento (accelerogramma di input) fornito dal CNR IGAG. Sia $Sa_o(T)$ che $Sa_i(T)$ sono forniti nella forma di valori discreti associati a singoli specifici valori di T (non necessariamente equi-spaziati). Supponiamo ora di voler calcolare il valore di FA nell'intervallo di periodi tra T_a e T_b . Se nell'intervallo T_b-T_a ci sono K valori di $Sa_o(T)$, si calcola la sommatoria:

$$O_{T_a-T_b} = \sum_{k=1}^{K-1} \left\{ (T_{k+1} - T_k) \frac{[Sa_o(T_k) + Sa_o(T_{k+1}))]}{2} \right\} \quad [9]$$

nella quale ciascun termine rappresenta l'area di un trapezio di altezza $(T_{k+1} - T_k)$ e basi $Sa_o(T_k)$ e $Sa_o(T_{k+1})$.

Allo stesso modo, se nell'intervallo T_b-T_a ci sono H valori di $Sa_i(T)$, si calcola la sommatoria:

$$I_{T_a-T_b} = \sum_{h=1}^{H-1} \left\{ (T_{h+1} - T_h) \frac{[Sa_i(T_h) + Sa_i(T_{h+1}))]}{2} \right\} \quad [10]$$

nella quale ciascun termine rappresenta l'area di un trapezio di altezza $(T_{h+1} - T_h)$ e basi $Sa_o(T_h)$ e $Sa_o(T_{h+1})$.

Il valore di FA corrispondente sarà dato dal rapporto

$$FA_{T_a-T_b} = \frac{O_{T_a-T_b}}{I_{T_a-T_b}} \quad [11]$$

In definitiva, per ciascuna microzona e per ciascuno dei 7 accelerogrammi di input, sarà determinato uno spettro di risposta tenendo eventualmente conto della variabilità del profilo di V_s , delle curve di rigidezza normalizzata e smorzamento e della profondità del basamento sismico, seguendo uno dei due approcci descritti nel paragrafo precedente. Disponendo di uno spettro di risposta rappresentativo della RSL per ciascun accelerogramma di input, sarà quindi possibile calcolare 7 terne di valori FA, una per ogni accelerogramma di input. Per stimare una singola terna da attribuire alla microzona, si calcolerà la media logaritmica dei 7 valori di FA relativi a ciascuno dei tre prefissati intervalli di periodi (0.1-0.5s, 0.4-0.8s e 0.7-1.1s), utilizzando l'equazione 12 e l'equazione 13 (analoghe all'eq. 3 e all'eq. 5 con FA al posto di V_s):

$$m_{ln} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \ln(FA_i) \quad [12]$$

$$FA_{rif} = e^{m_{ln}} \quad [13]$$

6.7 Esempio: il caso di S. Gimignano (SI)

6.7.1 Approccio probabilistico

Al fine di valutare l'influenza dei diversi parametri (variabili aleatorie) sulla RSL e quantificarne le incertezze, è stato utilizzato l'approccio probabilistico (metodo Monte Carlo) implementato nel codice di calcolo STRATA. Il metodo consiste nell'attribuire a ciascuna delle variabili aleatorie considerate una opportuna curva di distribuzione di probabilità e nell'estrarre in modo casuale, per ogni simulazione, un valore per ciascuna variabile. Sono state assunte come variabili aleatorie: la velocità delle onde di taglio (V_s) in ogni strato; le curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato e del rapporto di smorzamento per ciascun tipo di materiale presente nella successione stratigrafica; la profondità del basamento sismico

Le analisi sono state eseguite con riferimento a 9 differenti Tempi di Ritorno (T_R) utilizzando per ciascuno un set di 7 accelerogrammi spettro-compatibile la pericolosità di base del sito.

Tipo di terreno	Profondità [m]	Peso di volume [kN/m ³]
1	0-2.9	19
2	2.9-5.5	20
3	5.5-6.4	20
2	6.4-8.1	20
3	8.1-10.6	20
1	10.6-14.2	19
1	14.2-15.0	19
3	15.0-16.0	20
1	16.0-18.0	19
3	18.0-19.5	20
1	19.5-22.0	19
1	22.0-24.0	19
4	24.0-24.8	20
4	24.8-26.5	20
4	26.5-30.0	20
4	30.0-150.0	20
Basamento		22

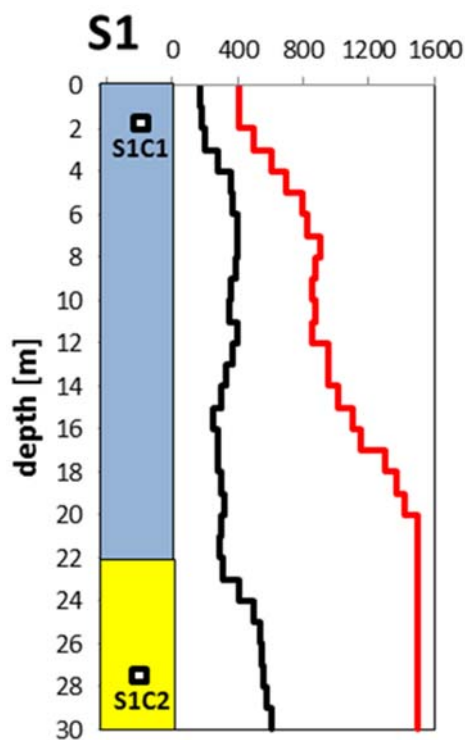


Figura 6.A1 - Profilo stratigrafico con indicazione dei campioni indisturbati prelevati e andamento con la profondità di V_s (in nero) e V_p (in rosso) (in m/s) in corrispondenza della verticale S1

6.7.2 Variabilità dei parametri geotecnici

Al fine di eseguire l'analisi di tipo stocastico per la valutazione della RSL, è stato assunto come base di partenza il profilo stratigrafico S1 (Figura 6.A1), nel quale sono stati identificati i seguenti quattro litotipi (v. tabella):

1. Sabbie limoso-argillose sciolte - formazione dei Calcareous Tufa (curve di $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ desunte dalla prova RC sul campione S1-C1);
2. Limi calcarei cementati molto porosi – travertini (curve di $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ proposte da Pergalani et al., (1999)¹⁴;
3. Ghiaie (curve di $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ proposte da Rollins, (1988)¹⁵;
4. Sabbie limose molto addensate - formazione delle argille blu (curve di $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ desunte dalla prova RC sul campione S1-C2).

Il numero di simulazioni analizzate è pari a 1000 per ciascuno dei segnali accelerometrici di input considerati.

In particolare, sono state assunte differenti distribuzioni di probabilità per i seguenti parametri:

- profondità del basamento sismico, H_{dep} (Brecce di Grotti – $V_s=1200\text{m/s}$): distribuzione uniforme ($z = 120\div 180\text{m}$);
- velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s . Come profilo stratigrafico 'rappresentativo' (profilo medio), esteso fino al basamento sismico, è stato assunto quello utilizzato nell'approccio deterministico. Per tale variabile è stata assunta una distribuzione lognormale, con coefficiente di variazione (COV - rapporto tra la deviazione standard σ e il valore assoluto della media μ) pari al 15%.

La scelta del tipo di distribuzione e del relativo COV è basata su dati di letteratura per terreni di caratteristiche ed età analoghe a quelli che costituiscono il deposito in oggetto.

I profili di velocità delle V_s sono riportati nella Figura 6.A2.

¹⁴ Pergalani, F., Romeo, R., Luzi, L., Petrini, V., Pugliese, A., Sanò, T. (1999). Seismic microzoning of the area struck by Umbria–Marche (Central Italy) Ms 5.9 earthquake of 26 September 1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18 (4), pp. 279–296.

¹⁵ Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B., Daily, W. D. (1998). Shear modulus and damping relationships for gravels. *ASCE (American Society of Civil Engineers) Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124 (5), pp. 396–405.

