

Gruppo di Lavoro di Supporto Tecnico Scientifico degli Studi di Microzonazione Sismica nella Regione Puglia

## PROTOCOLLI PER LO SVOLGIMENTO DEGLI STUDI DI MICROZONAZIONE DI 2°/3° LIVELLO NELLA REGIONE PUGLIA

### Responsabili scientifici:

*Vincenzo Del Gaudio (DiSTeGeo) - Piernicola Lollino (CNR - IRPI)*

1. Protocollo per l'aggiornamento degli studi di MS1 pregressi in accordo ai nuovi standard redatti dalla Commissione Tecnica Nazionale per la Microzonazione Sismica  
*Gioacchino Francesco Andriani, Salvatore Gallicchio, Giuseppe Diprizio, Davide Cerone, Paolo Morelli, Fabrizio Tursi, Veronica Zumpano, Francesco Filice*
2. Protocollo per la Rappresentazione ed Archiviazione Informatica dei Dati  
*Antonella Marsico*
3. Protocollo per l'esecuzione di indagini geofisiche di superficie  
*Vincenzo Del Gaudio, Agata Siniscalchi, Gerardo Romano*
4. Protocollo per l'esecuzione di indagini geotecniche e geofisiche in foro  
*Piernicola Lollino, Agata Siniscalchi*
5. Protocollo per la modellazione della risposta sismica locale in configurazione 1D  
*Piernicola Lollino, Nunzio Luciano Fazio, Angelo Ugenti*

## Introduzione

Il documento che segue è stato prodotto nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione Scientifica firmato il 04/12/2019 tra Regione Puglia, Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica e Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro, per le attività necessarie allo svolgimento degli Studi di Microzonazione Sismica (MS) di 1°, 2° e 3° livello e delle Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) degli insediamenti urbani afferenti ad alcuni comuni della Regione Puglia. Questo documento raccoglie i protocolli predisposti dal Gruppo di Lavoro di Supporto Tecnico Scientifico (GLSTS) per supportare i soggetti affidatari degli studi in oggetto attraverso un insieme di raccomandazioni circa le modalità di acquisizione, elaborazione e rappresentazione dei dati necessari alla produzione degli elaborati richiesti per la realizzazione degli studi di Microzonazione Sismica di 2°/3° livello (MS2/3), in coerenza con la versione più aggiornata degli standard definiti a scala nazionale dalla Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica (articolo 5, comma 7 dell'OPCM 13 novembre 2010, n. 3907).

I protocolli non hanno un carattere prescrittivo, ma forniscono una guida di riferimento per lo svolgimento delle indagini che verranno condotte dai soggetti affidatari, in modo da indirizzarli verso un prodotto finale che soddisfi i requisiti di qualità degli elaborati richiesti per la loro validazione da parte della Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica.

Il documento è suddiviso in 5 capitoli che descrivono i seguenti protocolli:

- 1) Protocollo per l'aggiornamento degli studi di MS1 pregressi in accordo ai nuovi standard redatti dalla Commissione Tecnica Nazionale per la Microzonazione Sismica (pag. 2);
- 2) Protocollo per la Rappresentazione ed Archiviazione Informatica dei Dati (pag. 14);
- 3) Protocollo per l'esecuzione di indagini geofisiche di superficie (pag. 18);
- 4) Protocollo per l'esecuzione di indagini geotecniche e geofisiche in foro (pag. 44);
- 5) Protocollo per la modellazione della risposta sismica locale in configurazione 1D (pag. 60)

I protocolli forniscono indicazioni di base sulle procedure che si raccomanda di seguire nello svolgimento delle attività previste per una MS1 e sugli standard di rappresentazione dei risultati delle attività di indagine definiti dalle linee guida nazionali. Per approfondimenti su queste tematiche si rimanda alla bibliografia annessa a ciascun protocollo.

In allegato è riportato lo schema dell'indice della relazione finale illustrativa attesa per ciascuno studio di MS2 o MS3. Tale indice fornisce una guida alla definizione della struttura complessiva delle attività di studio commissionate agli affidatari.

# 1. PROTOCOLLO PER L'AGGIORNAMENTO DEGLI STUDI DI MS1 PREGRESSI IN ACCORDO AI NUOVI STANDARD REDATTI DALLA COMMISSIONE TECNICA NAZIONALE PER LA MICROZONAZIONE SISMICA

## 1. Premessa

In accordo alle *Linee guida per la realizzazione della Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica con adattamento ai contesti vulcanici*, Versione 1.0 del 2020 (Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2019), si espone che gli step principali per assolvere agli studi conoscitivi di Microzonazione sismica di livello 1 (MS1) consistono nella produzione dei seguenti elaborati:

- Carta delle indagini;
- Carta geologico-tecnica (CGT\_MS);
- Carta delle frequenze;
- Sezioni geologico-tecniche;
- Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS);
- Relazione illustrativa.

Si sottolinea che, poiché la CGT\_MS, secondo le suddette Linee Guida, si ricava dalla rielaborazione della Carta Geologica e Geomorfologica di base (CG e G), la propedeutica redazione di quest'ultima e la sua consegna al Gruppo di Lavoro di Supporto Tecnico Scientifico (GLSTS), è imprescindibile per la verifica di tutti i successivi elaborati cartografici.

Nell'ambito del presente Protocollo di sintesi si fa riferimento anche al disciplinare *Linee guida per l'affidamento degli: "Studi di microzonazione sismica di livello 1 (MS1) e analisi della condizione limite per l'emergenza (CLE)"*, redatto dal Gruppo di Lavoro di Supporto Tecnico-Scientifico (GLSTS) costituito dal Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università di Bari Aldo Moro e dal CNR IRPI sede di Bari. Dal cronoprogramma di quest'ultimo documento si evince che le attività da svolgere nonché le relazioni e i prodotti cartografici, che devono essere forniti da parte dei professionisti incaricati, sono:

- partecipazione alla formazione preliminare;
- raccolta ed elaborazione dei dati pregressi;
- rilievo geologico-tecnico di dettaglio;
- definizione del piano di misure di rumore;
- esecuzione delle misure di rumore ed elaborazione dei risultati;
- realizzazione della carta delle indagini;
- realizzazione della carta geologica e geomorfologica di base, corredata da sezioni geologiche;
- realizzazione della carta delle frequenze naturali dei terreni;
- realizzazione della Carta geologico-tecnica (CGT\_MS) corredata dalle sezioni;
- realizzazione della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS);
- redazione della relazione illustrativa dello studio di Microzonazione sismica;
- acquisizione dei dati per l'analisi della CLE;
- redazione degli elaborati cartografici per la CLE;
- redazione della relazione illustrativa per la CLE;

- archiviazione dei metadati;
- partecipazione alle riunioni di coordinamento.

## 2. Studi di Microzonazione sismica di livello I: lo stato dell'arte

Poiché il presente documento ha come obiettivo quello di fornire un vademecum per la valutazione della completezza e la validazione degli studi pregressi di Microzonazione sismica di livello I, si è proceduto ad un confronto tra le attività svolte, i prodotti cartografici e le relazioni redatte nell'ambito del vecchio progetto di Microzonazione sismica e quello che si prevede di dover produrre attualmente, come precedentemente elencato in premessa.

Gli studi pregressi di Microzonazione sismica di livello I sono stati condotti a partire dal 2012 ed in seguito validati nel 2013 ed avevano come Soggetto realizzatore l'Autorità di Bacino della Puglia secondo lo schema di Convenzione allegato alla Delibera di Giunta della Regione Puglia 2407/2011. Questi studi sono stati eseguiti in accordo alle Linee guida allora vigenti e, per ogni comune studiato, i prodotti finali sono risultati i seguenti:

- ❖ la *Relazione illustrativa dello studio di microzonazione*, nella quale sono stati approfonditi i seguenti temi:
  - analisi della pericolosità sismica con particolare riferimento alla sismicità storica, alla zonazione sismogenetica, ai dati di pericolosità sismica;
  - assetto geologico, morfologico e idrogeologico;
  - dati geotecnici e geofisici pregressi disponibili;
  - modello del sottosuolo;
  - elaborati cartografici, in cui si descrivono i caratteri e le procedure di redazione della Carta delle indagini, della Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica, della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica con valutazione delle Zone stabili, delle Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali e delle Zone instabili;
  - mappa delle pendenze;
  - individuazione delle aree per le quali sono necessari ulteriori livelli di approfondimento;
- ❖ la Carta delle Indagini;
- ❖ la Carta Geologico-Tecnica;
- ❖ la Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica.

Pertanto, in virtù di quanto evidenziato in Premessa e nell'elenco delle attività e dei prodotti cartografici da redigere per i nuovi studi di MS1, le relazioni tecniche ed i prodotti cartografici già previsti per gli studi pregressi di MS1 che possono essere presi in considerazione per i nuovi studi di MS1 risultano i seguenti:

- a) la Carta delle Indagini;
- b) la Carta Geologico-Tecnica;
- c) la Carta della Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)
- d) la Relazione illustrativa della MS1.

Tuttavia, è necessario valutare criticamente i contenuti ed il workflow richiesti per gli elaborati degli studi di MS1 pregressi, confrontandoli con quelli richiesti per i suddetti elaborati nell'ambito delle

attuali Linee guida per la MS1. In seguito a tale confronto, sarà necessario indicare quali aggiornamenti effettuare sugli elaborati di MS1 pregressi nel rispetto dei nuovi standard.

### **3. La nuova cartografia tematica a supporto dei nuovi studi di MS1: sintesi dei contenuti in accordo alle attuali Linee guida**

In virtù di quanto illustrato nei Paragrafi 1 e 2 del presente Protocollo, le Carte tematiche validate nell'ambito degli studi di MS1 pregressi devono essere oggetto di revisione ed aggiornamento per l'adeguamento alle ultime Linee Guida (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2019; 2020). Inoltre, dovrà essere considerata anche la Carta Geologica e Geomorfologica di base, che qualora non presente o non congruente con quanto indicato nelle Linee Guida Nazionali dovrà essere realizzata ex novo o adeguata rispettivamente.

Gli elaborati pregressi dovranno quindi mostrare i seguenti contenuti:

- la Carta delle indagini dovrà contenere l'ubicazione in pianta dei sondaggi effettuati nell'area di studio, integrando la Carta delle Indagini consegnata per gli studi validati nel 2013, con i dati acquisiti posteriormente sino alla data dell'aggiornamento. I sondaggi vanno recuperati dagli archivi degli Uffici competenti, codificati e posizionati su carta. Al fine di rispettare i nuovi standard di rappresentazione e archiviazione (versione 4.2 – Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2020), i dati dovranno essere archiviati in formato digitale, integrati in un database e corredati di tutti i parametri ricavabili dai documenti di riferimento (colonne stratigrafiche, SPT, sismostratigrafie, downhole, etc.). I documenti dovranno essere rinominati secondo le indicazioni degli standard di rappresentazione ed archiviazione informatica (versione 4.2 – Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2020) e indicati nelle tabelle dei sondaggi. Allo stesso modo, si dovranno riportare sulla Carta anche i nuovi sondaggi (generalmente misure di rumore rilevate mediante tecnica HVSR) predisposti in base alla necessità di approfondire la conoscenza del territorio in termini di frequenza di risonanza dei siti e spessori dei terreni di copertura. La Carta delle indagini dovrà essere corredata di una legenda chiara e sintetica di supporto alla comprensione della tipologia di sondaggio ed all'ubicazione dello stesso nell'area di interesse: per maggior dettagli si rimanda al “Protocollo per lo svolgimento degli studi di Microzonazione Sismica di 1° livello della Regione Puglia”, predisposto dal GLSTS;
- la Carta Geologica e Geomorfologica di base (CG\_G) è imprescindibile, sebbene sia un prodotto non codificato, per la realizzazione della CGT\_MS, in quanto quest'ultima è il risultato di una rielaborazione della CG\_G (pagina 11 delle Linee Guida per la realizzazione della CGT\_MS - Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2019). Pertanto, la qualità della CGT\_MS è indissolubilmente legata a quella della CG\_G da cui è stata elaborata. Con riferimento alle Linee Guida aggiornate (cf. Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2019 - pag. 10), la CG\_G deve rappresentare la sintesi dei dati cartografici pregressi e di rilievi originali. Questi ultimi si rendono necessari qualora la cartografia pregressa risulti inadeguata per la scarsa qualità dei dati riportati e/o per l'uso di una scala di rilevamento e rappresentazione cartografica inferiore a 1:10.000. In allegato alla CG\_G dovranno essere fornite delle sezioni geologiche in numero adeguato a ricostruire il modello geologico di sottosuolo, elaborate lungo transetti che siano significativi per sintetizzare le caratteristiche locali dell'assetto geologico e geomorfologico che possono influenzare la risposta sismica locale (cf. Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2019 - par. 2.1). Le sezioni

dovranno necessariamente attraversare le aree urbanizzate e/o urbanizzabili ed essere orientate con gli estremi ortogonali ai lineamenti geologico–geomorfologici caratteristici (cf. Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2019 - par. 2.1). Queste sezioni saranno propedeutiche alla realizzazione del successivo modello geologico–tecnico di sottosuolo.

- la Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica (CGT\_MS) dovrà essere validata attraverso il confronto con la carta Geologica e Geomorfologica di base, ed aggiornata agli standard di rappresentazione ed archiviazione informatica più recenti (versione 4.2 – Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2020). Essa dovrà mostrare i seguenti contenuti:
  - I. terreni di copertura: unità litotecniche con indicazione dell’ambiente genetico- e deposizionale;
  - II. substrato geologico: unità litotecniche con indicazione delle corrispondenti unità litostratigrafiche codificate nella cartografia ufficiale del Servizio Geologico d’Italia;
  - III. instabilità di versante;
  - IV. forme di superficie e sepolte, comprensive di alcuni elementi lineari e puntuali;
  - V. elementi tettonico-strutturali;
  - VI. elementi geologici ed idrogeologici.

In particolare, la Carta Geologico-Tecnica dovrà seguire gli standard di rappresentazione ed archiviazione informatica mediante tematismi areali, lineari e puntuali per poter rappresentare gli elementi tettonico-strutturali, geologici, idrogeologici, le instabilità di versante, le forme di superficie e quelle sepolte. Per quanto concerne i *terreni di copertura*, essi devono essere menzionati e classificati in accordo allo *Unified Soil Classification System (USCS)*, così come previsto dagli standard internazionali American Society for Testing and Materials, in particolare l’ASTM D2487-17 *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes – Unified Soil Classification System*. Per tale ragione, i materiali di copertura dovranno essere identificati, sulla carta, con sigle ben definite e riportate nelle Linee guida, in modo da sintetizzare sia la natura litologica del materiale sia l’ambiente deposizionale (cfr. par. 1.2.1.1 delle Linee guida).

Le unità litotecniche del *substrato* dovranno essere anch’esse indicate con una sigla identificativa della natura del terreno (lapideo, granulare, coesivo, etc.), del grado di consolidazione (normale o sovraconsolidato) e dell’assetto geostrutturale (stratificato, fratturato, alterato, incoerente, etc.). Gli elementi tettonico-strutturali devono essere rappresentati in accordo alla legenda riportata nel paragrafo 1.2.1.3 delle Linee guida, tenendo conto sia dell’effetto cromatico sia del simbolismo da associare ai diversi tipi di strutture tettoniche. Nella redazione della CGT\_MS, l’accorpamento di due o più unità litologiche in un’unica unità geologico tecnica può comportare l’omissione di alcune informazioni di carattere geolitologico. A tal proposito, è opportuno indicare nella sigla convenzionale che identifica l’unità geologico-tecnica anche i riferimenti relativi alle unità litostratigrafiche corrispondenti (cfr. par. 1.2.1.7). In ogni caso per ogni unità litotecnica si dovrà indicare l’unità litostratigrafica da cui deriva; per quest’ultime si dovrà fare riferimento alle denominazioni utilizzate nei fogli del Servizio Geologico Nazionale.

Allo stesso modo, la stessa procedura dovrà essere seguita per gli elementi geologici ed idrogeologici rappresentati da pozzi per ricerca idrica o perforazioni geognostiche a carotaggio continuo utilizzate per il rinvenimento della falda idrica sotterranea. Particolare attenzione dovrà essere rivolta ai simboli che indicano l’ubicazione delle tracce delle sezioni geologico-tecniche, sia nel campo carta sia nella

legenda nonché alla corretta collocazione, a margine delle sezioni prodotte, dei riferimenti cardinali utili ad identificare la reale orientazione nello spazio della sezione stessa.

Un altro elemento di fondamentale importanza da rappresentare sulla Carta Geologico-Tecnica è la mappatura dei corpi di frana relativamente al tipo di cinematismo (crollo o ribaltamento, scorrimento, colata, complesso) ed allo stato fisico dei volumi di terreno potenzialmente coinvolti (attivo, quiescente, inattivo, non definito); la combinazione di entrambi i fattori dovrà rispettare il simbolismo convenzionale stabilito dalle Linee guida (cfr. par. 1.2.1.5).

Le forme di superficie e sepolte dovranno essere rappresentate con il simbolismo convenzionale, areale, puntuale e lineare con particolare attenzione rivolta a quegli elementi morfologici che possono essere causa di importanti fenomeni di amplificazione sismica. A tal proposito si fa riferimento agli orli di scarpata morfologica naturale o artificiale con altezza compresa tra i 10 m ed i 20 m, agli orli di scarpata morfologica naturale o artificiale con altezza >20 m, agli orli di terrazzo fluviale compreso tra 10 m e 20 m ed a quelli con altezza >20 m. Concorrono al possibile rischio di amplificazione sismica locale gli assi di valle sepolta stretta con coefficiente  $C \geq 0.25$  ( $C=H/L$  con H profondità della valle ed L semi-larghezza della stessa) e gli assi di valle sepolta larga con  $C < 0.25$ . Tutti gli elementi vanno cartografati in accordo alla legenda ufficiale proposta nelle Linee guida.

A corredo della CGT\_MS sarà necessario redigere le Sezioni geologico-tecniche il cui numero ed ubicazione dovrà essere pianificato in funzione delle caratteristiche geologico-strutturali dell'area di studio, affinché tutti gli elementi siano chiari alla successiva redazione della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS). Inoltre, si ribadisce la necessità che le sezioni attraversino i centri abitati e le infrastrutture comprese nell'area di studio. Fermo restando la redazione di sezioni in scala opportuna, generalmente 1:5000 così come la Carta CGT\_MS, e l'applicazione dei criteri standard di redazione (elementi di congiunzione quali riferimenti numerici o alfabetici a margine delle stesse che richiama l'esatta collocazione in carta, simboli utili all'orientazione, etc.), si precisa, in accordo a quanto fedelmente citato nelle Linee guida (cfr. par. 2.3), che gli elementi necessari da evidenziare in una sezione geologico-technica utile agli studi di MS sono:

- 1) andamento dell'interfaccia substrato-coperture. Di notevole importanza è la definizione dello spessore delle coperture, parametro utile per valutare la suscettibilità di una zona all'amplificazione del moto sismico e per una sua corretta classificazione preliminare nella carta delle MOPS, propedeutica agli approfondimenti per gli studi di MS di livello 2 e/o 3;
- 2) disarticolazione del substrato dovuto a cause tettoniche o morfologiche che possono condizionare la risposta sismica di superficie;
- 3) caratteristiche di rigidità del substrato, se si hanno a disposizione parametri geotecnici e geofisici del materiale. In alcuni casi è possibile che il substrato sia talmente profondo da non essere rappresentabile nelle sezioni geologico-tecniche, ma indicazioni sulla profondità dovranno comunque essere riportate nella Relazione illustrativa a supporto della cartografia. Indagini geofisiche possono mettere in evidenza i contrasti di impedenza sismica lungo superfici di discontinuità tra terreni di copertura e substrato, all'interno dei terreni di copertura a causa di una loro intrinseca eterogeneità ed all'interno del substrato stesso a causa della presenza di discontinuità non necessariamente accompagnate da variazioni litologiche;
- 4) discontinuità, geometrie sepolte e di superficie. Le discontinuità stratigrafiche assumono un ruolo importante nel caso di morfologie sepolte che separano unità caratterizzate da un forte contrasto di impedenza sismica, come nel caso di paleovalli.

Le discontinuità possono manifestarsi al contatto tra coperture e substrato, ma anche all'interno delle sole coperture e frequentemente, nel caso della stratigrafia urbana, laddove sono presenti stratificazioni antropiche con contrasti di impedenza. Le morfologie sepolte generalmente separano unità geologico-tecniche con forti contrasti dei valori di Vs; esse sono frequenti al di sotto delle coperture alluvionali al contatto con i terreni del substrato, ma anche al di sotto delle coperture di origine antropica. Queste morfologie, che possono rappresentare discontinuità stratigrafiche (per es. orli di scarpate o di terrazzi o bordi di valli sepolte), dovranno essere rappresentate in sezione in modo accurato e corrispondentemente a quanto riportato nello sviluppo plano-altimetrico sulla CGT\_MS. Le morfologie di superficie sono generalmente scarpate, picchi, creste, orli di scarpata ed assumono un ruolo più importante allorquando mostrano una morfologia particolare in termini di altezza topografica e/o acclività ( $>15^\circ$ ). Anch'esse vanno descritte con estremo dettaglio in sezione e si dovrà avere cura di mantenere una corretta corrispondenza con lo sviluppo plano-altimetrico della morfologia sulla CGT\_MS;

- 5) spessori significativi delle unità geologico-tecniche omogenee. Nelle sezioni ed in CGT\_MS vanno espressamente indicate le unità omogenee aventi spessore significativo  $\geq 3$  m, in quanto suscettibili di fenomeni di amplificazione sismica locale rilevanti per le opere di ingegneria civile. Per tale ragione, all'occorrenza, potrebbe essere utile redigere le sezioni geologico-tecniche ad una scala di maggiore dettaglio ( $\geq 1:5000$ ). I materiali con spessori inferiori possono non essere rappresentati in sezione ed in CGT\_MS in quanto non interagiscono significativamente con le lunghezze d'onda associate alle frequenze di interesse ingegneristico. I criteri di rappresentazione dovranno essere spiegati nella Relazione illustrativa a supporto delle sezioni e della CGT\_MS;
- 6) zone interessate da instabilità. Le aree che manifestano caratteri di instabilità quali frane e faglie attive e capaci dovranno essere rappresentate in sezione con l'aggiunta di tutte le informazioni utili per definire l'estensione e la profondità delle stesse;
- 7) elementi tettonici e strutturali di rilievo. Tutti gli elementi strutturali che possono determinare un forte stato di fratturazione dell'ammasso roccioso, strutture ad alto angolo tra coperture e substrato o determinare dei bruschi passaggi laterali dei valori di impedenza sismica, tali da giustificare fenomeni di amplificazione sismica, devono essere riportati in sezione. Altre situazioni strutturali di cui tenere conto sono le faglie che deformano il substrato dando luogo a morfologie sepolte che possono determinare effetti 2D e 3D. Infine, nelle sezioni si dovrà riprodurre anche l'assetto giaciturale dell'ammasso roccioso profondo, poiché strati troppo inclinati con successioni stratigrafiche e marcate variazioni litologiche possono generare evidenti discontinuità laterali che vanno tenute in considerazione per gli effetti di natura sismica;
- 8) andamento della superficie piezometrica. Le sezioni geologico-tecniche dovranno contenere, ove possibile, l'informazione relativa all'andamento della superficie della falda sotterranea. Questo aspetto idrogeologico è di fondamentale importanza per la previsione di fenomeni di liquefazione relativamente a materiali sabbiosi saturi che si collocano ad una profondità inferiore ai 20 m dal p.c., in presenza di una superficie freatica posta ad una profondità inferiore a 15 m dal p.c.

Nella redazione delle sezioni geologico-tecniche, sarebbe utile che le tracce delle sezioni fossero riportate anche sulla Carta delle MOPS al fine di controllare la congruenza tra i limiti delle litologie riportati nelle sezioni e quelli riportati sulla Carta delle MOPS. Questa operazione è utile per verificare la corrispondenza tra le geometrie del sottosuolo raffigurate

nelle sezioni geologico-tecniche e quelle previste nelle colonnine stratigrafiche a corredo delle Carte delle MOPS esplicative dei rapporti stratigrafici delle unità litotecniche rappresentate.

- la Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) ha il compito di mostrare come il territorio di studio possa essere suddiviso in microzone omogenee, in termini di comportamento omogeneo relativamente ai principali fenomeni correlati alla pericolosità sismica. Nella carta delle MOPS si individuano, quindi, Zone stabili, Zone stabili suscettibili di amplificazione locale e Zone di Attenzione per instabilità. L'individuazione di tali Zone deriva dall'interpretazione della CGT\_MS, la quale, sulla base dei dati derivanti da indagini geognostiche pregresse e da indagini condotte ex novo riportate sulla Carta delle indagini, permette, con il supporto della redazione delle sezioni geologico-tecniche, di giungere ad una interpretazione qualitativa globale del sito di studio, tale da poterne individuare microzone che mostrano un comportamento omogeneo. Nella Carta delle MOPS si individuano, relativamente alle microzone, singole colonne stratigrafiche nelle quali si distinguono sia i terreni di copertura, sia quelli del substrato, che nel complesso mostrano un comportamento omogeneo in prospettiva sismica.

