

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

**Protocolli di acquisizione  
ed elaborazione dati relativi  
alle attività di Microzonazione  
Sismica di livello 3  
in Italia Centrale**

2020

**CONVENZIONE**

- Commissario straordinario del Governo per la ricostruzione sisma 2016
- Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni

**BOOKMS**

Collana a cura del **Centro MS**

**CNR Edizioni**

STRATEGIE DI MITIGAZIONE



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

**Protocolli di acquisizione  
ed elaborazione dati relativi  
alle attività di Microzonazione  
Sismica di livello 3  
in Italia Centrale**

**CONVENZIONE**

- Commissario straordinario del Governo per la ricostruzione sisma 2016
- Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni

**BOOKMS**

Collana a cura del **Centro MS**

**CNR Edizioni**

STRATEGIE DI MITIGAZIONE

#### CONVENZIONE TRA

- Commissario straordinario del Governo per la ricostruzione sisma 2016
- Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche (per il Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni).

#### Supporto e coordinamento tecnico-scientifico per le attività di microzonazione sismica dei territori colpiti dagli eventi sismici a far data dal 24 agosto 2016.

#### RESPONSABILI SCIENTIFICI

- Massimiliano Moscatelli
- Francesco Stigliano

#### GRUPPO DI LAVORO

Dario Albarello  
*Presidente del Comitato di Indirizzo del CentroMS UNISI-DSFTA*

Gabriele Scarascia Mugnozza  
*Presidente del Comitato di Indirizzo del CentroMS, UNIROMA1-DST (da gennaio 2015 a febbraio 2018)*

Paolo Messina  
*CNR IGAG direttore fino al 30 novembre 2018*

Massimiliano Moscatelli  
*Responsabile scientifico del CentroMS, CNR IGAG*

Francesco Stigliano  
*CNR IGAG*

Iolanda Gaudiosi  
*CNR IGAG*

Edoardo Peronace  
*CNR IGAG*

Maria Chiara Cacioli  
*CNR IGAG*

Carolina Fortunato  
*CNR IGAG*

Sara Amoroso  
*UNICH-PE-INGEO - INGV*

Salomon Hailemichael  
*ENEA*

#### ATTIVITÀ ISTRUTTORIA DEGLI STUDI MS

Monia Coltella  
*CNR IGAG*

Andrea Pietrosante  
*CNR IGAG*

#### COORDINATORI UNITÀ OPERATIVE

Dario Albarello  
*UNISI-DSFTA*

Marco Amanti  
*ISPRA*

Stefano Catalano  
*UNICT-DSBGA*

Giuseppe Cosentino  
*CNR IGG*

Vincenzo Di Fiore  
*CNR ISPC*

Giuseppe Lanzo  
*UNIROMA1-DISG*

Lucia Luzi  
*INGV*

Salvatore Martino  
*UNIROMA1-DST*

Alessandro Pagliaroli  
*UNICH-PE-INGEO*

Floriana Pergalani  
*POLIMI-DICA*

Enrico Priolo  
*OGS*

#### SEGRETERIA TECNICA DI SUPPORTO

Federica Polpetta  
*CNR IGAG*

Silvia Giallini  
*CNR IGAG*

#### SEGRETERIA AMMINISTRATIVA

Francesca Argiolas  
*CNR IGAG*

Marco Gozzi  
*CNR IGAG*

Martina De Angelis  
*CNR IGAG*

Alessandro Leli  
*CNR IGAG*

Patrizia Mirelli  
*CNR IGAG*

Simona Rosselli  
*CNR IGAG*

#### COORDINAMENTO EDITORIALE

Cristina Di Salvo  
*CNR IGAG*

Federica Polpetta  
*CNR IGAG*

#### PROGETTO GRAFICO E IMPAGINAZIONE

Claudia Illuzzi

#### TRADUZIONE SEZIONE INGLESE

Paul David Blackmore



## Consiglio Nazionale delle Ricerche

La riproduzione, con qualsiasi procedimento, della presente opera o di parti di essa, deve essere preventivamente autorizzata dall'Editore.

**CODICE ISBN** *edizione cartacea*: 978 88 8080 407 9 – *edizione digitale*: 978 88 8080 408 6

© Cnr Edizioni, 2020: Piazzale Aldo Moro 7 – 00185 Roma – [www.edizioni.cnr.it](http://www.edizioni.cnr.it) • [bookshop@cnr.it](mailto:bookshop@cnr.it) • 06 49932287

**DOI:** 10.32053/PROTOCOLLI\_ACQUISIZIONE\_ED\_ELABORAZIONE\_DATI\_RELATIVI\_ALLE\_ATTIVITA\_DI\_MICROZONAZIONE\_SISMICA\_LIVELLO3\_ITALIA\_CENTRALE-2020

[https://doi.org/10.32053/PROTOCOLLI\\_ACQUISIZIONE\\_ED\\_ELABORAZIONE\\_DATI\\_RELATIVI\\_ALLE\\_ATTIVITA\\_DI\\_MICROZONAZIONE\\_SISMICA\\_LIVELLO3\\_ITALIA\\_CENTRALE-2020](https://doi.org/10.32053/PROTOCOLLI_ACQUISIZIONE_ED_ELABORAZIONE_DATI_RELATIVI_ALLE_ATTIVITA_DI_MICROZONAZIONE_SISMICA_LIVELLO3_ITALIA_CENTRALE-2020)

Quest'opera è distribuita con Licenza Creative Commons Attribuzione 4.0 Internazionale



Per citare il presente testo, si raccomanda di utilizzare la seguente dicitura:

**Gruppo di lavoro Protocolli di acquisizione ed elaborazione dati relativi alle attività di Microzonazione Sismica di livello 3 in Italia Centrale, Roma, 2020.**

# sommario

<b>PREMESSA</b>	<b>VI</b>
Dario Albarello e Gabriele Scarascia Mugnozza	p. VI
Massimiliano Moscatelli e Francesco Stigliano	p. VIII

## 01

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>X</b>
---------------------	----------

## 02

<b>INDAGINI GEOLOGICHE E GEOMORFOLOGICHE</b>	<b>4</b>
2.1 Premessa	p. 5
2.2 Il substrato	p. 7
2.3 Terreni di Copertura (TC)	p. 10
2.4 Elementi morfologici superficiali e sepolti pertinenti alla pericolosità sismica	p. 11
2.5 Elementi idrogeologici ed instabilità di versante	p. 11
2.6 Sezioni geologiche e geologico-tecniche	p. 13

## 03

<b>LE INSTABILITÀ</b>	<b>16</b>
3.1 Premessa	p. 17
3.2 Definizione delle zone instabili secondo le Linee Guida ICMS	p. 19
3.3 Zone di Attenzione per le Frane ( $Z_{A_{FR}}$ )	p. 19
3.4 Zone di Attenzione per la Liquefazione ( $Z_{A_{LQ}}$ )	p. 22
3.5 Zone di Attenzione per le Faglie Attive e Capaci ( $Z_{A_{FAC}}$ )	p. 24
3.6 Instabilità da sprofondamento	p. 26
3.7 Sintesi operativa	p. 26

## 04

<b>INDAGINI GEOFISICHE DI SUPERFICIE</b>	<b>28</b>
4.1 Premessa	p. 29
4.2 La pianificazione delle indagini e l'uso del metodo dei rapporti spettrali (HVSR)	p. 29
4.3 La determinazione del profilo di Vs: tecnica MASW	p. 31
4.4 Le incertezze	p. 33

## 05

**INDAGINI IN SITU E PROVE DOWN-HOLE****34**

5.1	Premessa	p. 35
5.2	Scelta del sito di prova	p. 35
5.3	Precisazioni di carattere generale	p. 36
5.4	Modalità tecniche esecutive dei sondaggi geognostici	p. 36
5.4.1	<i>Sondaggi geognostici</i>	p. 36
5.4.2	<i>Fluidi di circolazione</i>	p. 37
5.4.3	<i>Rilievo della falda</i>	p. 38
5.4.4	<i>Prelievo, conservazione e trasporto dei campioni</i>	p. 38
5.4.5	<i>Cassette</i>	p. 39
5.4.6	<i>Determinazione speditiva degli indici di resistenza su carote di terreni coesivi</i>	p. 40
5.4.7	<i>Riempimento dei fori di sondaggio in caso di mancato condizionamento</i>	p. 40
5.5	Prove penetrometriche	p. 40
5.5.1	<i>Prove penetrometriche dinamiche SPT</i>	p. 40
5.5.2	<i>Prove penetrometriche statiche CPT</i>	p. 42
5.5.3	<i>Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)</i>	p. 43
5.5.4	<i>Prove penetrometriche statiche con cono sismico (SCPT)</i>	p. 43
5.6	Posa in opera di tubi per prospezioni sismiche down-hole	p. 44
5.7	Documentazione	p. 46
5.8	Prospezioni sismiche in foro down-hole: modalità tecniche esecutive	p. 48
5.8.1	<i>Normative e specifiche di riferimento</i>	p. 48
5.8.2	<i>Caratteristiche delle attrezzature</i>	p. 48
5.8.3	<i>Controlli preliminari</i>	p. 49
5.8.4	<i>Modalità tecniche esecutive della prova DH</i>	p. 49
5.8.5	<i>Documentazione dei risultati della prova DH</i>	p. 50

## 06

**MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE IN CONFIGURAZIONE 1D****52**

6.1	Premessa	p. 53
6.2	Modello di analisi e scelta del codice di calcolo	p. 53
6.3	Gestione delle incertezze nella stima della RSL	p. 54
6.4	Parametri descrittivi della variabilità	p. 55
6.5	Implementazione della variabilità del profilo di Vs nelle analisi di RSL	p. 58
6.6	Calcolo dei valori di FA rappresentativi della singola microzona	p. 60
6.7	Effetti morfologici	p. 61
6.8	La regolarizzazione degli spettri di risposta	p. 63
6.9	Esempio: il caso di S. Gimignano (SI)	p. 64

## 07

**MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE IN CONFIGURAZIONE 2D****72**

7.1	Premessa	p. 73
7.2	Scelta del modello di analisi e del codice di calcolo	p. 74
7.3	Scelta delle sezioni e delle verticali da analizzare	p. 75
7.4	Estensione laterale delle sezioni per la modellazione numerica 2D	p. 78
7.5	Definizione del substrato sismico per le simulazioni numeriche	p. 79

7.6	Discretizzazione dei modelli	p. 79
7.7	Validazione modello di sottosuolo in base ai rapporti spettrali	p. 79
7.8	Definizione degli accelerogrammi e delle caratteristiche di non linearità dei terreni	p. 80
7.9	Risultati	p. 81
7.10	Bibliografia di riferimento	p. 82

## 08

### ANALISI PRELIMINARI DI STABILITÀ DELLE ZONE DI ATTENZIONE PER FRANA NEGLI STUDI MS

84

8.1	Premessa ed indicazioni generali	p. 85
8.2	Frane rotazionali e traslative in terra	p. 86
8.2.1	<i>Geometria del pendio</i>	p. 86
8.2.2	<i>Zonazione litotecnica</i>	p. 86
8.2.3	<i>Geometria della superficie di scivolamento</i>	p. 86
8.2.4	<i>Presenza della falda</i>	p. 86
8.2.5	<i>Analisi preliminari di stabilità</i>	p. 86
8.2.6	<i>Analisi di stabilità in condizioni pseudo-statiche e dinamiche</i>	p. 89
8.3	Debris flows	p. 89
8.3.1	<i>Schema di lavoro</i>	p. 89
8.3.2	<i>Valutazione</i>	p. 90
8.4	Frane in roccia	p. 91
8.4.1	<i>Situazioni di instabilità su pareti rocciose</i>	p. 91
8.4.2	<i>Frane su versanti rocciosi</i>	p. 93
8.4.3	<i>Rilievi remoti</i>	p. 93
8.5	Bibliografia di riferimento	p. 95

## 09

### ALLEGATI

96

allegati cap. 3.1	Scheda di raccolta dati per rilevamento coperture	p. 97
allegato cap. 3.2	Scheda di raccolta dati per rilievo geomeccanico	p. 98
allegato cap. 3.3	Scheda di raccolta dati per rilevamento frane	p. 99
allegato cap. 3.4	Riferimenti per la compilazione delle schede	p. 100
allegato cap. 4.1	Scheda metadati indagini HVSR	p. 106
allegato cap. 4.2	Scheda metadati indagini MASW	p. 108

**PREFAZIONE**

## A seguito della sequenza sismica

del centro Italia del 2016-2017, il 9 febbraio 2017 veniva emanato il Decreto Legge n. 8 con cui veniva attribuito al Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni (per brevità CentroMS) il ruolo di "supporto e coordinamento scientifico ai fini dell'omogeneità nell'applicazione degli indirizzi e dei criteri, nonché degli standard" per la predisposizione degli studi di microzonazione sismica di livello 3 nei territori dei comuni colpiti.

La successiva Ordinanza n. 24 del Commissario Straordinario per la ricostruzione Sisma 2016 confermava tale ruolo e formalizzava il rapporto tra il CentroMS e la Struttura Commissariale, nonché quelli con i comuni coinvolti, mediante un'apposita convenzione. A queste disposizioni hanno fatto seguito numerosi atti d'indirizzo tecnico-politico relativi agli sviluppi delle attività, nonché ai campi e alle modalità di applicazione concreta dei risultati conseguiti.

L'insieme dei provvedimenti normativi assunti a partire dal febbraio 2017 testimonia il ruolo fondamentale svolto dal CentroMS nelle attività di indagine e di analisi propedeutiche all'adozione di corretti e adeguati indirizzi, per la ricostruzione dei centri abitati, sia in campo urbanistico sia nella progettazione.

A questo riguardo è importante sottolineare come i soggetti fondatori del CentroMS avessero individuato fin dall'inizio, tra i quattro obiettivi costitutivi del Centro, quello relativo al "supporto tecnico-scientifico nei confronti di interlocutori istituzionali per la realizzazione e il coordinamento degli studi, anche nella fase della prima emergenza"; obiettivo che rappresenta ancor oggi uno dei tratti distintivi delle azioni del CentroMS.

Ebbene, quel ruolo propulsivo e di coordinamento degli studi di microzonazione sismica di livello 3, avviati su ben 138 Comuni ricadenti in 4 differenti Regioni, ha costituito per il CentroMS una sfida che è stata raccolta con grande impegno e spirito di servizio da parte di tutti i suoi componenti. Sono stati oltre 100 i ricercatori coinvolti, suddivisi in 14 unità operative, con attività di indagine organizzate dapprima secondo unità tematiche e successivamente focalizzate su aspetti specifici in relazione agli obiettivi prefissati in sede di ordinanze del Commissario, quali ad esempio approfondimenti e studi prototipali in zone di attenzione per cavità e instabilità di versante sismoindotte.

Anche le tempistiche sono state assai impegnative, prevedendo la consegna degli studi e dei successivi elaborati entro tempi molto ristretti, in modo da poter essere utilmente approvati e adottati per procedere con la ricostruzione dei centri abitati, laddove il livello di distruzione era pressoché totale, nonché la progettazione degli interventi di miglioramento/ adeguamento delle strutture danneggiate.

A tal fine, va sottolineato come, attraverso un lavoro di costante coordinamento e di continua verifica in itinere tra una molteplicità di attori istituzionali (struttura del Commissario, Regioni, Dipartimento della Protezione civile, professionisti e lo stesso CentroMS), l'enorme mole di lavoro sia stata svolta rispettando in larga misura le scadenze prefissate.

L'esperienza è stata nel complesso altamente formativa, soprattutto per i ricercatori

del CentroMS e per i liberi professionisti, in quanto ha consentito un continuo e proficuo scambio di conoscenze, nonché un confronto fecondo e costruttivo sui rispettivi metodi e approcci di indagine, pur se non sono mancate inevitabili difficoltà e alcune iniziali diffidenze.

Con questo volume, che fa parte della collana BookMS Manuali (download dal sito [www.centromicrozonazioneismica.it](http://www.centromicrozonazioneismica.it)), intendiamo raccogliere, organizzare e mettere in condivisione i principali elementi e insegnamenti tratti dall'intensa attività svolta in questi ultimi due anni. In particolare, sono riportate indicazioni utili alle attività di raccolta dati e relativa elaborazione per la realizzazione di carte di microzonazione sismica di livello3; si tratta di veri e propri protocolli per delineare procedure operative per la caratterizzazione delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), la delimitazione delle Zone di Attenzione e la valutazione della Risposta Sismica Locale all'interno delle MOPS. In tal senso, si vuole sottolineare una volta di più il decisivo ruolo svolto dagli studi di microzonazione sismica quale strumento di mitigazione del rischio sismico, non solo nelle fasi post-evento, ma soprattutto nell'ambito di una lungimirante strategia di prevenzione che privilegi l'adozione di corrette scelte in sede di pianificazione e progettazione.

A conclusione di questa premessa, desideriamo ringraziare tutti i protagonisti di questa intensa e avvincente esperienza; sebbene non sia possibile citarli tutti in questa sede, in primis i liberi professionisti e i ricercatori afferenti al CentroMS, riteniamo doveroso ricordare il contributo dato dalla struttura commissariale, nella persona dell'ing. Tortoioli, dai rappresentanti delle Regioni Abruzzo, Lazio, Marche e Umbria (ing. Basi, dott. Catalano, dott. Tiberi e dott. Motti), dai rappresentanti del Dipartimento della Protezione Civile (prof. Dolce, dott. Castenetto) e in ultimo, non certo in ordine d'importanza, dai responsabili scientifici della convenzione, il dott. Moscatelli e il dott. Stigliano dell'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche e dal gruppo di supporto operante presso la stessa struttura e da loro coordinato.

**GABRIELE SCARASCIA MUGNOZZA**

*già Presidente del Comitato  
di Indirizzo del CentroMS*

**e**

**DARIO ALBARELLO**

*Presidente del Comitato  
di Indirizzo del CentroMS*

## PREFAZIONE

### In seguito al primo degli eventi sismici

che hanno colpito l'Italia centrale a partire dal 24 agosto 2016, il 12 settembre 2016 è stato istituito un gruppo di supporto al Dipartimento della Protezione Civile per realizzare indagini propedeutiche alla microzonazione sismica dei territori colpiti. Tali indagini sono state realizzate dai centri di competenza del Dipartimento e dagli altri soggetti afferenti al Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni, CentroMS, nell'ambito delle attività svolte per conto della Funzione Tecnica di Valutazione e Pianificazione della Di.Coma.C. di Rieti.

Con il Decreto Legge n. 8 del 9 febbraio 2017, il CentroMS è stato riconosciuto quale organismo incaricato per il supporto scientifico e tecnico al Governo centrale, al fine di garantire la qualità degli studi e l'omogeneità nell'applicazione dei criteri per realizzare la microzonazione sismica dei Comuni interessati dalla sequenza sismica del 2016 e 2017.

Nell'ambito dell'Ordinanza n. 24 del 12 maggio 2017 "Assegnazione dei finanziamenti per gli studi di microzonazione sismica di III livello ai Comuni del centro Italia interessati dagli eventi sismici che si sono verificati dal 24 agosto 2016", è stata sottoscritta un'apposita convenzione tra il Commissario Straordinario per la ricostruzione Sisma 2016 e il CentroMS indirizzata al coordinamento delle attività di microzonazione sismica dei 138 Comuni più colpiti dagli eventi sismici del centro Italia. Per svolgere questo ruolo, a supporto dei professionisti incaricati della realizzazione degli studi, sono stati coinvolti oltre 100 ricercatori con competenze di tipo geologico, geotecnico e geofisico appartenenti a 25 diversi soggetti tra Istituti CNR, Enti di ricerca, Dipartimenti universitari.

Garantire la realizzazione dei 138 studi è stata una sfida difficile, che ha richiesto una struttura organizzativa ben articolata, con presa in carico di specifiche responsabilità da parte di ognuno dei 25 soggetti coinvolti. A riguardo, sono state istituite 8 unità di ricerca a carattere tematico (Informatica, Formazione, Input, Laboratori Geotecnici Prospezioni Geofisiche, Analisi Sismologiche, Instabilità, Analisi Numeriche) che hanno affiancato 6 unità territoriali di supporto ai professionisti affidatari. Di queste unità territoriali, tre hanno interessato la Regione Marche, una la Regione Abruzzo, una la Regione Lazio, una la Regione Umbria.

Gli studi sono stati realizzati dai professionisti incaricati in sei mesi. Dopo essere stati approvati dai responsabili del CentroMS, gli studi sono stati verificati e validati da un Gruppo di lavoro appositamente istituito con Ordinanza commissariale ed inviati a Regioni e Comuni. Gli studi sono accessibili attraverso il portale [www.webms.it](http://www.webms.it) ed i siti istituzionali delle Regioni interessate e del Commissario Straordinario Ricostruzione Sisma2016.