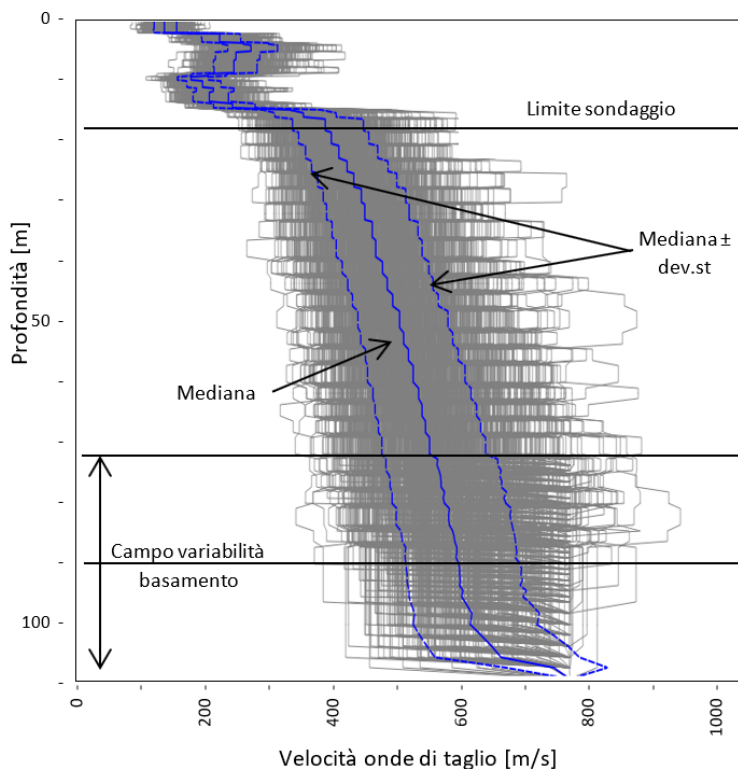


Figura 6.A2 - Profili di velocità – 1000 simulazioni

- curve di decadimento del modulo di taglio $G(\gamma)/G_0$ e del rapporto di smorzamento $D(\gamma)$: modello di Darendeli.

Nel modello di Darendeli¹⁶, implementato in STRATA¹⁷, è utilizzato un approccio di tipo Bayesiano, in cui la variabilità rispetto al valore medio è assunta come normalmente distribuita. La deviazione standard del modulo di taglio normalizzato G/G_0 è calcolata mediante la seguente espressione:

$$\sigma_{ND} = \exp(-4.23) + \sqrt{\frac{0.25}{\exp(3.62)} - \frac{\left(\frac{G(\gamma)}{G_0} - 0.5\right)^2}{\exp(3.62)}}$$

Il modello assume valori bassi di deviazione standard σ_{ND} quando $G(\gamma)/G_0$ è vicino ad 1 e a 0, mentre assume valori relativamente alti quando $G(\gamma)/G_0$ è pari a 0.5.

Nello stesso modello di Darendeli, la deviazione standard del rapporto di smorzamento $D(\gamma)$ (%) è assunta pari a:

$$\sigma_D = \exp(-5.0) + \exp(-0.25)\sqrt{D(\gamma)(\%)}$$

ovvero σ_D aumenta all'aumentare del rapporto di smorzamento.

¹⁶ Darendeli M.B. (2001) – Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. PhD thesis, The University of Texas, Austin.

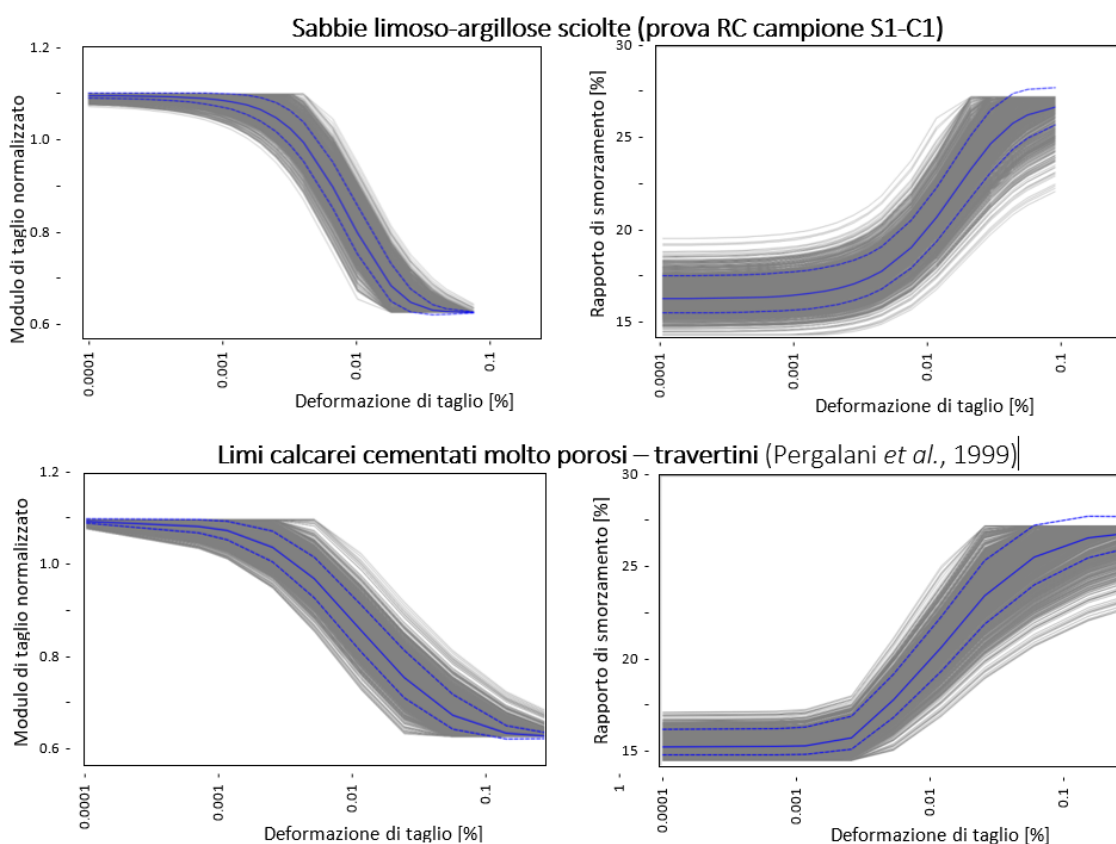
¹⁷ Kottke, A. R., and Rathje, E. M. (2009). Technical manual for Strata, Univ. of Texas, Austin, TX.

Avendo modellato la variabilità dei parametri mediante una distribuzione normale continua fra $-\infty$ e $+\infty$, potrebbero essere generati dei valori negativi di $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ (%). Per evitare tale incongruenza le distribuzioni sono state troncate rispettivamente a 0.05 e 0.1%.

Le curve medie attribuite ai diversi litotipi sono state ottenute da analisi di laboratorio (colonna risonante - RC) oppure, in mancanza di dati sperimentali, assunte da letteratura:

1. Sabbie limoso-argillose sciolte (prova RC campione S1-C1);
2. Limi calcarei cementati molto porosi – travertini (Pergalani *et al.*, 1999)¹⁸;
3. Ghiaie (Rollins, 1988)¹⁹;
4. Sabbie limose molto addensate (prova RC campione S1-C2).

Il campo di variabilità delle curve è riportato nei grafici seguenti (Figura 6.A3).



¹⁸ Pergalani, F., Romeo, R., Luzi, L., Petrini, V., Pugliese, A., Sanò, T. (1999). Seismic microzoning of the area struck by Umbria–Marche (Central Italy) Ms 5.9 earthquake of 26 September 1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18 (4), pp. 279–296.

¹⁹ Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B., Daily, W. D. (1998). Shear modulus and damping relationships for gravels. *ASCE (American Society of Civil Engineers) Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124 (5), pp. 396–405.