Diversi sono i criteri che conducono alla redazione della Carta delle MOPS, in accordo con gli standard per la redazione della CGT\_MS. In particolare, per la redazione della Carta delle MOPS è indispensabile tenere conto di alcune casistiche di elevato interesse ai fini dell'attività di microzonazione:

- aree con differente litologia, ma caratteristiche tecniche simili. Sulla base dei dati raccolti attraverso le indagini (pregresse ed attuali), può essere possibile accorpate aree adiacenti caratterizzate da unità litologiche differenti, ma con caratteristiche litotecniche e fisico-meccaniche simili, dando vita ad un'unica MOPS avente una successione verticale omogenea;
- aree con stessa litologia e differente spessore delle coperture. Può accadere che, a seguito di misure di rumore sismico, vengano individuate, in aree con lo stesso tipo di substrato, spessori dei materiali di copertura differenti che, di conseguenza, determinano una risposta sismica altrettanto diversa. In tal caso, si dovranno distinguere MOPS differenti ciascuna con un comportamento dinamico a sé stante. Di conseguenza, l'estensione di tali Microzone omogenee potrà essere definito da un livello superiore di approfondimento (MS2 e/o MS3);
- zone con stesso tipo di substrato, ma differente stato di fratturazione. In questo caso, sempre a seguito di indagini ambientali, potrà capitare di ottenere, in zone con la stessa natura litologica del substrato, una diversa risposta in termini di rigidità. Questo può essere attribuibile ad un diverso grado di fratturazione e di degradazione dell'ammasso roccioso, tale da individuare MOPS diverse;
- presenza di faglie attive e capaci. Qualora si dovessero rilevare aree suscettive ad instabilità causata da faglie classificate come attive e capaci, nella carta delle MOPS si dovranno classificare tali aree come Zone di instabilità;
- aree caratterizzate da fenomeni di instabilità. Tutte le zone ritenute suscettibili di possibili fenomeni di instabilità nella Carta delle MOPS dovranno essere identificate come Zone di Attenzione per instabilità.

#### 4. Cartografia pregressa MS1: contenuti e confronti con le attuali Linee guida

In riferimento a quanto espresso nel paragrafo 2, i prodotti cartografici pregressi disponibili che possono essere presi in considerazione a supporto dei nuovi studi di MS1 sono:

- a) la Carta delle Indagini;
- b) la Carta Geologico-Tecnica;
- c) la Carta della Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)
- d) la Relazione Illustrativa.

In tale elenco non è contemplata la Carta Geologica e Geomorfologica di base che, però, in accordo con le linee guida 2020, con il disciplinare UNIBA/CNR e con quanto espresso in Premessa, è un prodotto indispensabile per la valutazione della Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica di Livello 1.

Questa carta se non conforme agli Standard attuali dovrà essere opportunamente adeguata, o, se non presente, dovrà essere realizzata opportunamente ex-novo. Solo in seguito all'adeguamento o alla realizzazione della CG\_G si potrà procedere ad una congrua valutazione della CGT\_MS preesistente ed alla definizione delle eventuali modifiche da apportare sulla base degli ulteriori dati acquisiti e della nuova CG\_G.

Per quanto concerne la revisione dei contenuti della restante cartografia richiesta:

- La Carta delle indagini necessita una revisione del simbolismo precedente rispetto agli Standard aggiornati ed una integrazione con eventuali nuovi dati;
- La Carta Geologico-Tecnica e le relative sezioni dovranno essere revisionate alla luce di quanto rappresentato in CG\_G e relative sezioni, nonché nel simbolismo, nei codici e nella legenda secondo gli Standard aggiornati;
- La Carta delle MOPS dovrà essere necessariamente rielaborata alla luce della Carta delle Frequenze, della Carta delle Indagini aggiornata e della CGT\_MS revisionata.

Tuttavia, si dovrà fare un breve riesame dei contenuti di tali prodotti ed evidenziare quali informazioni sarebbe utile recepire e sfruttare nei nuovi studi e quali elementi andrebbero integrati alla luce delle nuove Linee guida.

In generale, i contenuti della *Carta delle indagini* redatta in concomitanza agli studi pregressi di MS1 sono sostanzialmente gli stessi previsti per i nuovi studi di MS1. Si evidenzia che esse sono state strutturate in modo da riportare sulla Carta topografica in scala 1:10000 i sondaggi geognostici pregressi (sondaggi indiretti e diretti) con simbolismo correttamente riportato in legenda e facilmente comprensibile al lettore. Tuttavia, per poter aggiornare la vecchia cartografia alla nuova in modo conforme allo standard vigente, è necessario aggiornare il simbolismo relativo alle diverse tipologie di sondaggi geognostici. Pertanto, è necessario far riferimento a quanto menzionato nel paragrafo 1.1.1 "*Carta delle indagini*" dello Standard di rappresentazione e archiviazione informatica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020).

Si sottolinea che, in riferimento agli standard attuali, la Carta delle indagini può essere rappresentata in una scala non inferiore a 1:10000. Per la stessa carta è comunque consigliabile mantenere la scala utilizzata per gli altri elaborati cartografici e, nel caso si riscontri una scarsa leggibilità dovuta alla sovrapposizione di indagini nella stessa area, si può procedere con inserti sul campo carta realizzati a scala maggiore.

Per alcuni dei suddetti comuni sono state visionate le *Carte Geologico-Tecniche*. Si fa presente che nella maggior parte dei casi mancano le Carte Geologiche e Geomorfologiche di base per cui non è stato possibile valutarne appieno la reale adeguatezza alle nuove Linee Guida Nazionali. Inoltre, le carte geologico-tecniche analizzate sono state redatte in scala 1:5000, suddivise in tavole in modo da cartografare tutta l'area di interesse, utilizzando unità geologiche non convenzionali (unità litologiche al posto delle unità litotecniche) cartografate con tonalità cromatiche e sigle che differiscono dalle prescrizioni dagli Standard attuali. Sono state cartografate anche le aree instabili, rappresentate da frane la cui rappresentazione non è in linea con quanto dettato dagli standard attuali. È stato associato il simbolismo convenzionale per individuare l'area di studio, le tracce di sezione geologico-technica, gli elementi stratigrafico strutturali (contatto stratigrafico, contatto stratigrafico incerto, giacitura degli strati, faglie, faglie presunte, pieghe, etc.). Sulla medesima carta sono stati riportati gli elementi morfologici più significativi (cavità, picchi, orlo di terrazzo fluviale, fronte di cava, etc.) e quelli idrogeologici con particolare attenzione alla individuazione delle aree laddove la falda idrica assume una profondità inferiore a 15 m dal p.c. Sono stati riportati anche i sondaggi distinguendo quelli che intercettano il substrato e quelli presi in riferimento per la redazione delle sezioni geologico-techniche; sono stati riportati in carta anche i pozzi terebrati per l'utilizzo delle acque sotterranee. Nel testo scritto della legenda, a completamento della descrizione litologica delle unità, sono stati riportati, laddove erano a disposizione, i principali parametri geofisici e geotecnici: velocità delle onde sismiche, modulo elastico longitudinale e di taglio, modulo di compressibilità e di Poisson, il peso di volume, la coesione e l'angolo di attrito dei materiali. Le carte sono state corredate da sezioni geologico-techniche (almeno due per ogni tavola) in scala 1:5000 dalle quali si evince il rapporto geometrico tra i terreni di copertura e quelli del substrato e di conseguenza l'ordine di grandezza dello spessore dei primi; va verificato che le geometrie delle unità del substrato siano in accordo con quanto riportato nella carta geologica di base, che però non è disponibile. Nel complesso non sembra che la scala del rilevamento rifletta quella richiesta negli standard e nelle linee guida 2020. È stato fornito anche uno schema non in scala dei rapporti stratigrafici tra le diverse unità litologiche.

In merito a quanto descritto ed in relazione a quanto richiesto dalle Linee guida attualmente vigenti, i seguenti aspetti delle *Carte Geologico-Tecniche* devono essere accuratamente revisionati:

- i codici e i riferimenti cromatici che identificano le unità litotecniche (terreni di copertura e substrato geologico): essi devono essere aggiornati in base alle nuove tonalità ed ai nuovi codici di individuazione delle litologie sia per i materiali di copertura (in accordo al sistema di classificazione dei suoli USCS – ASTM) sia per quelli del substrato;
- la legenda ed il simbolismo indicante gli elementi tettonico-strutturali;
- la legenda ed il simbolismo esplicativo dei caratteri geologici ed idrogeologici, nonché dei fenomeni di instabilità di versante, con indicazione della tipologia di cinematisma e dello stato fisico del fenomeno gravitativo;
- la legenda ed il simbolismo delle forme di superficie e sepolte con particolare attenzione a quegli elementi morfologici in grado di essere causa di fenomeni di amplificazione sismica locale, come ad esempio l'altezza dell'orlo delle scarpate, il rapporto tra la profondità e la semi-larghezza delle valli fluviali, l'acclività dei versanti;
- le sezioni geologico-techniche a corredo della Carta Geologico-Tecnica. Queste andrebbero aggiornate introducendo la legenda descrittiva delle singole unità rappresentate (terreni di copertura e del substrato) con le sigle ed i colori codificati. Inoltre, si dovranno meglio esprimere i riferimenti spaziali cardinali e riportare, eventualmente, l'ubicazione dei sondaggi

geognostici presi come riferimento per la redazione delle sezioni lungo il profilo delle stesse Zone di Attenzione per instabilità.

- E' necessario verificare che la scala dei particolari geometrici rappresentati in sezione sia più dettagliata rispetto a quanto rappresentato nei Fogli Geologici Ufficiali al 100.000 o al 50.000, in linea con quanto prescritto dalle linee guida.

In generale, al fine di aggiornare al meglio le preesistenti Carte Geologico-Tecniche è necessario fare riferimento 1) ad una carta Geologica e Geomorfológica di base realizzata secondo quanto menzionato nelle Linee Guida per la realizzazione della CGT\_MS 2020 e 2) a quanto menzionato nel paragrafo 1.1.2 “*Carta Geologico-Tecnica per la microzonazione sismica (CGT\_MS)*” dello Standard di rappresentazione e archiviazione informatica, (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020).

Un esame preliminare delle *Carte delle MOPS* redatte per gli studi pregressi di MS1 ha mostrato contenuti in linea di principio compatibili con quelli richiesti dalle recenti Linee guida; si evidenzia che in genere per le microzone non sono rappresentate le stratigrafie. Esse sono state redatte mettendo in evidenza con tonalità dal blu al verde al giallo le diverse microzone omogenee (Zone stabili, Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, Zone suscettibili di instabilità, etc.), le cui caratteristiche sia relativamente alla natura litologica, sia in merito alle principali proprietà tecniche, sono state descritte in legenda. In quest'ultima sono stati riportati anche i principali elementi geomorfologici significativi ai fini della pericolosità in area sismica. Le stratigrafie che identificano le suddette Zone sono state illustrate in modo schematico all'interno della *Relazione illustrativa dello studio di Microzonazione sismica*, redatta per ciascun comune, e le Zone che caratterizzano l'area di studio sono state descritte nel testo con il supporto di tabelle che sintetizzano lo spessore dei materiali, la descrizione litotecnica, le principali caratteristiche geofisiche e geotecniche ove disponibili.

Le Carte delle MOPS dovranno comunque essere revisionate in accordo con gli eventuali aggiornamenti della Carta Geologico Tecnica e, per quanto riguarda le modalità di rappresentazione, dovranno essere rivisti ed aggiornati:

- il layout cartografico, in quanto nelle nuove Carte delle MOPS, al fine di facilitare la lettura delle stesse, è necessario riportare a margine della mappa, e quindi in legenda, le colonne stratigrafiche di sintesi, indicanti la successione stratigrafica facente capo alla relativa microzona omogenea;
- le tonalità con cui rappresentare le diverse microzone (Zone stabili, Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, Zone di attenzione per le instabilità);
- i retini con cui rappresentare le suddette Zone, nonché i codici ad esse associati e le sigle;
- il simbolismo adeguato relativo alle aree caratterizzate da strutture tettoniche (per es. faglie attive/capaci);
- il simbolismo convenzionale per le forme di superficie e sepolte;
- il simbolismo per l'identificazione delle tracce di sezione topografica e per l'ubicazione delle misure di rumore ambientale.
- l'associazione delle stratigrafie alle microzone.

Per assolvere a tale necessità il professionista incaricato dovrà tenere conto di quanto riportato nel Paragrafo 1.1.3 “*Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Carta delle MOPS)*” dello Standard di rappresentazione e archiviazione informatica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020).

## 5. Conclusioni

In conclusione, si sottolinea che i prodotti degli studi pregressi di MS1 (anno 2013) rappresentano un supporto di base da valutare criticamente di caso in caso. Questo supporto, dovrà essere aggiornato secondo quanto previsto dai nuovi Standard in termini di contenuti, di codifica degli elementi e di layout cartografico, tenendo conto di quanto riportato sia nelle Linee guida per la realizzazione della Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica con adattamento ai contesti vulcanici (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020), sia nello *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica* (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020).

Infine, si precisa che, in virtù di quanto descritto ed in relazione a quanto è necessario per assolvere alle Linee guida degli attuali studi di MS1, gli studi pregressi richiedono di essere completati con le seguenti attività:

1. adeguamento o realizzazione della Carta Geologica e Geomorfologica di base, corredata da sezioni geologiche alla scala 1:5000;
2. aggiornamento della Carta delle Indagini;
3. compilazione delle schede di raccolta dati per il rilievo geomeccanico negli affioramenti più significativi.
4. programmazione ed esecuzione del piano di misure di rumore;
5. realizzazione della carta delle frequenze naturali dei terreni;
6. aggiornamento della Carta Geologico-Tecnica e realizzazione del modello geologico tecnico;
7. aggiornamento ed adeguamento della Carta delle MOPS;
8. redazione della relazione illustrativa degli studi di MS1.

Inoltre, ove risultino mancanti gli elaborati per l'analisi della CLE, occorrerà provvedere alla

9. acquisizione dei dati per l'analisi della CLE;
10. redazione degli elaborati cartografici per la CLE;
11. redazione della relazione illustrativa per la CLE

Per le modalità di preparazione dei suddetti elaborati, si rimanda al “Protocollo per lo svolgimento degli studi di Microzonazione Sismica di 1° livello della Regione Puglia”, predisposto dal GLSTS e a quanto ribadito in questo protocollo.

## Bibliografia

- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2019. Linee guida per l'elaborazione della carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica con adattamento ai contesti vulcanici. Versione 1.0. Roma, 79 pp.  
[http://governancerischio.protezionecivile.gov.it/documents/20182/229898/SIC\\_F2.1+Adattamento+contesto+vulcanico](http://governancerischio.protezionecivile.gov.it/documents/20182/229898/SIC_F2.1+Adattamento+contesto+vulcanico).



- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020. Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. Versione 4.2. Roma, dicembre 2020, 138 pp., [https://www.webms.it/sites/default/files/2018-06/StandardMS\\_4\\_2.pdf](https://www.webms.it/sites/default/files/2018-06/StandardMS_4_2.pdf).

## **2. PROTOCOLLO PER LA RAPPRESENTAZIONE ED ARCHIVIAZIONE INFORMATICA DEI DATI PER LA MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 2 E 3**

Gli studi di Microzonazione di 2° e 3° livello prevedono la produzione di elaborati cartografici contenenti elementi diversi a seconda del livello di Ms considerato. Gli elaborati cartografici e i dati su di essi rappresentati devono essere archiviati e riprodotti secondo le direttive illustrate nel documento “Microzonazione sismica - Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica – versione 4.2” (Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2020).

### **Elaborati cartografici previsti dagli studi di Microzonazione sismica di Livello 2 e di Livello 3**

- 1. Carta delle Indagini**
- 2. Carta di Microzonazione Sismica**
- 3. Carta delle MOPS con eventuali modifiche**
- 4. Relazione Illustrativa**

#### **1. Carta delle indagini**

La carta delle indagini, precedentemente elaborata per la carta delle MOPS, dovrà essere aggiornata integrandola con le indagini realizzate *ex-novo*. Pertanto, gli elementi della carta sono le indagini puntuali e le indagini lineari: le indagini pregresse e quelle realizzate *ex-novo* si distingueranno sulla base della data di realizzazione, che dovrà essere riportata nel database associato.

#### **2. Carta di Microzonazione Sismica**

La Carta di MS può avere sia zone con approfondimenti di livello 2, sia zone con approfondimenti di livello 3. In entrambe le carte vi possono essere zone stabili, zone stabili suscettibili di amplificazione e zone instabili.

La MS di livello 2 prevede:

Zone stabili - Parametro di amplificazione uguale a 1

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali con fattori di amplificazione da abachi regionali

Zone di Attenzione per instabilità:

Zone di Attenzione per Instabilità di versante (FR)

Zone di Attenzione per Liquefazione (LQ)

Zone di Attenzione per Faglie Attive e Capaci (FAC)

Zone di Attenzione per Cedimenti Differenziali (CD)

Zone di Attenzione per sovrapposizione di Instabilità Differenti (ID)

La MS di livello 3 prevede

Zone stabili - Parametro di amplificazione uguale a 1

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali con fattori di amplificazione da simulazioni numeriche e Spettri di output rappresentativi

Riguardo alle Zone soggette ad instabilità, il livello di approfondimento sarà concordato con il Gruppo di Lavoro di Supporto Tencico Scientifico (GLSTS) costituito dal Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università di Bari Aldo Moro e dal CNR IRPI sede di Bari per supportare i soggetti affidatari degli studi in oggetto.

### 3. Carta delle MOPS con eventuali modifiche

La Carta delle MOPS va ripresentata solo se viene modificata sulla base dei nuovi dati e delle elaborazioni raccolti negli studi di Livello 2 e di Livello 3. La modifica è da prevedersi in ogni caso per gli studi di Microzonazione Sismica che si basano su studi di livello 1 realizzati precedentemente alla definizione degli standard di rappresentazione vigenti (Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2020).

### 4. Relazione illustrativa

La relazione illustrativa precedentemente prodotta dovrà essere integrata con le informazioni relative alle indagini e alle elaborazioni condotte per arrivare ai risultati della MS di livello 2 e 3. Deve comprendere gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi per l'area studiata e almeno due sezioni litotecniche. In appendice si allega lo schema dell'indice della relazione finale illustrativa dello studio di MS2/3. Tale indice fornisce una guida alla definizione della struttura complessiva delle attività di studio commissionate agli affidatari.

In particolare, il capitolo 8 "Elaborati cartografici" sarà integrato con il paragrafo 8.4 "Carta di Microzonazione Sismica", nel caso lo studio sia condotto interamente con livello di approfondimento 2 o "Carta di Microzonazione Sismica con approfondimenti", se si rendono necessari approfondimenti di livello 3. Il paragrafo dovrà:

- Riportare la descrizione di tutte le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazioni locali e le zone di attenzione per instabilità.
- Definire e descrivere il parametro di amplificazione. Motivare, qualora venga utilizzato, la scelta del tipo di abaco regionale impiegato per il calcolo dei fattori di amplificazione. Riportare la metodologia di studio e i risultati delle amplificazioni in superficie, la descrizione degli accelerogrammi calcolati in superficie per diversi punti della zona e dello spettro di output rappresentativo di ciascuna zona (solo per il Livello 3)
- Definire e descrivere la categoria di sottosuolo, così come definita dalla normativa antisismica vigente, per le varie microzone

### L'archiviazione

La struttura di archiviazione è vincolante per legge (art. 11 L.77/2009).

Per realizzare la Carta di Microzonazione Sismica le informazioni verranno archiviate nei seguenti 6 *shapefile*.

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione	Cartella di destinazione
-----------	-----------------------	-------------	--------------------------

<b>Stab</b>	Poligonale	Zone stabili e zone stabili suscettibili di amplificazioni locali	MS23
<b>Instab</b>	Poligonale	Zone di attenzione*	MS23
<b>Forme</b>	Poligonale	Forme di superficie o sepolte	GeoTec
<b>Isosub</b>	Lineare	Isobate del substrato sepolto	MS23
<b>Elineari</b>	Lineare	Elementi lineari (escluse le isobate)	GeoTec
<b>Epuntuali</b>	Puntuale	Elementi puntuali	GeoTec

\* Le Zone di Suscettibilità e Rispetto previste dal documento “Microzonazione sismica - Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica – versione 4.2” (Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2020) saranno archiviate solo nel caso in cui vengano effettivamente definite in base al livello di approfondimento concordato con il GLSTS

Come si vede, solo gli shapefile “Stab”, “Instab” e “Isosub” sono contenuti nella cartella “MS23”, mentre gli shapefile “Forme”, “Epuntuali” e “Elineari” sono collocati nella cartella “GeoTec”. La struttura delle tabelle, i codici e la simbologia sono definiti dal documento “Microzonazione sismica - Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica – versione 4.2” (Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2020) al paragrafo 2.2.

Lo *shapefile* “Stab” è utilizzabile per tutti e tre i livelli degli studi di MS. Nel Livello 1 non sono inseriti dati nei campi dei fattori di amplificazione. Questi vengono compilati per le zone stabili e le zone stabili suscettibili di amplificazioni locali per la MS23: infatti, hanno come attributo i parametri che quantificano l’amplificazione locale del moto sismico di base e uno spettro di risposta elastico rappresentativo, come previsto dal documento “Microzonazione sismica - Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica – versione 4.2”. I valori scelti per quantificare l’amplificazione vengono inseriti anche nei campi corrispondenti dello *shapefile* “Instab”; quindi nei Livelli 2 e 3 devono essere inseriti i dati di un parametro di FA (Fattore di Amplificazione), la categoria di sottosuolo e, obbligatoriamente nel caso di MS3 e facoltativamente nel caso di MS2, i dati di FA0105, FA0408 e FA0711.

Negli studi di Livello 3 dovranno essere prodotti e archiviati gli spettri elastici di risposta in output rappresentativi per ogni microzona. Quindi, per la Carta di Microzonazione Sismica dovrà essere fornito lo SPETTRO elastico di risposta di output in superficie, rappresentativo per ciascuna zona, sia in termini di pseudoaccelerazione che in termini di pseudovelocità. Tutti i file degli spettri dovranno essere salvati nella cartella “MS23/Spettri” della struttura di archiviazione dei file.

Come conseguenza, rispetto alla MS di livello 1, va creata la cartella MS23 il cui contenuto è identico a quello della cartella MS1, in quanto contiene gli shapefile:

- Isosub

- Instab
- Stab

ma cambia il contenuto nelle tabelle associate agli shapefile.

In più contiene anche la cartella “Spettri”; la struttura di archiviazione dei file è la seguente:

- Nomecomune\_S42
  - BasiDati
  - CLE
  - GeoTec
  - Indagini
    - Documenti
  - MS1
  - MS23
    - Spettri
  - Plot
    - MS
    - CLE
  - Progetti
  - Vestiture

La cartella Spettri contiene le informazioni sugli spettri in formato .txt. Tali file devono essere redatti secondo le indicazioni del documento “ Microzonazione sismica - Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica – versione 4.2” (Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, 2020), par. 2.1.9.6

Come già indicato nei protocolli della MS1, l’utilizzo del plugin MzS Tool, nella versione 1.5 per QGIS 3.16, facilita la corretta compilazione delle tabelle, l’assegnazione dei codici, della simbologia e la preparazione degli elaborati cartografici. Ciò non esclude l’utilizzo di ArcGIS e del software *SoftMS* per la rappresentazione dei dati.

## Bibliografia

- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020. Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. Versione 4.2. Roma, dicembre 2020, 138 pp., [https://www.webms.it/sites/default/files/2018-06/StandardMS\\_4\\_2.pdf](https://www.webms.it/sites/default/files/2018-06/StandardMS_4_2.pdf).

### 3. PROTOCOLLO PER L'ESECUZIONE DI INDAGINI GEOFISICHE DI SUPERFICIE

#### 3.1 Premessa

Obiettivi di queste indagini sono soprattutto:

- 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 secondo i seguenti criteri: a) per le  $Z_{ALQ}$  saranno validi gli stessi modelli di risposta 1D o 2D delle MOPS stabili e suscettibili di amplificazione; b) per le  $Z_{AFR}$  esse saranno eventualmente trattate come le MOPS stabili e suscettibili di amplificazione qualora il corpo di frana abbia spessori non inferiori ai 10 m, ad esclusione comunque dei buffer associati a  $Z_{AFAC}$  e  $Z_{AFPAC}$  o alle  $Z_{AFR}$  già corrispondenti alla categoria R3-R4 secondo la classificazione PAI o già acquisite come vincolo territoriale a valle di precedenti studi di MS1

Accanto a questi due obiettivi principali, le 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 individuati. 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).

Altre tipologie di indagini geofisiche, quali ad esempio la prospezione geoelettrica, pur non fornendo indicazioni sul parametro velocità delle onde sismiche, possono all'occasione integrare le metodologie sismiche, a riflessione o a rifrazione, per una migliore definizione delle morfologie sepolte, dei rapporti tra coperture e substrato, di eventuali discontinuità (faglie, fratture), di cavità o di identificazione della falda.