Guardando ai numeri del progetto si percepisce l'enorme sforzo organizzativo del CentroMS:

- 500.000** cittadini interessati
- 138** amministrazioni comunali coinvolte
- 111** località nelle quali sono stati realizzati studi di microzonazione sismica di livello 1
- 533** località nelle quali sono stati realizzati studi di microzonazione sismica di livello 3
- 114** professionisti supportati
- 100** ricercatori coinvolti
  - 5** Istituti e Dipartimenti CNR (DSSTTA, IGAG, ex IAMC, ex IDPA, IMAA)
  - 4** Enti di ricerca (ISPRA, INGV, ENEA, OGS)

- 16** Dipartimenti universitari (DST, DISG, DICEA dell'Università degli Studi di Roma; DSBGA dell'Università degli Studi di Catania; DICA del Politecnico di Milano; DSFTA dell'Università degli Studi di Siena; SST dell'Università degli Studi di Camerino; DiBT dell'Università degli Studi del Molise; DST dell'Università degli Studi del Sannio; DICeA dell'Università degli Studi di Firenze; DISEG del Politecnico di Torino; INGEO dell'Università degli Studi di Chieti-Pescara; DICEAA dell'Università degli Studi dell'Aquila; DFG dell'Università degli Studi di Perugia; DICEA dell'Università degli Studi di Napoli Federico II; DISTAV dell'Università degli Studi di Genova)
- 162** misure di Vs da prove Down-Hole
- 92** prove di laboratorio su campioni geotecnici indisturbati
- 138** input sismici per l'analisi di risposta sismica locale mono e bidimensionale
- 115** analisi di risposta sismica locale da modellazione numerica bidimensionale
- 23** giornate dedicate all'aggiornamento di professionisti e tecnici delle Amministrazioni
- Software GIS opensource sviluppato** per archiviazione dati e produzione cartografica
- Software opensource sviluppato** per la gestione del progetto.

Questi numeri dimostrano, se mai ce ne fosse bisogno, che una stretta collaborazione tra Governo centrale, Regioni, Amministrazioni locali, Organismi di ricerca e mondo delle professioni è possibile e consente di raggiungere ottimi risultati. Non meno importante, l'interazione tra ricercatori e professionisti genera un effetto virtuoso di amplificazione delle conoscenze scientifiche e delle competenze tecniche, in un'ottica di prevenzione del rischio, che proietta i suoi effetti nella trasmissione dei risultati della ricerca alla società civile.

In questo quadro generale si inseriscono i **Protocolli di acquisizione ed elaborazione dati relativi alle attività di Microzonazione Sismica di livello 3 in Italia Centrale**, presentati in questo volume. I protocolli si rivolgono al mondo delle professioni e costituiscono un compendio di specifiche tecniche ed indicazioni per la realizzazione e l'elaborazione delle indagini più frequentemente utilizzate negli studi di microzonazione sismica. Nel testo sono anche riportate le principali metodologie utilizzate per le analisi numeriche di risposta sismica locale mono e bidimensionali. I protocolli costituiscono uno dei risultati più rilevanti dello sforzo profuso dai ricercatori impegnati nel progetto.

Per il continuo supporto ricevuto, ci preme ringraziare l'ing. Tortoioli e la dott.ssa Fratini della struttura commissariale. Un ringraziamento particolare va rivolto, inoltre, a tutto il personale "precario" del CNR e degli altri Enti, che ha lavorato con dedizione e spirito di sacrificio: senza il loro contributo questo lavoro non sarebbe stato possibile.

**MASSIMILIANO MOSCATELLI e  
FRANCESCO STIGLIANO**

*Responsabili del progetto per  
il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)  
Istituto di Geologia Ambientale  
e Geoingegneria (IGAG)*

01

**INTRODUZIONE**

**Scopo del documento\*** è fornire un insieme di indicazioni riguardo alle attività di raccolta dati e relativa elaborazione finalizzate alla realizzazione di carte di Microzonazione Sismica di Livello 3. In particolare, si tratta di indicazioni volte a delineare procedure per la:

1. caratterizzazione delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) secondo gli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica distinguendo tre situazioni specifiche: zone stabili, zone stabili soggette ad amplificazione del moto sismico e zone instabili;
2. delimitazione delle Zone di Attenzione (ZA) per le instabilità (frane -  $ZA_{FR}$ , liquefazione -  $ZA_{LQ}$ , faglie attive e capaci -  $ZA_{FAC}$ );
3. a tutte le MOPS, incluse quelle caratterizzate da instabilità verranno attribuiti valori di Fattori di Amplificazione, spettri di risposta elastici ed accelerogrammi secondo i seguenti criteri: a) per le  $ZA_{LQ}$  saranno validi gli stessi modelli di risposta 1D o 2D delle MOPS stabili e suscettibili di amplificazione; b) le  $ZA_{FR}$  saranno trattate come le MOPS stabili e suscettibili di amplificazione qualora il corpo di frana abbia spessori non inferiori ai 10 m, ad esclusione comunque delle  $ZA_{FR}$  già corrispondenti alla categoria R3-R4 secondo la classificazione PAI o già acquisite come vincolo territoriale a valle di precedenti studi di MS1; saranno esclusi da questa parametrizzazione i buffer associati a  $ZA_{FAC}$  o  $ZA_{FPAC}$ .

In tutto il processo che porta al conseguimento degli obiettivi posti dall'Ordinanza occorre distinguere fra due tipi di operatori:

- a. professionisti incaricati che si occupano di: i) revisione o costruzione del modello geologico in prospettiva sismica; ii) esecuzione delle misure geofisiche e loro interpretazione; iii) coordinamento delle attività per l'esecuzione di sondaggi, prove SPT, raccolta dei campioni per le indagini di laboratorio e predisposizione del foro per l'esecuzione di prove geofisiche; iv) modellazione della risposta sismica locale 1D limitatamente alle zone stabili suscettibili di amplificazione;
- b. operatori del CentroMS che si occupano di: i) supportare e sovrapvedere le attività dei professionisti incaricati; ii) fornire supporto decisionale o prescrizioni particolari durante l'esecuzione delle indagini in sito; iii) eseguire le misure geofisiche in foro; iv) fornire al professionista i dati relativi alla sismicità attesa (moto di input) e i dati per la caratterizzazione del modello geotecnico ai fini della modellazione della risposta sismica locale 1D (pesi di volume, profili di velocità delle onde di taglio, curve di rigidità e smorzamento); v) eseguire la modellazione della risposta sismica locale in situazioni complesse (2D); vi) analizzare la stabilità di alcune frane selezionate in condizioni pseudo-statiche e dinamiche.

I protocolli che seguono riguardano essenzialmente il primo tipo di operatore (punto a) e sono stati redatti considerando che:

- i professionisti selezionati posseggono i requisiti di esperienza per condurre efficacemente le attività previste dagli incarichi
- le metodologie richieste sono immediatamente applicabili a seguito delle attività formative a favore dei professionisti incaricati

\* Nel documento si trovano riferimenti a "Unità operative territoriali", "Unità tematiche", "Gruppi di supporto", "Gruppi di coordinamento". Queste strutture di coordinamento sono state realizzate per le attività di supporto tecnico-scientifico svolte dal CentroMS e finalizzate alla realizzazione degli studi previsti dalle Ordinanze n°24 e n°79 del Commissario Straordinario Ricostruzione Sisma 2016.

- le indagini prevedono l'uso di attrezzature normalmente disponibili nella pratica professionale
- l'applicazione dei protocolli è compatibile con le effettive risorse economiche messe a disposizione del professionista ed i limiti temporali previsti per la consegna degli elaborati.

Nell'elaborazione dei protocolli si è inoltre tenuto conto delle conoscenze acquisite negli ultimi anni e della relativa documentazione prodotta e disponibile in rete ad uso degli operatori incaricati, con particolare riferimento a:

- *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*<sup>1</sup>
- *Microzonazione Sismica dell'area Aquilana*<sup>2</sup>
- *Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*<sup>3</sup>
- *Linee guida per la gestione del territorio interessato da faglie attive e capaci*<sup>4</sup>
- *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante cosismiche*<sup>5</sup>
- *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da fenomeni di liquefazioni*<sup>6</sup>

Per molte delle metodologie di potenziale utilità per le attività oggetto del presente documento si rimanda alle pubblicazioni sopra elencate. Nei protocolli che seguono ci si concentrerà invece su alcuni aspetti e tecniche di particolare importanza per gli obiettivi dell'Ordinanza. Le indicazioni contenute nei protocolli, salvo quelle relative allo scambio dati e alla documentazione richiesta, non hanno carattere prescrittivo: il professionista incaricato potrà infatti scegliere le procedure più idonee alla specifica situazione in cui si trova ad operare, fermo restando il raggiungimento di uno standard minimo di qualità. Si tratta quindi piuttosto di una serie di indicazioni volte a: i) evidenziare possibili criticità, ii) delineare procedure rispettose dello 'stato dell'arte' e ridurre possibili margini di errore nella pianificazione delle indagini e nella esecuzione ed interpretazione delle misure, e iii) ottimizzare il coordinamento complessivo delle attività con l'obiettivo di garantire un buon livello di omogeneità dei risultati ottenuti. L'utilizzo di metodologie differenti da quelle di seguito indicate può comunque essere concordato con gli Operatori del CentroMS, che hanno in ogni caso la facoltà di verificare gli esiti in termini di qualità ed affidabilità del dato.

---

1 [www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/7-indirizzi-e-criteri-per-la-microzonazione-sismica](http://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/7-indirizzi-e-criteri-per-la-microzonazione-sismica).

2 [www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/11-microzonazione-sismica-per-la-ricostruzione-dell-area-aquilana](http://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/11-microzonazione-sismica-per-la-ricostruzione-dell-area-aquilana).

3 [www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view\\_pub.wp?contentId=PUB28083](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB28083).

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

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

6 [www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/21-linee-guida-per-la-gestione-del-territorio-in-aree-interessate-da-liquefazioni](http://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/21-linee-guida-per-la-gestione-del-territorio-in-aree-interessate-da-liquefazioni).



# 02

## INDAGINI GEOLOGICHE E GEOMORFOLOGICHE

**Marco AMANTI**

ISPRA

**Stefano CATALANO**

UNICT-DSBGA

**Franco CAPOTORTI**

ISPRA

**Giuseppe CAVUOTO**

CNR ISPC

**Marta DELLA SETA**

UNIROMA1-DST

**Maurizio D'OREFICE**

ISPRA

**Carlo ESPOSITO**

UNIROMA1-DST

**Pier LORENZO FANTOZZI**

UNISI-DSFTA

**Fabrizio GALLUZZO**

ISPRA

**Cristina MURARO**

ISPRA

**Pierluigi PIERUCCINI**

UNITO-DST

**Francesco TROIANI**

UNIROMA1-DST

## 2.1 Premessa

**Lo scopo fondamentale delle indagini geologiche e geomorfologiche** per la Microzonazione Sismica (MS) è la ricostruzione di un Modello Geologico del sottosuolo<sup>7</sup> che faccia da riferimento a tutte le elaborazioni successive, definendo i vincoli essenziali alla caratterizzazione in prospettiva sismica dell'assetto geologico e dei lineamenti topografici dell'area di studio. In particolare sono della massima importanza tre elementi chiave:

1. la determinazione geometrica 3D delle interfacce rappresentative di possibili contrasti di impedenza sismica potenzialmente responsabili di fenomeni di amplificazione locale del moto sismico;
2. l'identificazione del substrato di riferimento<sup>8</sup> ovvero della configurazione nella quale il moto sismico è assunto noto a partire da stime a carattere regionale;
3. l'identificazione delle aree soggette a potenziali fenomeni di instabilità e deformazione permanente indotti dallo scuotimento sismico (frane, fenomeni di liquefazione, cedimenti differenziali e fagliazione superficiale).

Gli strumenti a disposizione per raggiungere questi obiettivi sono quelli propri dell'indagine geologica e geomorfologica completati da procedure speditive di campagna per la caratterizzazione geomeccanica dei materiali. Tutti questi strumenti, assieme all'eventuale disponibilità di indagini dirette e prove geotecniche, consentono la rappresentazione spaziale della distribuzione, della geometria e della struttura degli orizzonti litologici nel sottosuolo riassunti in un "modello geologico"<sup>9</sup>. Questo andrà progressivamente raffinandosi in funzione di analisi specifiche (prove geofisiche, prove in foro) in un modello geologico-tecnico<sup>10</sup>, mirato alla ricostruzione di un quadro coerente della pericolosità sismica locale e di eventuali effetti sul territorio in caso di forti terremoti. Nella fase iniziale delle attività di Microzonazione Sismica (MS di Livello 1 o più brevemente MS1), il modello geologico preliminare costituirà la base per definire un insieme di ipotesi (per esempio riguardo alle profondità ed entità dei contrasti di impedenza sismica, alle unità potenzialmente rappresentative del substrato di riferimento) che orienteranno le campagne di indagine successive<sup>11</sup>. Per esempio, considerazioni di questo genere forniranno vincoli importanti alle procedure d'inversione numerica che porteranno alla determinazione

7 La risoluzione del modello geologico deve essere adeguata al livello di approfondimento degli studi di microzonazione eseguiti e la sua affidabilità è funzione diretta del grado di dettaglio delle indagini geologiche e morfologiche condotte e della disponibilità di risultati di indagini dirette e prove geotecniche a supporto delle indagini di terreno.

8 Non necessariamente coincidente con il substrato geologico.

9 Negli studi di MS il "modello geologico" sarà sviluppato utilizzando come base le unità geologico-tecniche, ricavate dalle unità litostratigrafiche e litologiche rilevate sul terreno, e dovrà essere coerente con le geometrie rappresentate nella Carta Geologico-Tecnica. Questa deve mantenere il requisito di documento cartografico di rappresentazione 3D della realtà geologica di un territorio, in cui sono riversate tutte le informazioni di carattere litologico e giaciturale sui terreni affioranti nelle aree oggetto di studio. Analogamente, i dati di sottosuolo derivanti da indagini dirette disponibili, vanno interpretati coerentemente con i contenuti della Carta Geologico-Tecnica, attribuendo i terreni attraversati nelle verticali dei sondaggi alle categorie di unità geologico-tecniche previste nella legenda della carta. La Carta Geologico-Tecnica deve, infatti, costituire il riferimento univoco per l'interpretazione dei dati geognostici, delle misure geofisiche 1D/2D e per le rappresentazioni 1D (es. colonne stratigrafiche MOPS) e 2D (profili geologico-tecniche) del modello geologico di sottosuolo. I sondaggi interpretati in termini di unità geologico-tecniche costituiranno i nodi di riferimento per la stesura della griglia di profili geologico-tecniche necessari per rappresentare adeguatamente il modello del sottosuolo.

10 Il "modello geologico-tecnico" si ottiene assegnando a ciascuna delle unità geologico-tecniche rappresentate nel "modello geologico" un intervallo di valori della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio al loro interno.

11 Negli studi di Microzonazione Sismica di Livello 1 (MS1), il modello geologico deve essere funzionale alla individuazione di zone a comportamento omogeneo in prospettiva sismica (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica; MOPS), definite sulla base dei caratteri litologici e delle sequenze della stratigrafia di sottosuolo, nelle quali figurino la tipologia di substrato geologico e delle sovrastanti coperture, con relativi spessori. Le stratigrafie delle singole MOPS di livello 1 costituiscono una ipotesi preliminare di modello di sottosuolo, con identificazione e localizzazione delle unità interpretabili come substrato o bedrock sismico ( $V_s > 800$  m/s), assimilabile al substrato di riferimento secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), e le profondità dei contrasti di impedenza sismica presenti nel sottosuolo. In pratica il modello geologico della MS1 individua preliminarmente gli oggetti del sottosuolo da caratterizzare nelle fasi successive, fornendo uno strumento indispensabile per orientare le campagne d'indagine per gli studi di MS3.

dei profili di velocità di fase delle onde S ( $V_s$ ) nelle singole microzone (MOPS e zone con instabilità secondo le limitazioni descritte sopra) e permetteranno di valutare la rappresentatività dei dati dei sondaggi e delle prove in foro oltre che dei risultati delle prove di laboratorio condotte sui campioni raccolti in profondità.

Il modello geologico per gli studi di livello 3 (MS3)<sup>12</sup> sarà sviluppato dalle misure su affioramenti, dall'interpretazione dei dati di sondaggio, dalle misure geofisiche 1D/2D, ma soprattutto sarà basato su una Cartografia Geologico-Geomorfologica e Geologico-Tecnica di qualità realizzata dagli affidatari<sup>13</sup>. Negli studi di livello 3 eventuali integrazioni delle informazioni geologiche possono includere sia la raccolta di dati geologici pregressi se non considerati già negli studi di livello 1 (dati immediatamente disponibili, perché raccolti in situ, e/o presenti in letteratura o in database pubblici)<sup>14</sup>, ovviamente analizzati criticamente in prospettiva sismica, che la realizzazione di rilievi geologici svolti ex-novo, alla scala di dettaglio adeguata<sup>15</sup>. Nella realizzazione delle cartografie di base dovrà essere rivolta particolare attenzione: i) alla mappatura dei depositi di copertura recenti e delle morfologie superficiali indicative di fenomeni di instabilità; ii) all'identificazione di elementi geomorfologici di rilevanza ai fini di processi amplificativi di sito; iii) al rilevamento geomeccanico degli affioramenti di ammassi rocciosi fratturati e/o eterogenei<sup>16</sup>; iv) alla caratterizzazione geotecnica speditiva dei depositi di copertura. Nel caso fossero già disponibili Carte di Microzonazione di Livello 1 con qualità elevata<sup>17</sup>, si procederà partendo dalla revisione critica del Modello Geologico relativo all'area di studio<sup>18</sup>. Questa fase si baserà sull'analisi critica degli elementi costitutivi di tale Modello, ovvero la:

- a. definizione di substrato<sup>19</sup>,
- b. definizione di Terreni di Copertura,
- c. verifica e eventuale integrazione nella MS di livello 3 (MS3 di seguito) delle superfici limite delle Unità Geologiche corrispondenti al Substrato Geologico e ai Terreni di Copertura,
- d. verifica e eventuale integrazione in MS3 degli elementi geomorfologici

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

**13** A tal fine, è necessaria una valutazione preventiva della carta geologico-tecnica degli studi di livello 1, mediante l'applicazione della metodologia proposta in Albarello et al. (2011). Essa prevede una valutazione complessiva della qualità dei dati geologici e geomorfologici degli studi di livello 1 basata sui seguenti parametri:

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

**14** Con specifico riferimento a lavori svolti dopo la realizzazione degli studi di microzonazione di livello 1.

**15** Le integrazioni hanno lo scopo di aumentare in maniera significativa la qualità del dato geologico, sempre tenendo conto dei criteri di valutazione proposti in Albarello et al. (2011).

**16** Fondamentale per identificare i settori di affioramento e la prevedibile estensione nel sottosuolo del substrato geologico alterato o fratturato.

**17** La valutazione dell'adeguatezza della base geologica adottata deve tenere conto anche della quantità e della distribuzione dei dati disponibili per caratterizzare le differenti aree da microzonare. Una stima semiquantitativa per la determinazione della qualità della carta di MS di livello 1 è sintetizzata nella tabella 1 in Albarello et al. (2011). È sottinteso che il Fattore di Qualità dei dati a supporto degli studi di livello 3 deve rientrare nella prima classe di qualità. Si sottolinea che tale risultato non può in alcun modo essere raggiunto se la Carta Geologico-Tecnica adottata non sia stata ottenuta mediante l'utilizzo di dati geologici e geomorfologici di terreno aggiornati (post 2000), raccolti ad una scala adeguata ( $\geq 1/10.000$ ) e mirati specificamente allo studio di microzonazione sismica. È quindi possibile omettere la raccolta di dati sul terreno solo se la Carta Geologico-Tecnica soddisfa già i requisiti minimi prima citati. In alternativa è necessario procedere a rilievi geologici e geomorfologici originali di dettaglio, almeno per quelle aree in cui gli studi pregressi non garantiscano i requisiti di qualità richiesti.

**18** Essenzialmente basata sull'acquisizione di dati di sottosuolo originali derivanti dall'esecuzione del piano delle indagini previsto negli studi di livello 3.

**19** Eventualmente distinguendo tra "substrato geologico" e "substrato di riferimento".

- e. superficiali e sepolti influenti sulla pericolosità sismica,
- e. verifica e eventuale integrazione in MS3 delle geometrie e delle caratteristiche degli elementi di instabilità relativi a movimenti gravitativi, fenomeni di liquefazione/addensamento e subsidenza, presenza di faglie attive e capaci.

Tenendo presente che la ricostruzione delle caratteristiche di sottosuolo e di superficie è di primaria importanza nelle attività di Microzonazione sismica, nel caso in cui le aree da microzonare non siano sufficientemente estese per la piena risoluzione del modello di sottosuolo dai dati di superficie, è necessario che rilievi di terreno originali siano condotti su "areali significativi" più ampi, in funzione della complessità del sottosuolo oggetto di indagine, e sufficienti ad illustrare le situazioni geologiche e morfologiche locali condizionanti la risposta sismica, secondo le modalità indicate nel **paragrafo 3.4.2** delle istruzioni tecniche degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS)<sup>20</sup>.

## 2.2 Il substrato

La necessità di caratterizzare al meglio l'assetto geometrico tridimensionale degli orizzonti risonanti implica una ricostruzione delle geometrie 3D delle Unità Geologiche corrispondenti al Substrato Geologico e ai Terreni di Copertura, mediante l'individuazione, quanto più precisa e dettagliata, dei relativi limiti stratigrafici o tettonici, siano questi ritenuti certi o incerti<sup>21</sup>.

Elementi essenziali per il raggiungimento di questo obiettivo sono la conoscenza dell'assetto tettonico-strutturale del substrato, con particolare riguardo alla giacitura delle diverse unità, alle geometrie dei loro limiti stratigrafici, alle caratteristiche geometriche e cinematiche dei contatti tettonici e all'andamento in superficie delle tracce delle faglie. È inoltre fondamentale conoscere l'assetto geomorfologico e la storia evolutiva delle forme del paesaggio per comprendere, al meglio, genesi e geometrie dei depositi di copertura. Per un'esecuzione corretta degli studi, è fondamentale attribuire i terreni al Substrato (SG o SS) o ai Terreni di Copertura (TC) secondo le indicazioni di seguito riportate<sup>22</sup>.