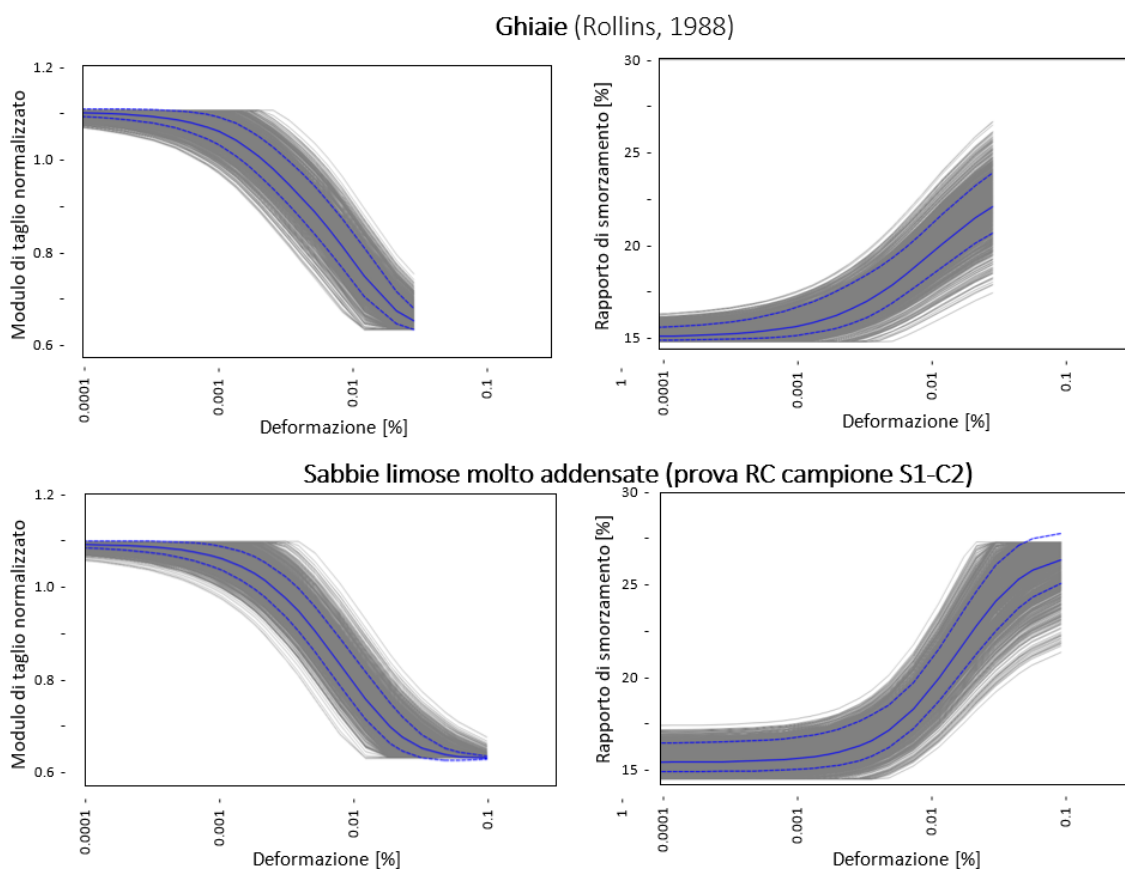


Figura 6.A3 - Campo di variabilità delle curve dei terreni

6.7.3 Influenza dei principali parametri geotecnici sulla RSL

Con lo scopo di indagare, in termini statistici, l'influenza sulla RSL dei principali parametri del modello analizzato sono state svolte una serie di analisi utilizzando i 7 accelerogrammi relativi a TR=475 anni.

Per tener conto dell'effetto di ciascuna variabile sono state condotte le seguenti analisi:

- modello completo (sono state considerate tutte le variabili contemporaneamente).

Separatamente è stata valutata l'influenza di:

- variabilità della profondità del basamento (H_{dep});
- variabilità delle VS;
- variabilità delle curve dei materiali.

Ciascuna analisi è stata condotta con un numero di simulazioni pari a 1000.

In particolare, nelle figure da 6.A4-6.A6 sono sintetizzati i risultati relativi a:

- spettro di risposta elastico (con smorzamento pari al 5% dello smorzamento critico);
- funzione di trasferimento;
- profilo di PGA.

6.7.3.1 Influenza della profondità del basamento (H_{dep})

I risultati ottenuti (Figura 6.A4) mostrano una ridotta influenza della profondità del basamento (H_{dep}).

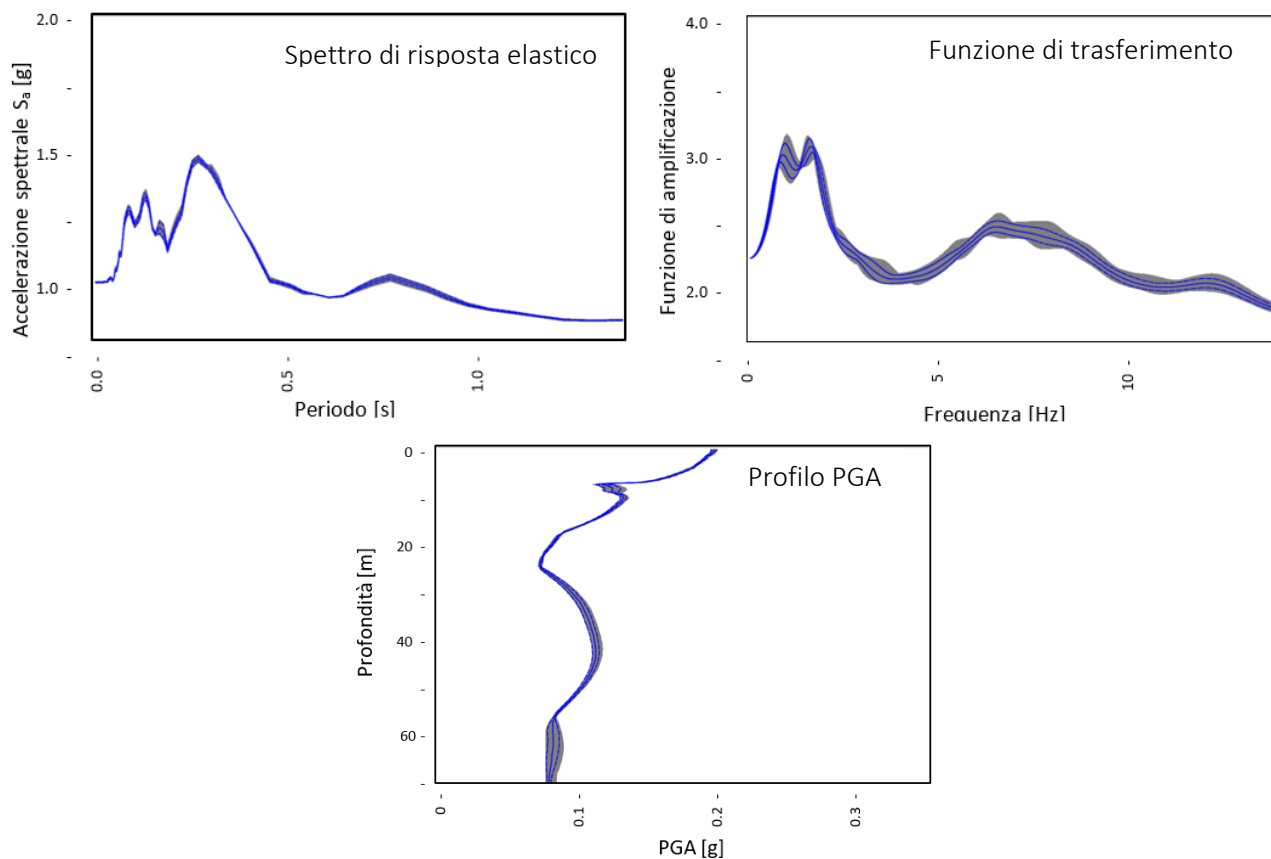
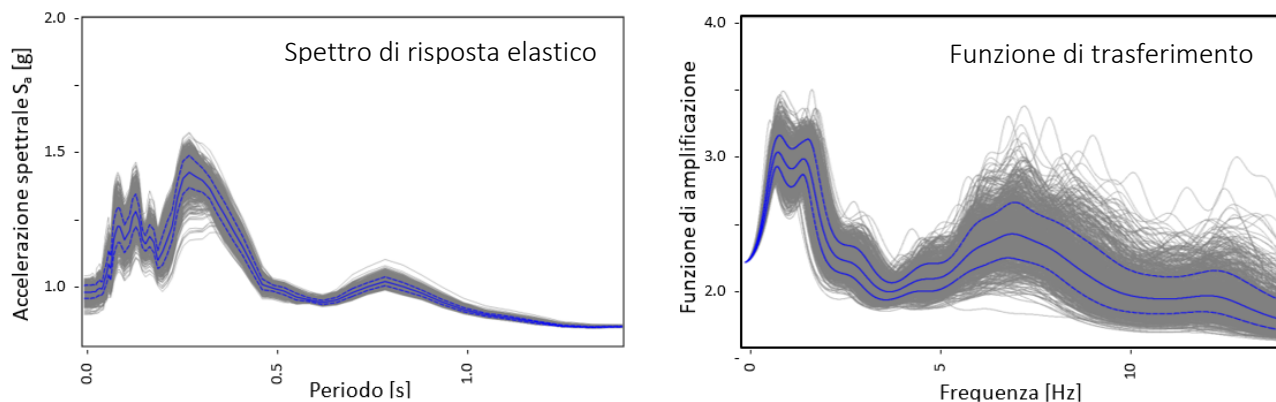


Figura 6.A4 - Influenza della profondità del basamento sismico sulla RSL per il caso considerato

6.7.3.2 Influenza della variabilità del profilo delle V_s :

I risultati ottenuti (Figura 6.A5) mostrano una significativa influenza della variabilità del profilo delle V_s .