La scelta delle tecniche di indagine più appropriate per le diverse situazioni viene effettuata dal professionista responsabile delle attività sul campo. Questi, in accordo con i responsabili del Gruppo di Lavoro di Supporto Tecnico-Scientifico (GLSTS), predispone il piano delle indagini indicando 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. In questo piano viene anche indicata la possibile localizzazione della prova sismica in foro prevista 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 al Protocollo di acquisizione ed elaborazione di registrazioni di rumore sismico ambientale (Del Gaudio, 2020), contenuto nei *"Protocolli per lo svolgimento degli studi di Microzonazione di 1° livello nella Regione Puglia"* (Gruppo di Coordinamento Tecnico Scientifico, 2020). Esito di questa campagna è la eventuale integrazione della Carta delle Frequenze prodotta nel corso degli studi di Microzonazione Sismica di Livello 1 (MS1) precedentemente svolti. 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) indentificate 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. In questo genere di analisi potrebbe essere utile determinare le aree caratterizzate da frequenze di risonanza appartenenti ai tre diversi domini di frequenza come più rappresentativi ai fini degli studi di Microzonazione Sismica (2.00-10.00 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 specifica sezione dei Protocolli citati (Del Gaudio, 2020). 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 30 min, preferibilmente acquisita in due sessioni di registrazione, ciascuna della durata di 15-16 minuti, effettuate in due punti collocati entro 10 metri l'uno dall'altro, 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 rimozione dei transienti va effettuata con cautela valutando il loro eventuale impatto sui risultati dell'analisi; i rapporti spettrali H/V vanno calcolati come media tra i valori ottenuti su sotto-finestre della serie campionata di durata temporale di 20-30 s, per un numero complessivo di finestre considerate per la stima finale (ovvero dopo l'eventuale rimozione dei transienti) non inferiore a 20.

- 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 da Albarello e Castellaro (2011), procedendo alla ripetizione delle misure quando necessario a valutare la loro effettiva ripetibilità
- tutte le misure HVSR considerate attendibili ed oggetto di interpretazione dovranno essere corredate da Fogli Campagna per l'Acquisizione HVSR, secondo le indicazioni riportate nel citato protocollo (Del Gaudio, 2020).

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 le limitazioni descritte 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) o anche alla tomografia elettrica (ERT) e alle tecniche basate sulla misura delle velocità di fase delle onde superficiali sia in configurazione attiva (MASW) che passiva (ESAC, ReMi, ecc.).

### 3.3 Tecniche in onde superficiali

Le tecniche in Onde Superficiali utilizzano 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 sono le più diffuse nella pratica professionale e quindi di maggiore interesse per le indagini qui considerate.

#### 3.3.1 Metodo MASW

Nell'applicazione della tecnica MASW va posta attenzione su alcuni aspetti di maggiore importanza:

- *la strumentazione deve essere adeguata agli scopi adottando sismografi digitali con adeguata dinamica ( $> 20$  Bit) dotati di un sufficiente numero di canali (almeno di 24 canali) e geofoni verticali con frequenza propria  $\leq 4.5$  Hz*
- *la durata della registrazione deve essere sufficiente per catturare l'intero segnale utile orientativamente  $\geq 2$  sec) con una frequenza di campionamento  $\geq 512$  Hz*
- *l'energizzazione deve essere condotta con un sistema di trigger caratterizzato da un errore  $\leq 1$  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*

- *la spaziatura fra i geofoni non dovrebbe essere superiore ai 3m, 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 (per esempio 5m) e integrare i risultati delle due misure*
- *allo scopo di ridurre il disturbo prodotto dalle onde di volume generate dalla sorgente, è opportuno eseguire le energizzazioni ad una certa distanza dal primo sensore (>5-10m).*

L'elaborazione dei dati acquisiti dovrà essere preceduta 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*
- *la 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 ( $f_{min}$  e  $f_{max}$  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 delle elaborazioni MASW saranno depositati in formato digitale ASCII, dovranno essere inoltre depositati i Fogli campagna relativi alle misure Rifrazione/MASW uno per ciascuno stendimento e le letture delle curve di dispersione. I dati originali delle misure effettuate andranno depositati in file formato 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.

In generale, 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. Il modello geologico gioca in questo senso un ruolo di primo piano permettendo di delimitare lo spazio di ricerca dei parametri incogniti (spessore degli strati e relativi valori di Vs). Anche i risultati di misure indipendenti (gravimetria, resistività, profili di Vp) 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 Vs 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 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.

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 Vs ottenuto per una singola zona. Questa incertezza è legata sia alla 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 Vs da utilizzare per la modellazione della risposta sismica locale della microzona analizzata.

### 3.3.2 Metodo ReMi

La tecnica MASW richiede un'attenta analisi dei dati per separare il segnale generato dalla sorgente sismica dal rumore di varia origine. In un ambiente antropizzato può essere necessario l'uso di sorgenti di energia più elevata per migliorare il rapporto segnale/rumore. Tuttavia è stata sviluppata una tecnica che sfrutta proprio il rumore sismico diffuso, o meglio la parte coerente costituita da onde di Rayleigh, eliminando la necessità di provvedere ad una sorgente controllata. Questa tecnica è denominata "**Refraction Microtremor**" (**ReMi**) o "**Noise Analysis of Surface Waves**" (**NASW**) (Louie, 2001). In questo caso si usa una schiera di sensori di frequenze sufficientemente basse (tipicamente 4-8Hz) per registrare rumore microsismico di frequenza da 2 Hz in su. L'uso di geofoni verticali consente di escludere dalla registrazione le onde di Love, sicché le uniche onde superficiali registrate sono quelle di Rayleigh. I geofoni vanno disposti con una spaziatura (intervallo di "takeout") adeguata per far sì che lo stendimento possa campionare lunghezze d'onda commisurate alla profondità di investigazione (da valutare nell'ordine della metà della lunghezza dello stendimento). L'acquisizione di rumore sismico viene condotta continuamente per alcune decine di minuti e la registrazione viene poi suddivisa in finestre temporali dell'ordine di 30 s, a ciascuna delle quali si applicano separatamente le successive elaborazioni.

Le registrazioni ottenute da tutti i geofoni in ciascuna finestra temporale sono idealmente affiancate in modo da avere una rappresentazione bidimensionale  $A(x,t)$  delle ampiezze del segnale registrato, in funzione sia del tempo che dello spazio (cioè della posizione spaziale del ricevitore). A questo insieme di dati si applica una "**trasformazione p- $\tau$** ": si tratta di un integrale di linea dato da:

$$A(p, \tau) = \int_x A(x, t = \tau + px) dx \quad [3.1]$$

cioè, in sostanza, per ogni coppia di valori  $p$  e  $\tau$ , definiti in un intervallo prefissato, si sommano le ampiezze corrispondenti ad una posizione spaziale  $x$  (del ricevitore) e ad un tempo  $t = \tau + px$ . Ciò corrisponde a sommare le ampiezze distribuite lungo allineamenti obliqui che tagliano il set di registrazioni e viene perciò definito “slant stacking”, cioè stacking obliquo (Fig. 3.1a): su tali allineamenti si dovrebbero trovare segnali che si propagano con una velocità  $1/p$  a partire da un tempo  $\tau$ . Se questo integrale dà un valore elevato, vuol dire che a quella combinazione di  $p$  e  $\tau$  corrisponde

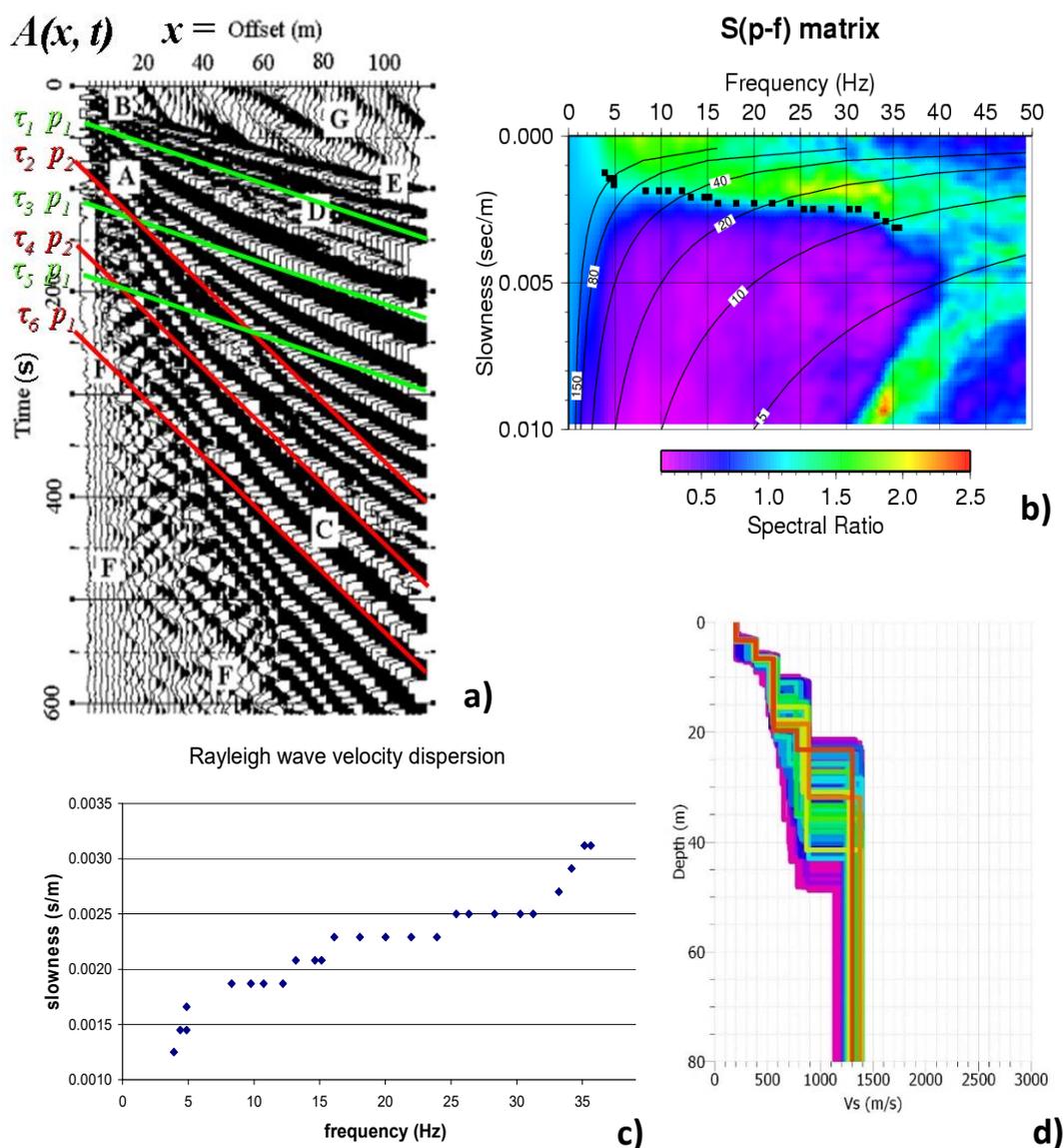


Fig. 3.1 – Esempificazione delle procedure di elaborazione ed interpretazione dei dati ReMi: a) schema dello “slant stacking”; b) matrice di potenza spettrale normalizzata, ottenuta dalla trasformazione  $p$ - $f$ , con evidenziati, tramite quadratini neri, i punti selezionati nel picking (le curve nere marcano combinazioni  $p$ - $f$  corrispondenti a valori costanti di lunghezza d’onda, il cui valore è annotato in metri; nell’esempio la lunghezza d’onda di Nyquist è 5 m); c) campionamento della curva di dispersione delle onde di Rayleigh, risultante dal picking; d) modelli di velocità delle onde S ottenuti dall’inversione della curva di dispersione (i diversi modelli sono quelli compatibili con la curva di dispersione entro definiti limiti di discordanza tra curve teoriche e sperimentale).

un segnale di energia significativa che si è propagato nel mezzo sottostante la schiera di ricevitori. Il parametro  $p$  è definito “lentezza” (“slowness”); esso corrisponde al parametro del raggio sismico e rappresenta l’inverso della velocità apparente con cui il segnale si propaga lungo la direzione della schiera di ricevitori. Poiché la sorgente delle onde non è controllata, queste possono provenire anche da direzioni opposte, sicché, una volta definito il verso dell’asse delle  $x$ , si possono avere segnali che viaggiano con velocità apparente sia positiva (nello stesso verso delle  $x$ ) che negativa (in senso opposto).

Per un dato valore di  $p$  si considerano la serie di valori di  $A(p, \tau)$  per  $\tau$  crescenti: la presenza di una periodicità  $T$  in tale sequenza è indicativa di una sorgente che genera un segnale di periodo  $T$ , propagantesi nel mezzo sotto la schiera di ricevitori con velocità apparente  $1/p$ : effettuando, quindi, la trasformata di Fourier di  $A(p, \tau)$  per valori fissati di  $p$  si ottiene uno spettro in cui ampiezze elevate associate ad una frequenza  $f$  evidenziano la presenza di una significativa trasmissione di energia mediante onde di quella frequenza e di velocità  $1/p$ . I valori risultanti dalla trasformata di Fourier vengono moltiplicati ciascuno per il proprio complesso coniugato, ottenendo uno spettro di potenza. Le potenze spettrali relative a valori positivi e negativi di  $p$  vengono sommati (dato che rappresentano onde che si propagano con la stessa velocità in senso inverso). Così pure si sommano le potenze spettrali ottenute per la stessa combinazione  $(p, f)$  nell’elaborazione delle tracce delle diverse finestre temporali di 30 s dell’acquisizione, in modo da migliorare il rapporto segnale/rumore (intendendo in questo contesto come “segnale” la parte coerente del rumore sismico associata alle onde di Rayleigh e come “rumore” la parte incoerente). Poiché le potenze spettrali associate alle diverse frequenze possono differire per ordini di grandezza, la somma delle potenze spettrali viene normalizzata dividendo ognuna di esse per la media di tutti i valori ottenuti per la medesima frequenza e  $p$  diverse. Si ottiene così una matrice  $S(p, f)$  in cui si associa una potenza spettrale normalizzata ad ogni combinazione di velocità e frequenza con cui le onde attraversano il mezzo sottostante la schiera di ricevitori (Fig. 3.1b).

La trasformazione delle registrazioni di rumore secondo la procedura descritta enfatizza i segnali corrispondenti a onde di Rayleigh che provengono da sorgenti distribuite attorno allo stendimento e lo attraversano secondo direzioni che formano con questo angoli diversi. In un diagramma bidimensionale in cui si riportano i valori  $S(p, f)$  in funzione di  $p$  ed  $f$  (tipicamente con  $f$  in ascissa e le slowness crescenti verso il basso, in modo da avere velocità crescenti verso l’alto), è possibile riconoscere bande di valori elevati di potenza spettrale che corrispondono alle onde di Rayleigh: queste bande si presentano slargate in quanto raggruppano segnali che attraversano lo stendimento lungo diverse direzioni, e quindi con una velocità apparente che è maggiore di quella reale tranne nel caso in cui la direzione di propagazione è parallela allo stendimento. Per estrarre dati rappresentativi delle velocità reali, occorre quindi selezionare punti disposti lungo il margine inferiore di queste bande, corrispondente all’incirca al passaggio da valori di potenza spettrale superiori alla media a valori inferiori (cioè intorno a 1, considerando la normalizzazione applicata). La selezione di questi punti si definisce “picking” e le coordinate  $(p, f)$  di tali punti forniscono un campionamento della curva di dispersione delle velocità delle onde di Rayleigh (Fig. 3.1c).

Tendenzialmente i punti del picking presentano un andamento discendente (o almeno non ascendente) da sinistra verso destra, perché questo corrisponde al fatto che le velocità delle onde di Rayleigh di frequenza più alta risentono delle velocità delle onde S di strati più superficiali (e quindi generalmente più lenti). E’ da tenere presente che la banda con andamento inverso che si osserva nell’angolo in basso a destra (Fig. 3.1b) è un artefatto da ignorare ai fini del picking: esso è dovuto al fenomeno

dell'“aliasing” spaziale, cioè la comparsa, a lunghezze d'onda inferiori a quella di Nyquist ( $\lambda_N =$  due volte la spaziatura intergeofonica), di un segnale sotto falsa identità (“alias”), che, in realtà, è una replica all'incirca speculare del segnale reale di lunghezza d'onda maggiore di  $\lambda_N$ . La comparsa di questo artefatto deriva dall'impossibilità di discriminare le potenze spettrali delle lunghezze d'onda minori di  $\lambda_N$ , da quelle simmetricamente maggiori di  $\lambda_N$ , a causa del sottocampionamento spaziale del campo d'onde, conseguente alla limitazione della spaziatura intergeofonica.

In linea di principio il picking effettuato secondo i criteri sopra descritti dovrebbe assicurare anche che la curva di dispersione campionata corrisponda al modo fondamentale delle onde di Rayleigh, dal momento che i modi superiori presentano, a parità di frequenza, velocità più alte e quindi i relativi segnali si addensano al di sopra del bordo lungo il quale si effettua il picking. Tuttavia alcuni studi hanno mostrato che a frequenze elevate ( $> 17-18$  Hz) le onde di Rayleigh sono spesso dominate dai modi superiori, in quanto il modo fondamentale è scarsamente eccitato e quindi occorre prestare attenzione a bruschi aumenti di velocità al crescere della frequenza, che potrebbero essere dovuti ad un salto di modo lungo la curva di dispersione (Fig. 3.2). In tal caso nell'interpretare la curva di dispersione occorrerà tener conto della sua natura multimodale. L'identificazione dei diversi modi non è semplice, ma, se correttamente effettuata, fornisce vincoli più stringenti alla modellazione delle velocità delle onde S, dato che, a parità di frequenza, i modi superiori forniscono informazioni su profondità maggiori rispetto al modo fondamentale.

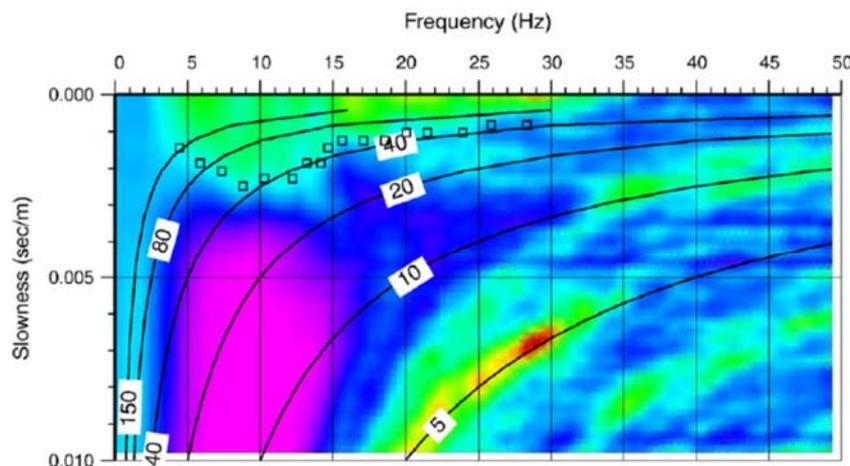


Fig. 3.2 – Esempio di picking che mostra un aumento delle velocità delle onde di Rayleigh al crescere della frequenza per effetto di un salto dal modo fondamentale al primo modo superiore (da Coccia et al., 2010).

Il calcolo della curva di dispersione può essere ripetuto per diverse registrazioni ottenendo diverse stime e quindi quantificando le incertezze dei valori di velocità delle onde di Rayleigh. La curva di dispersione viene poi interpretata, attraverso una modellazione numerica, per ottenere un modello di stratificazione delle velocità delle onde S. Tenendo conto, nella procedura di inversione, delle incertezze di stima delle velocità delle onde di Rayleigh, si dovrebbero ottenere diversi modelli cui corrispondono curve di dispersione delle onde di Rayleigh compatibili con i dati, il che consente di valutare l'incertezza da cui è affetta la stratigrafia sismica ottenuta (Fig. 3.1d).

È consigliabile l'uso congiunto di acquisizioni di tipo attivo (MASW) e passivo (ReMi), dato che, una volta realizzato lo stendimento dei geofoni, l'acquisizione dei due tipi di dati non comporta un

aggravio significativo di tempi e costi del sondaggio. In tal modo è possibile estendere l'intervallo di frequenze osservate (più basse con la tecnica ReMi, più alte con la tecnica MASW) e quindi l'intervallo di profondità investigate, avendo un controllo sulla coerenza delle curve di dispersione derivate dai due metodi per l'intervallo di frequenze comune.

I risultati delle elaborazioni delle acquisizioni secondo la tecnica ReMi andranno depositati in formato digitale ASCII, corredandoli con i Fogli di campagna delle misure per ciascuno stendimento e con le letture delle curve di dispersione. I dati originali delle misure effettuate andranno depositati in file formato ASCII o altro formato sismologico standard (p.es., SAC, SEG-Y, ecc.). I parametri ottenuti dalle elaborazioni andranno inseriti nella struttura di archiviazione seguendo le indicazioni riportate nella sezione 2.1.9.2 (pag. 73) degli Standard di Rappresentazione (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020).

### 3.3.3 Metodo ESAC

Un'ulteriore tecnica di indagine basata sull'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh derivata da registrazioni di rumore sismico è quella denominata **ESAC** (Extended Spatial Auto-Correlation) (Ling & Okada, 1993; Ohori et al., 2002). Essa consiste nel calcolare gli spettri delle funzioni di cross-correlazione, detti cross-spettri, tra registrazioni simultanee di rumore effettuate da geofoni verticali in un range di frequenze da 0.5 a 30 Hz. I geofoni sono disposti lungo uno stendimento con una spaziatura che va scelta in modo da ricoprire l'intervallo di lunghezze d'onda che interessa investigare, considerando che la minima lunghezza d'onda analizzabile è pari a due volte la minima spaziatura tra i geofoni, mentre la massima lunghezza d'onda è pari a circa due volte la lunghezza dello stendimento. Il sistema di registrazione dei segnali deve consentire l'acquisizione di dati per 15-30 minuti. In fase di elaborazione le registrazioni ai diversi sensori vengono suddivise in segmenti di 20-30 secondi e se ne calcolano le FFT. I cross-spettri di due registrazioni si ottengono moltiplicando lo spettro di una delle due per quello che si ottiene dallo spettro dell'altra invertendone le fasi. In pratica, si moltiplica la FFT del segnale registrato al primo geofono, assunto come origine, per il complesso coniugato della FFT delle registrazioni a ciascuno degli altri geofoni posti a differente distanza  $r_i$ . Indicando con  ${}_m S_{oi}$  il cross-spettro dell' $m$ -esimo degli  $M$  segmenti di registrazione relativi all' $i$ -esimo geofono, il cross-spettro medio normalizzato è dato da:

$$S_{oi}(f, r_i) = \frac{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M {}_m S_{oi}(f)}{\sqrt{\frac{1}{M^2} \sum_{m=1}^M {}_m S_{oo}(f) \cdot \sum_{m=1}^M {}_m S_{ii}(f)}} \quad [3.2]$$

dove, a denominatore, compaiono gli auto-spettri, cioè gli spettri delle funzioni di autocorrelazione delle registrazioni al primo e all' $i$ -esimo geofono. È stato dimostrato che, considerando i valori dei cross-spettri ottenuti per una stessa frequenza a distanze  $r_i$  crescenti, questi hanno un andamento descritto da una funzione di Bessel del primo tipo di ordine 0 ( $J_0$ ) e, in particolare, risulta:

$$S_{oi}(f, r_i) = J_0\left(\frac{2\pi f \cdot r_i}{c(f)}\right) \quad [3.3]$$

E' possibile calcolare per via computazionale i valori della funzione di Bessel in funzione di  $r_i$  per diversi valori della velocità di fase  $c(f)$ , fino a trovare quello per il quale si ottimizza l'accordo con i dati ottenuti dai cross spettri di una definita frequenza  $f$ , in termini di minimizzazione dello scarto quadratico medio (Fig. 3.3). Ripetendo l'operazione per diverse frequenze, si può ottenere una curva di dispersione interpretabile come nei metodi descritti in precedenza.