**20** I dati geologici e geomorfologici originali da utilizzare per redazione della Carta Geologico-Tecnica dovranno essere quanto più esaustivi su quattro elementi chiave:

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

**21** Negli studi riveste particolare importanza la ricostruzione, quanto più precisa possibile, dell'interfaccia tra gli orizzonti litologici assegnati al "substrato geologico" e alle coperture. Nel modello geologico, tale superficie frequentemente corrisponde al contatto tra "substrato di riferimento" delle NTC e i terreni superficiali a bassa velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ), cui si associa il contrasto d'impedenza sismica principale che condiziona in maniera predominante la risposta sismica locale. L'individuazione di tale superficie facilita enormemente la conversione del modello geologico in modello geotecnico, nelle successive fasi di modellazione. Nella realizzazione del modello geologico di livello 3, la suddivisione tra Substrato e Coperture, basata su dati geologici e geomorfologici di base, deve essere funzionale alle specificità e alle finalità ultime degli studi di microzonazione, attribuendo alle due categorie un significato essenzialmente geologico-tecnico se non geotecnico.

**22** Secondo gli Indirizzi e Criteri e gli Standard di rappresentazione, potrebbero rientrare tra le unità di copertura solo i terreni sciolti, anche se fortemente addensamenti, e argille non consolidate, mentre tutte le tipologie litologiche compatte andrebbero catalogate utilizzando le codifiche previste per le unità appartenenti al Substrato Geologico. Pertanto, la suddivisione Substrato/Coperture non coincide necessariamente con quella normalmente riportata nelle carte geomorfologiche di base, dove la differenziazione tra "substrato" e "formazioni superficiali" è indipendente dal grado di cementazione ed età, ma dipende solo da considerazioni sull'evoluzione morfologica di una determinata area. Non esiste neanche una corrispondenza immediata tra unità di ambiente marino ed unità di ambiente continentale desumibile dalle carte geologiche. Va comunque segnalato che sono in corso di approvazione nuove linee guida per la realizzazione della carta geologico-technica per la microzonazione sismica, con adattamento ai contesti vulcanici, per corredate da nuovi Standard di Rappresentazione nella versione 4.2, già utilizzati come riferimento per gli studi di microzonazione della Sicilia. Le linee guida ed i nuovi Standard introducono le categorie di unità geologico-tecniche Litoide di copertura, designare coperture cementate, e Substrato incoerente, per indicare livelli del substrato geologico incoerenti o poco cementati.

## Substrato Geologico (SG)

È costituito da rocce e corpi sedimentari compatti e rigidi, in genere di età pre-quadernaria, che non hanno subito processi di alterazione e degrado o deformazioni tettoniche pervasive, e che costituiscono la base su cui poggiano in discordanza o discontinuità stratigrafica rocce e corpi sedimentari meno consistenti o alterati o sedimenti sciolti, in genere a bassa rigidezza, chiamati con il termine generale di Terreni di Copertura (TC)<sup>23</sup>. Il SG non corrisponde necessariamente al Substrato di Riferimento o Substrato sismico, del quale viene richiesta l'individuazione per gli studi di MS3. Nella definizione di Substrato Geologico rientrano infatti numerose categorie di rocce che non soddisfano il requisito di rigidezza richiesto per essere ritenute substrato sismico ( $V_s > 800$  m/s) né, localmente, comportano contrasti d'impedenza significativi con i soprastanti Terreni di Copertura. Rientrano in queste categorie anche gli orizzonti lapidei degradati per motivi fisico-chimici (alterazione) e/o strutturali (fratturazione)<sup>24</sup>. Per questa tipologia di substrato, si può introdurre il concetto di Substrato Lento (SL, es. litofacies pelitiche, marnose ecc.) coincidente con il concetto di "substrato non rigido", precedentemente adottato nei vecchi standard di rappresentazione<sup>25</sup>. Le indagini geofisiche e i dati già esistenti (MS1) o quelle previste per la MS3 potranno confermare (in base alle caratteristiche fisiche misurate) a partire da quale profondità il Substrato Geologico possa coincidere con quello sismico di riferimento (SS)<sup>26</sup>.

Per una caratterizzazione esaustiva del Substrato Geologico, i dati raccolti dovranno consentire la definizione dei seguenti aspetti fondamentali:

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

**23** Ai fini degli studi di microzonazione sismica vanno attribuiti al Substrato Geologico (SG), utilizzando gli specifici codici previsti dagli Standard, tutti gli orizzonti o corpi rocciosi compatti affioranti in superficie o presenti in sottosuolo, in quanto ricoperti da sedimenti superficiali sciolti, che costituiscono invece i terreni di copertura (TC). Rientrano tra le tipologie di rocce ascrivibili al SG le rocce cristalline di origine magmatica plutonica e metamorfica, le rocce sedimentarie delle successioni meso-cenozoiche, gran parte delle rocce vulcaniche. Secondo gli ICMS sarebbero da attribuire al SG tutti i terreni di età quadernaria che abbiano subito compattazione per processi diagenetici, prima della loro esumazione ed esposizione in superficie o le formazioni superficiali recenti che, sebbene si siano sviluppate in connessione con l'evoluzione del paesaggio, risultano oggi ben cementate. Tale attribuzione potrebbe essere fuorviante nel caso in cui i livelli cementati poggiassero su orizzonti sciolti presenti in sottosuolo. Tali geometrie si concretizzerebbero con la presenza anomala in carta di unità di substrato su unità di copertura, cui associare molto probabilmente anche una anomala inversione della velocità delle onde di taglio nel profilo stratigrafico del sottosuolo. L'introduzione delle nuove Linee Guida per la realizzazione della Carta Geologico-Tecnica e dei nuovi Standard di Rappresentazione ovverà a queste anomalie di rappresentazione.

**24** Le rocce che costituiscono il SG, almeno nei livelli superficiali, spesso non costituiscono il "substrato sismico" a causa dei caratteri litologici originari o per fenomeni di alterazione e/o fratturazione. In questo caso, gli standard di rappresentazione hanno previsto l'uso di un codice specifico per l'indicazione del Substrato "Alterato" (SF, ad es. per fratturazione o deformazione tettonica, alterazione meteorica ecc.). Gli attuali standard non prevedono invece una distinzione in termini di rappresentazione delle unità di substrato, sulla base del loro comportamento sismico, in termini di velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ). Tale distinzione va quindi esplicitata direttamente nel modello geologico, associando alle geometrie degli orizzonti di sottosuolo i valori di  $V_s$  dedotti dalle inversioni dei risultati delle analisi geofisiche.

**25** Nel caso in cui il substrato geologico comprenda terreni superficiali con  $V_s < 800$  m/s (substrato geologico "lento"), molto frequente in aree di affioramento di successioni argilloso-sabbiose di età post-Tortoniana, nei profili geologico-tecnici non è immediatamente visualizzata la superficie di contrasto d'impedenza al tetto del "substrato sismico". In questi casi la profondità del substrato di riferimento da utilizzare nel modello "geotecnico" deve essere determinata mediante l'utilizzo dei dati geofisici che comunque andranno contestualizzati in termini di modello geologico. In particolare, va verificato se in profondità la superficie che separa il substrato geologico "lento" da quello assimilabile al substrato "sismico" di riferimento, ricavata dalle inversioni dei dati geofisici, si attesti in corrispondenza di un determinato limite geologico già conosciuto in letteratura o segnalato dalla cartografia geologica, eventualmente rappresentabile nei profili geologico-tecnici. Un caso classico potrebbe essere un contatto discordante alla base di successioni marine recenti, poco consolidate, poggianti su un substrato antico fortemente diagenizzato. Nel caso invece di un progressivo raggiungimento delle velocità da "bedrock sismico" all'interno della medesima formazione, la profondità va determinata puntualmente senza alcuna possibilità di associarla ad elementi visualizzabili indipendentemente nel modello.

**26** Nella conversione del modello geologico di sottosuolo in quello geotecnico, l'integrazione del dato geologico con quello geofisico è inoltre necessaria per verificare l'esistenza di contrasti d'impedenza significativi, in corrispondenza dell'interfaccia tra substrato "lento" e i soprastanti terreni di copertura. Questi ultimi, in caso di particolari condizioni di cementazione e di miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità, potrebbero costituire un efficiente substrato sismico. Pertanto, è raccomandabile che già nella formulazione del Modello Geologico di sottosuolo realizzato in MS1 o comunque in fase di pianificazione delle indagini per gli studi di MS3, il geologo evidenzii ipotesi di previsione del comportamento atteso in termini di  $V_s$  delle diverse unità classificate sia come Terreni di Copertura sia come Substrato Geologico.

A completamento delle indagini per la MS3, l'obiettivo principale della revisione del Modello Geologico realizzato in MS1 dovrà consistere nella indicazione di quali unità litostratigrafiche rappresentate nella cartografia geologico-morfologica di base possano essere convertite in unità geologico-tecniche assimilabili, per il loro comportamento, al Substrato di Riferimento. Questo obiettivo primario deve guidare la progettazione del piano delle indagini, con la selezione delle tipologie ed ubicazioni delle indagini geotecniche e geofisiche più opportune, per ottenere i dati analitici a supporto della stima qualitativa della rigidità dei materiali fornita in fase di realizzazione della MS1. Con il passaggio alla Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica (CGT\_MS) dovranno essere individuate, all'interno delle unità litostratigrafiche definite nella Cartografia Geologico-Geomorfologica di base, le diverse caratteristiche fisico-meccaniche delle unità e quindi le diverse unità litotecniche (siano esse S o TC) caratterizzate da specifiche caratteristiche fisico-meccaniche.

In particolare, i parametri specifici necessari a caratterizzare le rocce del substrato, possono essere riassunti come segue:

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

### Substrato Sismico (SS)

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

- valori di  $V_{s30}$  (velocità equivalente delle onde S nei primi 30 metri di sottosuolo) superiore a 800 m/s,
- avere una superficie topografica orizzontale.

Nel caso in cui non affiori, il Substrato Sismico è costituito da unità geologiche<sup>27</sup> caratterizzate da una velocità delle onde di taglio  $V_s \geq 800$  m/s, poste alla base di terreni meno rigidi o di sedimenti sciolti<sup>28</sup>.

Quando in corrispondenza di un affioramento di materiali rigidi che soddisfano i requisiti suddetti e dove non sono rilevati effetti locali di amplificazione o modificazioni in frequenza del moto sismico rispetto a quello misurato o stimato in profondità, si parla di *Substrato di Riferimento*; si presuppone quindi che al di sotto di questo tipo di

<sup>27</sup> Generalmente appartenenti al Substrato Geologico non degradato.

<sup>28</sup> Appartenenti al Substrato geologico "lento" o ai Terreni di copertura.

affioramento non esistano forti contrasti di impedenza sismica e che i materiali che lo compongono siano rigidi ed abbiano un comportamento meccanico di tipo lineare (mezzo continuo con comportamento visco-elastico)<sup>29</sup>.

### 2.3 I Terreni di Copertura (TC)

Comprendono gli orizzonti superficiali costituiti da rocce sciolte, a diverso grado di addensamento, in genere a bassa rigidità (in letteratura trattati spesso anche con il termine generico di "coperture") di età prevalentemente quaternaria, la cui evoluzione è legata ai diversi stadi di evoluzione e modellamento del paesaggio. I terreni di copertura possono essere associati a processi operati dai differenti agenti morfogenetici (acque correnti superficiali, gravità, carsismo, degradazione meteorica, ecc.). Questi depositi generalmente poggiano in netta discordanza sui terreni appartenenti al Substrato geologico e sono caratterizzati da frequenti variazioni, verticali e laterali, di spessore, litologia e composizione, in funzione della presenza di morfologie sepolte o della locale storia morfoevolutiva<sup>30</sup>.

Le Unità e/o le Formazioni classificate come TC dovranno essere caratterizzate ed analizzate in funzione della loro tipologia, del contesto deposizionale, dell'assetto stratigrafico, dello spessore ecc.<sup>31</sup>. A tal proposito ci si deve assicurare che gli studi di MS1 forniscano un'adeguata caratterizzazione delle coperture tale da evidenziare l'eventuale presenza al loro interno di strati con significativi contrasti di impedenza sismica (che possono dar luogo a fenomeni di amplificazione in corrispondenza di determinate frequenze) che nelle ulteriori fasi di indagine previste nello studio di MS di livello 3, potranno essere individuati e caratterizzati con maggiore precisione. In caso contrario è necessaria una integrazione preventiva all'esecuzione degli studi di MS3. Nel corso del rilevamento dei Terreni di Copertura, massima cura dovrà essere posta nella ricostruzione della superficie di interfaccia con il Substrato, evidenziando eventuali irregolarità dovute a paleotopografie sepolte nelle quali possono svilupparsi effetti amplificativi, dovuti sia alle forti variazioni laterali che alla geometria irregolare dell'interfaccia SG/TC (o SS/TC), da riprodurre con modelli 2D. La caratterizzazione dei Terreni di Copertura deve necessariamente essere condotta attraverso la raccolta di dati riguardanti la natura e la disposizione dei litotipi presenti, con l'individuazione di:

<sup>29</sup> È sempre opportuno verificare che i caratteri da SS delle unità affioranti o presenti nell'immediato sottosuolo si conservino anche in profondità, con un profilo di velocità stabilmente al di sopra della  $V_s$  limite di 800 m/s. La presenza in sottosuolo di inversioni di velocità, dovuta all'appoggio dei terreni affioranti "veloci" su un substrato "lento", potrebbero infatti comportare alterazioni del moto del suolo in superficie che vanno opportunamente modellate, tenendo conto della geometria della superficie di interfaccia tra le unità di substrato a differente comportamento. Paradossalmente, il comportamento da "bedrock sismico" potrebbe caratterizzare anche alcuni terreni di copertura. In questo caso, le inversioni di velocità potrebbero essere anche di notevole entità e confinate nei primi metri del sottosuolo. In ogni caso, il substrato sismico ed il substrato geologico in generale non va rappresentato come un "unicum", anzi è necessario caratterizzare al meglio l'assetto geometrico tridimensionale degli orizzonti risonanti, individuando con cura i limiti stratigrafici o tettonici, siano questi ritenuti certi o incerti, tra le diverse unità e definendo il loro assetto giaciturale.

<sup>30</sup> Alcuni di questi depositi sono associati a evidenti forme superficiali (es. conoide alluvionale, falda detritica ecc.) che ne designano l'origine e la geometria complessiva. In tali casi le variazioni di spessore e di litologia possono essere messe in relazione con la posizione dei depositi nell'ambito della forma complessiva. In altri casi, le variazioni di spessore e delle litofacies sono da imputare alla presenza di morfologie sepolte colmate dai depositi stessi e delle quali non vi è alcuna evidenza superficiale. In tali condizioni, la variabilità laterale deve necessariamente essere messa in evidenza mediante un numero adeguato di dati di sottosuolo.

<sup>31</sup> Si ricorda che per i terreni di copertura non è prevista una categoria di alternanza di litotipi e pertanto nelle successioni verticali vanno evidenziati e differenziati dagli altri solo gli orizzonti litologici omogenei che raggiungano uno spessore di almeno 3 m. In caso contrario, in presenza di una alternanza di livelli omogenei con spessori inferiori o se esistono intercalazioni di spessore inferiore ai 3 m all'interno di una sequenza omogenea, si classifica la formazione designandola sulla base della litologia prevalente. Variazioni laterali dei rapporti reciproci tra litologie in alternanza potrebbero quindi produrre una variazione di designazione all'interno del medesimo corpo sedimentario o orizzonte litostratigrafico.

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

## 2.4 Elementi morfologici superficiali e sepolti pertinenti alla pericolosità sismica

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

Per gli Elementi tettonico-strutturali, particolare attenzione deve essere rivolta:

- ad osservazioni strutturali di dettaglio degli specchi di faglia che interessano le rocce del substrato, anche per prevederne l'andamento in profondità;
- all'osservazione delle evidenze morfologiche di scarpate di probabile origine tettonica e di dislocazioni di superfici erosive o di corpi deposizionali quaternari;
- al rilevamento del maggior numero di dati che riguardano faglie attive e capaci, sia da letteratura sia ex-novo, basandosi, ad esempio, sulle evidenze di rotture cosismiche associabili agli eventi del 2016-2017.

Per gli elementi geomorfologici, particolare attenzione deve essere data:

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

## 2.5 Elementi idrogeologici ed instabilità di versante

Per quanto attiene alle tematiche idrauliche e idrogeologiche, la discussione con il professionista incaricato dovrà vertere principalmente sulla possibilità che l'area possa essere interessata da frane, come flussi detritici o *debris flow* (per i quali andrà considerata una eventuale concomitanza tra le condizioni sismiche ed idrauliche che possano scatenare tali fenomeni) o da possibili effetti di liquefazione. In questo senso la formazione e la consulenza sarà orientata alla verifica delle tipologie di frana segnalate nell'area e riportate nelle cartografie e nelle banche dati ufficiali disponibili, così come alla

eventuale necessità di eseguire indagini e/o studi di maggiore dettaglio ove si ritenesse indispensabile (ed anche ragionevolmente ed economicamente possibile) il recupero dei terreni interessati dai fenomeni franosi.

Indicazioni sulle modalità di rilevamento geologico e geotecnico di coperture, ammassi rocciosi o frane già esistenti, potenzialmente instabili per effetto di azioni sismiche, nonché sui prodotti cartografici nei quali dovranno essere indicate le instabilità rilevate, saranno forniti in maggior dettaglio nel capitolo successivo. Va sottolineato che anche per zone soggette a fenomeni di instabilità (con le limitazioni descritte in precedenza), allo scopo di consentire la modellazione della risposta sismica locale secondo le indicazioni riportate nei **capitoli 6 e 7**, è necessario definire apposite colonne stratigrafiche rappresentative che dovranno essere riportate nella relazione geologico tecnica a corredo della Microzonazione di Livello 3. Da questa analisi sono però escluse quelle caratterizzate da un livello di pericolosità da frana R3 e R4 secondo la classificazione PAI.

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

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

Limitatamente ad alcune situazioni oggetto di studi pilota, si suggerisce la valutazione di massima di stato / distribuzione / stile di attività integrando le evidenze di campo con i risultati di studio multi-temporale (change detection) su immagini ottiche (aeree o satellitari).

A questa analisi è opportuno affiancare le informazioni che possono derivare dalla consultazione dei dati SAR del Progetto Straordinario di Telerilevamento ([www.pcn.minambiente.it/mattm/progetto-pst-prodotti-interferometrici](http://www.pcn.minambiente.it/mattm/progetto-pst-prodotti-interferometrici)).

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

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

Nel caso di flussi detritici (*debris flow*) dovranno essere rilevati i depositi e le aree di alimentazione degli stessi.

Per quanto riguarda il tema della liquefazione anche in questo caso indicazioni più dettagliate

sono fornite nel "Documento di indirizzo alla trattazione delle instabilità nei prodotti di livello 3 previsti dalla ordinanza n°24 del 12/05/2017" redatto, nell'ambito delle attività della citata Ordinanza, dal Gruppo Operativo Trasversale per le Instabilità sismoindotte.

Per la definizione e delimitazione delle Zone di Attenzione (ZA) e per le Zone di Suscettibilità (ZS) riferite alle tipologie di instabilità riconosciuta da ICMS nelle sue linee guida (ovvero frane, liquefazione, faglie attive e capaci, faglie potenzialmente attive e capaci), l'indirizzo condiviso è che i professionisti incaricati si occupino della sola perimetrazione delle ZA. Non si prevede, pertanto, se non in futuri approfondimenti degli studi sulle instabilità di livello 3, che vengano delimitate e cartografate Zone di Rispetto (ZR) per nessuna delle tipologie di instabilità riconosciute da ICMS nelle sue Linee Guida. In tal senso, indicazioni specifiche e criteri di identificazione, perimetrazione e cartografia delle ZA e ZS, sono fornite nel "Documento di indirizzo alla trattazione delle instabilità nei prodotti di livello 3 previsti dalla ordinanza n°24 del 12/05/2017" redatto dalla UOTI e illustrato nel capitolo successivo. Nel caso di aree a franosità diffusa (o DGPV – Deformazioni Gravitative Profonde di Versante) si suggerisce di sostituire le  $ZA_{FR}$  con una MOPS già a partire dalle carte di Microzonazione sismica di Livello 1.

## 2.6 Sezioni geologiche e geologico-tecniche

Le sezioni geologiche e le sezioni geologico-tecniche, da esse derivate, costituiscono lo strumento per visualizzare il modello geologico di sottosuolo di riferimento. Se la carta geologico-tecnica è il documento rappresentativo della distribuzione dei terreni in superficie e degli elementi utili alla ricostruzione della loro geometria 3D, le sezioni geologiche forniscono visioni 2D della geometria 3D delle diverse unità nel sottosuolo, lungo transetti che siano effettivamente significativi per sintetizzare le caratteristiche locali dell'assetto geologico e geomorfologico. Un'ottimale rappresentazione della variabilità 3D del sottosuolo viene garantita eseguendo una griglia di profili geologici, orientati parallelamente ed ortogonalmente ai lineamenti geologico-morfologici caratteristici, di forma adeguata a quella del contorno delle aree da investigare, con maglia di dimensioni dipendenti dalla complessità del sottosuolo da modellizzare e, nel caso di studi di livello 3, dalle dimensioni della microzona. In ogni caso, la griglia di profili dovrà essere particolarmente concentrata sulle aree di maggiore interesse per le attività di MS. In particolare, è consigliabile l'utilizzo delle griglie di profili in ciascuna delle aree individuate per gli studi di MS, in cui ricadano gli abitati principali. Con il travaso dei dati delle indagini svolte ai fini della MS, le sezioni geologiche possono essere tramutate in altrettanti profili geologico-tecnici, in cui i terreni del sottosuolo vengono differenziati e rappresentati in funzione dei loro caratteri fisico-meccanici in prospettiva della risposta sismica locale. Appare evidente che, una volta fissata, la griglia di profili geologici da eseguire può costituire un valido riferimento per pianificare la distribuzione sul territorio delle indagini rivolte a ricostruire i profili geologico-tecnici, mediante la definizione della geometria dell'interfaccia substrato-copertura e la distribuzione in sottosuolo delle diverse tipologie delle coperture, con le relative Vs. I profili geologico-tecniche costituiranno la base per la definizione dei modelli geotecnici da utilizzare nelle modellazioni 2D.