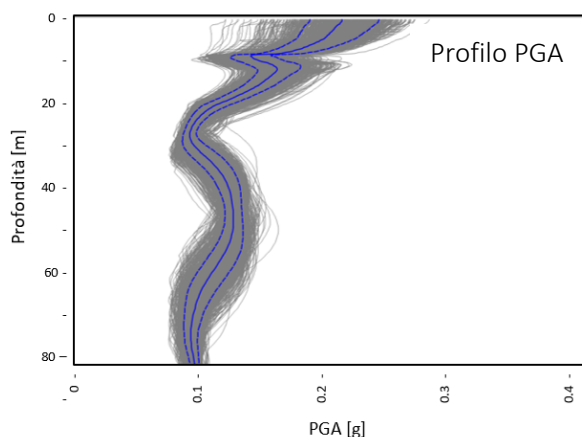


Figura 6.A5 - Influenza del profilo di V_s sulla RSL per il caso considerato

6.7.3.3 Influenza della variabilità delle curve di rigidezza e smorzamento dei materiali

I risultati ottenuti (Figura 6.A6) mostrano che l'influenza della variabilità delle curve di rigidezza e smorzamento dei materiali è ancora più significativa di quella del profilo di V_s .

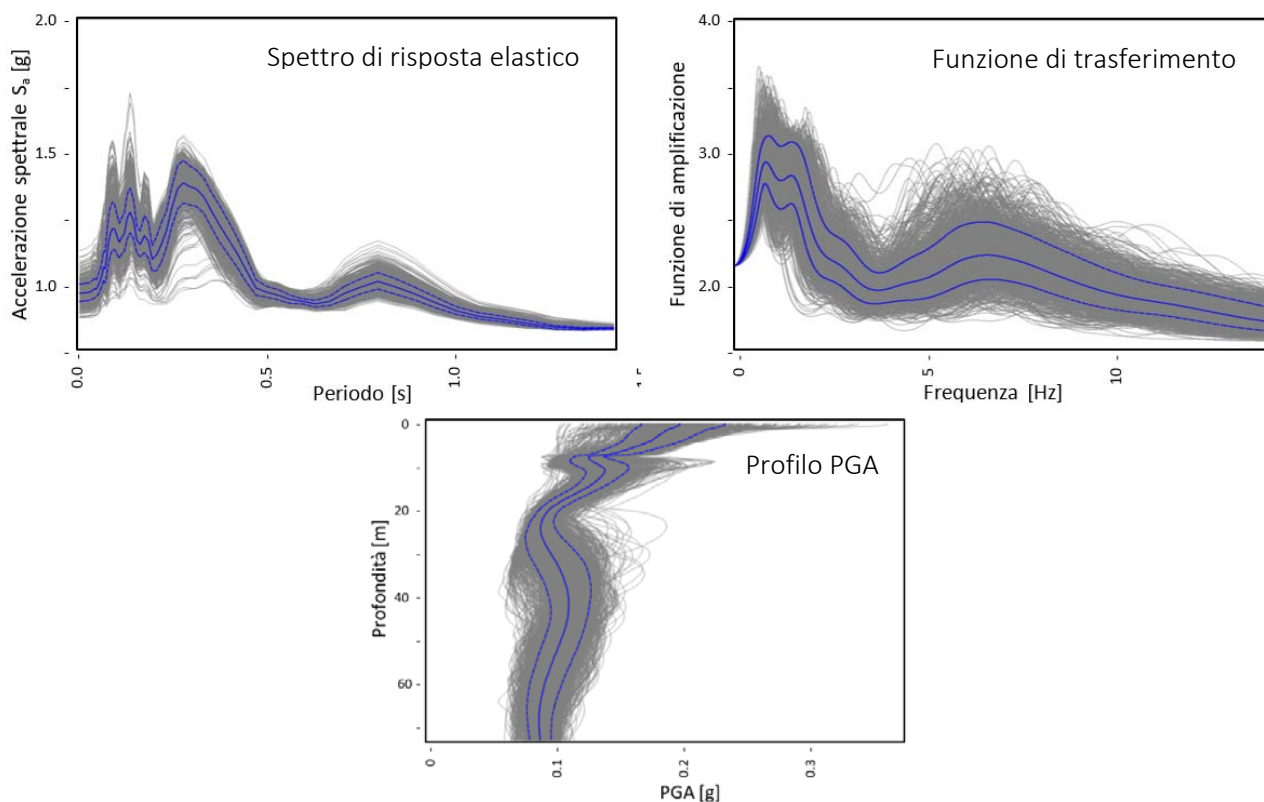


Figura 6.A6 - Influenza della variabilità delle curve di rigidezza e smorzamento dei diversi materiali sulla RSL per il caso considerato

6.7.3.4 Conclusioni sull' influenza della variabilità dei parametri

Per il tempo di ritorno considerato nella presente analisi di sensitività (475 anni) e per il particolare sito oggetto delle analisi, i parametri che sono risultati più significativi dal punto di vista della sensibilità del modello in termini di RSL sono il profilo di velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) e le curve di decadimento del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento con la deformazione di taglio dei materiali ($G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ (%)). La profondità del basamento sismico (H_{dep}) risulta invece poco influente ai fini della stima della RSL, nell'ambito dell'intervallo di variazione assegnato (-120m÷180m).

Pertanto, per una stima più accurata della RSL, appare più conveniente effettuare ulteriori misure di V_s e analisi dinamiche di laboratorio (ad es. colonna risonante), piuttosto che aumentare la profondità di indagine per una migliore localizzazione del basamento sismico.

Maggiori dettagli riguardo all'esempio trattato sono contenuti in Madi ai et al. (2017)²⁰.

7. Modellazione della risposta sismica locale in configurazione 2D

7.1 Premessa

Le analisi numeriche relative agli studi di MS3 devono essere in primo luogo basate sulla preventiva definizione delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) incluse le zone caratterizzate da instabilità per fenomeni di liquefazione (ZS_{LQ} e ZR_{LQ}).

Si ricorda che per la definizione delle microzone si deve tener conto anche delle zone di “pinch out”, ovvero di quelle aree in cui, lungo la sezione geologico-tecnica, una o più unità si assottigliano lateralmente fino a scomparire secondo il diagramma di flusso sintetizzato in Figura 7.1, che prevede:

- preliminare suddivisione in microzone omogenee basata sui limiti della carta geologico-tecnica;
- in presenza di “pinch-out”, ulteriore suddivisione della microzona;
- controllo delle frequenze di risonanza evidenziate dalle indagini puntuali di misure di rumore ambientale ed eventuale ulteriore suddivisione della microzona omogenea, sulla base delle frequenze di risonanza.

²⁰ Madi ai, C., Renzi, S., Vannucchi, G. (2017). Geotechnical Aspects in Seismic Soil–Structure Interaction of San Gimignano Towers: Probabilistic Approach. J. Perform. Constr. Facil., 2017, 31(5). ASCE, ISSN 0887-3828.

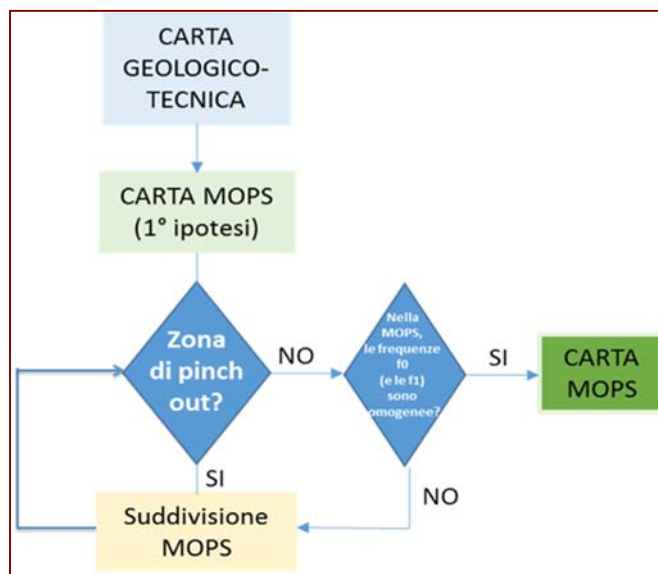


Figura 7.1 - Diagramma di flusso per la definizione delle MOPS

Ciò premesso, di seguito si descrivono gli elementi essenziali per le analisi numeriche di risposta sismica locale, schematizzati in Figura 7.2.