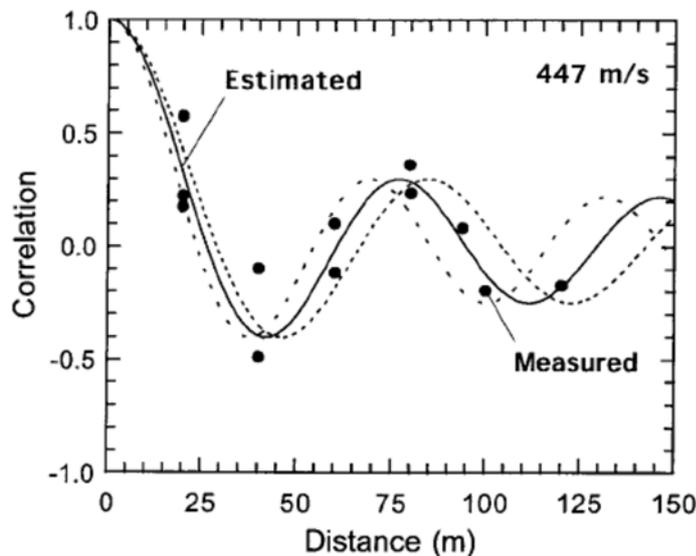


Fig. 3.3 – Esempio di calcolo delle velocità di fase di onde di Rayleigh con il metodo ESAC: i puntini rappresentano i valori dei cross spettri normalizzati, ottenuto a diverse distanze per una medesima frequenza (6 Hz), a confronto con curve della funzione di Bessel di ordine 0 calcolate per la stessa frequenza e per diverse velocità. Quella con il migliore accordo (in termini di scarto quadratico medio) è rappresentata con la linea continua e il corrispondente valore di velocità è indicato in alto a destra (da Oho et al., 2002).

### 3.4 Tecniche in onde di volume

#### 3.4.1 Sismica a rifrazione e riflessione

La metodologia più comunemente impiegata per ricostruire la geometria del substrato e la velocità degli strati, è la **sismica a rifrazione** con onde di compressione, dato che è di più semplice impiego sia nella fase di acquisizione che in quella di elaborazione dei dati. Tuttavia essa fornisce informazioni solo sulla velocità delle onde P che, per gli scopi di una microzonazione, non sono quelle di maggior interesse. In particolare, queste velocità possono non essere rappresentative delle proprietà meccaniche dei diversi strati individuati, in quanto sono influenzate dalla presenza del fluido interstiziale che contribuisce alla trasmissione delle vibrazioni. Più significative sono invece, a questo riguardo, le velocità delle onde S, la cui trasmissione dipende principalmente dalle proprietà dello scheletro solido del materiale (Fig. 3.4). Per determinare le velocità delle onde S si sono sviluppate tecniche di acquisizione specifiche che utilizzano sorgenti per la generazione di onde S (in particolare SH che, nella rifrazione, non trasmutano in onde di tipo P) attraverso l'applicazione di sollecitazioni dinamiche orizzontali, ma l'utilizzo di tali tecniche può presentare situazioni di difficoltà per l'energizzazione e per la presenza di possibili sorgenti di disturbo, soprattutto in ambienti antropizzati (con strade, condutture, ecc.). Una volta nota la velocità delle onde S, si può ricavare l'impedenza

sismica (da cui dipendono i fattori di amplificazione locale), se si hanno informazioni sulla densità degli strati, per esempio da misure di campioni in laboratorio.

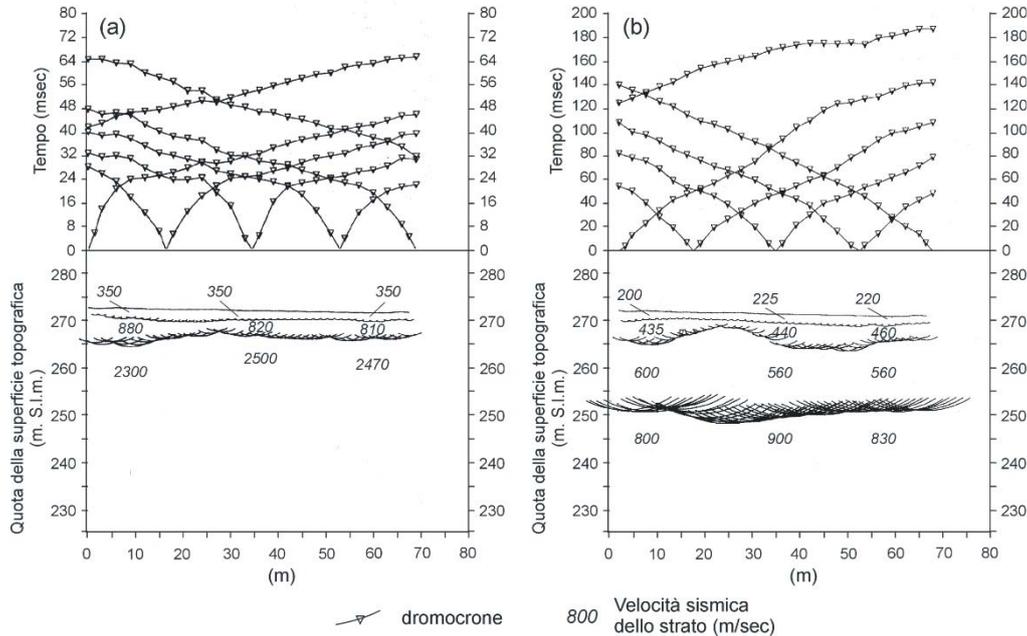


Fig. 3.4 – Esempio di indagine di sismica a rifrazione con impiego delle onde P (a sinistra) e delle onde S (a destra) in un sito di Castelnuovo Garfagnana (da Signanini, 2003).

Dalla contestuale misura delle velocità delle onde P ed S, si può ottenere il coefficiente o modulo di Poisson  $\sigma$  che è un parametro sensibile al contenuto di acqua della roccia;  $\sigma$  è un numero adimensionale legato alle velocità  $V_P$  e  $V_S$  delle onde P ed S dalla relazione

$$\sigma = \frac{1}{2} \left( \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{V_P^2 - V_S^2} \right) \quad [3.4]$$

dal che si vede che esso raggiunge un massimo di 0.5 nei fluidi ( $V_S = 0$ ), mentre nelle rocce assume valori più bassi. Poiché il valore di  $\sigma$  è influenzato dalla presenza di acqua interstiziale, la sua misura può fornire informazioni sul grado di saturazione delle rocce porose.

La misura di  $V_P$  e  $V_S$  di una roccia, inoltre, teoricamente consente di ricavare le sue costanti elastiche (i moduli di compressione  $K$ , di rigidità  $G$  e di Young  $E$ ), se se ne conosce la densità  $\rho$ : si ha infatti

$$K = \rho \cdot V_P^2 - \frac{4}{3} \rho \cdot V_S^2 \quad G = V_S^2 \cdot \rho \quad E = 2\rho \cdot V_S^2 \cdot (1 + \sigma) \quad [3.5]$$

Tuttavia la misura del modulo di rigidità ottenuta in questo modo si riferisce a un campo di deformazioni di entità limitata (quali sono quelle associate alla propagazione delle onde generate in una prospezione sismica) e può non essere rappresentativo del valore di rigidità per deformazioni maggiori (quali quelle associate a forti scuotimenti sismici), nel corso del quale possono manifestarsi effetti di scostamenti dalla linearità della relazione sforzi-deformazione e quindi variazioni dei valori dei moduli elastici rispetto a quelli ottenuti per piccole deformazioni.

Un limite della sismica a rifrazione è che essa presuppone che le velocità degli strati siano sempre crescenti verso il basso, sicché essa non consente di mettere in evidenza l'eventuale presenza di strati a bassa velocità, che sono di particolare interesse in quanto possono rappresentare orizzonti di minore resistenza al taglio lungo i quali si verificano fenomeni di instabilità (liquefazione, scivolamenti). Tuttavia, questo limite viene superato laddove si utilizzi un approccio tomografico che consente di rilevare zone a bassa velocità, che raggiungano la superficie o la sommità del substrato roccioso con una forte inclinazione.

Un superamento di tale limite lo si può ottenere anche applicando la **sismica a riflessione**. Essa estrae dall'intero sismogramma le informazioni sulle onde riflesse all'interfaccia di strati diversi, consentendo di ricostruirne la geometria, ma l'acquisizione del dato e il suo trattamento sono molto più complessi e costosi. Benché tradizionalmente sia stata impiegata per indagini di profondità dell'ordine delle migliaia di metri, quali quelle associate alla ricerca di idrocarburi, questa tecnica ha attualmente un largo impiego anche per indagini di superficie fino a profondità di poche decine o centinaia di metri, come nel caso della microzonazione. Il processing dei dati per i riflettori più superficiali è però problematico, soprattutto per le eterogeneità laterali presenti negli strati superficiali. Le sezioni di sismica a riflessione, eseguite utilizzando onde P oppure SH, possono fornire l'andamento delle stratificazioni con elevata risoluzione, evidenziando anche livelli di inversione delle velocità.

### 3.4.2 Tomografia sismica

I dati di sismica possono essere acquisiti in modalità tomografica per ottenere informazioni in forma 2D o 3D, in modo da ricostruire le variazioni laterali dei corpi geologici presenti nel sottosuolo. Con questa tecnica si raccolgono dati sui tempi di percorso relativi a varie combinazioni delle posizioni della sorgente e del geofono, e quindi a vari percorsi di propagazione delle onde attraverso il sottosuolo. La tomografia sismica può essere applicata sfruttando la presenza di una morfologia rilevata o la propagazione delle onde rifratte (Fig. 3.5): nel primo caso si potranno disporre i ricevitori su un pendio e le sorgenti sulla sommità del rilievo e/o sul pendio opposto. Nel caso di terreno pianeggiante, si potrà condurre una tomografia per onde rifratte, purché sussista la condizione di velocità crescenti con la profondità, ma in questo caso, le difficoltà e le incertezze interpretative aumentano, soprattutto per quel che riguarda la corretta definizione del percorso delle onde rifratte.

I dati dei tempi di arrivo vengono elaborati simultaneamente, rappresentando lo spazio attraversato dalle onde con un modello numerico costituito da un insieme di celle elementari e individuando i valori di velocità da associare a ciascuna cella per ottenere il miglior accordo possibile tra i tempi di percorso osservati e quelli calcolati per il modello. Per ottenere questo risultato si parte da un modello iniziale in cui la velocità varia solo in funzione della profondità (modello 1D) e attraverso un programma di calcolo si modifica il modello cercando di minimizzare le differenze tra tempi osservati e calcolati.

L'applicazione della tecnica tomografica presenta richiede una certa esperienza, dal momento che il risultato finale è fortemente influenzato dal modello di partenza. Occorre inoltre accompagnare la generazione del modello finale con un'analisi della quantità di informazioni disponibile per ciascuna cella, in base al numero di percorsi sismici che l'attraversano (grado di "illuminazione"), per poter valutare l'attendibilità dei risultati forniti dal modello in ogni sua parte (Fig. 3.6).

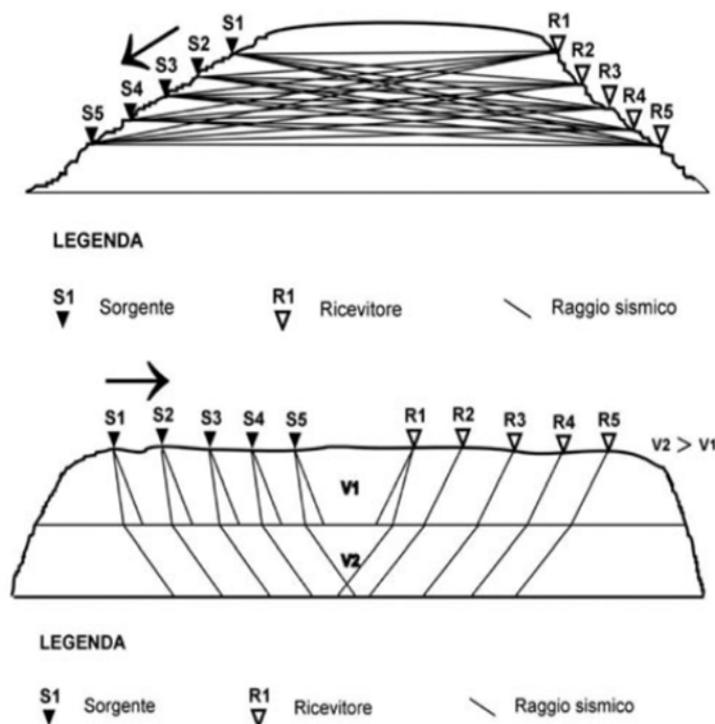


Fig. 3.5 – Possibili configurazioni dell’acquisizione di dati in una tomografia sismica sfruttando una morfologia rilevata (in alto) o la propagazione di onde rifratte (in basso) (da Gruppo di Lavoro MS, 2008).

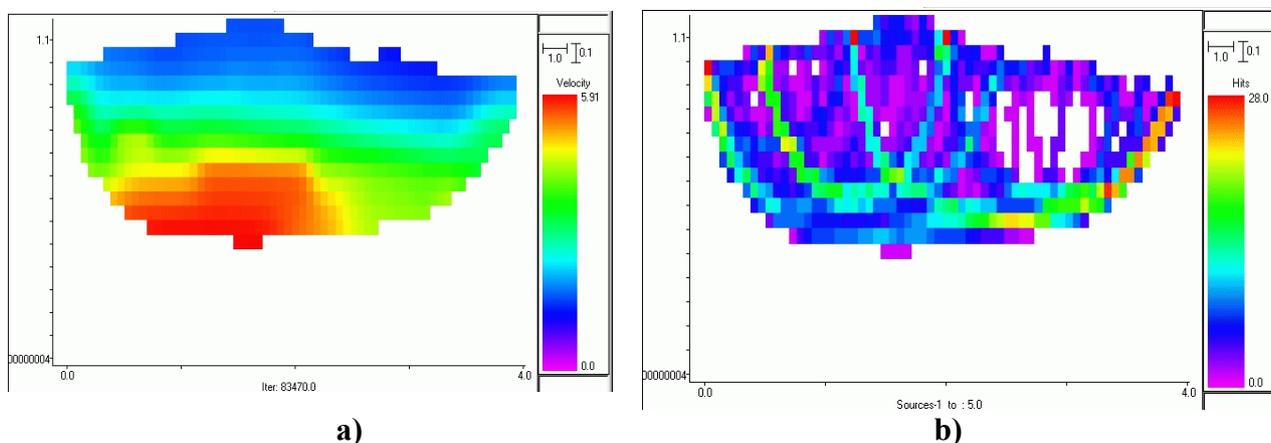


Fig. 3.6 – Esempio di risultato di una tomografia sismica e rappresentazione del grado di “illuminazione” delle celle in cui viene suddiviso il modello di sottosuolo.

### 3.4.3 Schema esecutivo delle prove di sismica

Nel seguito richiamiamo le indicazioni del documento *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica- parte III* pubblicato dal Dipartimento della Protezione Civile nel 2008 (Gruppo di Lavoro MS, 2008).

Le prove di sismica consistono nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali per la generazione delle onde P e orizzontali per la generazione delle onde SH e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori rispettivamente a componente verticale e orizzontale.

Va rilevato che le onde SH dirette e rifratte costituiscono sempre un primo arrivo rispetto alle onde di superficie (nella fattispecie le onde di Love) e che per brevi stendimenti risultano sufficientemente energetiche da poter essere registrate nonostante la loro attenuazione sia maggiore perché proporzionale a  $1/r$  in luogo di  $1/\sqrt{r}$  come accade per le onde di superficie ( $r$  è la distanza dal punto di energizzazione). Non esistono d'altra parte le limitazioni connesse con l'orizzontalità degli strati proprie delle tecniche che utilizzano le onde superficiali.

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si deve comporre delle seguenti parti:

- sistema energizzante;
- sistema di ricezione;
- trigger;
- sistema di acquisizione dati.

I sistemi energizzanti (sia per la generazione delle onde P sia delle onde SH) devono essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali.

Per la generazione in onde P, la sorgente è generalmente costituita da un grave in caduta libera o accelerata, oppure da un cannoncino industriale (tipo minibang o similari), o una mazza sismica. Dovranno comunque essere evitati sistemi che producano vibrazioni e/o rimbalzi durante la generazione del segnale, in grado di inficiare la lettura di quest'ultimo per l'intero sismogramma richiesto. Per l'energizzazione relativa a basi sismiche in onde P a elevata estensione lineare (ad esempio per stese sismiche di 480m), si potrà ricorrere all'utilizzo di esplosivo in quantità sufficiente da generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili.

Il sistema sorgente per le onde SH è generalmente costituito da un parallelepipedo di forma tale da poter essere colpito lateralmente a entrambe le estremità con una massa pesante. E' importante che il parallelepipedo venga gravato di un carico statico addizionale in modo che possa rimanere aderente al terreno sia al momento in cui viene colpito sia successivamente, affinché l'energia prodotta non venga in parte dispersa (vedi Figura 3.7). Con questo dispositivo è possibile generare essenzialmente delle onde elastiche di taglio polarizzate orizzontalmente, con proprietà uniforme sia nella direzione di propagazione sia nella polarizzazione e con una generazione di onde P trascurabile.



Fig. 3.7 – Esempio di sorgente di onde SH; a) accoppiamento tra massa energizzante e terreno favorito dal carico statico di un automezzo; con le frecce nere sono indicati i pendoli da 30 kg, utilizzati per la generazione delle onde di taglio polarizzate orizzontalmente.

L'accoppiamento parallelepipedo-terreno deve essere per "contatto" e non per "infissione". Un buon accoppiamento tra parallelepipedo e terreno si ottiene facilmente in terreni a granulometria fine (normalmente con dimensioni inferiori al limite superiore delle sabbie); nel caso, invece, di presenza di terreni a granulometria più grossolana sarà necessario approntare delle piazzole costituendo uno strato di materiale fine al contatto con il parallelepipedo energizzante. Alcuni autori suggeriscono di evitare come punti di energizzazione, qualora possibile, zone in cui affiorino rocce compatte o asfalti.

Generalmente per ogni base sismica si può considerare come requisito minimo l'uso di almeno 24 geofoni ed energizzazioni ogni 6 geofoni, possibilmente ogni 3; ad essi va aggiunta almeno una coppia di scoppi esterni, posizionati tipicamente a una distanza pari alla semi-lunghezza della base, tenendo comunque conto delle condizioni particolari di ogni prospezione. In particolare, per elaborazioni di tipo tomografico è preferibile estendere le basi sismiche in modo da posizionare tutti gli scoppi all'interno (o all'estremo) delle basi, in modo da vincolare meglio l'inversione tomografica.

Per esempio, per lunghezze pari a 120 m si consigliano minimo 7 registrazioni ("scoppi" o "tiri"), secondo il seguente schema:

Esterno sinistro	Estremo sinistro	Intermedio sinistro	centrale	Intermedio destra	Estremo destra	Esterno destra
---------------------	---------------------	------------------------	----------	----------------------	-------------------	-------------------

Per le linee di lunghezza pari a 240 m si consiglia di eseguire ulteriori due scoppi per un totale complessivo di 9 scoppi. Tali tiri dovranno essere effettuati nelle posizioni intermedie secondo il seguente schema:

Est. sx	Estr. sx	Interm. a 1/6	Interm. a 2/6	Centrale	Interm. a 4/6	Interm. a 5/6	Estr. dx	Est. dx
---------	----------	------------------	------------------	----------	------------------	------------------	----------	---------

Gli 'scoppi' estremi (Estremo sx e estremo dx) dovranno essere ubicati a una distanza massima dal primo e dall'ultimo geofono pari alla metà della distanza intergeofonica utilizzata.

In figura 3.8 è riassunto lo schema di misure suggerito.

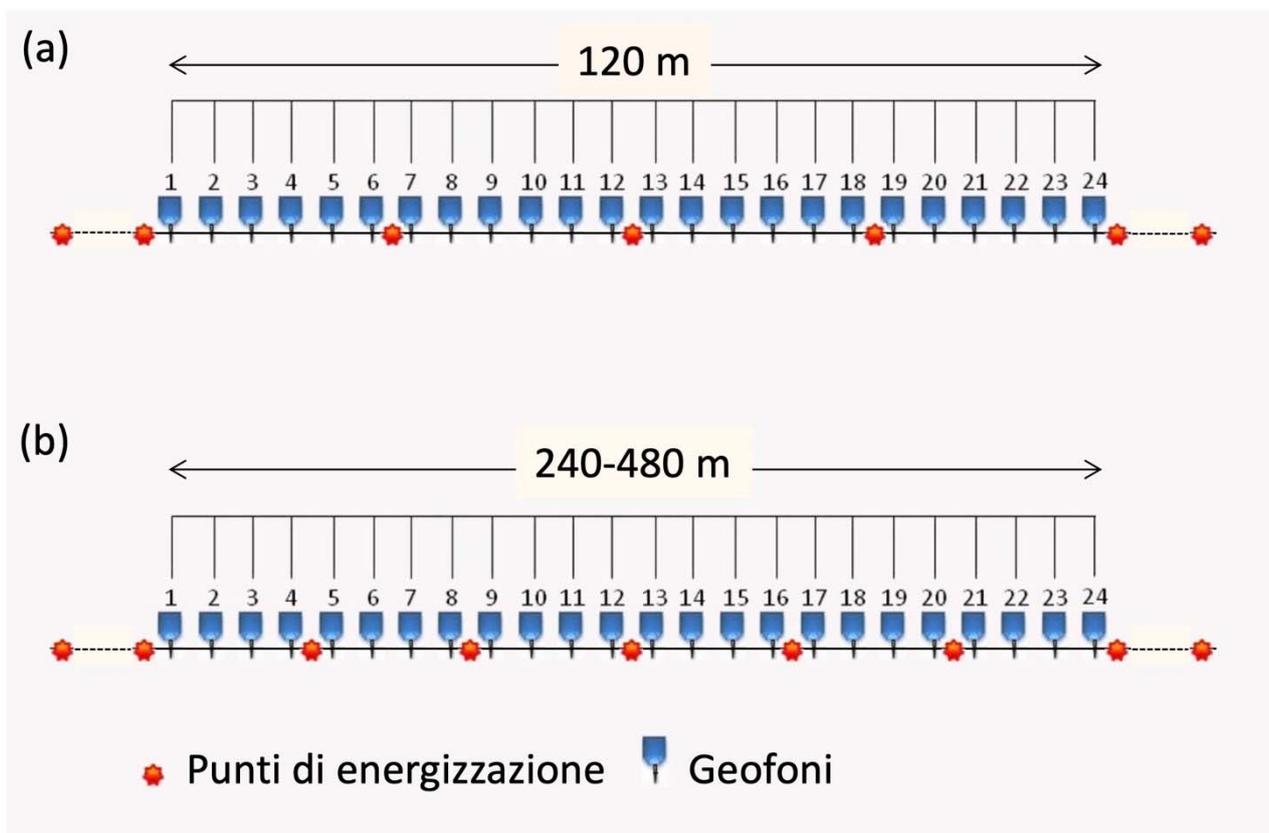


Figura 3.8 Esempio di array sismico con sistema ricevente composto da 24 geofoni (a) per una base sismica di 120 m e distanza inter-geofonica di 5 m e (b) per una base sismica di 240-480 m e distanza inter-geofonica di 10-20 m.

I punti di energizzazione per le onde P e SH devono essere coincidenti. Le acquisizioni in onde P e SH dovranno essere effettuate nel corso della medesima giornata, a meno di condizioni particolari. Di norma, la pratica comune prevede che l'acquisizione in onde P (generalmente meno problematica in contesti urbanizzati e logisticamente difficoltosi) debba precedere l'omologa acquisizione in onde SH.

Il sistema di ricezione è costituito da 24 geofoni verticali per le onde P e 24 geofoni orizzontali per le onde SH con frequenza propria variabile tra 4 e 14 Hz.

Per l'acquisizione in onde P, i geofoni devono essere ben accoppiati al terreno e posizionati verticalmente; l'acquisizione in SH prevede, invece, che i geofoni debbano essere ben accoppiati al terreno, posizionati verticalmente e con l'asse di oscillazione parallelo al parallelepipedo energizzante. Il parallelepipedo energizzante sarà posto con l'asse maggiore perpendicolare alla direzione di stendimento.

Eventuali basi sismiche consecutive dovranno essere sovrapposte, verificata la fattibilità logistica per distanza pari a almeno 3 spaziature inter-geofoniche.

Il trigger consiste preferibilmente in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo a un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e la produzione di un impulso che viene inviato a 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.

Nel caso di sistemi di energizzazione che prevedano l'utilizzo dell'esplosivo, il trigger può consistere in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui si attiva la microcarica di esplosivo, posizionata in tubi di ABS o PVC collocati in fori opportunamente predisposti.

Il sistema di acquisizione dati deve essere di tipo multicanale (almeno 24 canali) in grado di registrare su ciascuno di essi in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica minimo a 16 bit.

Esso è collegato a ciascuno dei trasduttori di velocità e al trigger; consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come tracce su un apposito monitor le vibrazioni a partire dall'impulso inviato dal trigger.

Il sistema deve avere anche le seguenti caratteristiche:

- lunghezza di registrazione almeno 0.5 s, ma, preferibilmente, arrivando ad almeno 1 sec per esigenze particolari legate all'utilizzo della intera registrazione (piuttosto che dei soli primi arrivi) per elaborazioni di sismica in foro con tecnica VSP (profilatura sismica verticale) oppure tramite l'utilizzo delle riflesse o le onde superficiali;
- passo di campionamento non inferiore a 0.500 ms;
- dinamica del convertitore analogico digitale non inferiore a 16 bit;
- rumore elettronico complessivo del sistema di acquisizione non superiore a 5mV per ogni canale, crosstalk > 50 dB;
- filtri per l'eliminazione delle interferenze derivanti da linee di tensione;
- filtri in acquisizione e in uscita;
- essere dotato di un display in grado di visualizzare simultaneamente le 24 tracce o tracce selezionate;
- possibilità di registrazione su supporto informatico;
- sistema per l'effettuazione dell'inversione di polarità nell'acquisizione in onde SH;

Sarà necessario, inoltre, accertare che la strumentazione sia impostata correttamente per quanto riguarda l'ora e la data della registrazione.