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

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

1. Le sezioni dovranno attraversare i centri abitati per una porzione rappresentativa delle dimensioni del centro abitato stesso<sup>32</sup>. Nel caso di centri abitati con distribuzione fortemente asimmetrica o di dimensioni notevoli potranno essere ubicate più sezioni rappresentative di dimensioni adeguate a rappresentare l'effettiva variabilità dell'assetto di sottosuolo.
2. Dimensioni longitudinali delle sezioni scelte per l'analisi bidimensionali (2D) dovranno essere tali da minimizzare, in corrispondenza della zona del centro abitato, gli effetti delle riflessioni totali delle onde che incidono sulle frontiere laterali della modellazione bidimensionale. Per questo è importante estendere la sezione in modo tale che le frontiere laterali si trovino ad una distanza almeno pari alla dimensione del tratto in corrispondenza del centro abitato attraversato. In pratica, se la sezione attraversa un centro abitato per un tratto di lunghezza  $X$ , è opportuno che la sezione abbia una lunghezza pari a  $X+X+X=3X$ , con l'abitato posto al centro della sezione.
3. Le sezioni dovranno essere ubicate in modo da caratterizzare la massima eterogeneità in termini di TC e S del Modello Geologico al di sotto del centro abitato, ovvero le sezioni dovranno essere realizzate fino ad una profondità tale da intercettare il Substrato Sismico (se identificabile) o quello Geologico.
4. Se l'eterogeneità è approssimativamente 1D (successione di strati orizzontali o sub-orizzontali) le sezioni potranno essere più corte; altrimenti, in caso di forti eterogeneità laterali, con configurazioni 2D o 3D (es. contatti sepolti molto acclivi, presenza di scarpate verticali sepolte ecc..) sarà necessario ubicare le sezioni in modo tale da rappresentare al meglio anche tali eterogeneità.
5. Le sezioni dovranno essere ubicate tenendo conto delle possibili morfologie sepolte o delle morfologie superficiali (ad es. presenza di riempimenti vallivi, contatti bruschi con i versanti, scarpate di terrazzo, scarpate strutturali ecc...). Nel caso di valli sepolte caratterizzate da un rapporto  $H/L > 1/4$  (con H profondità e L semi-larghezza della valle) potrebbe essere necessario estendere le sezioni oltre le estremità della valle per minimizzare gli effetti delle riflessioni laterali nella modellazione.
6. Nel caso di centri abitati posti su TC che riempiono morfologie sepolte è raccomandabile, dove il contrasto laterale sia significativo e l'eterogeneità 2D e/o 3D attesa sia importante, tracciare le sezioni lateralmente fino ad intercettare il Substrato Sismico (si veda in proposito anche paragrafo 3.4.2 degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica- ICMS).

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

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



# 03

## LE INSTABILITÀ

A cura della **Unità Operativa Trasversale Instabilità (UOTI)**

**COORDINATORE**

**Salvatore MARTINO**

UNIROMA1-DST

**MEMBRI**

**Sara AMOROSO**

UNICH-PE-INGEO - INGV

**Vittorio CHIESSI**

ISPRA

**Carlo ESPOSITO**

UNIROMA1-DST

**Carolina FORTUNATO**

CNR IGAG

**Claudia MADIAI**

UNIFI-DICeA

**Guido MARTINI**

ENEA

**Paolo MESSINA**

CNR IGAG

**Francesco SILVESTRI**

UNINA DICEA

**Paolo TOMMASI**

CNR IGAG

**Marco AMANTI**

ISPRA

## 3.1 Premessa

**Il presente documento vuole fornire un indirizzo all'applicazione** delle Linee Guida in relazione alle instabilità sismoindotte, annesse ad Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS)<sup>33</sup>.

Non saranno, di conseguenza, trattati aspetti teorici ma saranno fornite indicazioni che non hanno valenza di tipo prescrittivo, in quanto il professionista rimane responsabile dello studio sulle aree instabili: lo stesso ha piena facoltà di proporre metodologie e indagini più raffinate o differenti da quanto indicato nel presente documento, fermi restando gli aspetti formali che prevedono l'approvazione da parte del CentroMS del piano delle indagini e della successiva analisi di stabilità preliminare.

Alla sua base vi è la condivisa intenzione da parte dell'Unità Operativa Trasversale Instabilità (UOTI), di concerto con il coordinamento del CentroMS, di garantire la corretta ed attenta definizione delle Zone di Attenzione (ZA) per i fenomeni di instabilità, da parte dei professionisti incaricati degli studi di MS nell'ambito dell'Ordinanza n°24 del 12/05/2017, che prevede la Convenzione tra CentroMS e Commissario Straordinario del Governo per la ricostruzione nelle aree terremotate a seguito della sequenza sismica iniziata il 24 Agosto 2016.

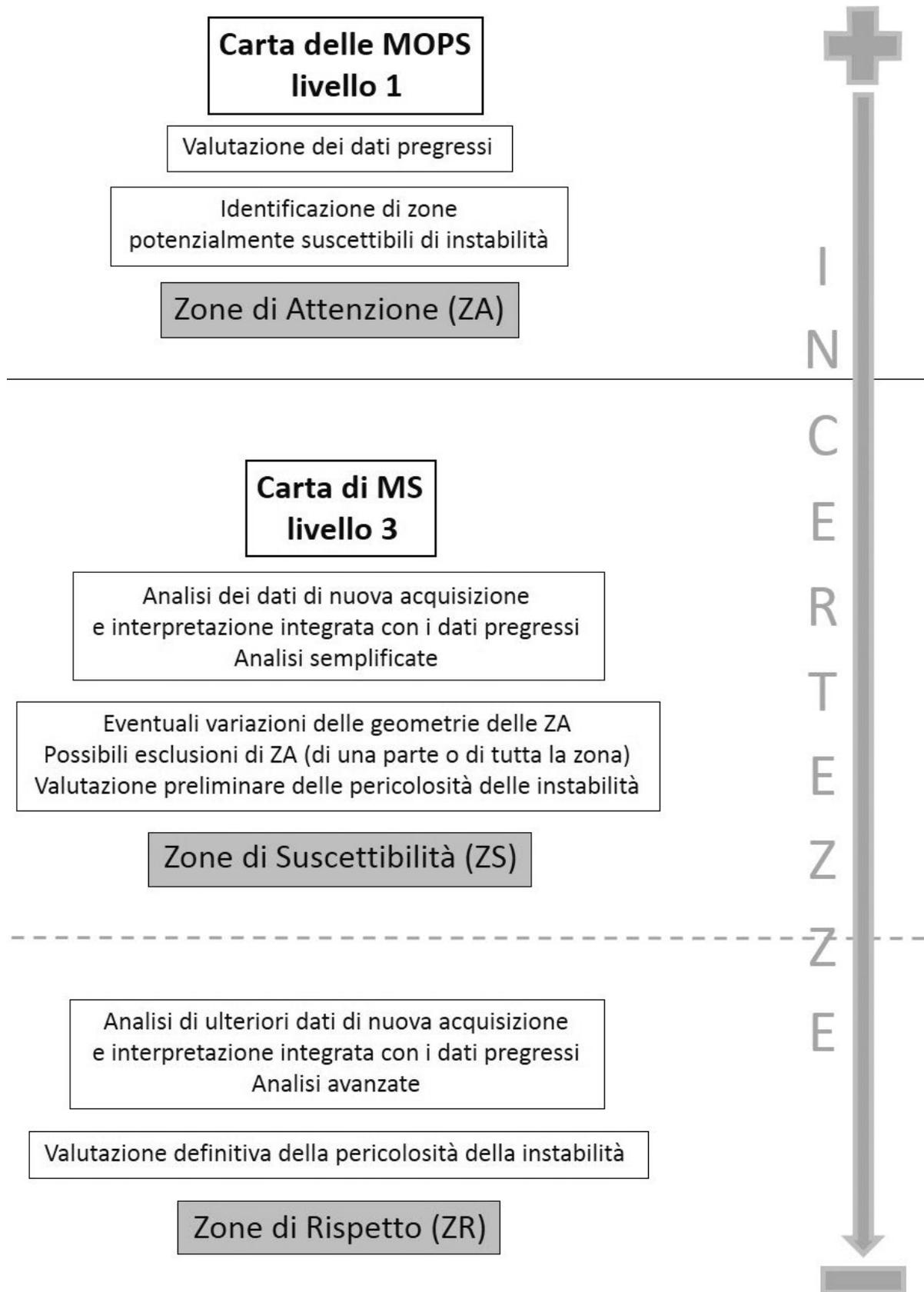
Nell'ambito delle attività indicate dall'Allegato Tecnico alla succitata Ordinanza, non si prevede, infatti, che i professionisti incaricati raggiungano il livello 3 (ovvero l'identificazione di Zone di Suscettibilità, ZS, e/o di Rispetto, ZR, ai sensi della **Figura 3.1**) per i diversi fenomeni di instabilità (instabilità di versante - FR, liquefazione - LQ, e faglie attive e capaci - FAC), ad eccezione delle zone instabili per frana ritenute di particolare interesse per le quali si raggiungerà il livello 3 e verrà quindi eseguita, ove possibile, la procedura di screening tra  $Z_{A_{FR}}$  e  $Z_{S_{FR}}$ . Per ulteriori elementi sulla definizione data da ICMS nelle Linee Guida per le instabilità sismoindotte alle diverse Zone di Attenzione, Suscettibilità e Rispetto si rimanda al successivo **paragrafo 6**.

I dati ricavati nel corso delle attività svolte dai professionisti potranno essere utilizzati allo scopo di perimetrare le  $Z_{S_{FR}}$ , le  $Z_{S_{LQ}}$  e le  $Z_{S_{FAC}}$  in alcune aree pilota, per le quali le Unità Operative Territoriali Regionali (UOTR), a loro discrezione ed onere, ritengano che le informazioni geologiche e geotecniche pregresse e/o acquisite nel corso delle suddette attività siano sufficienti a consentire l'applicazione di metodi semplificati e/o semiempirici per la quantificazione della suscettibilità all'instabilità per frana, liquefazione e fagliazione superficiale in occasione di eventi sismici.

Si ritiene, inoltre, che le ZA debbano essere dettagliate e supportate dal giudizio esperto dei professionisti incaricati limitatamente alle aree previste per le analisi di MS di livello 3; si prevede, in tal caso, la revisione delle perimetrazioni già fornite in eventuali precedenti studi di MS di livello 1. Questa attività di revisione è da considerarsi obbligatoria solo per le aree dove sono previste analisi di MS di livello 3.

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

<sup>33</sup> Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS) scaricabili all'URL: [www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/7-indirizzi-e-criteri-per-la-microzonazione-sismica](http://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/7-indirizzi-e-criteri-per-la-microzonazione-sismica).



**FIGURA 3.1**

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

Figura da *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismodotte (FR)*; <https://www.centromicrozonazioneismica.it/download/category/13-linee-guida-per-la-gestione-del-territorio-in-aree-interessate-da-instabilita-di-versante-cosismiche>.

## 3.2 DEFINIZIONE DELLE ZONE INSTABILI SECONDO LE LINEE GUIDA ICMS

In **Figura 3.1** è rappresentato uno schema, applicabile a tutte le possibili instabilità sismoindotte (frane, liquefazioni, faglie attive e capaci e cedimenti differenziali), che sintetizza le attività, i risultati attesi e il tipo di zona suscettibile di instabilità nell'ambito dei diversi livelli di approfondimento degli studi per la microzonazione sismica (MS). È da sottolineare l'opportunità di rendere totalmente omogenea, per le diverse instabilità, l'identificazione, il significato e la denominazione delle zone suscettibili di instabilità che, come si evince dal succitato schema, sono di tre tipi:

- Zone di Attenzione (ZA) negli studi per la Carta delle MOPS
- Zone di Suscettibilità (ZS) negli studi per la Carta di MS
- Zone di Rispetto (ZR) negli studi di per la Carta di MS.

**Zone di Attenzione (ZA):** sono zone nelle quali i dati a disposizione indicano la presenza di condizioni predisponenti l'instabilità in esame ma non sono sufficienti, in quantità e tipologia, per definire se l'instabilità possa effettivamente verificarsi in caso di evento sismico; è possibile, tuttavia, ad esempio attraverso la consultazione di inventari, stabilire la presenza e/o l'accadimento di eventuali fenomeni in occasione di eventi sismici passati.

**Zone di Suscettibilità (ZS):** zone nelle quali, a seguito di una raccolta dati specifica per l'instabilità in esame e l'applicazione di metodi di analisi il più delle volte semplificati (per permettere un'applicazione dei risultati a un'area estesa), è possibile fornire una stima quantitativa della pericolosità.

**Zone di Rispetto (ZR):** zone nelle quali, a seguito di una raccolta dati specifica per l'instabilità in esame e l'applicazione di metodi di analisi il più delle volte avanzati (per analizzare dettagliatamente aree limitate e/o particolarmente importanti), è possibile quantificare in modo affidabile la pericolosità.

## 3.3 Zone di Attenzione per le Frane ( $ZA_{FR}$ )

In accordo con le Linee Guida relative alle instabilità per frana (**Figura 3.1**), le zone di Attenzione ( $ZA_{FR}$ ) sono zone nelle quali i dati a disposizione indicano la presenza di condizioni predisponenti l'instabilità in esame ma non sono sufficienti, in quantità e tipologia, per definire se l'instabilità possa effettivamente verificarsi in caso di evento sismico; è possibile, tuttavia, ad esempio attraverso la consultazione di inventari, cataloghi e documenti esistenti (tra cui IFFI, PAI e rapporti tecnici predisposti da gruppi collaboranti con il CentroMS, p.es. CEDIT, ISPRA, AGI-GEER<sup>34</sup>) stabilire se in occasione di eventi sismici passati, nonché di quelli più recenti, si siano verificati eventuali fenomeni di instabilità.

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

- a. acquisizione integrale delle perimetrazioni PAI + IFFI come dato pregresso;
- b. rilevamento geologico, geomorfologico e geomeccanico, e verifica in sito delle perimetrazioni PAI+IFFI;
- c. eventuale rettifica (mai in difetto) delle aree PAI+IFFI e conseguente nuova perimetrazione;

<sup>34</sup> CEDIT - [www.ceri.uniroma1.it/index.php/web-gis/cedit/](http://www.ceri.uniroma1.it/index.php/web-gis/cedit/); AGI-GEER - [www.geerassociation.org/](http://www.geerassociation.org/); IFFI - [www.progettoiffi.isprambiente.it/](http://www.progettoiffi.isprambiente.it/).

- d. restituzione di due *layer* informativi distinti, comprendenti:
- 1) perimetrazione PAI+IFFI originale;
  - 2) nuova perimetrazione.

Per ciò che attiene **il punto b)** si richiede che vengano effettuati rilievi georiferiti in corrispondenza delle seguenti tipologie di contesti effettivamente o potenzialmente instabili: **1)** coperture; **2)** corpi di frana; **3)** ammassi rocciosi fratturati.

Il suddetto rilevamento dovrà essere condotto attraverso l'osservazione di forme tipicamente connesse a zone sorgente e/o zone di accumulo per frane in terra e roccia. I dati relativi al rilevamento dovranno essere riportati nelle schede informative fornite dal CentroMS e allegate al presente documento (**allegati cap. 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, Capito 9**) ai fini della creazione di un *database* che verrà realizzato dal CentroMS.

Le schede contengono informazioni descrittive e/o semi-quantitative che si ritengono utili a:

- geolocalizzare i contesti effettivamente o potenzialmente instabili;
- fornire indicazioni preliminari in base alle quali indirizzare future indagini geognostiche, prove geotecniche ed attività di monitoraggio finalizzate alla caratterizzazione stratigrafica, fisico-meccanica e all'analisi dei cinematismi in atto nei contesti instabili;
- omogeneizzare il dato rilevato, garantendo una base informativa minima, comune a tutti i contesti territoriali, in chiave geologica e geotecnica su cui innestare futuri studi di livello 3 volti a definire Zone di Suscettibilità ( $ZS_{FR}$ ) e di Rispetto ( $ZR_{FR}$ ) per fenomeni di frana.

Per ciò che attiene **il punto c)**, le operazioni di riperimetrazione dei corpi di frana PAI+IFFI dovrà avvenire solo in eccesso, ovvero solo nel caso in cui il rilevamento evidenzi una lacuna nelle instabilità indicate nei dati pregressi e/o una sottostima della loro estensione. Ciò può essere imputato all'evoluzione stessa dei processi gravitativi in atto (nel caso che i prodotti pregressi siano significativamente datati) o anche a lacune informative esistenti negli stessi. Non si ritiene, invece, ammissibile l'eliminazione di elementi instabili già inventariati nei prodotti ufficiali pregressi che, come tali, pongono un vincolo sovraordinato da parte dei PAI alle carte di MS di livello 3 nell'uso del territorio.

Per ciò che attiene **il punto d)**, la perimetrazione ufficiale PAI+IFFI dovrà essere fornita su un *layer* informativo distinto da quello in cui si riporterà l'eventuale nuova perimetrazione. I professionisti incaricati sono tenuti a segnalare esplicitamente nelle relazioni di accompagnamento le discrepanze riscontrate tra i due *layer* informativi fornendo, come annesso alle relazioni, una carta che evidenzi le differenze cartografiche rilevate. In definitiva, prescindendo da quanto indicato dalle linee guida (**Figura 3.2**), nell'ambito delle attività previste dalla presente Ordinanza i professionisti incaricati dovranno riportare nelle carte di MS di livello 3 solo le  $ZA_{FR}$ ; saranno, invece, le singole UOTR territoriali a valutare l'opportunità di restituire, a loro discrezione ed onere, anche la delimitazione delle  $ZS_{FR}$  nelle carte di MS che saranno consegnate ai Comuni.

Per ciò che attiene le frane in roccia, secondo quanto previsto dalle linee guida ICMS (**Figura 3.3**), le  $ZA_{FR}$  nella loro perimetrazione dovranno contenere informazioni sulle aree di invasione (*runout distance*) dedotte da evidenze geomorfologiche (distribuzione dei depositi di frana) ed eventualmente supportate da valutazioni quantitative semplificate di natura empirico-statistica.

**FIGURA 3.2**

Livelli, carte e corrispondenti tipi di zone di instabilità di versante.

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

**FIGURA 3.3**

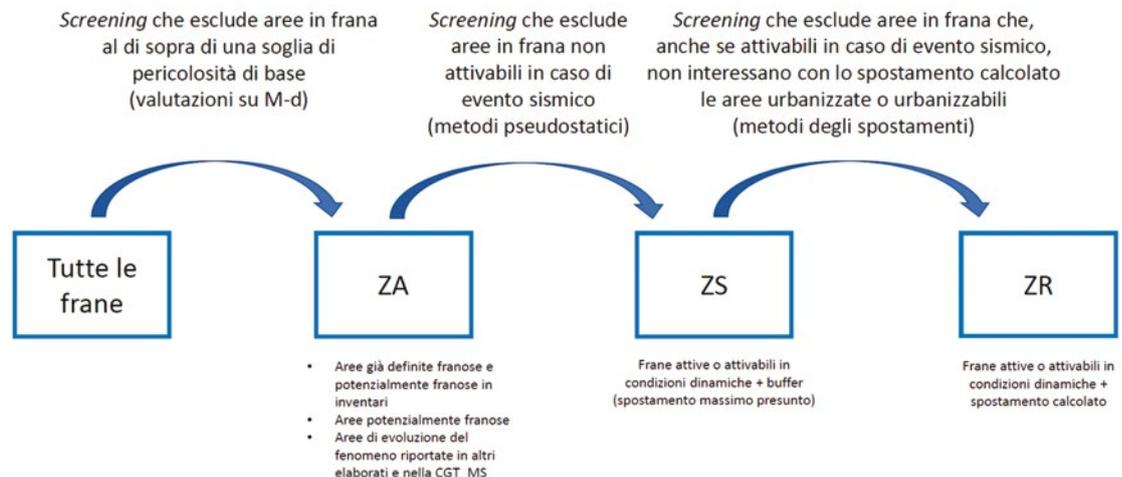
Schema riassuntivo per la verifica delle condizioni per l'individuazione delle zone per le frane di crollo.

Metodi	Parametro	ZONE	CARTA	LIVELLO MS
Analisi inventari Metodi empirici	<i>Runout distance</i>	$Z_{A_{FR}}$ (Zona di Attenzione)	MOPS	1
Non si effettuano studi sulle instabilità		$Z_{A_{FR}}$ (Zona di Attenzione)	MS	2
Valutaz. Attività RIIAP-MS	$FR_{ATT}$ Soglia	$Z_{S_{FR}}$ (Zona di Suscettibilità)	MS	3
Metodi empirici	<i>Runout distance</i>			
Analisi del moto di caduta blocchi	<i>Runout distance</i> FRR	$Z_{R_{FR}}$ (Zona di Rispetto)	MS	3

L'identificazione delle  $Z_{A_{FR}}$  secondo le linee guida sulle instabilità di versante (Figura. 3.4) consente di condurre, in un successivo livello 3, una operazione di *screening* che escluda dalle aree instabili perimetrate (considerando sia le aree effettivamente instabili, sia quelle potenzialmente instabili) quelle che non possono attivarsi in caso di evento sismico, ricorrendo a metodi semplificati (pseudostatici). Le aree in frana che dovessero risultare instabili all'azione sismica in queste analisi costituiranno la perimetrazione delle  $Z_{S_{FR}}$ . Solo studi più specifici ed approfonditi, finalizzati ad individuare le aree di invasione delle infrastrutture e/o del tessuto urbano, consentiranno di evincere dalle  $Z_{S_{FR}}$  le  $Z_{R_{FR}}$ .