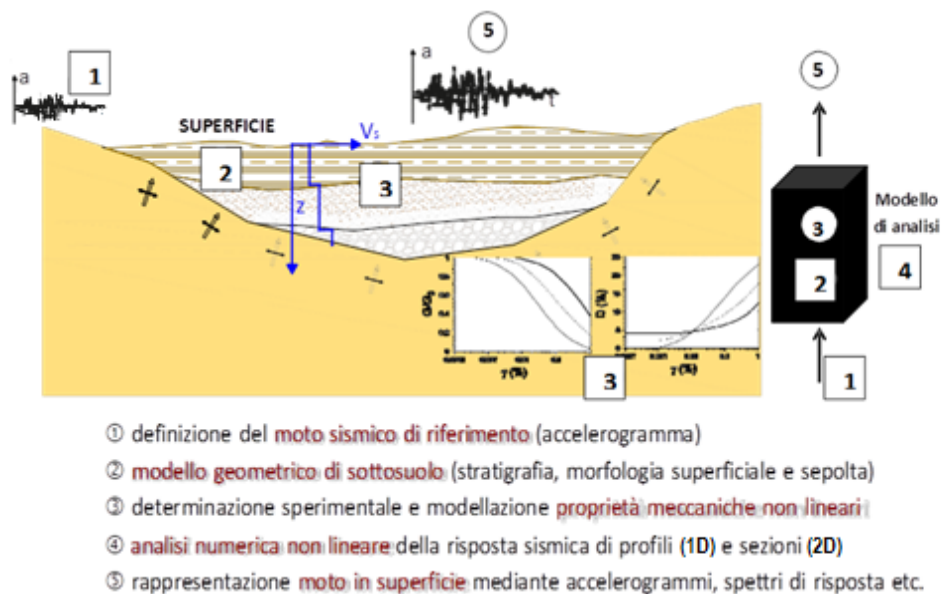


Figura 7.2 - Elementi essenziali per le analisi numeriche

7.2 Scelta del modello di analisi e del codice di calcolo

La prima scelta che deve essere effettuata riguarda l'utilizzo di modelli mono-dimensionali (1D) o bi-dimensionali (2D).

Tale scelta è strettamente legata alle condizioni geologiche, geomorfologiche e litostratigrafiche del sito in analisi. In linea di principio, i codici 1D possono essere utilizzati solo per condizioni che

prevedano morfologia superficiale, unità litotecniche e tetto del substrato sismico sub-orizzontali. Il fattore di forma della morfologia superficiale o sepolta influenza la scelta della schematizzazione geometrica (1D, 2D, 3D) per l'analisi dell'amplificazione stratigrafica e/o topografica di bacini e creste (Figura 7.3).

La presenza di bacini sepolti dà origine a specifiche fenomenologie che possono essere modellate solo facendo ricorso a modelli 2D. La prima fenomenologia riguarda la presenza di fenomeni di risonanza complessiva del bacino sepolto. L'eventuale occorrenza di questo fenomeno può essere diagnosticata utilizzando come elemento discriminante il rapporto tra la profondità della valle (massimo spessore del deposito) h , e la sua semiampiezza l , prevede una distinzione in:

- valli superficiali ($h/l < 0.25$): la risposta in frequenza a centro valle non è influenzata dal rapporto di forma ($f_{1D} \approx f_{2D}$);
- valli profonde ($h/l > 0.25$): le frequenze che caratterizzano la risposta bidimensionale sono maggiori di quelle valutate su profili 1D ($f_{2D} > f_{1D}$).

Un criterio non solo geometrico prevede che i modelli 1D possono essere utilizzati se è verificata la condizione nella quale:

$$\frac{h}{l} \leq 0.65 / \sqrt{C_v - 1}$$

dove C_v è il rapporto tra la velocità del substrato sismico e quella media nei terreni di riempimento della valle. I codici di calcolo 1D possono essere utilizzati per la zona centrale della valle e solo nel caso in cui sia soddisfatto il più restrittivo dei due criteri precedenti.

Un secondo fenomeno è legato alla generazione di onde superficiali in corrispondenza del raccordo fra le coperture del bacino ed i materiali incassanti. Laddove in questa zona si realizzino marcati contrasti di impedenza sismica (>3) le onde superficiali possono generare significativi aumenti del livello di scuotimento alla superficie delle coperture del bacino. L'estensione delle zone interessate da questo fenomeno dipende largamente dalle caratteristiche dei materiali di riempimento (essenzialmente lo smorzamento materiale). Quindi, in presenza di marcati contrasti laterali di impedenza sismica in prossimità delle superficie, risulta necessaria la modellazione 2D della risposta sismica locale.

In linea di principio, sia nel caso di valli che di creste gli effetti geometrici sono condizionati dal rapporto tra lunghezza d'onda dominante del campo di moto e dimensione caratteristica dell'irregolarità morfologica.

Quando sussistono condizioni predisponenti a significativi effetti geometrici, cadono i presupposti per interpretare rapporti spettrali a stazione singola mediante inversioni monodimensionali, e quindi l'uso di tali dati per la validazione del modello è possibile solo per via diretta. E' pertanto opportuno conoscere le condizioni morfologiche (oltre che stratigrafiche) dei siti di installazione delle stazioni per utilizzarne efficacemente le informazioni.

In presenza di creste, cocuzzoli, dorsali (amplificazioni topografiche) è necessario utilizzare codici di calcolo 2D se la pendenza del fianco è maggiore di 15° (in accordo con quanto indicato nelle NTC, per le categorie topografiche).

Per le analisi 2D si consiglia di utilizzare programmi che prevedono almeno l'analisi lineare equivalente con frontiera assorbente nel caso di effetti di valle e programmi con elementi al contorno nel caso di effetti morfologici in roccia.

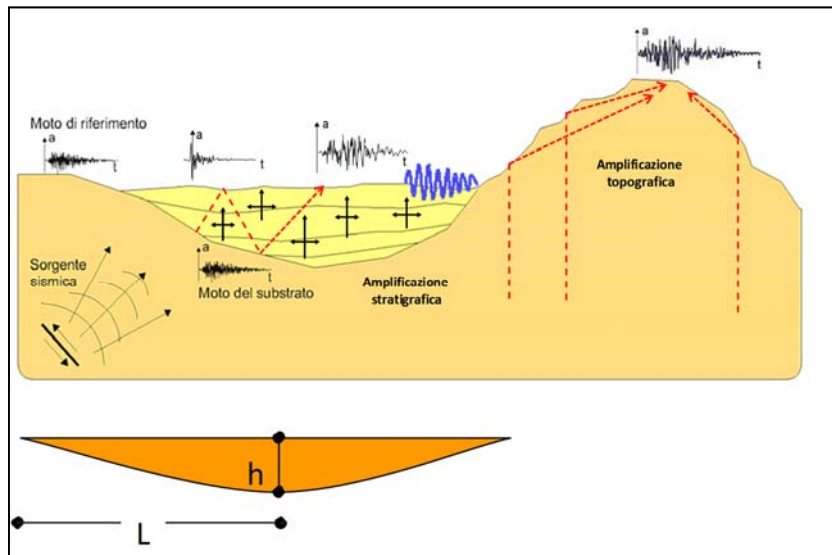


Figura 7.3 - Fattori morfologici influenti sull'amplificazione

7.3 Scelta delle sezioni e delle verticali da analizzare

A partire dalle microzone omogenee, identificate tramite la procedura di Figura 7.1, si procederà a definire la giacitura delle sezioni e la localizzazione delle verticali, relative alle analisi condotte rispettivamente con modelli 2D e 1D.

In linea di principio, dato che i risultati devono condurre alla costruzione di una mappa di MS3, è necessario che la distribuzione delle sezioni e delle verticali permetta di includere tutti gli ambiti caratterizzabili in modo omogeneo sotto gli aspetti geologici, geomorfologici, geotecnici e geofisici influenti sull'amplificazione locale.