L'informazione relativa al numero di stacks effettuati, dovrà essere fornita nella relazione con una tabella che la indichi per ogni acquisizione. L'esecuzione della prova deve essere preceduta da una fase preparatoria durante la quale vengano realizzate le piazzole per il posizionamento dei sistemi energizzanti e vengano preparati gli strumenti di registrazione.

La prova si sviluppa con le seguenti accortezze:

- Nel caso di energizzazioni con esplosivo, l'esecuzione della prova deve essere preceduta da una fase preparatoria durante la quale vengono realizzati i fori per il posizionamento e brillamento delle cariche. tali fori devono avere una profondità non inferiore a 1.5 metri e in essi vengono collocati tubi in ABS o PVC di diametro non inferiore ai 5 cm. Le cariche e i relativi inneschi (detonatori elettrici) vanno posizionati nella parte inferiore del tubo e opportunamente borbati con argilla, sabbia o altro materiale inerte in maniera da ridurre al minimo, in superficie, gli effetti dello scoppio. Dopo aver predisposto i fori per l'esplosivo, i geofoni verticali vengono collocati secondo le modalità sopra

descritte e successivamente vengono fatte brillare le cariche ed eseguite, per ciascun punto di scoppio, le relative registrazioni.

- Per i profili in fase SH, la sorgente viene attivata producendo, su un lato del parallelepipedo, una sollecitazione che attiva il trigger e si propaga dalla sorgente verso i ricevitori con vibrazioni di tipo SH, dirette perpendicolarmente alla direzione di percussione e polarizzate sul piano orizzontale. Poiché si devono ricavare onde SH, per consentire la registrazione di dati caratterizzati da buona qualità, è necessario produrre alla sorgente due onde di polarità opposta per avere la possibilità di sottrarre battuta sinistra e battuta destra, in modo da individuare meglio l'istante di primo arrivo (metodo cross-over). È preferibile che questa operazione venga eseguita direttamente in campagna, ovvero in fase di acquisizione, ed è per tale motivo che la strumentazione utilizzata deve essere in grado di eseguire l'inversione di polarità.

Le registrazioni devono risultare chiare e tali da consentire univoche individuazioni dei primi arrivi; pertanto, in generale dovrebbero essere privilegiate registrazioni a un solo stack, evitando la sommatoria (signal enhancement) che “sporca” il segnale. Tuttavia, l'impresa al fine di consentire la chiara individuazione dei primi arrivi, dovrà eseguire più battute. Nel caso, nonostante le attenzioni per la limitazione del rumore di fondo e l'effettuazione di un numero adeguato di stack (di norma non inferiore a 50 battute), questo fosse comunque elevato e tale da non consentire una registrazione di qualità, l'impresa deve sospendere i lavori e comunicare le eventuali difficoltà per concordare le possibili soluzioni.

#### **3.4.4 Elaborazione dati**

L'elaborazione dei dati dovrà essere realizzata mediante software a elevata valenza diagnostica in grado di fornire i valori dei parametri di velocità, relativi ai rifrattori individuati, per ogni stazione geofonica con particolare riferimento al caso di morfologie ondulate sia della superficie topografica sia dei rifrattori, come ad esempio il “metodo reciproco”, il delay time e il “metodo reciproco generalizzato”, od algoritmi di inversione tomografica.

Nel caso sulle dromocrone venga rilevata la presenza di fasi con netta variazione di velocità, come nel caso di sedimenti a bassa compattezza a diretto contatto con formazioni francamente litoidi, vanno privilegiati i metodi classici di interpretazione come il delay time e il GRM.

Nel caso venga invece rilevata la presenza di gradienti di velocità, con dromocrone ad andamento curvilineo, è preferibile una inversione di tipo tomografico, onde evitare ambiguità nell'attribuzione dei rami di dromocrone agli ipotetici rifrattori. Si puntualizza che per l'inversione tomografica dei dati, questi ultimi devono garantire una buona copertura del sottosuolo da parte delle onde sismiche, pertanto va usata, per quanto possibile, un'alta densità di geofoni ed energizzazioni: non meno di 24 geofoni, distanze inter-geofoniche < 10m, densità tiri almeno ogni 4 geofoni.

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde P e SH può scomporsi in cinque fasi fondamentali:

- individuazione del primo arrivo in P;
- individuazione del primo arrivo in SH;
- ricostruzione della dromocrona e relativa interpretazione in P;
- ricostruzione della dromocrona e relativa interpretazione in SH;

- definizione dei moduli dinamici.

attraverso questo approccio sarà possibile ottenere sezioni sismostratigrafiche in cui vengono definite distribuzioni discrete delle velocità e dei relativi rifrattori.

I risultati delle suddette indagini devono essere per quanto possibile tarati con i dati di ulteriori e successive indagini geofisiche di dettaglio e confrontate con i risultati ottenuti dall'esecuzione di indagini geognostiche e geotecniche, al fine di verificarne l'attendibilità e il grado d'errore intrinseco, e, conseguentemente, di giungere a un coerente modello geologico-tecnico del sottosuolo.

### **3.4.5 Presentazione dei risultati**

per le indagini svolte dovrà essere fornita:

1. Una relazione generale in cui sono specificati:

- obiettivi delle indagini e contesto geologico delle aree investigate;
- piano di sicurezza dell'impresa e piano di controllo di qualità qualora l'impresa sia certificata;
- risultati delle indagini ed eventuali osservazioni.

2. Una relazione tecnica per ciascuna linea sismica che, oltre ai risultati e alle conclusioni raggiunte, comprenda tutta la documentazione, le tabelle e i grafici da cui risulti:

- la descrizione delle procedure eseguite e della strumentazione utilizzata;
- la planimetria CTR in scala 1:5.000, ove esistente, per un inquadramento di massima e per una visione più generale del sito di indagine e dello stendimento. In alternativa sarà utilizzata una planimetria CTR in scala 1: 10.000 (Figura 3.4-12);
- la planimetria su base CTR 1:2.000 ingrandita in scala 1:1.000 con l'ubicazione della linea sismica, il posizionamento dei geofoni e delle energizzazioni, univocamente individuate, interne ed esterne alla linea per visualizzare su carta la geometria di acquisizione. Per quanto riguarda le energizzazioni occorrerà identificarle in modo univoco.
- uno schema dettagliato della linea sismica al fine di caratterizzare la geometria di acquisizione: dovranno essere indicate le posizioni relative dei geofoni, dei punti di scoppio e le relative distanze e quote; inoltre andranno esplicitati chiaramente i nomi dei files di campagna relativi a ogni energizzazione. Per ogni linea, al fine di agevolarne la georeferenziazione, andranno fornite le coordinate geografiche del primo e dell'ultimo geofono. Qualora lo stendimento sia una spezzata, dovranno essere fornite le coordinate degli estremi della spezzata;
- la stampa delle registrazioni di campagna corredata del numero di stack; per le onde SH la stampa relativa alla differenza battuta destra - battuta sinistra e una tabella che indichi per ogni acquisizione il numero di stack effettuati; sebbene sia richiesta una lunghezza di registrazione pari a 1 secondo, il sismografo dovrà essere settato in visualizzazione con una lunghezza tale da permettere il chiaro riconoscimento del trend dei primi arrivi.
- i tempi di propagazione delle onde P e SH osservati ai geofoni relativi ai vari scoppi;

- il diagramma tempi di arrivo-distanze (“dromocrone sismiche”) relativamente alle onde P e SH distinguendo con simboli diversi ciascun set di registrazioni;
- le profondità dei vari rifrattori individuati e le relative velocità sismiche sia per le onde p sia per le SH. Al fine di valutare le modalità di realizzazione delle sezioni sismostratigrafiche, i valori di velocità e di profondità dovranno essere definiti e/o rappresentati in riferimento ai valori di ascissa in corrispondenza dei quali sono stati calcolati dal programma e comunque almeno relativamente alle posizioni dei punti di scoppio;
- la sezione sismostratigrafica relativa sia alle dromocrone in P che in SH. In essa dovranno essere indicati i valori di velocità, la topografia e lo spessore dei sismostrati individuati;
- la sezione litostratigrafica interpretativa finale con una legenda in cui sono indicati i diversi litotipi individuati sulla base di cartografia geologica e geomorfologica o delle osservazioni geologiche di superficie, e/o di dati di sondaggio se presenti. Il passaggio dal dato sismostratigrafico alla sezione litostratigrafica dovrà essere realizzato a cura di un geologo, in grado di seguire, alla luce delle sue conoscenze specifiche, l’interpretazione del dato geofisico in funzione della natura geologico-tecnica dei terreni indagati, presunta dalla realizzazione dei rilievi di superficie. La sezione litostratigrafica fornita dovrà essere campita per tutta l’area corrispondente alla massima profondità indagata e dovrà contenere dei riferimenti topografici (corsi d’acqua, toponimi, edifici, strutture) che siano finalizzati alla corretta localizzazione della sezione nella zona in oggetto; tale allegato andrà redatto a una scala adeguata a rappresentare i risultati ottenuti con sufficiente dettaglio. Nell’eventualità che non risultassero coincidenti le geometrie e le profondità dei rifrattori le sezioni litostratigrafiche dovranno essere fornite separatamente per le prospezioni in P e in SH;
- una relazione relativa ai risultati e alle conclusioni raggiunte;
- la documentazione fotografica relativa alle fasi di esecuzione di ciascuna linea sismica. Dovrà essere fornita una foto per ogni base sismica in cui è indicata la progressione dei geofoni e le energizzazioni, laddove le condizioni logistico-morfologiche lo consentano, altrimenti saranno effettuate più foto. Sarà opportuno che risulti visibile l’intera linea, gli strumenti di energizzazione, il contesto ambientale e la congruenza tra l’ubicazione della linea nelle planimetrie e la stesa in campagna.

La relazione tecnica verrà predisposta in forma cartacea e su supporto magnetico.

3. Le registrazioni di campagna. I dati originali di registrazione e le sezioni film delle energizzazioni eseguite, su supporto cartaceo e digitale.

#### **3.4.6 Standard di valutazione dei risultati**

Nel caso in cui l’amministrazione appaltante si avvalga di una procedura di controllo e collaudo dei dati forniti, si riportano di seguito le specifiche che possono essere adottate. Sono state predisposte una serie di definizioni per valutare la qualità dei dati acquisiti ai fini di una loro possibile utilizzazione per un’attendibile interpretazione ai fini geologici. La valutazione dei risultati sarà effettuata dai referenti scientifici incaricati, i quali dovranno rispettare, nelle loro valutazioni, i seguenti parametri:

- Valutazione delle registrazioni. La chiara lettura del segnale costituisce l'elemento essenziale per procedere alle successive operazioni di interpretazione ed elaborazione, pertanto il segnale di tutte le registrazioni si deve leggere per tutte le tracce e per tutti i punti di misura.
- Valutazione della congruenza tra dromocrone e dati di registrazione. Il presupposto della congruenza è la buona individuazione del primo arrivo, pertanto le dromocrone devono essere perfettamente congruenti con i dati di registrazione.
- Valutazione della congruenza tra l'interpretazione sismostratigrafica e le dromocrone. Nella fase di interpretazione devono essere rispettati il numero degli strati evidenziati nelle dromocrone e analizzate le eventuali variazioni di velocità e profondità dei singoli sismostrati, pertanto l'interpretazione sismostratigrafica deve essere perfettamente congruente con le dromocrone.
- Valutazione della congruenza tra l'interpretazione litostratigrafica e le conoscenze geologiche della zona indagata. Le sezioni geologiche interpretative eseguite dall'impresa dovranno essere ispirate a conoscenze geologico-strutturali di dettaglio delle aree indagate; sarà quindi necessario utilizzare, per una corretta interpretazione delle sezioni sismostratigrafiche, non solo una cartografia a grande scala, ma anche una cartografia a scala minore che possa consentire di inquadrare le problematiche geologiche locali in un contesto regionale. In particolare, devono essere valutati gli spessori, le attribuzioni formazionali ed eventuali discontinuità rilevate.

### 3.5 Indagini geoelettriche

I metodi di prospezione elettrica possono essere divisi tra quelli che utilizzano correnti naturali (metodo dei potenziali spontanei) e metodi che utilizzano correnti artificiali (metodo della polarizzazione indotta, metodo della resistività). Di seguito verrà descritto solo il metodo della resistività che risulta essere il più utilizzato. La prova trova il suo fondamento sul fatto che le rocce sono in grado di condurre corrente; tale capacità viene espressa dalla conducibilità elettrica o dal suo inverso la resistività ( $\rho$ ) espressa in ohm·m. Lo scopo della prova consiste quindi nel caratterizzare dal punto di vista elettrico, tramite la misura della resistività  $\rho$ , le unità litologiche presenti nel sito di indagine e la ricostruzione delle loro geometrie nel sottosuolo (profondità e spessori). A causa del fatto che il terreno solo in prima approssimazione può essere considerato omogeneo e isotropo, il parametro che in realtà viene ricavato è la resistività apparente  $\rho_a$  legata da relazioni complesse alla resistività vera e agli spessori degli strati interessati dall'indagine. Nell'ambito del metodo della resistività, le tecniche maggiormente utilizzate in passato per la stima di tale parametro erano il sondaggio elettrico Verticale (SEV) ed il Profilo di Resistività (PR). Oggi queste tecniche non trovano più applicazione e sono state sostituite dalle tecniche tomografiche dette tomografie geoelettriche (ERT) effettuata con misure multiple lungo uno stesso profilo. Queste consentono la ricostruzione della distribuzione di resistività nel sottosuolo e sono particolarmente efficaci laddove siano presenti terreni molto differenti con contrasti di resistività elevati (ghiaie – argille; argilliti – calcari; ecc.). La tomografia geoelettrica unisce sia i vantaggi del SEV che del PR risultando utile sia nella determinazione di successioni elettro-stratigrafiche sia nella determinazione di variazioni laterali di resistività apparente. Nella Tabella 3.1 è riportato l'ordine di grandezza delle resistività reali per alcuni tipi di acqua e alcuni tipi di rocce.

Estrema cautela e opportuni accorgimenti devono essere prestati nell'applicazione delle prove in aree urbanizzate per la presenza di sottoservizi, condutture metalliche interrate, linee elettriche di corrente

continua, reti ferroviarie, reti elettriche di alta tensione, disturbi questi che possono influire significativamente sulla qualità delle misure e sull'attendibilità dei risultati.

ACQUA - ROCCE	RESISTIVITÀ (ohm-m)
Acqua di mare	0.2
Acqua di depositi alluvionali	10 - 30
Acqua di sorgente	50 - 100
Sabbia e Ghiaia asciutta	1000 - 10000
Sabbia e Ghiaia imbibita di acqua dolce	50 - 500
Sabbia e Ghiaia imbibita di acqua salata	0.5 - 5
Argilla	2 - 20
Marna	20 - 100
Calcere	300 - 10000
Quarzite	300 - 10000
Cineriti e tufi vulcanici	20 - 100
Lave	300 - 10000
Scisti grafittici	0.5 - 5
Scisti argillosi o alterati	100 - 300
Scisti intatti	300 - 3000
Gneiss e Granito alterato	100 - 1000
Gneiss e Granito intatto	1000 - 10000

Tabella 3.1: Resistività reale per alcuni tipi di acque e rocce (da Astier, 1971).

### 3.5.1 Schema esecutivo della tomografia Geoelettrica

La prova consiste nell'immettere una corrente continua nel terreno per mezzo di due elettrodi in acciaio, detti "elettrodi di corrente" (A-B), e nel misurare la differenza di potenziale (d.d.p.), mediante altri due elettrodi detti "elettrodi di tensione" (M-N). In superficie si determina la resistività apparente  $\rho_a$  che è calcolata dalle misure di intensità di corrente  $I$  immessa nel terreno e dalla differenza di potenziale  $\Delta V$  misurata attraverso gli elettrodi di potenziale. La relazione generale è:

$$\rho_a = k \Delta V / i \quad [3.6]$$

dove  $k$  è il cosiddetto fattore geometrico dipendente dalla configurazione utilizzata, cioè dalle distanze e posizioni reciproche dei 4 elettrodi (quadrupolo). Dette  $AM, AN, BN$  e  $BM$  le distanze relative tra gli elettrodi, il coefficiente geometrico è pari a:

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right)} \quad [3.7]$$

In generale, aumentando le dimensioni del quadrupolo si ottengono informazioni relative a porzioni più profonde del sottosuolo. Stabilita perciò una distanza minima interelettrodica "a", misure relative a distanze interelettrodiche multiple di questa,  $na$ , consentiranno di stimare le variazioni di resistività a profondità via via crescenti. Vi sono configurazioni di misura (dispositivi) standard, cioè con geometrie fisse del quadrupolo. Al variare del dispositivo, si ottiene una diversa risoluzione delle

discontinuità presenti nel sottosuolo, come pure varia la profondità di investigazione a parità di lunghezza del profilo. In figura 3.9 sono schematizzate le configurazioni elettrode di comune utilizzo.

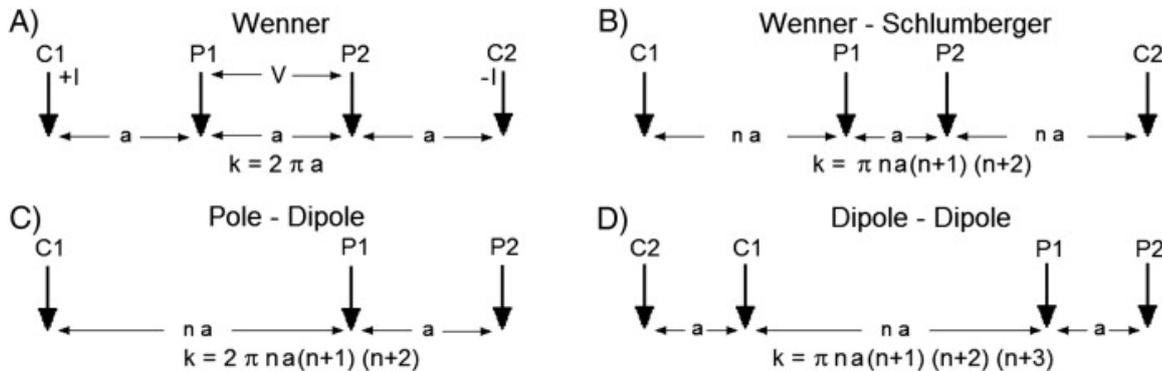


Figura 3.9: principali configurazioni elettrode. Immagine modificata da Loke et al., 2013.

A differenza di quanto avviene nell'acquisizione di VES e PR, indagini in cui si utilizzano tipicamente quattro elettrodi collegati tramite quattro cavi separati ad un sistema di acquisizione, nel caso dell'indagine ERT si utilizzano sistemi di acquisizione multi-elettrodo con 25 o più elettrodi collegati al sistema di acquisizione tramite cavi multipolari. Un circuito di commutazione programmabile interno al sistema di acquisizione seleziona automaticamente i 4 elettrodi appropriati per ogni misurazione. Ciò consente, di utilizzare quasi tutte le configurazioni di misura illustrate in figura 1. Effettuando misurazioni con spaziature diverse in punti diversi lungo il cavo, si ottiene un profilo 2D del sottosuolo (tomografia geoelettrica).

La strumentazione utilizzata per le indagini ERT si deve quindi comporre delle seguenti parti:

- Georesistivimetro
- Cavi multielettrodo
- Elettrodi

Il georesistivimetro funge sia da sistema di energizzazione sia da sistema di ricezione. Il sistema di energizzazione, alimentato mediante generatore o batterie esterne, deve essere caratterizzato da una potenza proporzionata alle profondità di indagine e al contesto di lavoro; in contesti caratterizzati da bassi valori di potenziale spontaneo, si può operare con piccola potenza; nel caso contrario si renderà necessario utilizzare sistemi con gruppi elettrogeni ed elevatori di tensione. La corrente immessa deve essere continua o a onda quadra con periodicità non minore di 250 ms. Il sistema di ricezione deve permettere la compensazione dei potenziali spontanei e lettura dei valori dopo un sufficiente numero di stacking. Lo strumento deve poter sostenere una tensione di 500 V in corrente continua e permettere misure di corrente di oltre 1A. L'impedenza d'ingresso sul circuito di potenziale MN deve essere maggiore di 1 MΩ e deve esser possibile acquisire differenze di potenziale in un ampio range che va dai centesimi di millivolt a qualche volt. A titolo indicativo si può indicare il limite di 1.0 mV come segnale accettabile agli elettrodi MN, mentre segnali più piccoli devono essere confermati da più serie di letture ripetute e in ogni caso univocamente determinati.

I cavi multielettrodo devono essere in rame-acciaio (il rame per le sue ottime proprietà conduttive, l'acciaio per la sua resistenza alla trazione) perfettamente isolati, evitando il più possibile le giunture e con una sezione proporzionale alla lunghezza dello stendimento.

Gli elettrodi possono essere realizzati in qualsiasi materiale conduttivo (ferro, acciaio, ecc.). Per migliorare il passaggio della corrente nel terreno è necessario realizzare anche delle rose di picchetti e imbibire il terreno di acqua salata. In presenza di rocce particolarmente resistive, si renderà inoltre necessario l'utilizzo di elettrodi di corrente anche delle dimensioni di un metro di altezza con diametri di 2-3 centimetri.

Dopo aver individuato un'area sufficientemente idonea per l'esecuzione della prova, vengono ben infissi nel terreno gli elettrodi da utilizzare per l'invio di corrente/misura dei potenziali ed è necessario specificare il tipo di strumentazione utilizzata (bussola, GPS, ecc.) e/o il tipo di tecnica adottata per il corretto allineamento e posizionamento degli stessi lungo il profilo da investigare. La bontà del contatto elettrico tra elettrodo e terreno deve essere controllata prima dell'inizio delle operazioni di misura. Laddove la resistenza di contatto dovesse risultare maggiore dei  $2k\Omega$ , si consiglia il controllo dell'elettrodo (l'elettrodo deve essere fermamente infisso nel terreno e la pinzetta di connessione elettrodo-cavo deve essere in buono stato) e l'utilizzo di soluzioni saline da versare nel punto in cui l'elettrodo è infisso.

Riguardo alle configurazioni di misura da adottare, si raccomanda di utilizzare sia la configurazione Dipolo-Dipolo per la sua maggiore sensibilità a variazioni laterali di resistività nel sottosuolo che la disposizione Wenner-Schlumberger per la sua maggiore sensibilità a variazioni verticali. Nell'impostare la sequenza di acquisizione sul georesistivimetro, si raccomanda altresì di non utilizzare distanze interelettrodiche massime superiori al valore di  $6a$  (con "a" distanza minima interelettrodica) al fine di ottenere misure caratterizzate da un buon rapporto segnale-rumore.

### **3.5.2 Elaborazione dati**

Per l'elaborazione dei dati acquisiti è consentito l'uso di uno qualunque dei molteplici software di inversione 2D di dati geoelettrici. A prescindere dal software utilizzato si raccomanda l'analisi ed il filtraggio dei dati acquisiti per l'eliminazione di punti misura anomali prima di procedere con il processo di inversione.

Il modello di resistività ottenuto dovrà essere sempre accompagnato dall'indicazione dell'errore ad esso associato (RMS o indicatore affine) e dal confronto tra pseudosezione sperimentale e pseudosezione calcolata.

### **3.5.3 Presentazione dei risultati**

Per le indagini svolte dovrà essere fornita:

1. Una relazione generale in cui sono specificati:
  - a. obiettivi delle indagini e contesto geologico delle aree investigate desunte dal programma preliminare redatto e fornito al committente;
  - b. Piano di sicurezza dell'impresa che per questo tipo di indagine si rende necessario soprattutto quando correnti e tensioni in gioco sono elevate, e piano di controllo qualità qualora l'impresa sia certificata;
  - c. risultati delle indagini ed eventuali osservazioni.

La relazione generale deve essere consegnata su supporto cartaceo e digitale.