**FIGURA 3.4**

Metodologia generale di individuazione delle ZA, ZS e ZR per le instabilità di versante (frane), da Linee Guida annesse ad ICMS.



Le figure di questa pagina sono da *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR)*; <https://www.centromicrozonazioneismica.it/download/category/13-linee-guida-per-la-gestione-del-territorio-in-aree-interessate-da-instabilita-di-versante-cosismiche>.

### 3.4 Zone di Attenzione per la Liquefazione ( $ZA_{LQ}$ )

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

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

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

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

La CGT deve altresì guidare alla individuazione delle aree nelle quali si possa ipotizzare la presenza di terreni non coesivi, saturi, nei primi 20 m di sottosuolo. Tale individuazione dovrà essere accompagnata da una descrizione specifica affinché possano essere condotti negli studi di livello 3 gli approfondimenti necessari a verificare l'effettiva presenza di condizioni predisponenti il fenomeno della liquefazione, arrivando in questo modo alla perimetrazione delle  $ZS_{LQ}$  e delle  $ZR_{LQ}$  (Figura 3.5).

Nell'ambito delle attività previste dall'Ordinanza in questione, ai fini della perimetrazione delle aree liquefacibili negli studi di MS di livello 3, i professionisti incaricati dovranno integrare e verificare, eventualmente modificando in eccesso o in difetto, la delimitazione delle  $ZA_{LQ}$  presenti nelle carte delle MOPS già ufficializzate. Saranno, invece, le singole UOTR a valutare, a loro discrezione ed onere, se, per alcune aree pilota ed a partire dalle  $ZA_{LQ}$  definite dai professionisti, ottenere le  $ZS_{FR}$ , restituendone la delimitazione nelle carte di MS che saranno consegnate ai Comuni dai professionisti incaricati.

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

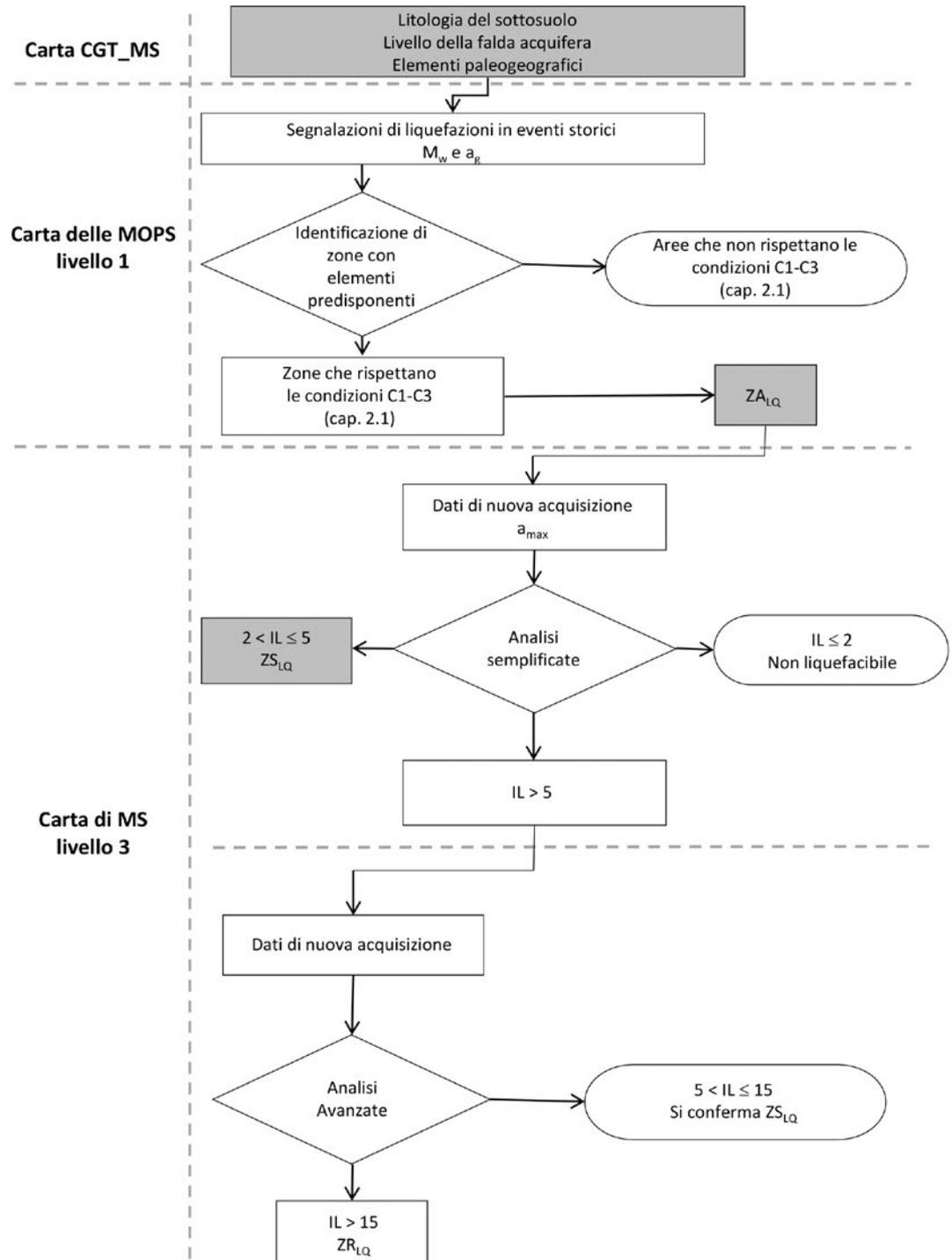
- C1.** nella successione litologica sono presenti orizzonti di terreni non coesivi saturi (limi sabbiosi, sabbie, sabbie limose, sabbie ghiaiose, sabbie argillose e ghiaie sabbiose) ad una profondità inferiore a 20 m dal p.c.;
- C2.** la falda acquifera si trova ad una profondità media stagionale inferiore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

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

**FIGURA 3.5**

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

Figura da *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni*; <https://www.centromicrozonazioneismica.it/it/download/category/21-linee-guida-per-la-gestione-del-territorio-in-aree-interessate-da-liquefazioni>.



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

La procedura di perimetrazione prevede che:

- nell'ambito della elaborazione della Carta delle MOPS e della Carta di MS di livello 3, le  $ZA_{LQ}$  siano individuate tra quelle suscettibili di amplificazione (ovvero le zone nelle quali sono verificate le condizioni C1 e C2);
- una  $ZA_{LQ}$  possa essere costituita da una o da più zone suscettibili di amplificazione anche confinanti;
- per la  $ZA_{LQ}$  dovrà essere specificata anche la successione litostratigrafica nei primi 20 m.

### 3.5 Zone di Attenzione per le Faglie Attive e Capaci ( $ZA_{FAC}$ )

La microzona omogenea che sarà riportata nelle MOPS del livello 1 di MS relativa alle FAC sarà costruita in modo da comprendere la supposta traccia del piano di rottura principale e i probabili fenomeni deformativi del terreno correlati al piano di rottura principale. Questa zona sarà denominata  $ZA_{FAC}$  (Zona di Attenzione per FAC) e rimanderà obbligatoriamente a livelli di approfondimento specifici, propri del livello 3 previsto da ICMS.

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

- l'area oggetto di studi di MS ricade in area epicentrale di terremoti storici con  $M_w > 5.5$  (cfr. CPT15<sup>35</sup>);
- la letteratura scientifica disponibile già riporta la presenza di faglie all'interno di formazioni tardo-pleistoceniche-oloceniche;
- sono segnalate evidenze di attività recente delle faglie rilevate sul campo da geologi, durante i rilievi geologico-tecnici per la stesura delle carte di MS.

Solo nel livello 3 di MS una  $ZA_{FAC}$  potrà essere distinta in certa (tipo \_a) ed incerta (tipo \_b) in base ad una valutazione di robustezza e chiarezza degli elementi geologici e geomorfologici a essa associati. Tale distinzione dovrà guidare alla scelta ed all'applicazione di metodi diagnostici di livello 3, di tipo paleosismologico.

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

I professionisti dovranno limitarsi a perimetrare le  $ZA_{FAC}$  nelle CGT e nelle MOPS e le eventuali  $ZA_{FPAC}$  nelle sole CGT, in entrambi i casi le perimetrazioni saranno basate sull'acquisizione di dati pregressi o direttamente rilevati per il presente studio. Nel caso delle FAC questi dati dovranno consentire di verificare almeno 2 delle condizioni preliminari sopra elencate, nel caso delle FPAC l'indicazione geologica sarà mantenuta in via ipotetica nella sola CGT.

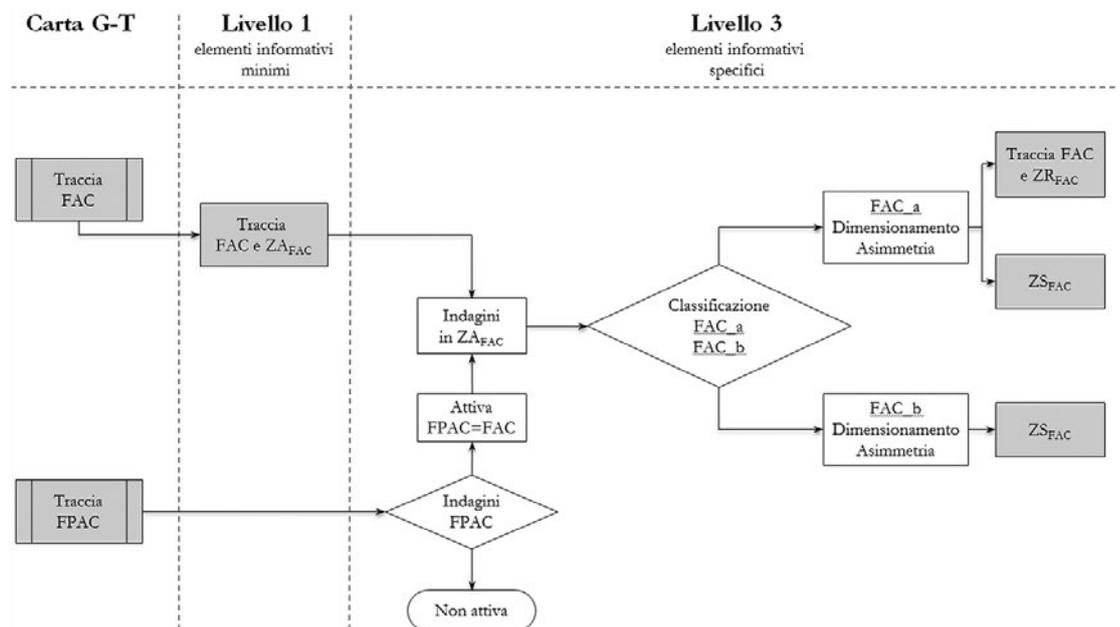
<sup>35</sup> Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), 2016. CPT15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi: [doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT15](https://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT15).

A propria discrezione ed onere, le UOTR potranno definire le Zone di Suscettibilità per le FAC ( $ZS_{FAC}$ ) per alcune aree pilota, cartografandole nelle carte di Microzonazione Sismica di livello 3. Per come definite da ICMS, le  $ZS_{FAC}$  sono atte a delimitare l'area nella quale sono localizzate la traccia del piano di rottura principale della faglia attiva e capace e altre possibili strutture tettoniche secondarie associate al piano di rottura principale, e le zone di trasferimento tra segmenti distinti della faglia. Le Linee Guida, a tale riguardo, precisano che la  $ZS_{FAC}$  dovrà essere definita per quelle faglie attive e capaci le cui informazioni disponibili, sia pregresse che acquisite appositamente, non permettano di definire con chiarezza la traccia principale della faglia e gli elementi secondari ad essa associati. La  $ZS_{FAC}$  può essere tracciata in modo asimmetrico rispetto alla traccia (*footwall* e *hangingwall*) della faglia.

In caso le UOTR decidano di delimitare le  $ZS_{FAC}$  nelle carte di MS, secondo lo schema operativo proposto dalle Linee Guida (**Figura 3.6**) esse dovranno per prima cosa occuparsi della distinzione delle FAC di tipo *\_a* da quelle di tipo *\_b* e dimensionare le rispettive  $ZS_{FAC}$  nella consapevolezza che solo le FAC di tipo *\_a* saranno, in futuro, oggetto di studi paleosismologici di livello 3, che porteranno alla perimetrazione delle  $ZR_{FAC}$ .

**FIGURA 3.6**  
Procedure di dimensionamento delle zone di faglia nei differenti livelli di approfondimento degli studi di MS.

Figura da  
Linee guida per la gestione del territorio interessato da faglie attive e capaci;  
<https://www.centromicrozonazioneisismi.ca.it/it/download/category/10-linee-guida-per-la-gestione-del-territorio-interessato-da-faglie-attive-e-capaci>.



### 3.6 Instabilità da sprofondamento

Questa tipologia di instabilità interessa casi particolari, in genere territorialmente circoscritti, ed è oggetto di specifici disciplinari.

Lo schema di lavoro può essere riassunto come segue:

- a. raccolta ed elaborazione dei dati pregressi
- b. censimento e rilievo delle cavità anche attraverso metodi topografici, speleologici e tramite video ispezione;
- c. realizzazione di indagini geofisiche 2D e/o 3D (ad es. microgravimetria, georadar, ERT) finalizzate a completare il quadro conoscitivo nelle aree non esplorabili e dunque direttamente visionabili;
- d. realizzazione di indagini dirette con prelievo di campioni per la caratterizzazione fisico-meccanica dei materiali potenzialmente coinvolti dai dissesti;
- e. ripermimetrazione della Zona di Attenzione (ZA) per cavità e aggiornamento dello studio di microzonazione sismica.

Per le attività di cui al punto e) le evidenze basate su indagini dirette o indirette potranno essere integrate con l'applicazione di metodologie semplificate che facciano uso della probabilità di presenza di una cavità e di un eventuale conseguente collasso.

### 3.7 Sintesi operativa

Si riporta di seguito una sintesi schematica operativa dei livelli richiesti per l'analisi delle instabilità nei prodotti di consegna di livello 1 e 3 previsti dall'Ordinanza in questione. Sono specificati i prodotti di competenza diretta dei professionisti incaricati (che saranno oggetto di supervisione da parte delle UOTR) e quelli che potranno essere realizzati dalle UOTR su aree pilota a loro discrezione ed onere.

- \* a discrezione ed onere delle UOTR e solo in alcune aree pilota da relizzare
- CGT** Carta Geologico Tecnica
- MOPS** Carta delle MOPS (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica)
- MS** Carta di Microzonazione Sismica

		professionisti incaricati			UOTR*
		livello 1		livello 3	livello 3
		CGT	MOPS	MS	MS
ZA	FR	X	X	X	
	LQ	X	X	X	
	FAC_a	X	X		
	FAC_b	X	X		
	FPAC	X			
ZS	FR				X
	LQ				X
	FAC_a				X
	FAC_b				X
	FPAC				X
ZR	FR				
	LQ				
	FAC				



# 04

## INDAGINI GEOFISICHE DI SUPERFICIE

**Dario ALBARELLO**

UNISI-DSFTA

**Grazia CAIELLI**

CNR IGAG

**Fabrizio CARA**

INGV

**Massimo COMPAGNONI**

POLIMI-DICA

**Roberto DE FRANCO**

CNR IGAG

**Fernando FERRI**

ISPRA

**Sebastiano IMPOSA**

UNICT-DSBGA

**Francesca PACOR**

INGV

**Luca Maria PUZZILLI**

ISPRA

## 4.1 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  $Z_{A_{LQ}}$  saranno validi gli stessi modelli di risposta 1D o 2D delle MOPS stabili e suscettibili di amplificazione; b) per le  $Z_{A_{FR}}$  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  $Z_{A_{FAC}}$  e  $Z_{A_{FPAC}}$  o alle  $Z_{A_{FR}}$  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).

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 della macroarea di appartenenza nominati dal CentroMS, 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.

## 4.2 La pianificazione delle Indagini e l'uso del metodo dei rapporti spettrali (HVSR)

Per la pianificazione delle misure si suggerisce un approccio in due fasi. La prima fase, di tipo esplorativo, è essenzialmente basata sull'esecuzione di misure di vibrazioni ambientali a stazione singola con la tecnica dei rapporti spettrali a integrazione delle misure eventualmente esistenti (per una descrizione di dettaglio del metodo HVSR si rimanda ai *Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica* già citati). Esito di questa campagna è la costruzione di una carta delle frequenze di picco della curva HVSR, in scala almeno 1:10000 eventualmente integrata con misure SSR (Standard Spectral Ratio) da registrazioni di terremoti (se disponibili). Scopo di questa prima fase è supportare il modello geologico con una valutazione del livello di omogeneità

delle diverse MOPS (ed eventualmente delle aree instabili con le limitazioni descritte in precedenza) indeterminate su base geologica. Questa campagna fornirà una stima delle frequenze di risonanza che caratterizzano l'area esplorata mettendo in evidenza le situazioni dove sembrano esistere contrasti di impedenza maggiori e fornendo indicazioni di massima sulla profondità di questi contrasti. La scelta della densità e della distribuzione dei punti di misura dipenderà dal livello di eterogeneità messo in evidenza dal modello geologico. Comunque si suggerisce come minimo una copertura con distanze fra i punti di misura dell'ordine di 400-600 metri, con densità maggiori (200-300 m) laddove richiesto da specifiche situazioni. In questo genere di analisi potrebbe essere utile determinare le aree caratterizzate da frequenze di risonanza appartenenti ai tre diversi domini di frequenza indicati nell'Ordinanza 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, indicati nell'Ordinanza per la stima di FA). Per una descrizione di protocolli sperimentali relativi alle misure HVSR si rimanda nuovamente alla pubblicazione *Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione* ed ai riferimenti in essa contenuti. 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 valori di ampiezza: si dovrà quindi porre la massima attenzione nel garantire un buon accoppiamento dello strumento di misura (velocimetro tri-direzionale) con il terreno, alle condizioni ambientali durante la misura e al possibile influsso di sorgenti di disturbo;
- dato che le misure hanno come obiettivo la determinazione di proprietà medie del campo di vibrazioni ambientali, la scelta di una opportuna durata delle registrazioni è importante: si suggerisce una durata complessiva non inferiore a 20-30 min 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; quando gli spettri di ampiezza sono calcolati con un metodo di accumulo (stacking) dei valori ottenuti su sotto-finestre della serie campionata, si suggerisce per ciascuna finestra una dimensione temporale di 20-30 sec e comunque tale che il numero complessivo di finestre considerate per la stima finale (ovvero dopo l'eventuale rimozione dei transienti) non sia 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 nei *Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione* procedendo alla ripetizione delle misure quando necessario a valutare la loro effettiva ripetibilità;
- tutte le misure HVSR infine considerate attendibili ed oggetto di interpretazione dovranno essere corredate da Fogli Campagna per l'Acquisizione HVSR in formato

testo, una descrizione delle procedure di post-elaborazione adottate, un file in formato digitale ASCII con i valori dei rapporti spettrali medi per le diverse frequenze e relativo intervallo di confidenza, le registrazioni, un file in formato ASCII o altro standard sismologico (p.es. SAC) delle registrazioni.

Nella seconda fase, in funzione del modello Geologico e dei risultati ottenuti nella prima fase, si procederà all'esecuzione delle misure volte alla stima dei profili di Vs da attribuire alle diverse MOPS incluse le aree instabili secondo 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) e tecniche basate sulla misura delle velocità di fase delle onde superficiali sia in configurazione attiva (MASW) che passiva (ESAC, ReMi, ecc.). Per una trattazione esaustiva delle tecniche a rifrazione in SH si rimanda agli allegati tecnici degli *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica* citati sopra.

### 4.3 La determinazione del profilo di Vs: tecnica MASW

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

- la strumentazione deve essere adatta agli scopi con utilizzo di 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 ( $> 5-10$ m).

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;
- a partire dai valori delle velocità di fase delle onde di Rayleigh (VR), una 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);
- 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. Va comunque sottolineato che molte configurazioni sismo-stratigrafiche risulteranno comunque 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 ultime 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.

## 4.4 Le incertezze

Al fine di permettere una migliore valutazione dei risultati delle inversioni in rapporto ai vincoli geologici, sarebbe opportuno effettuare una valutazione del livello di incertezza che caratterizza il profilo di Vs ottenuto per una singola microzona. Questa incertezza è legata sia alla mancata univocità del modello di sottosuolo sia alle eventuali variazioni laterali nella stessa microzona. Allo scopo di valutare l'entità della prima forma di 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. Per una trattazione più articolata delle modalità di implementazione delle incertezze si rimanda al **capitolo 6 (paragrafo 6.5 e 6.6)** dove viene descritta una procedura compatibile con le procedure numeriche per la valutazione della risposta sismica locale 1D (in particolare il codice STRATA).