Compatibilmente con considerazioni di carattere logistico ed urbanistico, le modellazioni numeriche vanno preferibilmente condotte lungo sezioni topo-stratigrafiche 'maestre', tracciate lungo direzioni ortogonali o parallele rispetto ai lineamenti morfologici principali superficiali ed il più possibile ortogonali rispetto ai lineamenti morfologici sepolti. In entrambi i casi le sezioni dovranno contenere gli elementi stratigrafici e litologici fondamentali, in modo da consentire l'estrapolazione dei risultati dell'analisi ad una mappa di MS. Si riportano di seguito alcuni esempi significativi.

La Figura 7.4 mostra una sezione tracciata attraverso l'abitato di Poggio Pienze, caratterizzata da significative variazioni morfologiche sepolte (ribassamenti, scarpate di faglia) che ha richiesto un'analisi 2D. Il risultato dell'analisi espresso in termini di fattore di amplificazione, riferito all'intensità di Housner, $FA(H)$, è stato sovrapposto alla carta geologica al fine di identificare microzone caratterizzate da condizioni stratigrafiche e morfologiche omogenee.

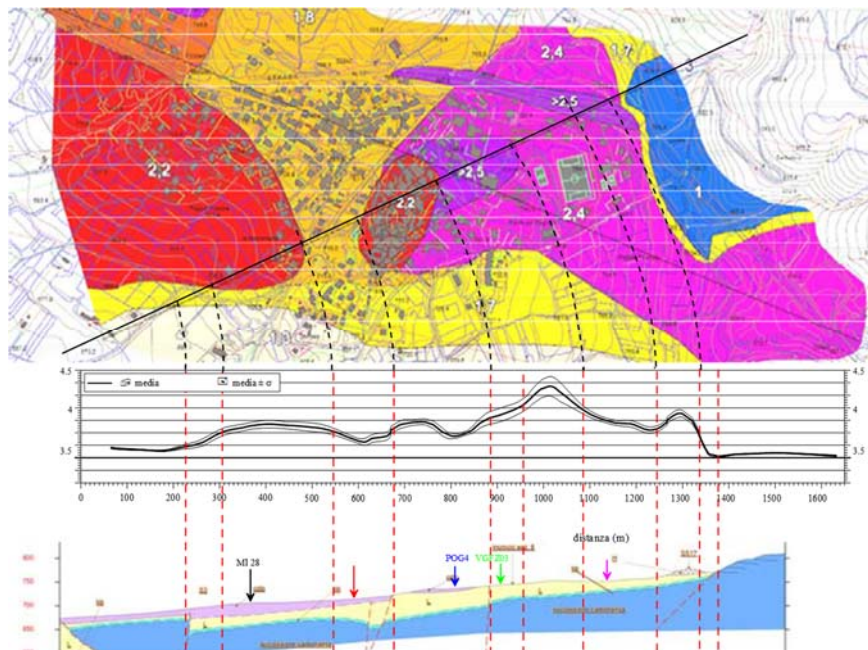


Figura 7.4 - Poggio Pienze: (dal basso) sezione stratigrafica, profilo del fattore di amplificazione dell'intensità di Housner calcolato con analisi 2D, estrapolazione a carta di MS3

La Figura 7.5 riporta la carta di MS3 dell'area archeologica di Roma, costruita a partire dai risultati di analisi 2D eseguite su 7 sezioni rappresentative, tracciate perpendicolarmente ai principali elementi morfologici superficiali e sepolti (incisioni vallive, scarpate di faglia, ecc.).

In Figura 7.5a i risultati delle analisi (in termini di fattore di amplificazione, calcolato a partire dall'intensità di Housner, nell'intervallo 0.1-0.5s) sono rappresentati lungo una delle sezioni stratigrafiche. Nella mappa di Figura 7.5b i valori di FH sono rappresentati attraverso diversi colori lungo le tracce delle sette sezioni, mantenendo la carta geologica (riferita alla base dei riporti e dello strato archeologico). La mappa di MS3 (Figura 7.5c) è stata creata estrapolando i risultati ottenuti lungo le sezioni mediante un processo di contouring manuale basato su giudizio esperto, tenendo conto delle caratteristiche morfologiche superficiali e sepolte rappresentate nelle sezioni stratigrafiche.

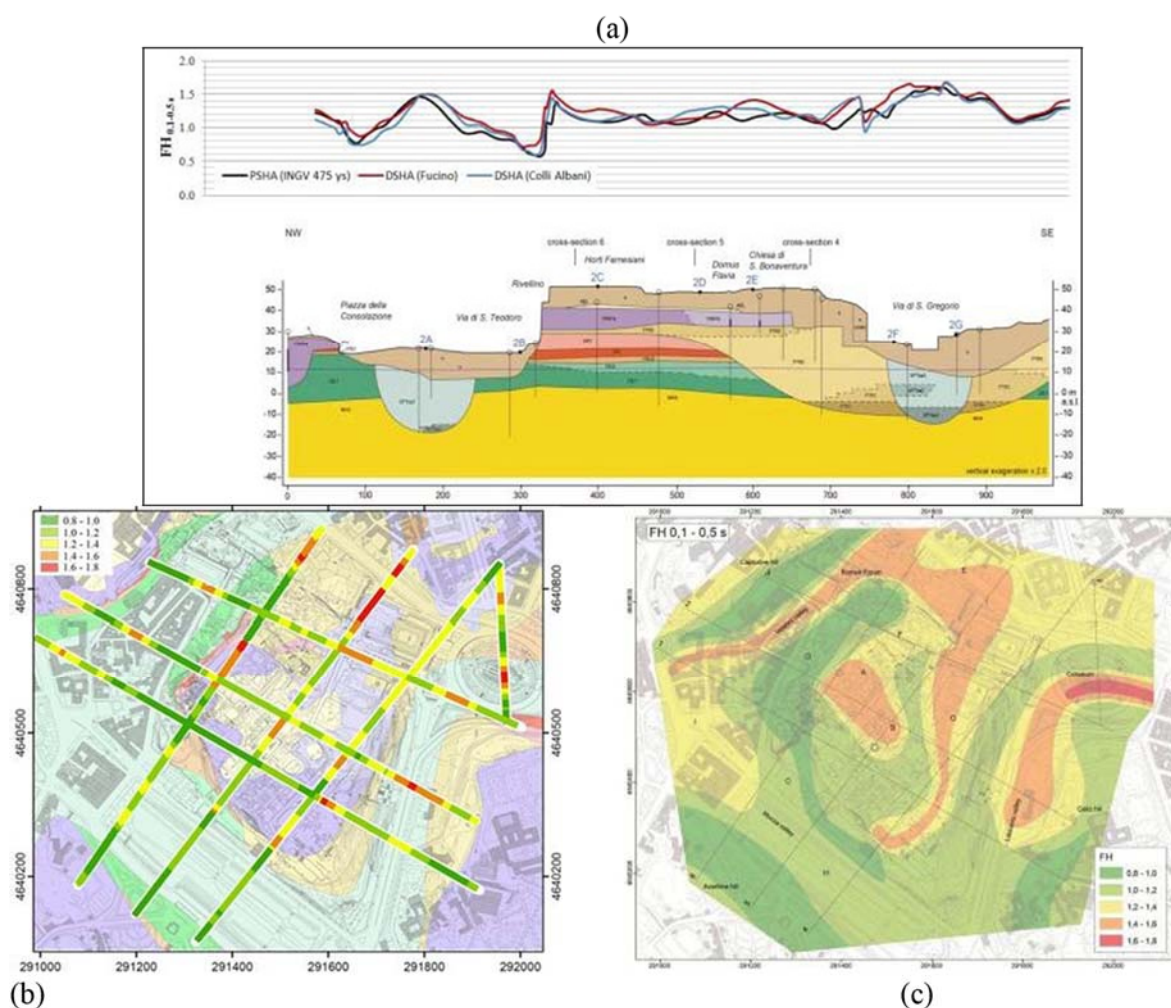


Figura 7.5 - Area archeologica Roma: (a) sezione stratigrafica e profilo del fattore di amplificazione dell'intensità di Housner calcolato con analisi 2D, (b) sovrapposizione dei profili alla carta geologica, (c) estrapolazione a carta di MS3

7.4 Estensione laterale delle sezioni per la modellazione numerica 2D

Come è noto, in una sezione d'analisi 2D (o in un dominio 3D) con un modello agli elementi finiti o alle differenze finite, la frontiera inferiore deve essere approfondita all'interno del substrato sismico per una profondità tale da poter applicare il moto di riferimento ai nodi di base in maniera sincrona. Analogamente a quella inferiore, le frontiere laterali devono essere tali da riprodurre la trasmissione di energia delle onde sismiche dal volume di sottosuolo d'interesse. In caso contrario, si generano onde riflesse che vengono artificialmente introdotte nella regione stessa, causando una sovrastima dell'amplificazione (Figura 7.6a).