2. Una relazione tecnica con documentazione relativa alla strumentazione e alla geometria di acquisizione utilizzata:

- a. caratteristiche tecniche del sistema sorgente in riferimento all'utilizzo di batterie, generatore o elevatore di tensione;
  - b. caratteristiche tecniche del georesistivimetro utilizzato, in cui compaiano marca, modello, anno di fabbrica, revisioni e tarature effettuate, voltaggio e amperaggio massimo sostenuto, l'impedenza di ingresso al circuito MN;
3. Una relazione tecnica con documentazione, tabelle e grafici da cui risulti per ciascuna prova:
- a. descrizione delle procedure eseguite;
  - b. la planimetria su base CTR in scala 1:5.000, ove esistente, per un inquadramento di massima e per una visione più generale del sito di indagine e della ubicazione delle prove. In alternativa sarà utilizzata una planimetria CTR in scala 1:10.000;
  - c. la planimetria su base CTR 1:2.000 ingrandita in scala 1:1.000 con l'ubicazione dell'area di indagine e delle prove eseguite;
  - d. uno schema dettagliato delle prove al fine di caratterizzare la geometria di acquisizione adottata: Per ogni prova andranno fornite le coordinate geografiche utili a definire la posizione dei profili di acquisizione.
  - e. in ogni caso andrà fornito il quaderno di campagna, completo di giorno, mese e anno dell'acquisizione,
  - f. le caratteristiche del software utilizzato per l'elaborazione;
  - g. la profondità e relative resistività degli strati;
  - h. la sezione elettrostratigrafica. In essa dovranno essere indicati i valori di resistività, la topografia, lo spessore degli elettrostrati individuati;
  - i. la sezione litostratigrafia interpretativa finale con una legenda in cui sono indicati i diversi litotipi individuati sulla base della cartografia geologica e geomorfologia fornita dal committente. La sezione litostratigrafia dovrà essere eseguita per tutta l'area corrispondente alla profondità indagata e dovrà contenere dei riferimenti topografici (corsi d'acqua, toponimi, edifici, strutture) che siano finalizzati alla corretta localizzazione della sezione nella zona in oggetto;
  - j. restituzione di mappe di resistività a varie profondità; queste ultime da decidere in accordo con la committenza;
  - k. una relazione relativa ai risultati e alle conclusioni raggiunte;
  - l. la documentazione fotografica relativa alle fasi di esecuzione della prova.

Le relazioni tecniche devono essere prodotte su supporto cartaceo e digitale.

## Bibliografia

- Albarello, D. & Castellaro, S., 2011. Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. *Ingegneria Sismica*, XXVIII (2), 32-62.
- Coccia, S., Del Gaudio, V., Venisti, N., Wasowski, J., 2010. Application of Refraction Microtremor (ReMi) technique for determination of 1-D shear wave velocity in a landslide area. *J Appl. Geophys*, 71, 71-89, doi: 10.1016/j.jappgeo.2010.05.001.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020. Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. Versione 4.2. Roma, dicembre 2020, 138 pp., [https://www.webms.it/sites/default/files/2018-06/StandardMS\\_4\\_2.pdf](https://www.webms.it/sites/default/files/2018-06/StandardMS_4_2.pdf).
- Del Gaudio V., 2020. Protocollo di acquisizione ed elaborazione di registrazioni di rumore sismico ambientale. In: Gruppo di Coordinamento Tecnico Scientifico degli Studi di Microzonazione Sismica nella Regione Puglia: “Protocolli per lo svolgimento degli studi di Microzonazione di 1° livello nella Regione Puglia”, pagg. 48-66, [https://protezionecivile.puglia.it/wp-content/uploads/ProtocolliMS1\\_1.0.pdf](https://protezionecivile.puglia.it/wp-content/uploads/ProtocolliMS1_1.0.pdf).
- Gruppo di lavoro MS, 2008. Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol. e Dvd, <https://www.centromicrozonazione.sismica.it/it/download/category/24-linee-guida>.
- Louie, J. N., 2001. Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 347–364, doi: 10.1785/0120000098.
- Ling, S., Okada, H. 1993. An extended use of the spatial autocorrelation method for the estimation of structure using microtremors. In Proc. of the 89th SEGJ Conference, Nagoya, Japan, 12–14 October 1993, Society of Exploration Geophysicists of Japan, 44–48 (in Japanese).
- Loke, M. H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O., Wilkinson, P.B., 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *J. Appl. Geophys*, 95, 135-156, doi: 10.1016/j.jappgeo.2013.02.017.
- Otori, M., Nobata, A., Wakamatsu, K., 2002. A Comparison of ESAC and FK Methods of Estimating Phase Velocity Using Arbitrarily Shaped Microtremor Arrays. *Bull. Seim. Soc. Amer.*, 92 (6), 2323–2332.
- Signanini, P., 2003. Ricostruzione delle geometrie del sottosuolo mediante prove geofisiche e problemi connesse con la determinazione del parametro  $v_s$  per la modellazione degli effetti di sito: aspetti metodologici e risultati. In: “Corso di Aggiornamento professionale – Microzonazione sismica”, Ordine Regionale dei Geologi della Puglia, Lucera (FG), 8-17 maggio 2003.

## 4. PROTOCOLLO PER L'ESECUZIONE DI INDAGINI GEOTECNICHE E GEOFISICHE IN FORO

### Premessa

Il presente capitolo riguarda l'esecuzione delle indagini geognostiche in situ previste nell'ambito degli studi di microzonazione sismica di livello 3 da effettuarsi nei Comuni della Puglia interessati dagli stessi studi, in accordo con quanto riportato nel volume "Protocolli di acquisizione ed elaborazione dati relativi alle attività di Microzonazione Sismica di livello 3 in Italia Centrale" (CNR Edizioni, 2020), di seguito denominati Protocolli MS3 Italia Centrale. Il capitolo descrive in linea generale le procedure e le attività principali necessarie alla esecuzione delle indagini stesse, per cui si rimanda al volume anzidetto, che va considerato dunque come parte integrante di questi protocolli, per tutti gli approfondimenti e le specifiche non dettagliate nel presente capitolo.

In particolare, le specifiche tecniche riportate nel seguito riguardano le attività di:

- i) realizzazione di sondaggi a carotaggio continuo (lunghezza complessiva almeno pari a 35m);
- ii) prelievo di campioni indisturbati per indagini di laboratorio;
- iii) esecuzione di prove SPT o CPT;
- iv) esecuzione di prove sismiche di tipo Down Hole (DH).

A questo scopo vengono richiamate le maggiori criticità che si possono incontrare nelle operazioni in sito e le procedure più adeguate al fine di evitare errori che possano compromettere l'esecuzione delle prove e il loro esito. Si fa presente, tuttavia, che gli Affidatari incaricati che eseguiranno le attività in sito dovranno comunque operare in ottemperanza alle Leggi, ai regolamenti vigenti e alle prescrizioni delle Autorità competenti.

Le modalità esecutive 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) e prescrizioni previste dalla ASTM "Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing" – Designation, D7400-17, per cui si invita a fare riferimento agli stessi documenti, o eventualmente ai Protocolli MS3 Italia Centrale, per gli aspetti non trattati nel presente testo.

### 4.1 Scelta del sito di prova

La scelta del sito per l'esecuzione dei fori da attrezzarsi per le prove sismiche di tipo Down - Hole (in seguito DH) dovrà avvenire di concerto con il Gruppo di Lavoro per il Supporto Tecnico-Scientifico della Microzonazione Sismica Regione Puglia (GLSTS). Tale scelta dovrà essere effettuata in modo da garantire la massima rappresentatività dei risultati rispetto 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. A tal proposito, occorre ricordare che, ad esempio, occorrerà posizionarsi in aree facilmente accessibili con strumenti e mezzi per l'esecuzione delle prove DH.

La scelta della ubicazione dei fori da attrezzare ai fini dell'esecuzione delle prove DH dovrà tenere conto dell'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 ( $V_s$ ) rispetto alla profondità, o dell'impossibilità di acquisirne ex-novo in determinati punti. A tal fine, andrebbe preferita la scelta di un sito di indagine nel quale: 1) siano presenti le principali unità stratigrafiche/geofisiche da indagare e 2) il substrato geologico sia raggiungibile e rappresentativo per la definizione del substrato sismico. Contestualmente, i risultati ottenuti da misure DH potranno fornire un elemento di confronto e taratura per le misure geofisiche di superficie, laddove esse siano presenti per i litotipi da caratterizzare. Nel caso di geometrie sepolte profonde (con profondità del substrato molto superiore a 35 m 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 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, i risultati di diverse DH eseguite in più Comuni limitrofi. In altre parole, il GLSTS potrà stabilire di ubicare i sondaggi DH in modo da ottenere profili di  $V_s$  che siano sufficientemente rappresentativi delle principali tipologie di coperture presenti nelle aree oggetto di microzonazione sismica.

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 GLSTS.

## 4.2 Sondaggi geognostici

I sondaggi hanno lo scopo di fornire una informazione completa, continua e diretta dei litotipi che attraversano, poiché consentono di:

1. ricostruire il profilo stratigrafico,

2. effettuare il prelievo di almeno un campione indisturbato da sottoporre ad analisi geotecniche di laboratorio,
3. eseguire prove SPT, ed eventualmente prove CPT
4. effettuare la posa in opera delle tubazioni per le prospezioni sismiche DH.

Nel caso specifico, le perforazioni dovranno essere eseguite a carotaggio continuo, che consente il recupero delle carote intatte; l'affidatario è tenuto a disporre di attrezzature idonee ad eseguire sondaggi a rotazione e ad impiegare carotieri semplici o doppi, in relazione alla natura litologica dei terreni e delle rocce.

Il diametro minimo a fondo foro dovrà essere sufficiente per prelevare campioni indisturbati con 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 pari a 35 m dal piano campagna. Il GLSTS potrà in ogni caso disporre che il foro sia arrestato a profondità minore di quella anzidetta. In questo caso, la porzione di lunghezza del sondaggio non eseguita potrà essere utilizzata in altre indagini, preferibilmente altri sondaggi, in accordo con il GLSTS.

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. Per gli aspetti legati alle procedure di stabilizzazione del foro di sondaggio si rimanda ai Protocolli MS3 Italia Centrale. L'affidatario potrà proporre l'impiego di rivestimenti con diverse caratteristiche, in relazione al tipo di attrezzatura di perforazione prescelta.

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

L'affidatario ha l'obbligo di fornire il carotaggio dei fori o dei tratti di foro predefiniti a valle di approvazione del GLSTS, 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 GLSTS, dovesse risultare inferiore alle percentuali sopra indicate, si potrà prevedere una riduzione dell'importo in fase di contabilità finale ovvero si 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/cm<sup>2</sup>);
- scissometro tascabile con fondo scala non inferiore a 100 kPa.

#### **4.2.1 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.

L'eventuale uso di fluidi diversi dai sopra elencati sarà subordinata alla preventiva approvazione da parte del GLSTS, con la condizione che in ogni caso il fluido prescelto, oltre ad esercitare le funzioni di raffreddamento, asportazione detriti ed eventuale sostegno, 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, al fine di evitare un disturbo eccessivo delle condizioni originarie o un eccessivo sovracarotaggio.

Per eventuali situazioni in cui sia opportuno un avanzamento del carotaggio a secco, si consultino i Protocolli MS3 Italia Centrale.

#### **4.2.2 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.

#### **4.2.3 Prelievo, conservazione e trasporto dei campioni**

Nel caso in cui il professionista incaricato ritenga necessario eseguire un prelievo di campioni indisturbati, alla profondità e con modalità concordate con il GLSTS, dovrà inviare il campione presso il laboratorio del Dipartimento di Scienze della Terra UNIBA e garantire le modalità di conservazione più opportune in relazione alla natura dei terreni. Le spese del trasferimento dei campioni sono a carico dell'affidatario. Tutti i campioni appena prelevati nel corso del sondaggio

dovranno essere riposti in luogo riparato dal gelo e dal sole, possibilmente umido, in attesa di essere inviati al laboratorio anzidetto.

Il campione del tipo indisturbato dovrà essere prelevato con campionatori a pistone o a pressione (campionatori semplici), nel caso di terreni coesivi poco consistenti, mentre si dovranno utilizzare campionatori a rotazione, con doppia parete e scarpa avanzata, in presenza di terreni molto consistenti e rocce lapidee. Il campione dovrà avere dimensioni utili non inferiori a 85 mm di diametro e 500 mm di lunghezza. L'affidatario è tenuto ad avere in cantiere entrambi i campionatori semplici e almeno uno dei campionatori doppi e ad utilizzarli fino al raggiungimento di fatto dei relativi limiti operativi.

Per il campionamento e il mantenimento dei campioni dovranno essere utilizzate fustelle metalliche, preferibilmente nuove o in ottimo stato di conservazione, ed i campioni prelevati andranno sottoposti a sigillatura. Per i dettagli relativi alle operazioni di sigillatura dei campioni si rimanda alle indicazioni riportate nei Protocolli MS3 Italia Centrale.

Tutti i campioni prelevati dai fori di sondaggio, dovranno essere accompagnati da una etichetta da applicare al contenitore, non degradabile per umidità, in cui saranno indicati: Comune, località, professionista incaricato, ditta esecutrice, numero identificativo del campione, specifica se trattasi di campione indisturbato o disturbato, tipo di terreno di prelievo, profondità di prelievo, data di prelievo. Per ognuno dei campioni, oltre all'etichetta, dovrà essere allegata, su supporto cartaceo, una scheda contenente le seguenti informazioni:

- Comune e località di esecuzione del sondaggio,
- Sigla identificativa del sondaggio,
- Profondità effettiva raggiunta,
- Profondità della falda,
- Data di inizio perforazione e data finale di cementazione del foro,
- Stratigrafia semplificata e foto delle cassette catalogatrici.

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

Infine, per i tratti di sondaggio in cui il GLSTS 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.

#### **4.2.4 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 (per le modalità specifiche si vedano i Protocolli MS3 Italia centrale) e le foto dovranno essere allegate alla relazione illustrativa finale.

Il trasporto delle cassette fino al luogo di conservazione e/o smaltimento sarà a carico dell'affidatario e dovrà essere realizzato con modalità e tempi che saranno definiti in accordo con il Comune.

#### ***4.2.5 Prove speditive di resistenza sulle carote di terreni coesivi***

Per quanto concerne i 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.

#### ***4.2.6 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.

### **4.3 Prove penetrometriche dinamiche SPT (Standard Penetration Test)**

La prova consiste nella infissione a percussione, secondo 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). Per le caratteristiche e modalità esecutive, questa prova è da preferirsi su terreni incoerenti.

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 alle profondità definite dal professionista incaricato.

Per quanto concerne le caratteristiche dell'attrezzatura da utilizzare per le prove SPT e la relativa preparazione del foro si consultino i Protocolli MS3 Italia Centrale.

#### **4.3.1 Modalità esecutive**

La prova viene eseguita infiggendo a percussione alla profondità prescelta 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 risultante della prova, NSPT, è dato dalla somma del numero di colpi relativo agli ultimi due tratti (necessari all'infissione negli ultimi 30 cm), dunque non considerando il numero di colpi per l'infissione del primo tratto di 15 cm. L'infissione nel primo tratto viene arrestata in ogni caso dopo 50 colpi, qualora non si sia raggiunta la profondità di infissione di 15 cm. 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 a 100. In tal caso si annota 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.

#### **4.4 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 è collegata la punta. Questa prova può essere eseguita sia su terreni coesivi che su terreni incoerenti.

##### **4.4.1 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 cm<sup>2</sup>.

Il manicotto deve avere una superficie laterale compresa fra 150 e 200 cm<sup>2</sup>; 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 è di tipo elettrico e risulta montato 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; la penetrazione della batteria deve avvenire ad una velocità costante e pari a 20 mm/s (+/- 5 mm/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 200 mm 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.

#### **4.4.2 Tarature e controlli**

L'affidatario 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.

#### **4.4.3 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).

#### **4.4.4 Prove penetrometriche statiche 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 prova CPT 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  $10^{-4}$  m/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.

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, e quindi il profilo della stessa pressione con la profondità del sondaggio.

#### ***4.4.5 Prove penetrometriche statiche 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 necessità 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.

### **4.5 Documentazione**

L'affidatario è tenuto a comunicare tempestivamente al GLSTS, su 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 l'affidatario è tenuto a fornire al GLSTS il rapporto di perforazione, completo di una breve relazione redatta da un tecnico comprendente la\le verticale\i rappresentante\i in scala la\le stratigrafia\le di dettaglio rilevata\le, accompagnata\le da una planimetria, pure in scala, con ubicazione dei sondaggi (l'ubicazione, determinata con precisione, va anche georeferenziata).

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 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 ed 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 del Dipartimento di Scienze della Terra

UNIBA.

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 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.

#### **4.6 Prospezioni sismiche in foro down-hole**

Le modalità operative di alcune indagini oggetto delle presenti specifiche tecniche, 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”*.

##### ***4.6.1 Posa in opera di tubi per prospezioni sismiche Down-Hole***

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.

Il tubo di rivestimento definitivo dovrà essere a sezione circolare, in PVC atossico (o ABS). Dovrà avere spessore  $\geq 4$  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 GLSTS) 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 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 presso il 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, si dovrà 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 schiacciature 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 anzidetta, 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.

#### **4.6.2 Caratteristiche delle attrezzature**

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

- sistema di energizzazione;
- 2 ricevitori tridirezionali;
- sismografo registratore;
- dispositivo di segnalazione di partenza automatica del segnale (trigger); 1 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 la Struttura di supporto e coordinamento.

È onere e responsabilità dell'affidatario 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 del sondaggio entro il quale si esegue la prova sismica.

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, calcestruzzo 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, 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 a profondità prefissate, in grado di registrare i tempi di arrivo delle onde di compressione e di taglio. Potrà essere utilizzato un solo ricevitore tridirezionale, se concordato con il GLSTS.

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).

I ricevitori dovranno essere collegati, secondo la loro lunghezza, in modo di mantenere costante la distanza verticale (compresa tra 1 e 2 m) 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 millisecondi.

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 (si consiglia 1 secondo) con tempo di registrazione pre-trigger di almeno 10 millisecondi.

I dati devono essere registrati per ciascuna energizzazione in fase P e per le due (destra e sinistra) in fase S. Essi devono infine essere restituiti come materiali allegati agli studi di microzonazione sismica di livello 3 in formato ASCII, SEG2 o SEG-Y standard o come eventualmente indicato dal GLSTS, 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.

#### **4.6.3 Controlli preliminari**

In fase di esecuzione della prospezione sismica DH:

- dovrà essere verificato che uno dei due sensori orizzontali di ogni ricevitore sia orientato parallelamente alla direzione di generazione delle onde S;
- sarà necessario eseguire una battuta destra e una battuta sinistra in modo da poter effettuare 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:
  - a) trazione del cavo di bloccaggio della sonda e b) 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.

#### **4.6.4 Modalità tecniche esecutive della prova DH**

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, in genere a fondo foro;
- 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 terminate le operazioni di rivestimento e cementazione l'interno dei tubi deve essere lavato con acqua pulita e lasciato pieno d'acqua.

#### **4.6.5 Documentazione dei risultati della prova DH**

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere una relazione conclusiva i cui saranno indicati:

- informazioni generali (sito, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- le modalità esecutive del foro;
- lo schema geometrico di ogni tubazione installata;
- la quota assoluta o relativa della testa della tubazione di misura;
- le caratteristiche della tubazione installata;
- le modalità di iniezione, quantità e composizione della miscela iniettata nell'intercapedine;
- la stratigrafia del sondaggio;
- gli algoritmi di calcolo impiegati, tabelle e tavole ad integrazione e chiarimento delle analisi.

In particolare i valori delle letture dei tempi di arrivo e le misure delle velocità P ed S e degli altri parametri sotto riportati devono essere riportati per ogni profondità di indagine;

- la sezione dati sismici tempo-profondità-ampiezza delle tracce sismografiche onde di compressione (Energizzazione P);
- la sezione dati sismici tempo-profondità-ampiezza delle tracce sismografiche onde di taglio (Energizzazione S destra e sinistra);
- le velocità intervallari delle onde di compressione e di taglio;
- il coefficiente di Poisson;
- le risultanze finali ed interpretative (anche ottenute eventualmente con metodi più sofisticati del metodo delle velocità intervallari);
- le osservazioni e note eventuali.

## 5. PROTOCOLLO PER LA MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE IN CONFIGURAZIONE 1D

### Premessa

Il presente capitolo riguarda l'esecuzione delle analisi numeriche di risposta sismica locale (RSL) 1-D da eseguirsi nell'ambito degli studi di microzonazione sismica di livello 3, da effettuarsi nei Comuni della Puglia interessati, nei casi in cui non siano verificate le ipotesi di applicabilità degli abachi, che prevedono assetti litostratigrafici semplificati. Lo stesso capitolo è stato redatto in accordo con quanto riportato nel volume *“Protocolli di acquisizione ed elaborazione dati relativi alle attività di Microzonazione Sismica di livello 3 in Italia Centrale”* (CNR Edizioni, 2020), di seguito denominati brevemente *Protocolli MS3 Italia Centrale*, e nei volumi *“Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica – Parti I e II, Parte III”* (Dipartimento della Protezione Civile, 2008). Il capitolo descrive in linea generale le procedure e le attività principali necessarie alla esecuzione delle analisi numeriche 1-D, rimandando per tutti gli approfondimenti e le specifiche non dettagliate nel presente capitolo al volume *Protocolli MS3 Italia Centrale*, che va considerato dunque come parte integrante di questi protocolli.

Obiettivo delle analisi numeriche previste dal livello 3 di approfondimento della microzonazione sismica è la determinazione di alcuni parametri rappresentativi della Risposta Sismica Locale (RSL) in tutte le microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), individuate dal livello 1 e dagli eventuali approfondimenti eseguiti nei livelli 2 e 3, definite come stabili e soggette a fenomeni di amplificazione o instabili per fenomeni di liquefazione/instabilità di versante/faglie attive o capaci.

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

- a) Accelerogrammi (in numero di 7) rappresentativi della pericolosità sismica locale (scenari di scuotimento) associata ad eventi con tempo di ritorno di 475 anni e relativi spettri di risposta elastici in pseudo-accelerazione, con smorzamento pari al 5% dello smorzamento critico ( $S_a$ ); a tal proposito, verranno resi disponibili input sismici da parte del GLSTS;
- b) 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;
- c) 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 “FA0105”, “FA0408”, “FA0711” 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. 82 degli Standard 4.2 (paragrafo 2.1.9.6), se non diversamente specificato dal GLSTS o da ss.mm.ii. degli Standard stessi.

### 5.1 Modello di analisi e scelta del codice di calcolo

La modellazione sarà effettuata dall'incaricato utilizzando uno fra i codici di calcolo disponibili per la stessa finalità (STRATA, EERA, Deepsoil), che operano nel dominio delle frequenze o nel dominio del tempo e simulano il comportamento non lineare dei terreni mediante il metodo lineare equivalente. In questi modelli, il sottosuolo è schematizzato mediante una successione di strati sovrapposti, orizzontali ed 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 con superficie topografica orizzontale (Categoria di sottosuolo A e Categoria topografica T1 secondo la classificazione NTC18, 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 (o bedrock 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, e quindi degli strati che costituiscono il modello.

Un elemento chiave delle analisi numeriche di RSL 1D è il livello di discretizzazione necessaria ad una corretta modellazione del sottosuolo. In pratica, si tratta di definire lo spessore massimo  $\Delta h_{max}$  dei diversi strati presenti nel modello. Se uno strato omogeneo della successione ha uno spessore maggiore del valore  $\Delta h_{max}$  necessario ad ottimizzare la modellazione, questo dovrà essere suddiviso in una serie di sottostrati con le stesse caratteristiche. Un valore ragionevole di  $\Delta h_{max}$  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, la dimensione del sottostrato dovrà essere non superiore a  $\Delta h_{max} = 1.25$  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.

## 5.2 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, attraverso cui si determinano 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 successivamente, sulla base di queste 7 valutazioni viene poi

assegnata alla singola MOPS (o alla zona instabile) una sola terna di fattori di amplificazione (FA) per ognuno dei tre intervalli di periodo indicati (0.1-0.5s, 0.4-0.8s e 0.7-1.1s), ciascuno calcolato come valore mediano dei 7 valori calcolati per i diversi accelerogrammi. Una ulteriore fonte di incertezza nella RSL deriva 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 i materiali presenti;
5. le curve di rigidità normalizzata e smorzamento sono incerte perché frutto di misure di laboratorio in numero limitato e della interpretazione approssimata mediante modelli reologici semplificati;
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 ciascuna combinazione di profilo di  $V_s$ , di andamento delle curve di decadimento e smorzamento e di 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 basamento sismico, considerando ciascuno dei 7 accelerogrammi 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.

### 5.3 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 in Figura 5.1. 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 da tutta la curva è pari a 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  $\mu$  e la deviazione standard  $\sigma$ . 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 5.1 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 considerato. 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  $\mu$  e  $\sigma$  della distribuzione in Figura 5.1. Se disponiamo di  $N$  valori sperimentali, una stima di  $\mu$  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  $\mu$  e  $\sigma$ , 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 5.1 (Distribuzione Normale) 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 5.1 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 5.2).