# 05

## INDAGINI IN SITU E PROVE DOWN-HOLE

**Iolanda GAUDIOSI**

CNR IGAG

**Claudia MADIAI**

UNIFI-DICeA

**Maurizio SIMIONATO**

CNR IGAG

**Paolo TOMMASI**

CNR IGAG

## 5.1 Premessa

Il contenuto di questo capitolo è relativo all'esecuzione delle indagini geognostiche in situ. In particolare vengono definite alcune specifiche tecniche inerenti le attività di: i) realizzazione di sondaggi a carotaggio continuo; ii) prelievo di campioni indisturbati per indagini di laboratorio; iii) esecuzione di prove penetrometriche dinamiche SPT e di prove penetrometriche statiche CPT, CPTU, SCPT; iv) condizionamento del foro di sondaggio per l'esecuzione di prove sismiche di tipo Down Hole (in seguito DH); v) esecuzione della prova DH.

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

## 5.2 Scelta del sito di prova

La scelta del sito in cui allestire il foro per la prova sismica di tipo DH dovrà avvenire in concerto con la Struttura di supporto e coordinamento. Essa dovrà essere effettuata in modo da garantire la massima rappresentatività dei risultati in rapporto alle caratteristiche del territorio oggetto della microzonazione sismica e tenere conto della logistica necessaria all'esecuzione dell'indagine, ivi compresa la sicurezza dei differenti operatori che si avvicineranno sul sito. Non è superfluo ricordare che, ad esempio, occorrerà posizionarsi lontano da edifici pericolanti e comunque in aree facilmente accessibili con strumenti e mezzi per l'esecuzione della prova DH.

L'indisponibilità di misure geofisiche di superficie pregresse, ottenute lungo stendimenti 1D e 2D attivi e/o passivi, che consentano la definizione di profili di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ), o l'impossibilità di acquisirne ex-novo in determinati punti (per motivi legati all'eventuale presenza di geometrie bidimensionali e alla logistica), potranno essere elementi guida per individuare la collocazione del foro da attrezzare ai fini dell'esecuzione della prova DH. In pratica, andrebbe favorita una localizzazione nella quale siano presenti le principali unità stratigrafiche/geofisiche e il Substrato Geologico sia raggiungibile e rappresentativo per la definizione del Substrato Sismico. Viceversa, i risultati ottenuti dalle misure DH potranno fornire un elemento di confronto importante con le misure geofisiche di superficie, laddove esse siano presenti per tutti i litotipi da caratterizzare. Nel caso di geometrie sepolte profonde con profondità del Substrato Geologico molto superiore a 35m e pertanto non investigabili completamente tramite la prova, l'ubicazione potrà essere scelta in maniera tale da poter pervenire alla caratterizzazione completa della verticale tramite inversione congiunta con la forma della curva HVSR, facendo uso del profilo di DH come vincolo e/o eventualmente della curva di dispersione di una prospezione sismica su antenna sismica ricavata per lo stesso sito.

L'ubicazione della prova, inoltre, dovrebbe essere stabilita tenendo conto di un contesto ed una scala più ampia di quello del singolo Comune in modo da poter utilizzare in maniera organica, ai fini della caratterizzazione del sottosuolo, di più DH eseguite in più Comuni limitrofi. In altre parole, le ubicazioni andranno scelte in modo da poter ottenere profili di  $V_s$  per tutte le tipologie di coperture presenti nelle aree oggetto di microzonazione sismica. Questo importante lavoro di coordinamento spetta alla Struttura di supporto e coordinamento che coordina l'affidatario nelle operazioni di campagna per la scelta del sito.

### 5.3 Precisioni di carattere generale

Nell'esecuzione delle attività concernenti le indagini geognostiche e le prospezioni sismiche in fori di sondaggio sono inclusi oneri e costi occorrenti per: il prelievo di almeno un campione indisturbato di terreno che 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.

L'affidatario 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 dalla Struttura di supporto e coordinamento.

### 5.4 Modalità tecniche esecutive dei sondaggi geognostici

Le modalità operative delle indagini oggetto delle presenti prescrizioni tecniche, sono conformi, per quanto possibile, alle "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche" A.G.I., 1977 e prescrizioni previste dalla ASTM "Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing" – Designation, D 7400-17. L'affidatario dovrà in ogni caso attenersi a quanto di seguito specificato.

#### 5.4.1 SONDAGGI GEOGNOSTICI

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

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

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

La profondità che in linea di massima dovrà essere raggiunta da ciascun sondaggio è fissata a 35 m dal piano campagna. La Struttura di supporto e coordinamento potrà in ogni caso disporre che il foro sia arrestato a profondità minore di quella indicata inizialmente. I metri non utilizzati potranno essere mutuati in altra tipologia di acquisizione, previa comunicazione e concordemente con quanto indicato dalla Struttura di supporto e coordinamento.

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

A tale scopo, a meno di indicazioni diverse da parte della Struttura di supporto e coordinamento, le pareti del foro dovranno essere stabilizzate con tubi metallici con funzioni di rivestimento provvisorio aventi le seguenti caratteristiche:

- spessore tubo = 8÷10 mm
- diametro interno =101÷147 mm (vedi anche **paragrafo 5.6**)
- lunghezza spezzoni =150÷200 cm

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 sempre seguire la perforazione.

L'affidatario ha l'obbligo di fornire il carotaggio dei fori o dei tratti di foro, precisati dal Professionista incaricato su approvazione della Struttura di supporto e coordinamento, 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 (calcarei, 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 della Struttura di supporto e coordinamento, dovesse risultare inferiore alle percentuali sopra indicate, l'Amministrazione potrà prevedere una riduzione dell'importo in fase di contabilità finale ovvero potrà richiedere un aumento della profondità del sondaggio per una lunghezza pari al tratto con percentuale di recupero inadeguata.

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

- scandaglio a filo graduato, per la misura della quota di fondo foro raggiunta dalla perforazione;
- sondina piezometrica elettrica;
- penetrometro tascabile, con fondo scala > 0.5 MPa (5 kg/cm<sup>2</sup>);
- scissometro tascabile con fondo scala non inferiore a 100 kPa.

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

Considerando la litologia media e la consistenza dei terreni costituenti i depositi oggetto di indagini, la circolazione di fluidi dovrà essere attuata nelle modalità strettamente indispensabili al raffreddamento degli utensili e al sostegno dell'eventuale instabilità del foro, ciò al fine di evitare un disturbo eccessivo delle condizioni originarie o un eccessivo sovracarotaggio.

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

### 5.4.3 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.

### 5.4.4 PRELIEVO, CONSERVAZIONE E TRASPORTO DEI CAMPIONI

L'affidatario dovrà provvedere al prelievo di almeno un campione indisturbato, alla profondità e con le modalità concordate con la Struttura di supporto e coordinamento. L'affidatario recapiterà i campioni fino all'area concordata con la Struttura di supporto e coordinamento e garantirà le modalità di conservazione più opportune in relazione alla natura dei terreni. Tutti i campioni prelevati dovranno essere riposti in luogo riparato dal gelo e dal sole, possibilmente umido, in attesa di essere inviati al laboratorio. La Struttura di supporto e coordinamento specificherà il luogo della spedizione e/o consegna presso i laboratori certificati, fermo restando che l'onere del trasferimento è a carico dell'affidatario. Il prezzo del prelievo è infatti incluso nel costo forfettario del foro e comprende tutti gli oneri necessari all'estrazione e conservazione dei campioni, anche se non specificati (estrazione del campione, fornitura della fustella metallica necessaria, paraffinatura e sigillatura della fustella e conservazione del campione nella fustella).

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

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 suoi limiti operativi.

Per il campionamento e il mantenimento dei campioni dovranno essere utilizzate fustelle metalliche preferibilmente nuove o in ottimo stato di conservazione (senza ammaccature

significative, con particolare riguardo alla scarpa tagliente). Le fustelle contenenti i campioni dovranno essere sigillate alle due estremità con appositi tappi a tenuta, bloccati da nastri adesivi, previo trattamento di protezione delle due estremità del campione mediante colaggio o pennellatura di paraffina fusa.

Tutti i campioni prelevati dai fori di sondaggio, dovranno essere accompagnati da una etichetta da applicare al contenitore, non degradabile per umidità, in cui sono indicati:

- la denominazione del campione, specificando che si tratti di campione
- indisturbato o disturbato;
- il tipo di terreno all'interno del quale è stato prelevato;
- la profondità di prelievo del campione;
- la data di prelievo del campione.

Per ognuno dei campioni, oltre all'etichetta, dovrà essere inoltre allegata al campione, su un supporto cartaceo, una scheda contenente le seguenti informazioni:

- il Comune, la località in cui è stato eseguito il sondaggio per il quale sono disponibili i campioni indisturbati ed eventualmente i campioni disturbati, la sigla identificativa del sondaggio;
- la profondità effettiva raggiunta;
- la profondità della falda;
- la data di inizio della perforazione e la data di completamento del condizionamento del foro (cioè la data finale delle operazioni di cementazione del foro);
- una stratigrafia semplificata e le 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 alterate dal prelievo (*dilavate*, "cotte", *disturbate*); successivamente, il campione viene inserito in un doppio sacchetto di plastica e contraddistinto con un cartellino indelebile, inserito fra i due sacchetti. Il campione viene poi riposto in luogo riparato dal gelo e dal sole in attesa di essere inviato al laboratorio.

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

#### 5.4.5 CASSETTE

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

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

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

Le cassette dovranno essere fotografate secondo le modalità specificate nel **paragrafo 5.7** 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.

#### **5.4.6 DETERMINAZIONE SPEDITIVA DEGLI INDICI DI RESISTENZA SU CAROTE DI TERRENI COESIVI**

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

#### **5.4.7 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 (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.

### **5.5 Prove penetrometriche**

#### **5.5.1 PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE SPT (Standard Penetration Test)**

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

#### **Normative e specifiche di riferimento**

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

L'affidatario dovrà in ogni caso attenersi a quanto di seguito specificato.

## Caratteristiche dell'attrezzatura

Per la prova dovrà essere usato un tubo campionatore Raymond, in acciaio indurito, apribile longitudinalmente, di diametro esterno  $51 \pm 1$  mm, diametro interno  $35 \pm 1$  mm e lunghezza minima (esclusa la scarpa tagliente terminale) di 457 mm. La scarpa terminale, rastremata a tagliente negli ultimi 19 mm per favorire la penetrazione e costituita anch'essa di acciaio indurito, dovrà essere riparata o sostituita quando sbeccata o distorta.

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

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

## Preparazione del foro

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

Il rivestimento metallico provvisorio del foro, se utilizzato, non deve essere infisso al di sotto della profondità di prova. Dopo la pulizia, la quota del fondo foro deve essere controllata con apposito scandaglio confrontandola con quella raggiunta con la manovra di perforazione; se la differenza tra le due misure supera i 7 cm si deve procedere ad una nuova pulizia del foro.

## Modalità esecutive

La prova si esegue infiggendo a percussione a fondo foro il campionatore per tre tratti consecutivi, ciascuno di 15 cm, annotando separatamente il numero di colpi necessario per la penetrazione in ciascun tratto. L'indice della prova, NSPT, è dato dalla somma del numero di colpi relativo agli ultimi due tratti (ovvero necessari all'infissione negli ultimi 30 cm). L'infissione nel primo tratto viene arrestata in ogni caso dopo 50 colpi. Si identifica la condizione di rifiuto quando nei due tratti successivi si ha un avanzamento minore o uguale di 30 cm con un numero di colpi pari 100. In tal caso viene annotata la lunghezza di infissione (in cm) corrispondente ai 100 colpi. La frequenza di battitura in tutte le fasi della prova non deve essere superiore a 30 colpi al minuto.

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

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

- cantiere;
- n° del sondaggio;

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

### 5.5.2 PROVE PENETROMETRICHE STATICHE CPT (Cone Penetration Test)

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.

#### 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 1000 mm<sup>2</sup>. Il manicotto deve avere una superficie laterale compresa fra 15000 e 2000 mm<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 caratterizza il penetrometro che è di tipo elettrico, nel quale lo sforzo è misurato mediante dispositivi elettrici (ad es. estensimetri) montati direttamente nella punta.

Il dispositivo di spinta deve essere in grado di esercitare sulla batteria di aste cave una spinta di progetto non inferiore a 10 t, con una corsa preferibilmente di un metro, nel caso del penetrometro elettrico; la penetrazione della batteria deve avvenire a una velocità costante e pari a 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.

#### 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.

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

#### 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).

### 5.5.3 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 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. La dimensione e la posizione del filtro poroso alloggiato sul cono devono essere chiaramente specificati. Oltre ai risultati forniti da un comune penetrometro elettrico (RP, RL, RLT e RP/RL rispetto alla profondità) la prova CPTU deve fornire la registrazione in continuo della pressione dinamica dei pori nel volume di roccia intorno alla punta conica.

### 5.5.4 PROVE PENETROMETRICHE STATICHE CON CONO SISMICO (SCPT)

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

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

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

Ad ogni metro di profondità, in concomitanza con la sosta per l'aggiunta di un'altra asta, o eventualmente a profondità prestabilite a seconda delle necessita progettuali, viene

sospesa l'infissione del piezocono e, tramite adeguato sistema di energizzazione situato a p.c., vengono generate delle vibrazioni artificiali nel terreno.

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

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

## 5.6 Posa in opera di tubi per prospezioni sismiche DH

L'esecuzione della prospezione sismica DH richiede la preparazione di un foro di sondaggio, rivestito da tubazione metallica provvisoria, di diametro sufficiente a permettere l'installazione nel foro di un tubo in PVC munito di cannetta laterale per eseguire la cementazione dello stesso procedendo da fondo foro verso la superficie.

Il rivestimento metallico provvisorio dovrà avere un unico diametro in modo che il foro abbia diametro costante per tutta l'altezza e dovrà essere estratto per sfilamento, senza l'aiuto della rotazione. Le caratteristiche del rivestimento provvisorio sono state descritte nel **paragrafo 5.4.1**.

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

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

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

Al termine di tutte le operazioni sopra descritte, si provvederà all'installazione a testa foro di un chiusino di protezione in acciaio verniciato; il chiusino dovrà essere provvisto di un coperchio con chiusura antigelo, di lucchetto e chiavi che dovranno essere consegnate alla Struttura di supporto e coordinamento e successivamente, a lavori finiti, al Comune. Nel caso di installazione in luoghi aperti al traffico veicolare o pedonale (strade, piazzali, marciapiedi), e solo su specifica richiesta del Committente, 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 della Struttura di supporto e coordinamento (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, ad insindacabile giudizio della Struttura di supporto e coordinamento, 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, l'affidatario dovrà a suo onere provvedere a rimuovere la tubazione e procedere ad una nuova installazione. Dovrà essere presentato un breve rapporto sull'installazione del tubo di rivestimento definitivo in PVC, contenente una descrizione delle modalità di iniezione, quantità e composizione della miscela iniettata nell'intercapedine, nonché la segnalazione di eventuali anomalie riscontrate (es. eccessiva dispersione della boiaccia dopo la rimozione del rivestimento provvisorio, ecc.).

In cantiere, l'affidatario, 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 15mm e tubi di rivestimento provvisorio di diametro interno 127mm; tuttavia, nelle situazioni che richiedono l'uso di una miscela di iniezione più densa rispetto a quella indicata nei protocolli (v. capoverso precedente), e quindi di una cannetta di iniezione di diametro maggiore (d=20mm), si consiglia l'uso di tubi di rivestimento provvisorio di diametro interno 147mm.

## 5.7 Documentazione

L'affidatario è tenuto a comunicare tempestivamente alla Struttura di supporto e coordinamento, a richiesta, lo stato di avanzamento dei sondaggi e delle prove in situ, consegnando il rapporto di perforazione aggiornato alla data della richiesta.

Al termine dei sondaggi l'affidatario è tenuto a fornire alla Struttura di supporto e coordinamento il rapporto di perforazione, completo di una breve relazione redatta da un Geologo comprendente la\le verticale\i rappresentante\i in scala la\le stratigrafia\ve di dettaglio rilevata\ve, accompagnata\ve 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 e il numero identificativo del campione;
- la quota del prelievo;
- la lunghezza del campione (nominale nel caso di campioni indisturbati);
- la natura del campione;
- la modalità del prelievo;
- la data del prelievo;
- la data di spedizione e/o consegna all'area indicata dalla Struttura di supporto e coordinamento.

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

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

A tal fine si dovranno seguire le seguenti indicazioni:

- le cassette verranno fotografate singolarmente, con pellicola a colori o fotocamera digitale, entro breve tempo dal loro completamento (max 24 ore) e comunque prima di modificazioni dovute all'essiccamento;
- si richiede una visione chiara delle carote contenute, scegliendo le condizioni di illuminazione ottimali (evitando luci ed ombre) e un adeguato numero di pixel;
- si raccomanda una foto presa dall'alto e scattata da una distanza non superiore a 2 m;
- eventuali attività di rimaneggiamento delle carote, al fine di verificare dati di consistenza o plasticità di tipo speditivo, dovranno essere immediatamente seguite da riprese fotografiche;
- le carote litoidi dovranno essere lavate;
- si richiede la completa leggibilità di tutte le indicazioni esistenti sulla cassetta (sigla sondaggio, profondità progressive, testimoni di campionamenti ecc.);
- nelle fotografie dovrà essere visibile la tavola cromatica di riferimento.

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

## **5.8** **Prospezioni sismiche in foro down-hole: modalità tecniche esecutive**

### **5.8.1** **NORMATIVE E SPECIFICHE DI RIFERIMENTO**

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".

### **5.8.2** **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);
- 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, cls o teflon, ben saldato al terreno, dovrà essere collocata ad una distanza adeguata dalla bocca del foro in funzione della migliore risoluzione dell'indagine stessa.

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

I ricevitori tridirezionali, 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 la Struttura di supporto e coordinamento.

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 SEGY standard o come eventualmente indicato dalla Struttura di supporto e coordinamento, 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.

### 5.8.3 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.

### 5.8.4 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.

### 5.8.5 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.



# 06

## MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE IN CONFIGURAZIONE 1D

**Dario ALBARELLO**

UNISI-DSFTA

**Claudia MADIAI**

UNIFI-DICeA

## 6.1 Premessa

**Obiettivo delle analisi numeriche** previste dall'Ordinanza n.24 del 12 Maggio 2017 è la determinazione di alcuni parametri rappresentativi della Risposta Sismica Locale (RSL) in tutte le Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), sia quelle definite come stabili e soggette a fenomeni di amplificazione sia quelle instabili ad esclusione delle  $ZA_{FR}$  qualora il corpo di frana abbia spessori inferiori ai 10 m, di quelle  $ZA_{FR}$  già corrispondenti alla categoria R3-R4 secondo la classificazione PAI o già acquisite come vincolo territoriale a valle di precedenti studi di MS1 e dei buffer associati a  $ZA_{FAC}$  o  $ZA_{FPAC}$ .

I parametri di interesse determinati sulla base delle analisi 1D di RSL 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 ( $S_a$ ); nel caso in cui siano disponibili input sismici forniti dalla Regione, essi costituiranno un ulteriore insieme di accelerogrammi, previa ulteriore comunicazione ed indirizzo da parte del CentroMS.
- b. Fattori di Amplificazione (FA) relativi a tre intervalli di periodi (0.1-0.5s, 0.4-0.8s e 0.7-1.1s).

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

La modellazione sarà effettuata dall'incaricato utilizzando uno fra i codici di calcolo disponibili (Skake91, STRATA, EERA, Deepsoil, ProShake ecc.), che operano nel dominio delle frequenze e modellano il comportamento non lineare dei terreni mediante il metodo lineare equivalente (nel seguito, per comodità, si farà esplicito riferimento solo al codice STRATA<sup>36</sup>, considerato come rappresentativo di tutti gli altri). In questi modelli, il sottosuolo è schematizzato mediante una successione di strati sovrapposti, orizzontali e omogenei (modello 1D). In questi codici i principali dati richiesti in ingresso sono:

- i. Lo scuotimento sismico (accelerogramma) su basamento sismico affiorante ovvero su un sito di riferimento rigido e superficie topografica orizzontale (Categoria di sottosuolo A e Categoria topografica T1 secondo la classificazione NTC08, corrispondente ad un ammasso roccioso o terreno rigido con superficie suborizzontale e valori della velocità media delle onde S nei primi 30 metri almeno pari a 800 m/s); questo scuotimento è detto anche 'moto di input' o 'moto di riferimento' e deve essere assegnato al codice di calcolo come 'rock outcropping input motion' (indicato anche come '2A' nel codice STRATA).
- ii. Il profilo di velocità delle onde S ( $V_s$ ) fino alla profondità corrispondente al basamento sismico ovvero al tetto di un ammasso roccioso o terreno rigido caratterizzato da valori di  $V_s$  almeno pari a 800 m/s; più in generale si deve identificare come profondità di riferimento quella del tetto del primo strato della successione che presenta valori di velocità delle onde S maggiori di 750-800m/s con uno spessore ritenuto sufficientemente significativo in relazione al modello geologico del sito.
- iii. 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.

<sup>36</sup> Kottke, Albert R., and Ellen M. Rathje. (2008). "Technical manual for Strata." Report No.: 2008/10. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. Il software è liberamente disponibile al sito <https://github.com/arkottke/strata>.

Un elemento chiave delle analisi numeriche 1D è il livello di discretizzazione necessaria ad una corretta modellazione del sottosuolo. In pratica, si tratta di definire lo spessore massimo  $\Delta h_{max}$  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:

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

dove  $Vs$  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,  $Vs$  è dell'ordine 200 m/s dovrà essere  $\Delta h_{max} \approx 1m$ . Per dettagli circa gli altri dati richiesti in input e le procedure di calcolo si rimanda al manuale del codice di calcolo di volta in volta utilizzato.