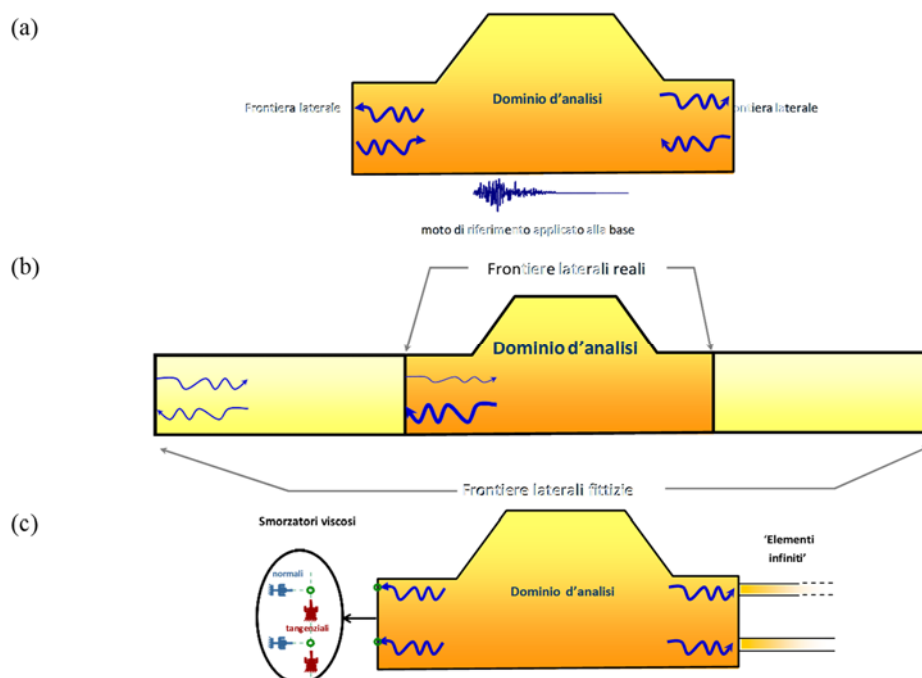


Figura 7.6 - (a) Modello 2D con frontiere laterali riflettenti prossime (a) o lontane (b) rispetto all'irregolarità morfologica, e frontiere laterali assorbenti (c).

Se si adotta uno schema con nodi laterali vincolati sugli spostamenti (p. es. QUAD4M o QUAKE) che corrisponde ad una frontiera riflettente, un primo accorgimento è quello di estendere i confini laterali del deposito fino ad una distanza dal dominio d'analisi confrontabile con la sua larghezza (Figura 7.6b) o comunque pari ad almeno 400-500 m. In tal modo si minimizzano gli effetti delle riflessioni totali delle onde che incidono sulle frontiere laterali. La soluzione migliore consiste adottare frontiere assorbenti (absorbing o transmitting boundaries) costituite da (Figura 7.6c):

- smorzatori viscosi ai nodi sia di base che laterali (soluzione adottata p.es. da PLAXIS);
- come sopra, aggiungendo condizioni *free-field*, cioè di moto monodimensionale lungo la colonna di terreno che definisce la frontiera laterale (soluzione adottata da FLAC);
- elementi infiniti (soluzione adottata da ABAQUS).

I suddetti accorgimenti non sono necessari se si opera con metodi agli elementi al contorno (p.es. BESOIL), tuttavia questi ultimi hanno difficoltà a trattare i casi in cui il comportamento non lineare del terreno può essere significativo.

7.5 Definizione del substrato sismico per le simulazioni numeriche

Per ogni modello stratigrafico, il substrato sismico sarà posizionato in corrispondenza del tetto del primo strato dell'Unità stratigrafica che presenta valori di velocità delle onde S maggiori di 750-800 m/s con uno spessore ritenuto sufficientemente significativo in relazione al modello geologico del sito. Di norma, per il substrato viene assunto un comportamento elastico o visco-elastico lineare.

7.6 Discretizzazione dei modelli

Nelle analisi numeriche 2D si deve tenere in conto il problema legato alla discretizzazione dei modelli stessi. L'altezza degli elementi, nel caso di modelli 2D a maglie quadrangolari, ovvero la dimensione del lato minore, nel caso di modelli 2D a maglie triangolari, sono funzione della lunghezza d'onda relativa alla massima frequenza.

Una regola pratica per la discretizzazione degli elementi per i modelli 2D può essere:

$$h_{\max} = \frac{\lambda_{\min}}{K} = \frac{\lambda_{\min}}{6 \div 8} = \frac{V_s}{(6 \div 8) f_{\max}}$$

dove $h_{\max}$ è l'altezza degli elementi, nel caso di modelli 2D a maglie quadrangolari, o la dimensione del lato minore, nel caso di modelli 2D a maglie triangolari), $\lambda_{\min}$ è la lunghezza d'onda, K è il coefficiente di stabilità, V_s è la velocità delle onde di taglio, $f_{\max}$ è la massima frequenza significativa del segnale di ingresso e di conseguenza, la massima frequenza che dovrà essere risolta nel modello numerico (valore consigliato: 20 Hz).

Nel caso di modelli 2D a maglie quadrangolari è opportuno che la larghezza media dell'elemento sia inferiore a 3 $h_{\max}$ vicino alla frontiera laterale e 5 $h_{\max}$ al centro della sezione. Nel caso di modelli 2D a maglie triangolari è opportuno che nella discretizzazione siano seguiti i criteri adottati dai comuni algoritmi di ottimizzazione per analisi ad elementi finiti (dimensioni tra i lati del singolo elemento confrontabili tra loro e differenza tra i lati di elementi adiacenti non superiore al 30-40%).

7.7 Validazione modello di sottosuolo in base ai rapporti spettrali

Le misure di rumore ambientale o le registrazioni di eventi deboli possono essere utilizzate nella validazione dei modelli di sottosuolo 1D/2D/3D. Il buon accordo tra la frequenza fondamentale (e le successive armoniche) evidenziata dai rapporti HVSR o HVRS (rapporti spettrali a stazione singola basati rispettivamente su spettri di Fourier o risposta) o SSR (rapporti spettrali rispetto ad un sito di riferimento), e quella determinata numericamente, in regime lineare, permette infatti di confermare la correttezza del modello di sottosuolo adottato per le modellazioni numeriche (Figura 7.7). Per il confronto delle armoniche superiori tra i risultati numerici e quelli sperimentali, si predilige l'uso dei rapporti SSR.

È stato già ricordato che il confronto tra la funzione di trasferimento sperimentale e quella numerica deve essere effettuato tenendo conto delle condizioni morfologiche del sito ove sono state installate le postazioni sismiche. In altre parole, se la misura sperimentale è stata eseguita in un sito a morfologia marcatamente 2D o 3D, anche le analisi numeriche dovranno riprodurre tale complessità morfologica.

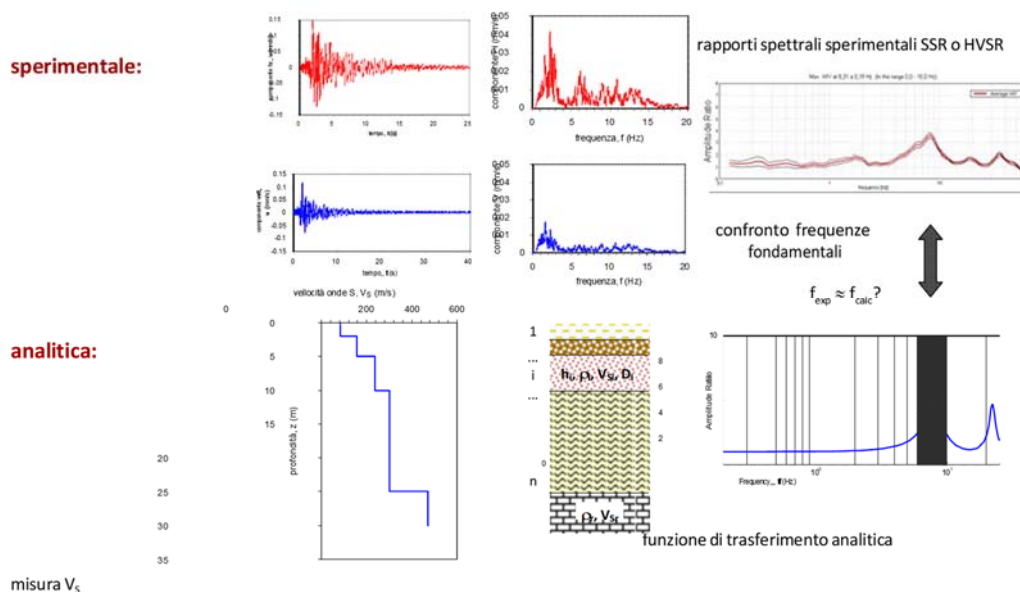


Figura 7.7 - Schema logico per il confronto tra rapporti spettrali sperimentali e funzioni di trasferimento analitiche ai fini della validazione del modello di sottosuolo.