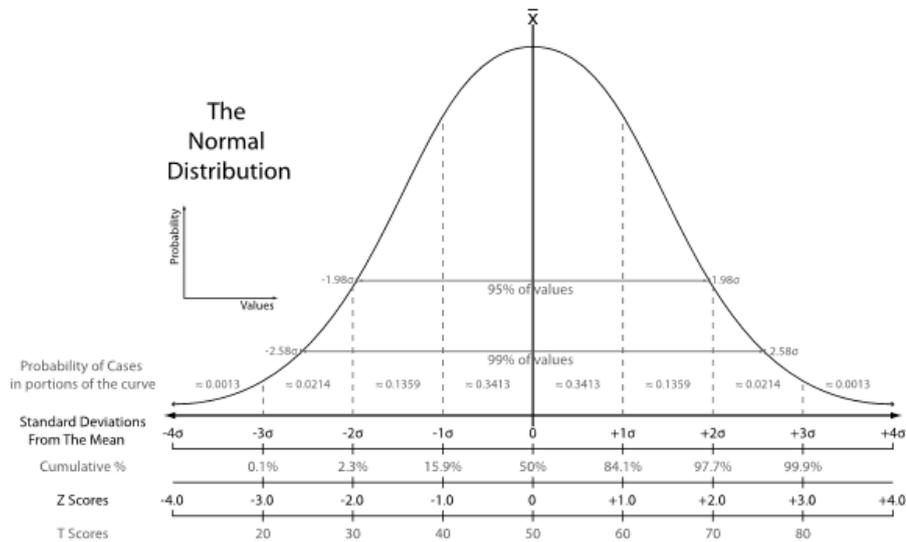


Figura 5.1 - Possibile distribuzione teorica dei valori di una data grandezza (Distribuzione Normale o di Gauss). In ascissa i valori possibili (in termini di scarto dal valore medio  $\mu$ , espresso in unità di deviazione standard  $\sigma$ ) ed in ordinata la loro frequenza relativa (teorica). In 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  $V_{s_i}$ , possono essere stimati come segue

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

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

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

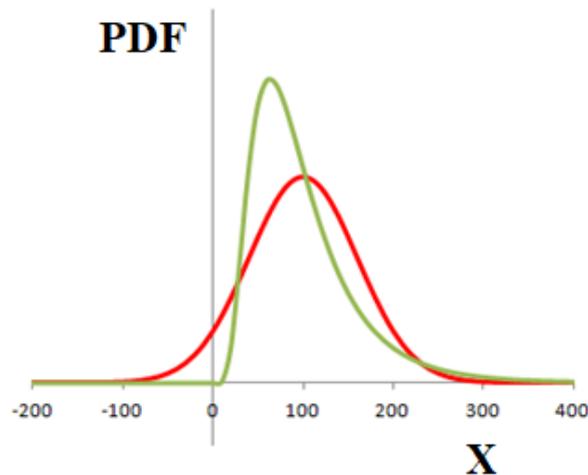


Figura 5.2 - Andamento della distribuzione log-normale (in verde) confrontata con l'andamento di una distribuzione Normale o di Gauss come in Figura 5.1.

Si dimostra che, in questo caso, il valore di riferimento  $V_{Srif}$  sarà

$$V_{Srif} = e^{m_{ln}} \quad [5]$$

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

$$V_{S84^\circ} = e^{m_{ln} + s_{ln}} \quad [6]$$

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].

### 5.3.1 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  $V_s$  di riferimento a partire dagli  $N$  profili di  $V_s$  ottenuti dalle misure. A questo scopo, conviene discretizzare ogni profilo definendo il valore di  $V_s$  per ogni metro fino ad una profondità adeguata al problema in esame (Figura 5.3).

Il procedimento può essere ripetuto per i diversi profili di  $V_s$  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  $V_s$  che possono essere utilizzati per calcolare i valori di  $m_{ln}$  e  $s_{ln}$  come in Figura 5.4.

In alternativa, si può parametrizzare anche la variabilità del profilo di  $V_s$  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 5.4. 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 5.4).

Spessore (m)	$V_s$
2	180
8	230
3	330
7	500



Prof (m)	$V_s$ (m/s)
1	180
2	180
3	230
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 5.3 - Rappresentazioni alternative del profilo di  $V_s$ .

A questo punto la variabilità del profilo di  $V_s$  può essere messa in conto procedendo in due modi. Il primo (tendenzialmente meno conservativo, ma più veloce) consiste nell'assumere il profilo di  $V_s$  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  $V_s(h)$  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)	$m_{in}$	$s_{in}$	$e^{(min)}$	$e^{(mig-sin)}$	$e^{(mig+sin)}$	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 5.4 - Realizzazione di un profilo di riferimento (ultima colonna) avendo a disposizione 3 profili di Vs (Vs1, Vs2 e Vs3)

Un altro approccio (più conservativo, ma anche un po' più complesso) tiene conto, nella fase di analisi della RSL, della variabilità di Vs(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 (cioè per ogni accelerogramma di input), variando casualmente l'andamento del profilo Vs(h), delle curve di decadimento e smorzamento, e della profondità del basamento sismico, all'interno dei vincoli imposti dall'utente, con il metodo stocastico Monte Carlo. In particolare, è possibile assegnare ad ogni strato (ad esempio di spessore pari ad 1m come in tabella 5.4) un valore rappresentativo ( $e^{m_{in}}$ ) ed una variabilità definita dal parametro  $s_{in}$  e dai limiti assoluti di cui sopra. In questo caso, il moto di riferimento può essere assegnato alla profondità dove  $e^{m_{in}-s_{in}}$  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 Vs(h), G/G0- $\gamma$ , D- $\gamma$  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 i valori del periodo nella prima colonna e tutti gli spettri di risposta calcolati nelle colonne successive (quindi ogni riga contiene nella prima colonna il valore del periodo e nelle successive i corrispondenti valori di  $Sa_i$  per quel 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 5.4) 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.

#### 5.4 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 GLSTS. 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 la 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 Vs):

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

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

## 5.5. Esempio: il caso di S. Gimignano (SI)

### 5.5.1 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 (Vs) 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-compatibili la pericolosità di base del sito.

### 5.5.2 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 5.5), nel quale sono stati identificati i seguenti quattro litotipi (v. tabella in Figura 5.5):

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)<sup>1</sup>;
3. Ghiaie (curve di  $G(\gamma)/G_0$  e  $D(\gamma)$  proposte da Rollins, (1988)<sup>2</sup>;
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.

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B., Daily, W. D. (1988). 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.

Tipo di terreno	Profondità [m]	Peso di volume [kN/m <sup>3</sup> ]
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

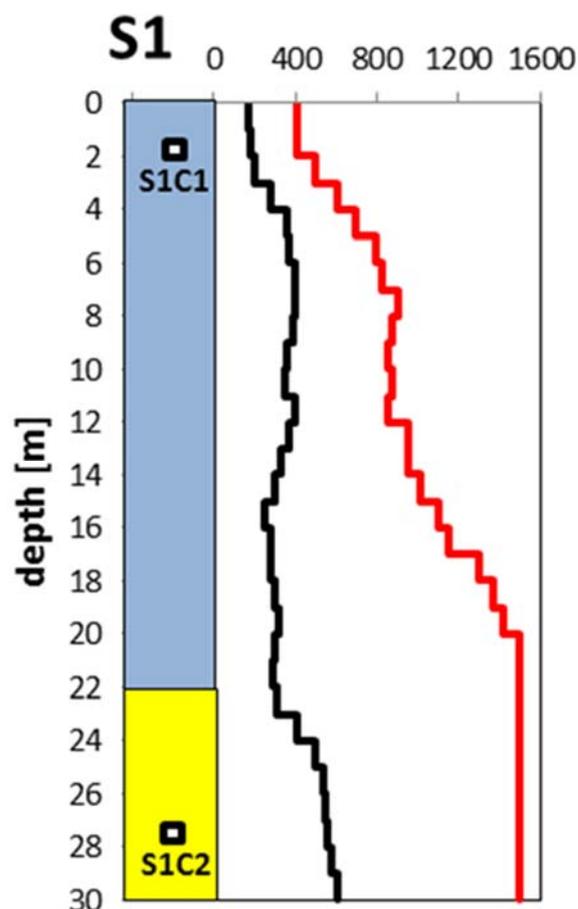


Figura 5.5 - Profilo stratigrafico con indicazione dei campioni indisturbati prelevati e andamento con la profondità di  $V_s$  (in nero) e  $V_p$  (in rosso) (in m/s) in corrispondenza della verticale S1

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 ottenuto sulla base delle indagini disponibili, senza alcuna trattazione di tipo statistico (approccio deterministico: il profilo disponibile, se unico, o la media dei profili disponibili, se più di 1). Per tale variabile è stata assunta una distribuzione lognormale, con coefficiente di variazione (COV - rapporto tra la deviazione standard  $\sigma$  e il valore assoluto della media  $\mu$ ) 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 campi di variabilità dei profili di  $V_s$  e della profondità del basamento sismico sono riportati nella Figura 5.6.

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

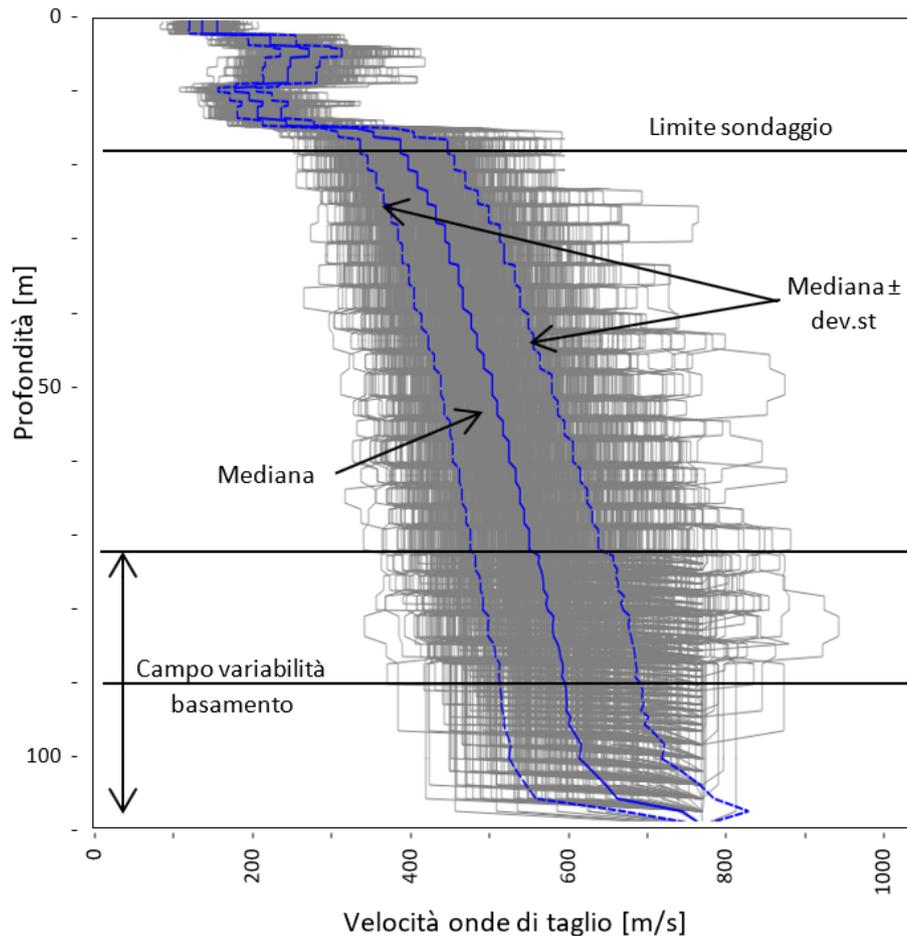


Figura 5.6 - Profili di velocità – 1000 simulazioni

Nel modello di Darendeli<sup>3</sup>, implementato in STRATA<sup>4</sup>, 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  $G(\gamma)/G_0$  è calcolata mediante la seguente espressione:

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

Il modello assume valori bassi di deviazione standard  $\sigma_{ND}$  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:

<sup>3</sup> Darendeli M.B. (2001) – Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. PhD thesis, The University of Texas, Austin.

<sup>4</sup> Kottke, A. R., and Rathje, E. M. (2009). Technical manual for Strata, Univ. of Texas, Austin, TX.

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

ovvero  $\sigma_D$  aumenta all'aumentare del rapporto di smorzamento.

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)<sup>5</sup>;
3. Ghiaie (Rollins, 1988)<sup>6</sup>;
4. Sabbie limose molto addensate (prova RC campione S1-C2).

Il campo di variabilità delle curve è riportato nei grafici di Figura 5.7.

### 5.5.3 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  $T_R=475$  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 5.8 a 5.10 sono sintetizzati i risultati relativi a:

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

I risultati ottenuti mostrano una ridotta influenza della profondità del basamento ( $H_{dep}$  – Fig. 5.8), una significativa influenza della variabilità del profilo delle VS (Fig. 5.9), ed una influenza ancora più alta della variabilità delle curve di rigidezza e smorzamento dei materiali (Fig. 5.10).

5 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.

6 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.

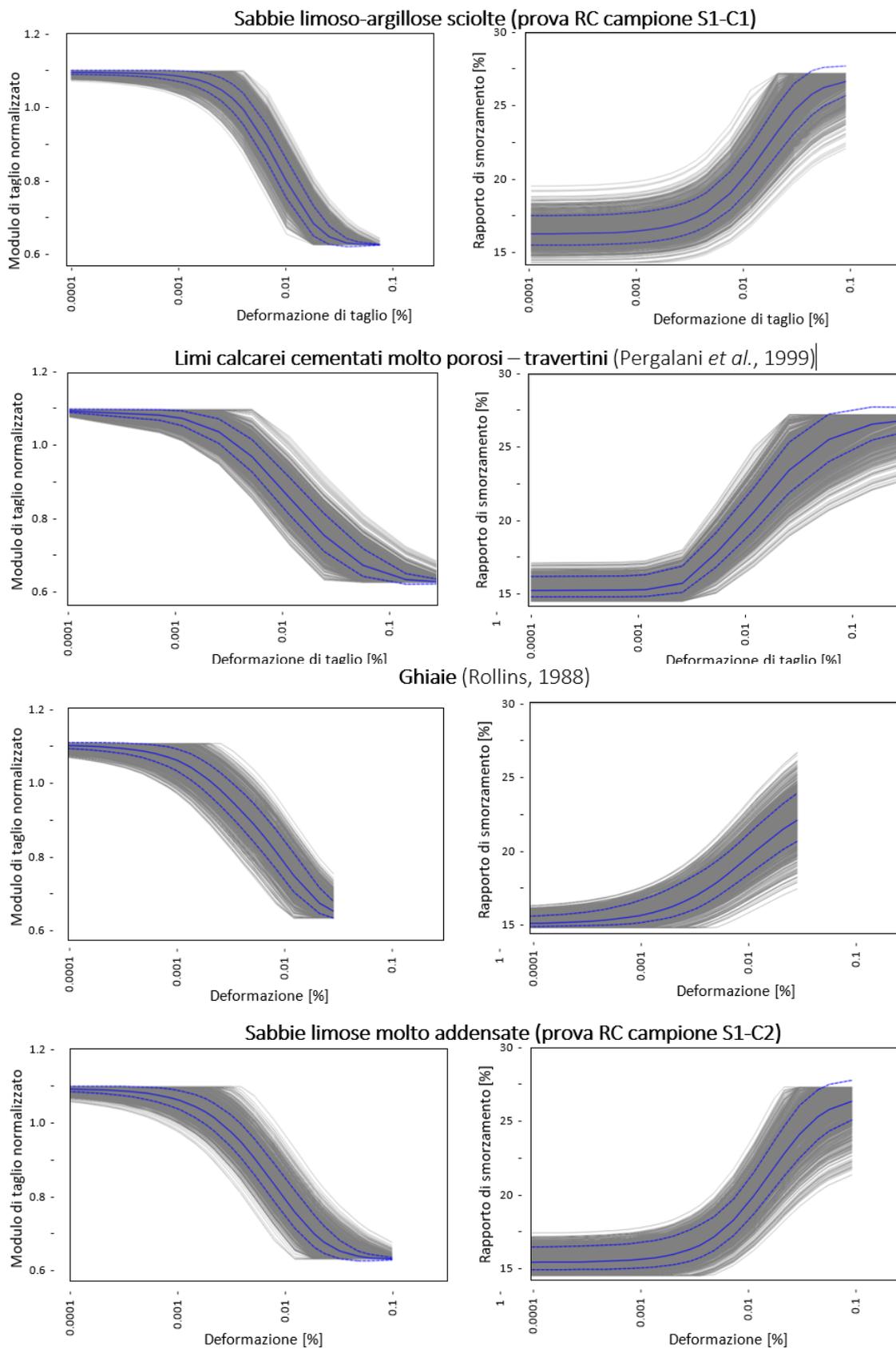


Figura 5.7 - Campo di variabilità delle curve dei terreni

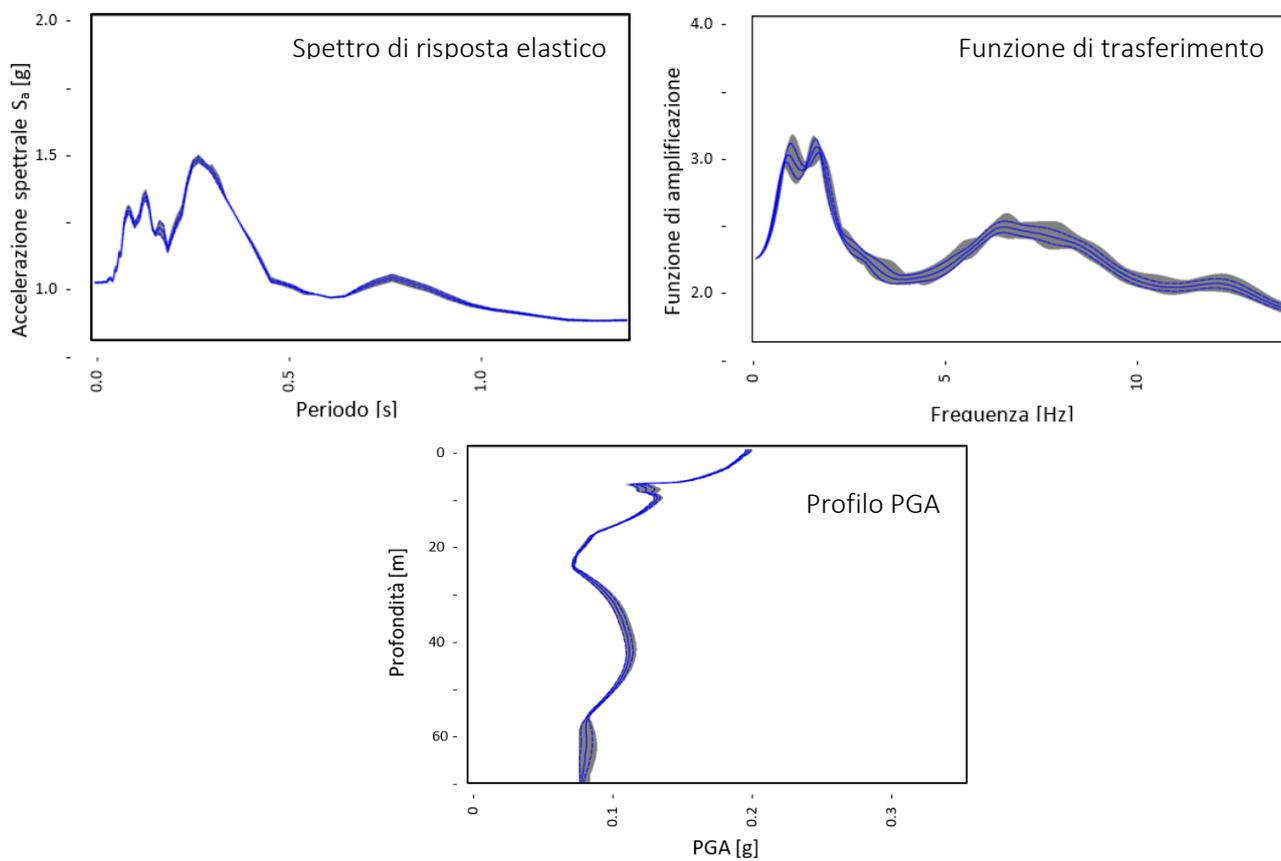


Figura 5.8 - Influenza della profondità del basamento sismico sulla RSL per il caso considerato

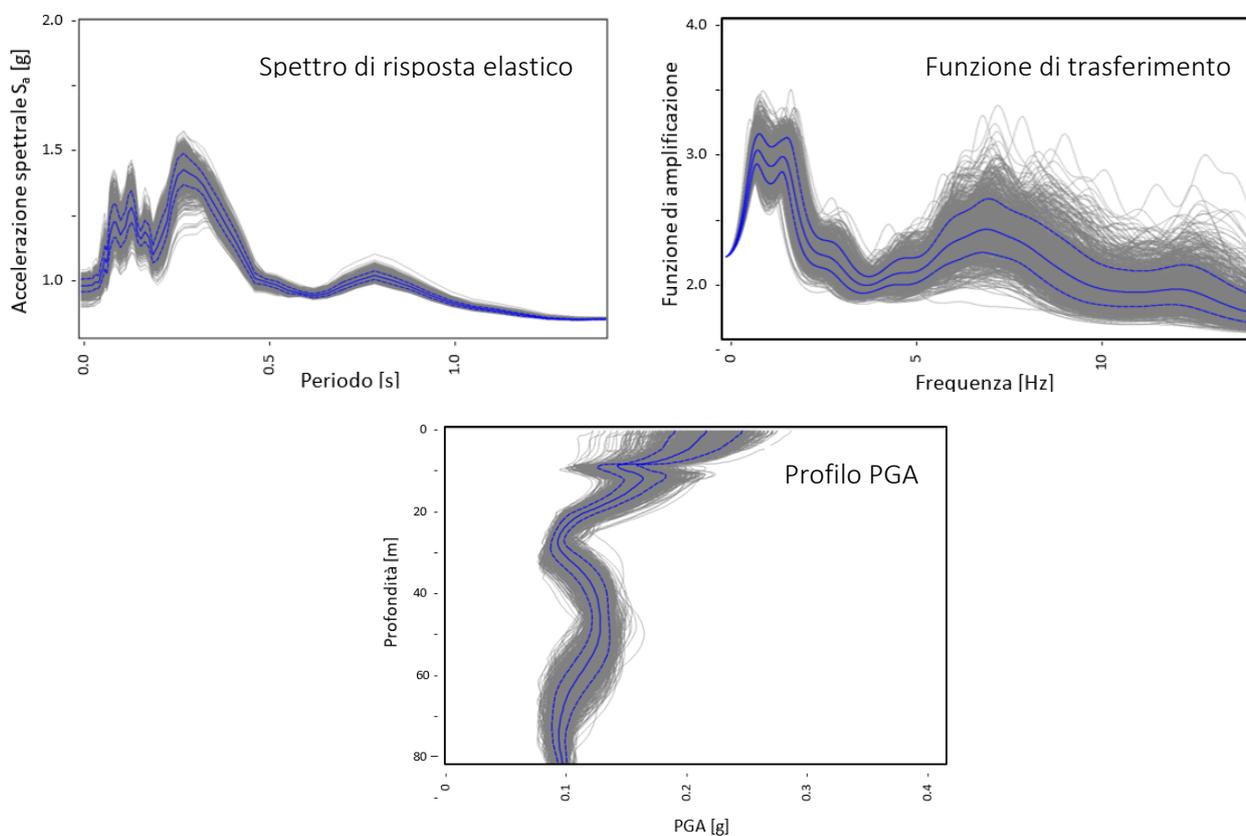


Figura 5.9 - Influenza del profilo di  $V_s$  sulla RSL per il caso considerato

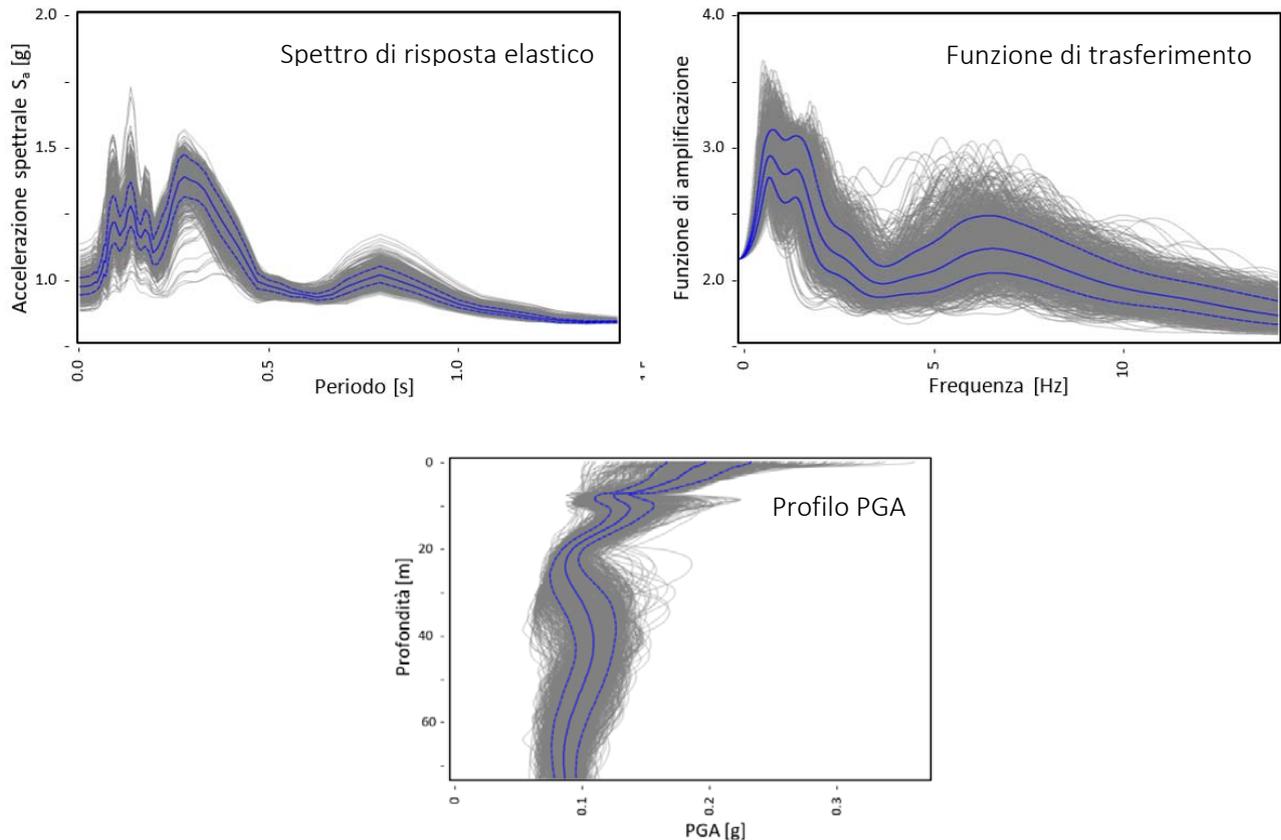


Figura 5.10 - Influenza della variabilità delle curve di rigidezza e smorzamento dei diversi materiali sulla RSL per il caso considerato

#### 5.5.4 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 Madiai et al. (2017)<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Madiai, 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.