### 6.3 Gestione delle incertezze nella stima della RSL

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

1. il profilo  $Vs(h)$  è derivato da misure (curva di dispersione, curva HVS, 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  $Vs$  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  $Vs(h)$  a causa di variazioni di spessore delle coperture o della eterogeneità (variabilità intrinseca) di queste ultime;

4. i campioni raccolti e analizzati in laboratorio potrebbero non essere pienamente rappresentativi o non sufficienti a caratterizzare tutti materiali presenti;
5. le curve di decadimento e smorzamento sono incerte perché frutto di misure di laboratorio 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 esclude la possibilità di formulare ipotesi ragionevoli riguardo a queste caratteristiche della microzona. Infatti, tutte le misure in forma diversa concorrono a definire dei limiti 'plausibili' per i valori dei diversi parametri, ovvero compatibili con le osservazioni. Si tratta di definire questi limiti a partire dall'insieme dei valori stimati: tutti i valori all'interno di questi limiti saranno giudicati possibili e quindi utilizzabili per la stima della risposta sismica locale. Ovviamente, a ciascun profilo di  $V_s$ , a ciascun andamento delle curve di decadimento e smorzamento, a ciascun valore di profondità del basamento sismico, corrisponderà una diversa stima della risposta sismica locale (RSL).

Bisognerà quindi valutare l'impatto di questa variabilità sui risultati 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  $G/G_0$  e  $D$  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 del Fattore di Amplificazione, ciascuno relativo ad un singolo intervallo di periodi.

## 6.4 Parametri descrittivi della variabilità

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

popolazione). Il valore di riferimento corrisponde al baricentro della distribuzione in frequenza (la cosiddetta 'media' della distribuzione) che coincide anche con il valore mediano (ovvero il valore che divide in due parti uguali l'insieme dei valori potenzialmente misurabili).

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 attorno al valore medio: maggiore è il valore della deviazione standard e maggiore è l'effetto dei fattori di disturbo che producono valori più lontani dal valore di riferimento. Per esempio, dalla curva di **Figura 6.1** si vede che l'84.1% dei valori potenzialmente misurabili è minore di  $\mu + \sigma$  (area della curva tra  $-\infty$  e  $\mu + \sigma$ , mentre ben il 97.7% è più piccolo del valore  $\mu + 2\sigma$ . La stessa distribuzione può essere utilizzata per definire le probabilità che dalla misura risulti un valore maggiore di quello di riferimento. Per esempio potremmo dire che esiste una probabilità di circa il 16% che il valore di  $V_s$  sia maggiore di  $\mu + \sigma$ .

In questo contesto, dal punto di vista pratico, il problema diventa quello di stimare i due parametri  $\mu$  e  $\sigma$  della distribuzione in **Figura 6.1**. 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  $V_{si}$  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:

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{s_i} \tag{1}$$

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

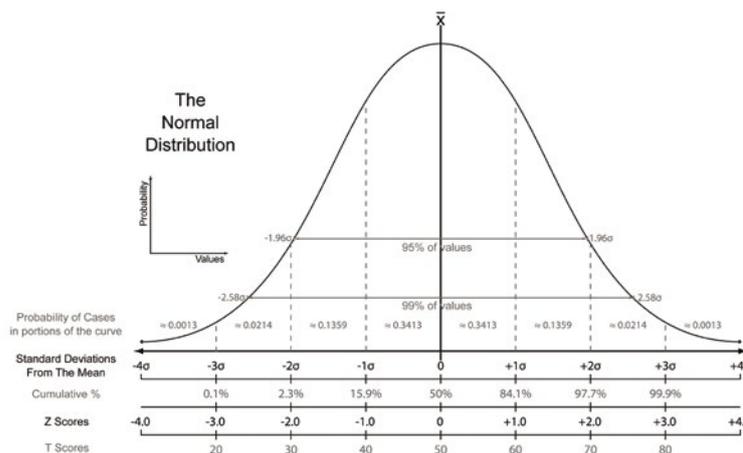
$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{s_i} - m)^2} \tag{2}$$

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 6.1** è poco adatta a rappresentare la distribuzione di probabilità di molte delle grandezze di interesse ai fini della RSL. Per esempio, la curva in **Figura 6.1** ammette anche valori negativi e questo è inammissibile per i valori di  $V_s$  o del Fattore di amplificazione  $FA$ . In questi casi la descrizione della popolazione dei valori possibili è meglio descritta da una distribuzione asimmetrica di tipo log-normale (**Figura 6.2**).

**FIGURA 6.1**

Possibile distribuzione teorica dei valori di una data grandezza (Distribuzione di Normale o di Gauss). In ascissa i valori possibili (in termini di scarto dal valore medio  $\mu$  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.

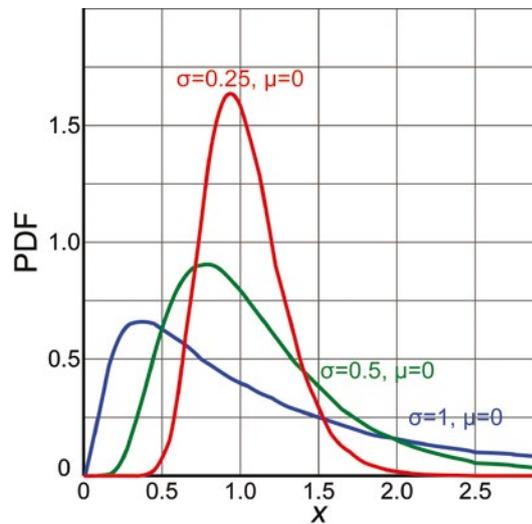


Nel caso della distribuzione log-normale i parametri di interesse sono  $m_{ln}$  e  $s_{ln}$  che, con riferimento ad esempio all'insieme N di valori  $V_{s,i}$ , possono essere stimati come segue

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

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

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



**FIGURA 6.2**

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

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

$$V_{s,rif} = e^{m_{ln}} \quad [5]$$

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

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

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 lognormale 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

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

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

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

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

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

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

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

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

**FIGURA 6.3**  
Rappresentazioni alternative del profilo di Vs.

A questo punto la variabilità del profilo di Vs può essere messa in conto procedendo in due modi. Il primo (tendenzialmente meno conservativo ma più veloce) consiste nell'assumere il profilo di Vs corrispondente alla media logaritmica ( $e^{m_{ln}}$ ) come unico profilo rappresentativo. In base allo stesso criterio si potranno quindi scegliere singole curve di decadimento e di smorzamento 'rappresentative' ed effettuare il calcolo con il codice di calcolo (STRATA o equivalenti) applicando il moto di riferimento dove il profilo di Vs(h) supera gli 800 m/s. Per ogni scenario di scuotimento, ovvero per ciascun accelerogramma di riferimento, sarà possibile quindi ottenere come risultato 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 <sub>ln</sub>	s <sub>ln</sub>	exp(m <sub>ln</sub> )	exp(m <sub>ln</sub> -s <sub>ln</sub> )	exp(m <sub>ln</sub> +s <sub>ln</sub> )	MIN	MAX
1	180	180	220	5,193	5,193	5,394	5,260	0,1159	192	171	216	180	220
2	180	180	220	5,193	5,193	5,394	5,260	0,1159	192	171	216	180	220
3	230	180	300	5,438	5,193	5,704	5,445	0,2555	232	179	299	180	300
4	230	180	300	5,438	5,193	5,704	5,445	0,2555	232	179	299	180	300
5	230	180	300	5,438	5,193	5,704	5,445	0,2555	232	179	299	180	300
6	230	180	300	5,438	5,193	5,704	5,445	0,2555	232	179	299	180	300
7	230	260	300	5,438	5,561	5,704	5,568	0,1330	262	229	299	230	300
8	230	260	340	5,438	5,561	5,829	5,609	0,1999	273	223	333	230	340
9	230	260	340	5,438	5,561	5,829	5,609	0,1999	273	223	333	230	340
10	230	260	340	5,438	5,561	5,829	5,609	0,1999	273	223	333	230	340
11	330	400	340	5,799	5,991	5,829	5,873	0,1035	355	320	394	330	400
12	330	400	340	5,799	5,991	5,829	5,873	0,1035	355	320	394	330	400
13	330	400	450	5,799	5,991	6,109	5,967	0,1566	390	334	456	330	450
14	500	400	450	6,215	5,991	6,109	6,105	0,1116	448	401	501	400	500
15	500	400	450	6,215	5,991	6,109	6,105	0,1116	448	401	501	400	500
16	500	400	450	6,215	5,991	6,109	6,105	0,1116	448	401	501	400	500
17	500	400	450	6,215	5,991	6,109	6,105	0,1116	448	401	501	400	500
18	500	400	450	6,215	5,991	6,109	6,105	0,1116	448	401	501	400	500

FIGURA 6.4

Realizzazione di un profilo di riferimento (ultima colonna) avendo a disposizione 3 profili di Vs (Vs 1, Vs 2, Vs 3, in m/s).

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 decadimento e smorzamento e della profondità del substrato rigido di riferimento. In questo caso è possibile sfruttare una opzione presente nel codice STRATA che consente di eseguire numerose analisi della RSL (il numero di simulazioni deve essere fissato dall'utente e sufficientemente elevato; di norma per garantire una soluzione stabile sono necessarie alcune centinaia di simulazioni, meglio 1000) per ogni singolo scenario di scuotimento, variando casualmente l'andamento del profilo Vs(h), delle curve di decadimento e smorzamento, e della profondità del basamento sismico, all'interno dei vincoli imposti dall'utente (metodo stocastico Monte Carlo). In particolare, è possibile assegnare ad ogni strato (ad esempio di spessore pari ad 1m come nelle tabelle di Figura 6.4 un valore rappresentativo ( $e^{m_{ln}}$ ) ed una variabilità definita dal parametro  $s_{ln}$  e dai limiti assoluti di cui sopra. In questo caso, il moto di riferimento può essere assegnato alla profondità dove  $e^{m_{ln}}$  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 decadimento e smorzamento utilizzando la parametrizzazione disponibile nel codice STRATA. In questo modo si otterrà in output un numero di accelerogrammi (e di relativi spettri di risposta  $S_{a_n}(T)$ ) pari al numero N di simulazioni effettuate combinando casualmente i valori di Vs(h), G/G<sub>0</sub>, D 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  $\overline{S_a}(T)$  dove

$$\overline{S_a} = e^{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln(S_{a_n})} \quad [7]$$

essendo  $S_{a_n}$  l'ordinata dello spettro n-esimo in corrispondenza del periodo T. Lo spettro di risposta (mediano) di riferimento  $\overline{S_a}(T)$  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  $\overline{S_a}(T)$ .

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 nelle colonne successive (quindi ogni riga contiene nella prima colonna il valore del periodo e nelle successive i corrispondenti valori di  $Sa_n$ ).
2. si calcolano i logaritmi naturali dei singoli valori di  $Sa_n$  per i diversi periodi e si confronta un dato spettro  $Sa_n(T)$  con lo spettro  $\overline{Sa}(T)$  calcolando il parametro  $L_n^2$  dato da:

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

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

Si esegue lo stesso calcolo (facilmente implementabile in un foglio EXCEL) per tutti gli spettri calcolati per un determinato scenario di scuotimento e si seleziona come rappresentativo per quello scenario l'accelerogramma corrispondente allo spettro di risposta per il quale  $L^2$  è minimo.

## 6.6 Calcolo dei valori di FA rappresentativi della singola microzona

Il calcolo del valore di FA per una data microzona si effettua come segue. Si identifica 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  $Sa_{in}(T)$  associato allo scenario di scuotimento (accelerogramma di input) fornito dal CentroMS e/o dalla Regione (se disponibile). Sia  $Sa_o(T)$  che i.c.s. sono definiti per punti associati ad un certo numero di 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 dello spettro di input  $Sa_i(T)$ , 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 decadimento 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 applicherà il concetto di media logaritmica ai 7 valori di FA relativi a ciascuno dei tre prefissati intervalli di periodo (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):

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

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

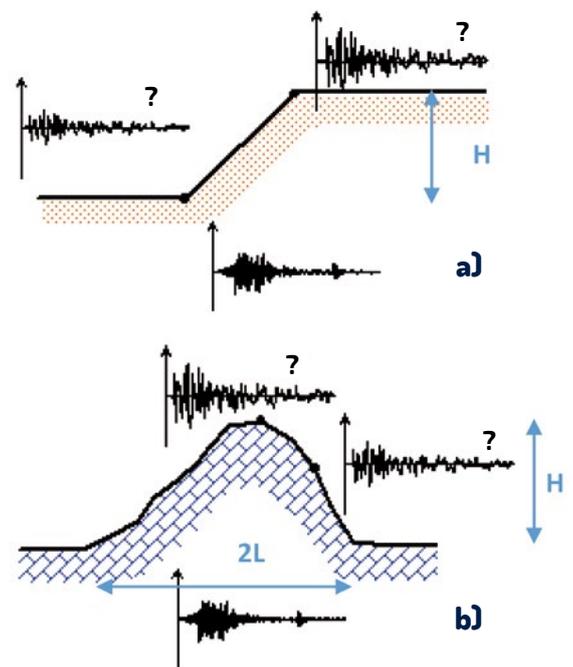
## 6.7 Effetti morfologici

Per definizione, la modellazione numerica descritta finora non è in grado di tenere conto dei possibili effetti che la configurazione morfologica del terreno può giocare sulla risposta sismica locale. Nel capitolo successivo verrà descritto un approccio numerico avanzato per gestire questo tipo di fenomeni. Tuttavia, può valere la pena effettuare una valutazione preliminare della possibile presenza di questi effetti in modo da valutare l'attendibilità dei risultati dedotti dall'analisi numerica 1D e quindi la necessità di ricorrere a procedure numeriche avanzate per una stima più corretta della risposta sismica locale.

**A questo scopo sono qui descritte delle procedure di valutazione del possibile valore di FA associato agli effetti morfologici relativi a due situazioni: pendii e creste isolate** (Figure 6.5a e 6.5b rispettivamente). Il valore ricavato con queste procedure può essere utilizzato in due modi. Il primo è quello di fornire una stima di FA quando affiora il substrato sismico. Il secondo è quello di un confronto con il valore FA ricavato dall'analisi 1D per valutare la necessità di ricorrere ad una modellazione 2D: in pratica, se il valore FA ricavato dall'analisi 1D risulterà comparabile o inferiore a quello dedotto per l'effetto morfologico mediante l'approccio semplificato illustrato di seguito, allora l'analisi 2D verrà considerata altamente auspicabile.

**Si fa presente che i valori di FA dedotti con la procedura qui illustrata rappresentano comunque un miglioramento rispetto ai coefficienti previsti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018 in quanto:**

1. nella procedura proposta si tiene conto della dipendenza dell'amplificazione topografica dalla frequenza (cioè dell'evidenza che i fenomeni di amplificazione topografica avvengono prevalentemente in determinati campi di periodo);
2. per le creste si valuta in maniera quantitativamente più realistica il fenomeno (i fattori di normativa, al massimo 1.4, possono sottostimare i fenomeni).



**FIGURA 6.5**  
Configurazioni topografiche considerate: rilievo isolato (a), pendio (b)

## PRESENZA DI PENDII

Sulla sommità dei pendii i fenomeni di amplificazione topografica interessano prevalentemente i valori di periodo intorno a:

$$T_0 = 5H/V_s \quad [14]$$

(Ashford et al., 1997)<sup>37</sup> dove H è altezza del pendio (Figura 6.5a),  $V_s$  è la velocità delle onde di taglio media (pesata sullo spessore) dei materiali che costituiscono il pendio. In accordo con i risultati ottenuti da Ashford et al. (1997), il fattore di amplificazione topografica alla **sommità del pendio** può essere posto:

- $S_T = 1.0$  per pendii di inclinazione minore di  $15^\circ$
- $S_T = 1.2$  per pendii di inclinazione maggiore di  $15^\circ$  e minore di  $30^\circ$
- $S_T = 1.4$  per pendii di inclinazione maggiore di  $30^\circ$  (e fino a  $75^\circ$ )
- $S_T = 1.55$  per pendii subverticali (rupi)

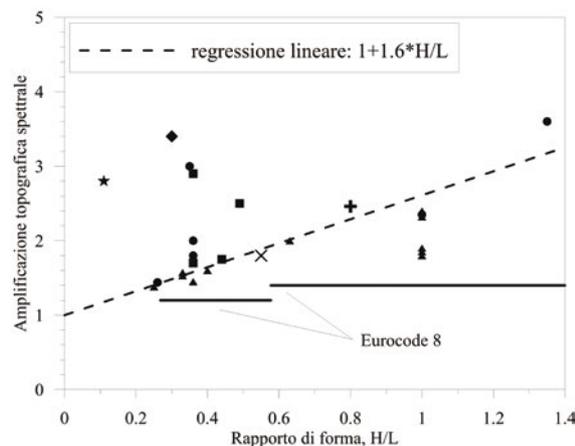
Stimato  $T_0$  con la [14], si valuta l'intervallo di inclinazione di interesse e si moltiplica per il corrispondente  $S_T$  il fattore di amplificazione FA relativo all'intervallo di periodo in cui ricade  $T_0$ . Es. se  $T_0 = 0.2$  s si moltiplica per  $S_T$  solo il fattore FA calcolato nel campo 0.1-0.5s e non quelli tra 0.4-0.8s e 0.7-1.1s. Lungo il pendio si usa sempre la [14] ponendo, se l'inclinazione è maggiore di  $15^\circ$ , sempre  $S_T = 1.2$ .

## RILIEVI ISOLATI

Alla cresta di rilievi isolati i fenomeni di amplificazione topografica interessano prevalentemente i valori di periodo intorno a (Paolucci, 2002)<sup>38</sup>:

$$T_0 = (1-1.4) * 2L/V_s \quad [15]$$

dove L è la semi-larghezza del rilievo misurata alla base (Figura 6.5b),  $V_s$  è la velocità delle onde di taglio media (pesata sullo spessore) dei materiali che costituiscono il rilievo. Il fattore di amplificazione topografica **in cresta** può essere valutato a partire dalla retta di regressione riportata nel grafico di Figura 6.6 in funzione del rapporto di forma H/L con H altezza del rilievo.



**FIGURA 6.6**  
Fattore di amplificazione topografica per rilievi isolati (Pagliaroli et al., 2007).<sup>39</sup>

<sup>37</sup> ASHFORD S. A., SITAR N. (1997). Analysis of Topographic Amplification of Inclined Shear Waves in a Steep Coastal Bluff. Bulletin of the Seismological Society of America, 87: 692-700.

<sup>38</sup> PAOLUCCI R. (2002). Amplification of earthquake ground motion by steep topographic irregularities. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31: 1831-1853.

<sup>39</sup> PAGLIAROLI A., LANZO G., D'ELIA B., COSTANZO A., SILVESTRI F. (2007). Topographic amplification factors associated to cliff morphology: numerical results from two case studies in Southern Italy and comparison with EC8 recommendations. XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Workshop on geotechnical aspect of EC8, Madrid (Spain), September 25, 2007, CD-ROM, 10 pp.

Stimato  $T_0$  con la [15], si moltiplica per il valore di  $S_T$ , ricavato dal grafico di **Figura 6.6**, il fattore di amplificazione  $FA$  relativo all'intervallo di periodo in cui ricade  $T_0$ .  
Lungo i versanti del rilievo si usa sempre la [15] ponendo, se inclinazione maggiore di  $15^\circ$ :  $S_T = 1.2$ , se inclinazione maggiore di  $30^\circ$ :  $S_T = 1.4$ .

## 6.8 La regolarizzazione degli spettri di risposta

Potrebbe essere utile, a fini di progettazione, eseguire la regolarizzazione degli spettri di risposta dedotti dalle analisi numeriche. Qui di seguito viene illustrata la procedura numerica proposta allo scopo.

A partire dai risultati delle simulazioni numeriche, la procedura permette di ottenere lo spettro di risposta elastico nella forma standardizzata secondo le Norme Tecniche per la Costruzioni (NTC, 2018).

I passi procedurali sono ( $SA$  è lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione e  $SV$  è lo spettro di risposta elastico in pseudovelocità, entrambi output delle simulazioni numeriche):

- Si calcola lo spettro di pseudoaccelerazione ( $SA$ ) e si determina il periodo proprio ( $TA$ ) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudoaccelerazione
- Si calcola il valore medio dello spettro ( $SA_m$ ) nell'intorno di  $TA$  tra  $0.5T$  e  $1.5T$ , questo valore sarà assunto come valore costante del tratto ad accelerazione costante dello spettro standard:

$$SA_m = \frac{1}{TA} \int_{0.5TA}^{1.5TA} SA(T) dT$$

- Si determina lo spettro di pseudovelocità ( $SV$ ) a partire da quello di accelerazione

$$SV(T) = SA(T) * \frac{T}{2\pi}$$

quindi il periodo proprio ( $TV$ ) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudovelocità

- Si calcola il valore medio dello spettro ( $SV_m$ ) nell'intorno di  $TV$  tra  $0.8T$  e  $1.2T$ :

$$SV_m = \frac{1}{0.4 * TV} \int_{0.8TV}^{1.2TV} SV(T) dT$$

- Si determina il periodo proprio in corrispondenza del quale si incontrano i due rami dello spettro ad accelerazione costante e velocità costante:

$$T_c = 2\pi \frac{SV_m}{SA_m}$$

- Si determina  $T_b = 1/3 * T_c$  e  $T_d = 4.0 * a_{max} / g + 1.6$ , con  $a_{max}$  accelerazione di ancoraggio dello spettro di output. Poiché il valore di  $a_{max}$  non è fornito nello spettro delle simulazioni numeriche si procede per estrapolazione lineare, secondo la seguente equazione:

$$a_{max} = \left( \frac{S_e(T=0.01s)}{SA_m} - \frac{0.01}{T_b} \right) \left( 1 - \frac{0.01}{T_b} \right)$$

con  $S_e(T=0.01s)$  ordinata dello spettro di accelerazione per  $T=0.01s$ , primo valore del periodo nello spettro elastico delle simulazioni numeriche

- g. Si termina il parametro  $F_0$  come rapporto  $SA_m/a_{max}$
- h. Si applicano le equazioni riportate in NTC (2008), assumendo  $a_g = a_{max}$ , per la determinazione dei tratti dello spettro tra  $T_A=0, T_B, T_C, T_D$  fino a  $T=4s$ .