In Figura 7.8 è mostrato l'esempio di Roio Piano, dove un sondaggio stratigrafico e una prova down-hole (DH), spinti fino a 40 m, non avevano individuato il substrato sismico. Il profilo di VS ottenuto da una prova MASW, mediante inversione congiunta di acquisizioni in modalità attiva e passiva, restituiva invece un substrato sismico a circa 45 m di profondità (Figura 7.8a). Seppur ben confrontabili, i due profili di velocità avrebbero potuto generare qualche incertezza su localizzazione e profondità del substrato, rilevate solo dalla MASW; questo dubbio è stato risolto integrando i risultati delle indagini geofisiche con quelli delle misure HVSR disponibili nello stesso sito. Infatti, il buon accordo tra la frequenza fondamentale (nonché quella del secondo picco) del rapporto H/V e quella determinata numericamente utilizzando il profilo di VS desunto dalla prova MASW (Figura 7.8b), ha permesso di confermarne la correttezza, in termini sia di profilo di velocità delle onde di taglio sia di profondità del substrato.

7.8 Definizione degli accelerogrammi e delle caratteristiche di non linearità dei terreni

Gli accelerogrammi da utilizzare in input per le simulazioni numeriche saranno i 7 accelerogrammi forniti dal CNR IGAG.

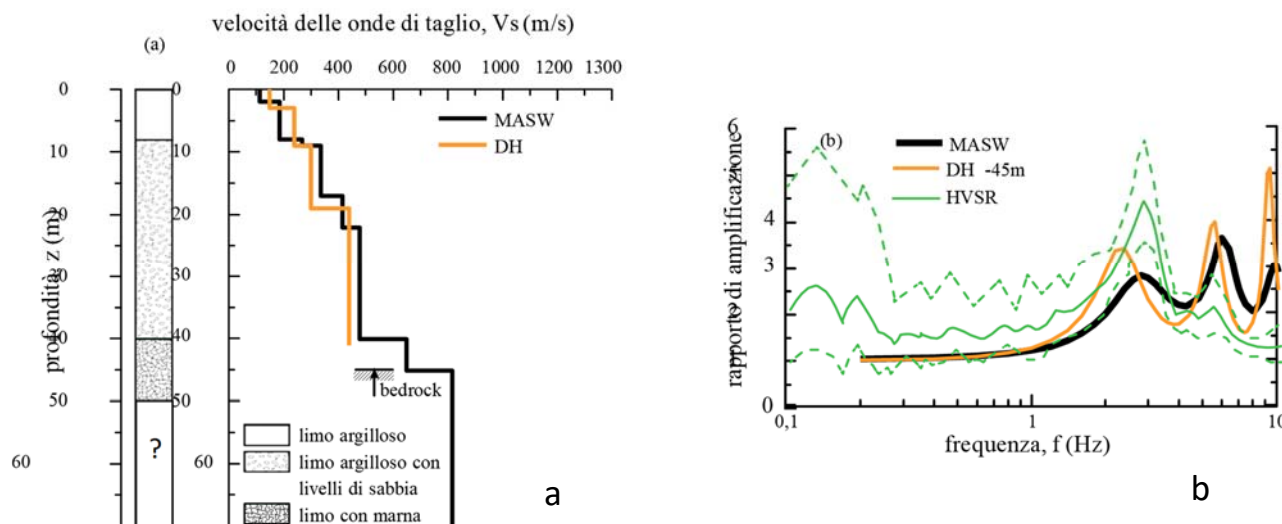


Figura 7.8 - Roio Piano: (a) stratigrafia e profili di velocità da prove DH e MASW; (b) confronto tra rapporti spettrali sperimentali H/V e funzioni di amplificazione analitiche basate sui profili di velocità DH e MASW

7.9 Risultati

La procedura di elaborazione dei risultati delle analisi 2D, esattamente come quella 1D, ambisce ai seguenti risultati:

1. Definizione dello spettro di risposta in accelerazione in superficie per ciascuna microzona di livello 3 per i 7 output ricavati da altrettanti input forniti dal CNR IGAG, dovrà essere calcolata la media (o la mediana) degli spettri di risposta elastici in accelerazione al 5% dello smorzamento, almeno fino a 1.1s;
2. Definizione del fattore di amplificazione (FA) come indicato nel paragrafo 6.6 e seguendo quindi lo stesso approccio utilizzato nelle modellazioni 1D.

Si ricorda che, ad ogni microzona di livello 3, eventualmente ottenuta dalla suddivisione in più microzone delle MOPS di livello 1, in funzione delle caratteristiche geologiche-morfologiche e dei risultati delle analisi numeriche (vedi premessa), dovrà avere associato un FA ed il relativo spettro medio o mediano.

7.10 Riferimenti bibliografici modellazione 2D

- Bard P., Y., Bouchon M. (1985) - *The two dimensional resonance of sediment filled valleys*. Bull. Seism. Soc. Am. 75: 519–541.
- Cividini A., Pergalani F., Compagnoni M., Parisi A. (2017). *On the evaluation of Local Response Spectra according to the Italian Design Code*, 15th International Conference of the International Association for Compute Method and Advances in Geomechanics IACMAG, 19-23 October, Wuhan, China.
- Di Capua G., Compagnoni M., Di Giulio G., Marchetti M., Milana G., Peppoloni S., Pergalani F., Sapia V. (2014). *The seismic microzonation of level 3 of Sant'Agata Fossili (northern Italy) based on a multidisciplinary approach*. Annals of Geophysics, 57, 1, S0189; DOI:10.4401/ag-6363.
- 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 Earthquake Eng, 14, pp. 3363- 3387.
- Landolfi L. (2013). *Analisi della risposta sismica locale in condizioni complesse di sottosuolo: il caso di Castelnuovo (AQ)*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geotecnica XXV ciclo, Università di Napoli Federico II.
- 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 Earthquake Eng, n. 9, pp. 1417-1442.
- Pagliaroli A., Lanzo G., Sanò T. (2007). Confronto fra tre codici di calcolo 2D della risposta sismica locale. Atti del XII Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", ANIDIS, Pisa, 10-14 giugno 2007, Edizioni Plus – Pisa University Press, Pisa, DVD articolo #45. ISBN: 978-88-8492-458-2, 12 pp.
- Pagliaroli A., Quadrio B., Lanzo G., Sanò T. (2014a). *Numerical modelling of site effects in the Palatine hill, Roman Forum and Coliseum archaeological area*. Bulletin of Earthquake Engineering, 12, pp. 1383–1403.
- Pagliaroli A., Moscatelli M., Raspa G., Naso G. (2014b). *Seismic microzonation of the Central Archeological Area of Rome: results and uncertainties*. Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 1405–1428.
- Santucci de Magistris F., d'Onofrio A., Evangelista L., Foti S., Maraschini M., Monaco P., Amoroso S., Totani G., Lanzo G., Pagliaroli A., Madiati C., Simoni G., Silvestri F. (2013). *Geotechnical characterization of the Aterno valley for site response analyses*. Rivista Italiana di Geotecnica, 47 (3), 65-86.
- Silvestri F., d'Onofrio A. (2014). *Risposta sismica e stabilità di centri abitati e infrastrutture*. In: La Geotecnica nella difesa del territorio e delle infrastrutture dalle calamità naturali, Vol. 1, pp. 5-60, AGI, ISB

8. Allegati

8.1 *Allegato 1 - Scheda Metadati indagini HVSR*

8.2 Allegato 2 - Scheda Metadati indagini MASW o SR