### 5.6 Criteri e modalità operative per la perimetrazione delle cartografie di livello 3

Il presente capitolo tratta le procedure da adottare una volta eseguite le analisi di risposta sismica locale in assetto mono (a cura del professionista) o bidimensionale (a cura del GLSTS), al fine di rappresentare i risultati corrispondenti nell'ambito della carta di microzonazione di livello 3 (Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni, Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica 2021).

Le analisi di risposta sismica locale consentono di avere a disposizione una serie di parametri di output (spettri di risposta elastici medi e relativi fattori di amplificazione per ogni nodo di analisi, con riferimento ai vari periodi di ritorno scelti) ubicati lungo le sezioni di analisi e/o in corrispondenza di punti di taratura opportunamente scelti nell'ambito del territorio in esame.

I risultati relativi ai fattori di amplificazione dovranno essere puntualmente riportati su base cartografica al fine di realizzare la carta di microzonazione sismica di livello 3 con le seguenti precisazioni:

- per l'estrapolazione areale del dato, nei settori dell'area di studio non coperti dalle sezioni geologico-tecniche e, quindi, sprovvisti di dati di output delle analisi numeriche, si dovrà forzatamente ricorrere ad estrapolazione areale basata su valutazioni su base esperta. Tale processo, di per sé estremamente delicato ed esposto alla soggettività del soggetto realizzatore, deve essere effettuato mediante l'ausilio combinato della cartografia geologico-technica e della cartografia MOPS;
- è sempre da tenere in conto che in linea di massima può esistere una correlazione tra le microzone relative ai due livelli di approfondimento (1 e 3), sebbene questo processo di correlazione (nell'ambito dell'estensione del dato) debba essere effettuato in maniera automatica ma doverosamente critica;
- quindi nella redazione di studi di MS3 è possibile prevedere un'estrapolazione areale dei risultati basata principalmente sugli esiti delle analisi di RSL, con successivo controllo del risultato in riferimento all'estensione ed alla distribuzione delle MOPS e delle indagini di esplorazione del sottosuolo disponibili. Si tenga presente, però che nel caso siano presenti pochi dati di output (aspetto non positivo per l'esito dello studio e, quindi, da evitare in fase di programmazione delle analisi) non conviene operare un'estrapolazione areale svincolata dalle MOPS. Converrà, invece, rispettare i limiti delle microzone omogenee o, se necessario, operare una suddivisione nell'ambito della stessa MOPS in termini di amplificazione.

Lo schema logico sul quale si basa l'estrapolazione areale dei dati di amplificazione è indicativamente il seguente:

- rappresentazione su mappa di tutti i punti di output delle modellazioni dinamiche effettuate (sia 1-D che 2-D), con il relativo fattore di amplificazione;
- individuazione del contesto sismostratigrafico alla base di ogni valore di FA desunto;
- identificazione sulle cartografie tematiche esistenti (in particolare geologico-techniche e MOPS) di analoghe condizioni sismostratigrafiche su aree non coperte da analisi di risposta sismica locale (Figura 5.11);

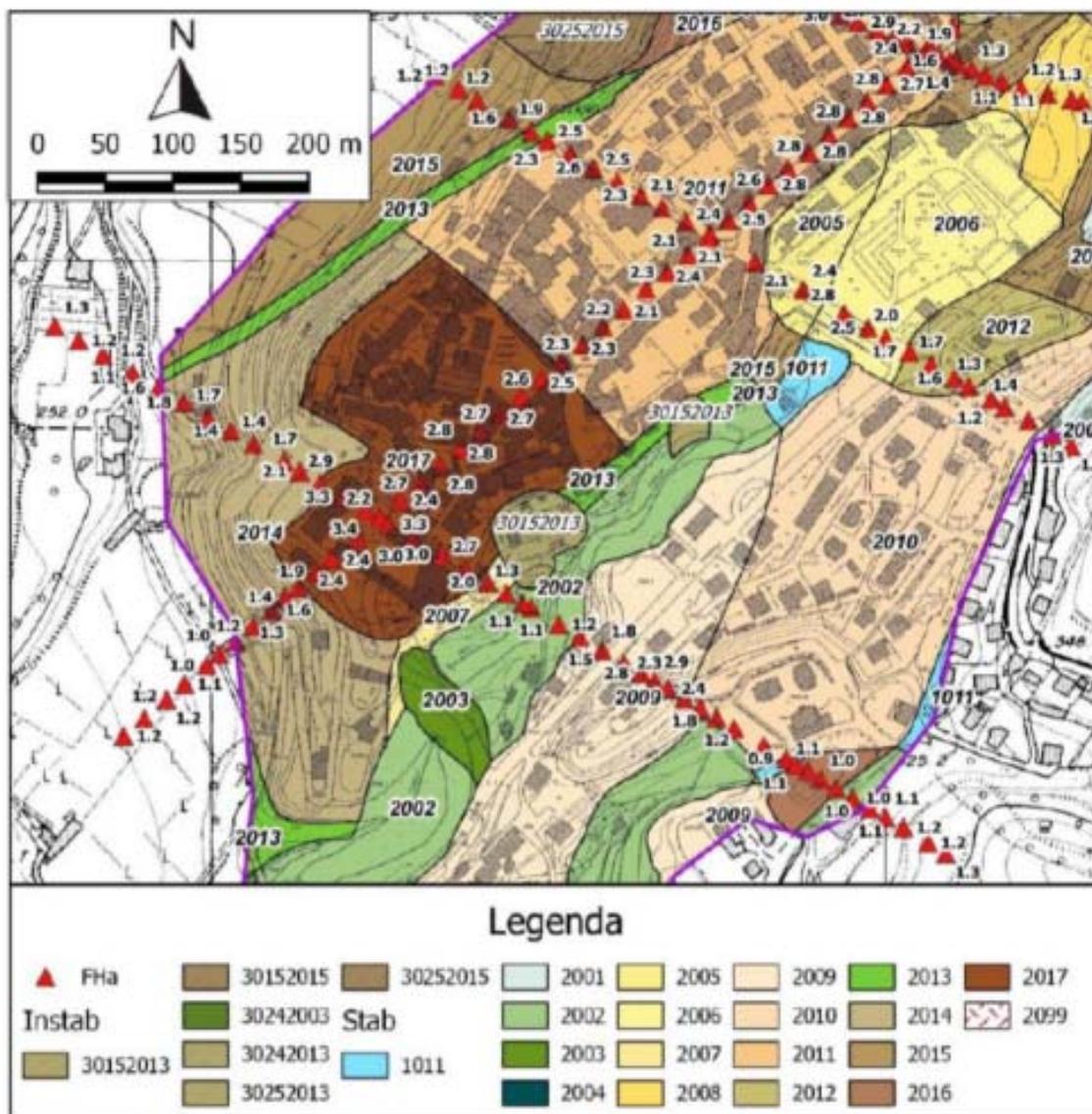


Figura 5.11 - Sovrapposizione dei valori di FA0105 con le MOPS individuate nello studio di MSI (Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni, Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica 2021).

- se in tali aree sono presenti, comunque indagini sismiche attive e/o passive è opportuno, nel processo di estrapolazione, tener conto dei risultati di tali indagini;
- raggruppamento di situazioni tipologiche ed amplificative simili mediante la discretizzazione dell'area in classi distinte da differenti intervalli di FA0105;
- stima, in corrispondenza delle microzone individuate al punto precedente, dei fattori di amplificazione richiesti dagli Standard nazionali e regionali (FA0105, FA0408 e FA0711);
- rappresentazione della cartografia prodotta mediante software operante in ambiente GIS;
- calcolo degli spettri medi per ogni microzona individuata nella MS3.

## **Allegato 1 - Indice della relazione illustrativa dello studio di microzonazione sismica di livello 2/3**

### Introduzione

#### 1.1. Finalità degli studi

Riferimenti normativi.

#### 1.2. Descrizione generale dell'area comunale

Inquadramento geografico e altimetrico

#### 1.3. Definizione dei documenti di base utilizzati nello studio

Cartografie, foto aeree, immagini da satellite, archivi consultati (fonti di acquisizione di dati geognostici), studi di riferimento (PSC, PPC, ecc.), articoli scientifici.

#### 1.4. Aree da sottoporre agli studi di MS

Descrizione delle aree interessate dallo studio di MS, con distinzione delle porzioni territoriali studiate mediante approfondimenti di livello 3 (se presenti).

### 2. Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

#### 2.1. Sismicità storica dell'area di studio

Definizione del catalogo di sito per il Comune studiato (Database Macrosismico Italiano 2015

INGV: <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI15>), eventualmente integrato da notizie inedite derivanti da fonti storiche locali relative a risentimenti di terremoti storici noti e/o sconosciuti alla letteratura sismologica. Descrizione sintetica dei maggiori terremoti risentiti nell'area di studio.

#### 2.2. Sismicità recente dell'area di studio

Distribuzione della sismicità recente (Banche dati INGV; CPTI: <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI/>; ISIDE: <http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/index.jsp>; CSII.1: <http://csi.rm.ingv.it/>. Banche dati regionali).

#### 2.3. Pericolosità sismica di base

Carte di pericolosità di base (<http://essel-gis.mi.ingv.it/>), spettri di risposta di riferimento, registrazioni accelerometriche (<http://itaca.mi.ingv.it/>), faglie sismogenetiche (<http://diss.rm.ingv.it/diss/>).

### 3. Assetto geologico e geomorfologico dell'area

Valutazione dell'adeguatezza della Carta Geologica e Geomorfologica pregressa per le finalità della MS2/3 e descrizione degli eventuali approfondimenti ed adeguamenti apportati ai fini della ridefinizione del quadro stratigrafico, strutturale e morfologico dell'area di studio <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Ai fini della verifica da parte del GLSTS della adeguatezza della Carta Geologica e Geomorfologica predisposta come base per la redazione della Carta Geologico Tecnica, gli affidatari devono inderogabilmente, in via preliminare, consegnare al GLSTS la Carta Geologica e Geomorfologica aggiornata prima della preparazione della Carta Geologico Tecnica.

### 3.1. Inquadramento geologico

Inquadramento geologico generale, assetto tettonico e neotettonico; con riferimenti ai dati di base considerati (cartografia, sezioni geologiche, studi e articoli scientifici).

### 3.2. Assetto geomorfologico

Inquadramento geomorfologico generale dell'area di studio con particolare riferimento agli elementi morfologici potenzialmente soggetti ad amplificazioni topografiche.

### 3.3. Assetto stratigrafico

Descrizione delle unità stratigrafiche affioranti con relative caratteristiche litotecniche corredate da schemi riassuntivi (schema dei rapporti stratigrafici, tabelle di sintesi). Descrizione litostratigrafica degli affioramenti geologici ritenuti più rappresentativi (per estensione dell'affioramento e per caratteristiche lito-strutturali) corredate da materiale fotografico dettagliato (commentato anche graficamente).

### 3.4. Elementi tettonici

Descrizione degli elementi strutturali dell'area di studio con particolare riguardo per eventuali faglie attive e capaci (FAC) e potenzialmente attive e capaci (FPAC).

### 3.5. Considerazioni finali sull'architettura stratigrafica e sull'assetto morfologico e strutturale

Informazioni e considerazioni utili ai fini della valutazione delle criticità geologiche che insistono nelle aree investigate, con particolare riferimento ad eventuali aree oggetto di approfondimenti; indicazioni funzionali alla definizione della risposta sismica locale (es. notizie storiche su effetti cosismici a seguito di terremoti passati, interventi di stabilizzazione effettuati in aree in frana o in aree caratterizzate da litologie con caratteristiche geotecniche scadenti).

## 4. Dati geotecnici e geofisici

### 4.1. Dati pregressi

Schematizzazione dei dati pregressi acquisiti ad integrazione dei dati già disponibili derivanti dallo studio di MS di livello 1. Indicazione degli archivi e banche dati consultate per l'acquisizione dei dati pregressi.

### 4.2. Dati acquisiti ex-novo

Descrizione del piano delle indagini. Schematizzazione dei dati acquisiti ex-novo. Descrizione delle tecniche di acquisizione e modalità di elaborazione dei nuovi dati, attrezzature utilizzate e modalità di esecuzione delle prove (tale indicazione va fornita per ogni tipologia di indagine geognostica, geotecnica e geofisica acquisita ex-novo mediante un sotto paragrafo dedicato).

## 5. Modello del sottosuolo finalizzato alla MS

### 5.1. Unità geologico-tecniche: definizione e parametrizzazione

Definizione del modello geologico e geologico-tecnico di sottosuolo. Modalità di integrazione dei dati raccolti. Definizione e schematizzazione delle unità geologico-tecniche con sintesi delle

principali proprietà fisiche, meccaniche (statiche e dinamiche) e geofisiche rilevanti per la modellazione della risposta sismica locale, tratte dalla letteratura e dalle elaborazioni realizzate dal GLSTS (è richiesta la realizzazione di tabelle riassuntive).

## 5.2. Sezioni geologico-tecniche

Descrizione delle sezioni geologico-tecniche (in numero non inferiore a 2) rappresentative della complessità del sottosuolo dell'area investigata ed orientate in modo da evidenziare tutti gli elementi che possono indurre effetti locali di amplificazione (ad es., valli e scarpate sepolte, oppure zone con intensa fratturazione). In particolare, dovranno essere evidenziati e descritti i seguenti elementi:

- Andamento dell'interfaccia substrato geologico-coperture;
- Discontinuità sismiche e litostratigrafiche, morfologie sepolte e di superficie;
- Spessori significativi delle unità geologico-tecniche omogenee;
- Zone interessate da instabilità (frane, faglie attive e capaci, liquefazione, cedimenti);
- Elementi tettonici e strutturali rilevanti;
- Andamento della superficie piezometrica.

## 6. Interpretazioni e incertezze

Distribuzione dei dati: rappresentatività e incertezze (es., evidenziare litotipi per i quali si dispone di dati diretti e quelli per i quali si è fatto ricorso a dati di letteratura, trattamento statistico dei dati meccanici se la numerazione del campione lo consente). Limiti del modello di sottosuolo.

## 7. Metodologie di elaborazione e risultati

### 7.1. Zone stabili suscettibili di amplificazione

#### 7.1.1. Scelta dell'input sismico (fornito dal GLSTS)

Descrivere la metodologia di studio impiegata evidenziando le procedure di selezione dell'input sismico in relazione alla pericolosità sismica di base. È richiesta una tabella di sintesi degli accelerogrammi scelti con le caratteristiche rilevanti (magnitudo, distanza, condizioni di sottosuolo, fattori di scala) e i grafici di confronto tra lo spettro medio degli accelerogrammi selezionati e lo spettro di riferimento.

#### 7.1.2. Simulazioni numeriche 1-D

Modalità di esecuzione delle simulazioni numeriche con riferimento alle metodologie di calcolo e ai software utilizzati. Modello di calcolo adottato con indicazione delle condizioni al contorno, modalità di applicazione dell'input, parametri rilevanti per la modellazione numerica (es., numero di iterazioni per analisi lineare equivalente, ecc.).

#### 7.1.3. Risultati delle simulazioni 1-D

I risultati delle analisi numeriche monodimensionali (1D) devono essere espressi in termini di storie temporali dell'accelerazione orizzontale in superficie e relativi spettri di risposta (smorzamento strutturale 5%) di output, grafici che illustrano l'andamento con la profondità di parametri rappresentativi (e.g., tensione tangenziale massima, deformazione tangenziale massima, modulo di taglio, fattore di smorzamento). Per ciascuna verticale analizzata, la risposta sismica locale verrà parametrizzata in termini di amplificazione stratigrafica (quantificata in termini di fattori di

amplificazione dell'accelerazione massima FA o dell'intensità di Housner FH nel campo di periodi di interesse) e di spettri risposta elastici al 5% di smorzamento delle strutture.

#### 7.1.4. Simulazioni numeriche 2D (a cura del GLSTS)

Modalità di esecuzione delle simulazioni numeriche con riferimento alle metodologie di calcolo e ai software utilizzati. Modello di calcolo adottato con indicazione delle condizioni al contorno, modalità di applicazione dell'input, parametri rilevanti per la modellazione numerica (es., numero di iterazioni per analisi lineare equivalente, ecc.).

#### 7.1.5. Risultati delle simulazioni 2D (a cura del GLSTS)

I risultati delle analisi numeriche bidimensionali (2D) devono essere espressi in termini di storie temporali dell'accelerazione orizzontale in superficie e relativi spettri di risposta (smorzamento strutturale 5%) di output. Per ciascun nodo di restituzione, la risposta sismica locale verrà parametrizzata in termini di amplificazione (quantificata in termini di fattori di amplificazione dell'accelerazione massima FA o dell'intensità di Housner FH nel campo di periodi di interesse) e di spettri risposta elastici al 5% di smorzamento delle strutture.

### 7.2. Zone instabili

#### 7.2.1. Faglie attive e capaci (FAC)

##### 7.2.1.1. Analisi dei dati

Analisi dei dati di letteratura e di quelli acquisiti ex-novo (analisi e interpretazioni aerofotogrammetriche, rilievi geologici, indagini geofisiche e geognostiche, livellazioni topografiche di dettaglio).

##### 7.2.1.2. Risultati

Definizione delle Zone di Attenzione per le Faglie Attive e Capaci ( $Z_{AFAC}$ )

#### 7.2.2. Liquefazioni (LQ)

##### 7.2.2.1 Suscettibilità dei terreni alla liquefazione

Analisi dei dati di letteratura e di quelli acquisiti ex-novo (assetto stratigrafico, idrogeologia, parametri sismologici, segnalazioni di fenomeni di liquefazione avvenuti in passato). La suscettibilità dei terreni alla liquefazione deve essere valutata sulla base dei risultati di prove in sito (e.g., CPT, SPT, etc.) e di prove di laboratorio (caratteristiche fisiche quali distribuzione granulometria, limiti di Atterberg, contenuto d'acqua, etc.). Tali analisi deve essere svolta per ognuna delle verticali investigate, possibilmente scelte in numero proporzionato all'estensione dell'area ed alla variabilità delle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche dei depositi.

##### 7.2.2.2 Risultati

Definizione di Zone di Attenzione per la Liquefazione ( $Z_{ALQ}$ )

#### 7.2.3. Instabilità di versante sismoindotte (FR)

##### 7.2.3.1 Analisi dei dati

Analisi dei dati di letteratura e di quelli acquisiti ex-novo (analisi e interpretazioni aerofotogrammetriche, rilievi geologici, indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche, livellazioni topografiche di dettaglio, misure inclinometriche, misure di pressione interstiziale, etc.).

### 7.2.3.2 Risultati

Perimetrazione delle aree in frana; in presenza di frane attive, ove sussista la disponibilità di dati, riportare informazioni su: volumi potenzialmente instabili, entità e velocità dei movimenti, distribuzione del regime delle pressioni interstiziali, parametri di resistenza al taglio. Criticità e grado d'incertezza dei risultati.

### 7.2.4. Instabilità da sprofondamento e cedimento differenziale (CD)

#### 7.2.3.1 Analisi dei dati

Analisi dei dati di letteratura e di quelli acquisiti ex-novo (analisi e interpretazioni aerofotogrammetriche, rilievi geologici, indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche relative ad evidenze di potenziale suscettibilità a fenomeni di sprofondamento sismoindotto.

#### 7.2.2.2 Risultati

Definizione di Zone di Attenzione per Cedimenti Differenziali (Z<sub>ACD</sub>)

## 8. Elaborati cartografici <sup>(2)</sup>

### 8.1. Carta delle indagini (CI)

Descrizione della distribuzione delle indagini, distinguendole tra pregresse e realizzate ex-novo; realizzazione tabella schematica riassuntiva per tipologia e quantità di indagini.

#### 8.1.1 Carta delle frequenze naturali dei terreni

Criteri adottati per la costruzione della carta delle frequenze; descrizione delle possibili interpretazioni geologico stratigrafiche associabili alle frequenze fondamentali rilevate con esempi illustrativi; tabella riassuntiva con riportati i valori di frequenza ed ampiezza dei picchi H/V per ogni misura.

### 8.2. Carta Geologico Tecnica per la MS (CGT\_MS)

Descrizione e classificazione dei materiali che costituiscono le unità di substrato geologico e dei terreni di copertura nonché delle geometrie dei loro contatti. Segnalare la presenza di aree con coperture di spessore inferiore a 3 m e non cartografabili. Descrizione delle tipologie di instabilità e degli elementi lineari e puntuali che si ritengono utili per gli studi di MS. Indicazione nel campo carta dell'ubicazione delle tracce di sezione geologico-tecnica ritenute più significative ed esplicative.

### 8.3. Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)

Descrizione delle zone stabili, stabili suscettibili di amplificazioni locali e instabili; nonché degli elementi superficiali (orli di scarpate, creste morfologiche) e sepolti (faglie, paleovalli, cavità). Riportare gli schemi dei rapporti litostratigrafici (colonne stratigrafiche) per le singole microzone nonché i profili topografici in grado di condizionare la risposta sismica; illustrare le differenze della nuova carta delle MOPS rispetto a quella realizzata nel livello 1.

---

<sup>(2)</sup> Per maggiori dettagli su struttura e contenuto di questo capitolo si consultino le indicazioni degli Standard di Rappresentazione ed Archiviazione informatica 4.2 – pagg. 50-51

#### 8.4. Carte di Microzonazione Sismica (MS) (con approfondimenti) <sup>(3)</sup>

Descrizione, per le aree con approfondimenti di livello 2, degli elementi che hanno concorso alla scelta degli abachi per il calcolo dei fattori di amplificazione FA e FV relativi agli intervalli di frequenza 2-10.00 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); resoconto dei risultati ottenuti nelle stime di questi fattori.

Descrizione degli accelerogrammi calcolati in superficie, degli spettri di risposta e dei fattori di amplificazione per tutte le microzone omogenee in prospettiva sismica per le quali è stato condotto un approfondimento di livello 3. Definizione della categoria di sottosuolo da NTC e indicazione del valore di  $V_{SH}$  per tutte le microzone omogenee in prospettiva sismica. Per le diverse microzone, indicazione di eventuali amplificazioni del moto sismico che possono essere indotte da particolari condizioni geologiche e geomorfologiche locali.

#### 8.5. Commenti finali e criticità

#### 9. Confronto con la distribuzione dei danni degli eventi passati

Se disponibili, confronti con la distribuzione dei danni per eventi passati, note sulla vulnerabilità delle strutture coinvolte.

#### 10. Bibliografia

Riportare tutti i riferimenti scientifici e tecnici consultati per la redazione della relazione e per la realizzazione dello studio.

#### 11. Allegati

11.1. Carta delle indagini in scala 1:5.000

11.2. Carta delle frequenze naturali dei terreni in scala 1:5.000

11.3. Carta Geologico-Tecnica per la MS (CGT\_MS) in scala 1:5.000

11.4. Sezioni geologico-tecniche in scala 1:5.000

11.5. Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) in scala 1:5.000

11.6. Carte di Microzonazione Sismica (MS) (con approfondimenti\*) in scala 1:5.000

11.7 Accelerogrammi calcolati in superficie

11.8. Spettri di risposta in accelerazione

---

<sup>(3)</sup> La specificazione “con approfondimenti” va aggiunta nel caso in cui lo studio di Microzonazione Sismica sia stato condotto con livello di approfondimento 3.