Infine, nel calcolo degli spettri di progetto per i codici di calcolo della vulnerabilità si utilizzeranno i seguenti valori degli altri parametri richiesti  $a_g = a_{max}$ ;  $\xi = 5\%$ ;  $\eta = 1$ ;  $S_S = 1$ ;  $S_T = 1$ . Questa procedura di regolarizzazione può essere utilizzata anche per lo spettro di input, utilizzando  $a_g$  invece che  $a_{max}$  (ovvero assumendo implicitamente  $S=1$ ).

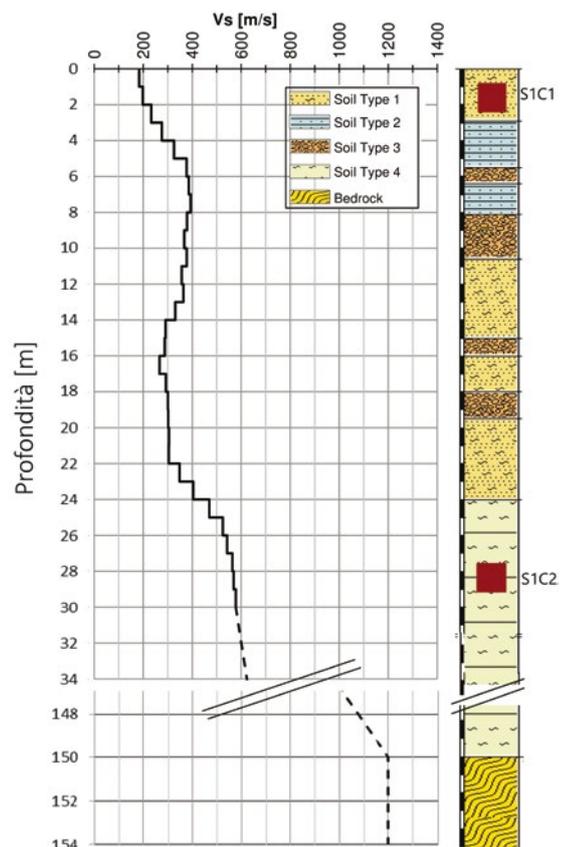
## 6.9 Esempio: il caso di S. Gimignano (SI)

### APPROCCIO PROBABILISTICO

Al fine di valutare l'influenza dei diversi parametri (variabili aleatorie) sulla RSL e quantificarne le incertezze, è stato utilizzato l'approccio probabilistico (metodo Monte Carlo) implementato nel codice di calcolo STRATA. Il metodo consiste nell'attribuire a ciascuna delle variabili aleatorie considerate una opportuna curva di distribuzione di probabilità e nell'estrarre in modo casuale, per ogni simulazione, un valore per ciascuna variabile. Sono state assunte come variabili aleatorie: la velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) in ogni strato; le curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato e del rapporto di smorzamento per ciascun tipo di materiale presente nella successione stratigrafica; la profondità del basamento sismico. Le analisi sono state eseguite con riferimento a 9 differenti Tempi di Ritorno ( $T_R$ ) utilizzando per ciascuno un set di 7 accelerogrammi spettro-compatibile la pericolosità di base del sito.

TIPO DI TERRENO	PROFONDITÀ [m]	PESO DI VOLUME [kN/m <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
<b>BASAMENTO</b>		<b>22</b>

**FIGURA 6.7**  
 Profilo stratigrafico con indicazione dei campioni indisturbati prelevati e andamento con la profondità di  $V_s$ .



## VARIABILITÀ DEI PARAMETRI GEOTECNICI

Al fine di eseguire l'analisi di tipo stocastico per la valutazione della RSL, è stato assunto come base di partenza il profilo stratigrafico S1 (Figura 6.7), nel quale sono stati identificati i seguenti quattro litotipi (v. tabella di Figura 6.7):

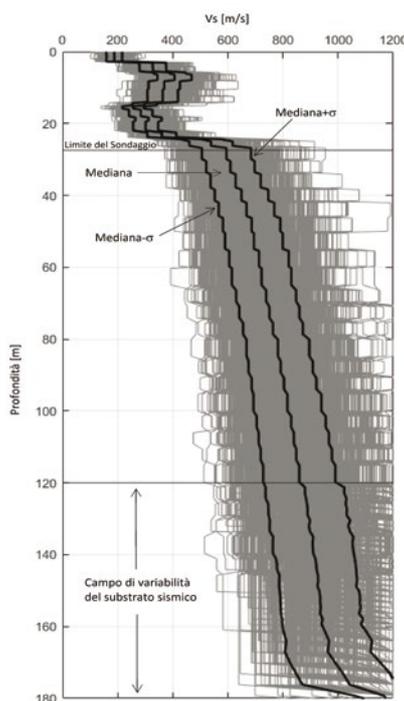
1. Sabbie limoso-argillose sciolte - formazione dei Calcareous Tufa (curve di  $G(\gamma)/G_0$  e  $D(\gamma)$  desunte dalla prova RC sul campione S1-C1);
2. Limi calcarei cementati molto porosi - travertini (curve di  $G(\gamma)/G_0$  e  $D(\gamma)$  proposte da Pergalani et al., (1999)<sup>40</sup>;
3. Ghiaie (curve di  $G(\gamma)/G_0$  e  $D(\gamma)$  proposte da Rollins, (1988)<sup>41</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.

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

- **profondità del basamento sismico**,  $H_{dep}$  (Brecce di Grotti -  $V_s=1200\text{m/s}$ ): distribuzione uniforme ( $z = 120\div 180\text{m}$ ).
- **velocità di propagazione delle onde di taglio**,  $V_s$ . Come profilo stratigrafico 'rappresentativo' (profilo medio), esteso fino al basamento sismico, è stato assunto quello utilizzato nell'approccio deterministico. Per tale variabile è stata assunta una distribuzione lognormale, con coefficiente di variazione (COV - rapporto tra la deviazione standard  $\sigma$  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 6.7.

**FIGURA 6.8**  
Campo di variabilità  
dei profili di  $V_s$  e  
della profondità del  
basamento sismico.



<sup>40</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>41</sup> 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.

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

Nel modello di Darendeli<sup>42</sup>, implementato in STRATA<sup>43</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  $G/G_0$  è calcolata mediante la seguente espressione:

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

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:

$$\sigma_D = \exp(-5) + \exp(-0.25) \sqrt{D(\gamma) (\%)}$$

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>44</sup>;
3. Ghiaie (Rollins, 1988)<sup>45</sup>;
4. Sabbie limose molto addensate (prova RC campione S1-C2).

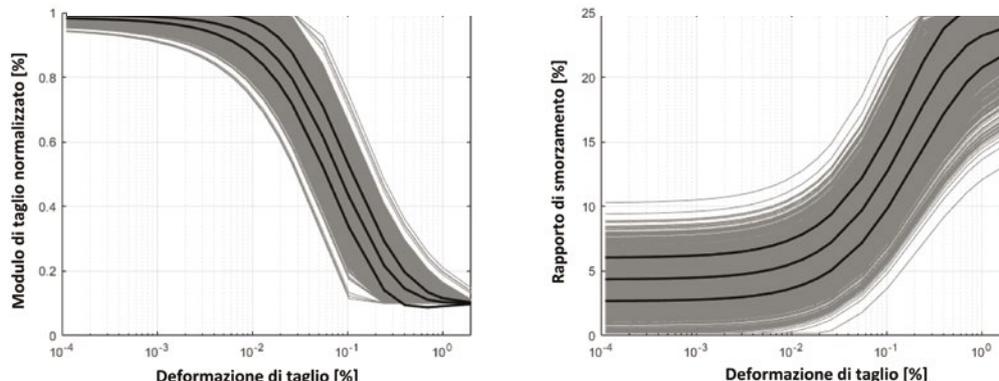
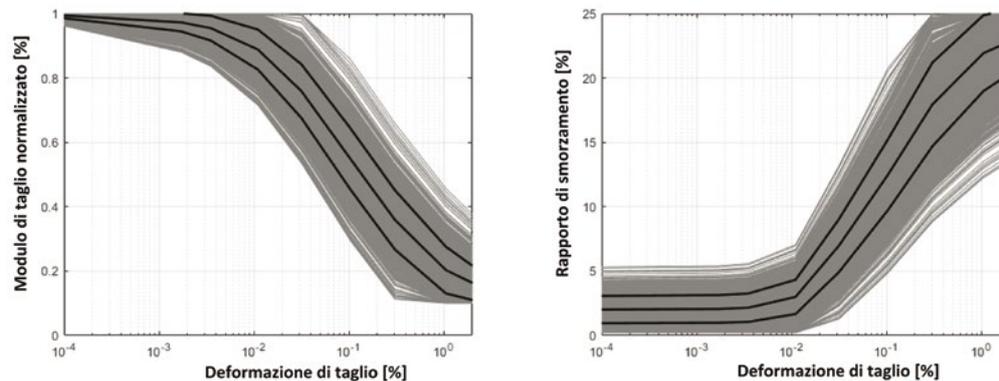
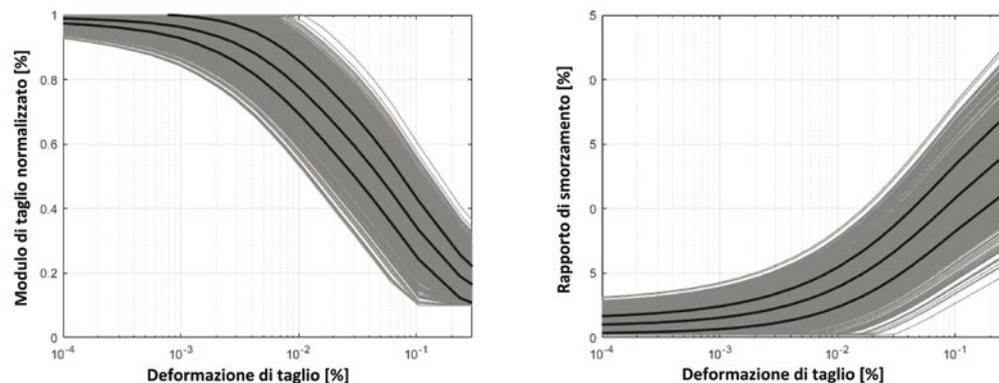
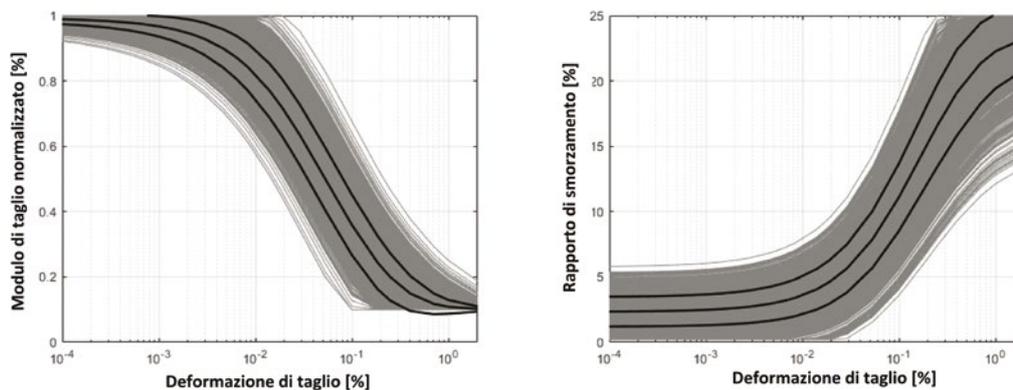
Il campo di variabilità delle curve è riportato nei grafici seguenti (Figura 6.8).

<sup>42</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>43</sup> Kottke, A. R., and Rathje, E. M. (2009). Technical manual for Strata, Univ. of Texas, Austin, TX.

<sup>44</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>45</sup> 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.

**Sabbie limoso-argillose sciolte** (prova RC campione S1-C1)**Limi calcarei cementati molto porosi - travertini** (Pergalani et al., (1999))**Ghiaie** (Rollins, 1988)**Sabbie limose molto addensate** (prova RC campione S1-C2)

**FIGURA 6.8**  
Campo di variabilità  
delle curve dei terreni.

## INFLUENZA DEI PRINCIPALI PARAMETRI GEOTECNICI SULLA RSL

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

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

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

Separatamente è stata valutata l'influenza di:

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

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

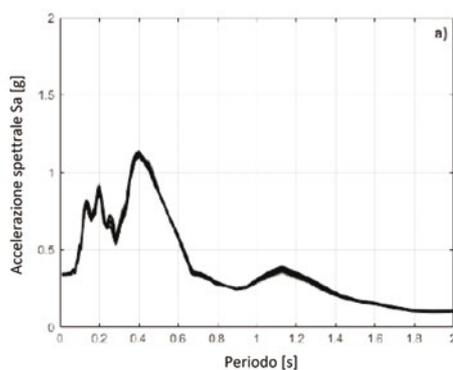
In particolare nelle figure da 6.9-6.10 sono sintetizzati i risultati relativi a:

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

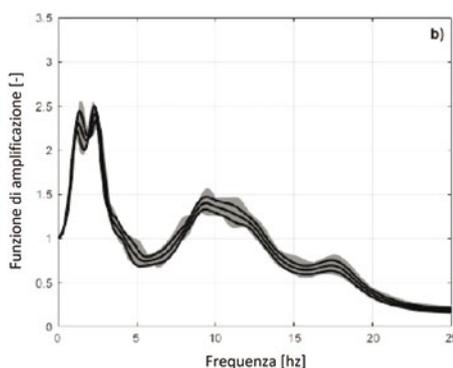
### Influenza della profondità del basamento ( $H_{dep}$ )

I risultati ottenuti (Figura 6.8) mostrano una ridotta influenza della profondità del basamento ( $H_{dep}$ ).

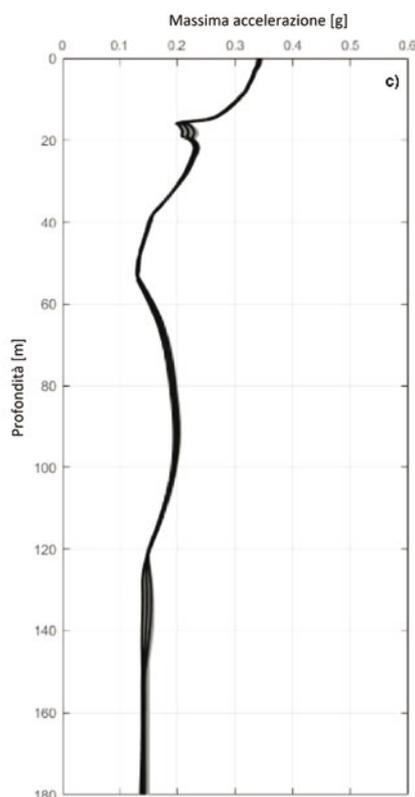
#### Spettro di risposta elastico



#### Funzione di amplificazione



#### Profilo PGA



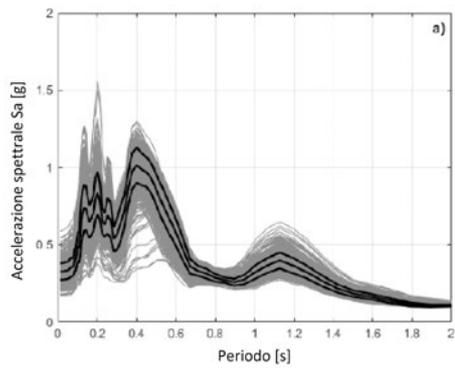
**FIGURA 6.9**

Influenza della profondità del basamento sismico sulla RSL per il caso considerato.

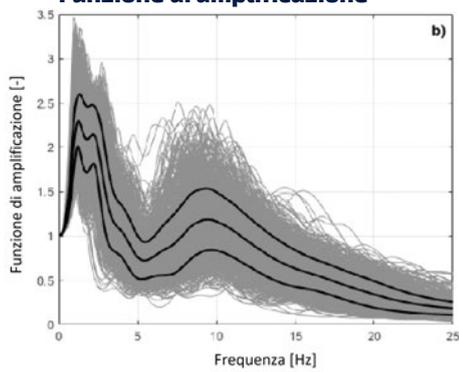
### Influenza della variabilità del profilo delle $V_s$ :

I risultati ottenuti (Figura 6.10) mostrano una significativa influenza della variabilità del profilo delle  $V_s$

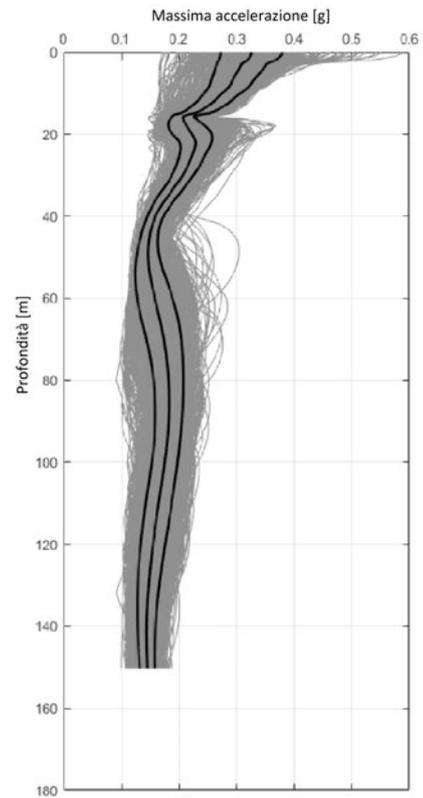
#### Spettro di risposta elastico



#### Funzione di amplificazione



#### Profilo PGA

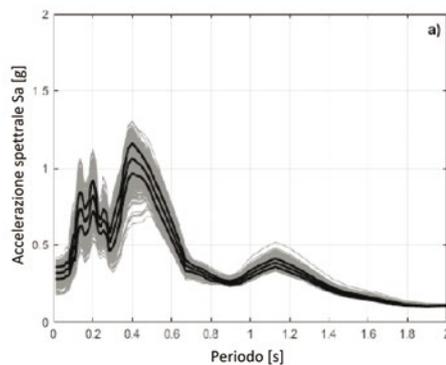


**FIGURA 6.10**  
Influenza del profilo di  $V_s$  sulla RSL per il caso considerato.

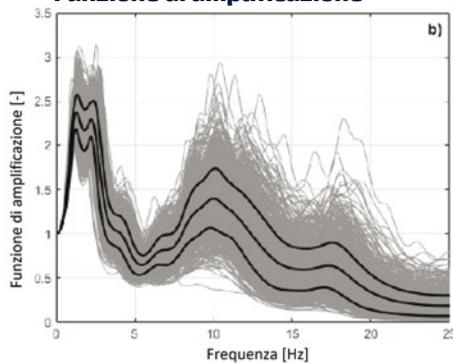
## Influenza della variabilità delle curve di rigidezza e smorzamento dei materiali

I risultati ottenuti (Figura 6.11) mostrano che l'influenza della variabilità delle curve di rigidezza e smorzamento dei materiali è ancora più significativa di quella del profilo di  $V_s$ .

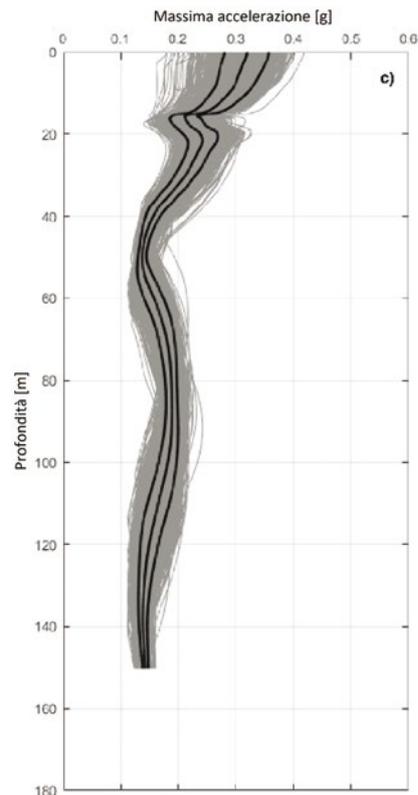
### Spettro di risposta elastico



### Funzione di amplificazione



### Profilo PGA



**FIGURA 6.11**

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

## 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  $V_s$ , nel caso esaminato, 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>46</sup>.

<sup>46</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.



# 07

## MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE IN CONFIGURAZIONE 2D

Gruppo di lavoro **Analisi Numeriche**

**COORDINATORE**

**Floriana PERGALANI**

POLIMI-DICA

**MEMBRI**

**Dario ALBARELLO**

UNISI-DSFTA

**Lucia LUZI**

INGV

**Marco AMANTI**

ISPRA

**Claudia MADIAI**

UNIFI-DICeA

**Vittorio CHIESSI**

ISPRA

**Giuliano MILANA**

INGV

**Massimo COMPAGNONI**

POLIMI-DICA

**Guido MARTINI**

ENEA

**Roberto DE FRANCO**

CNR IGAG

**Salvatore MARTINO**

UNIROMA1-DST

**Anna D'ONOFRIO**

UNINA-DICEA

**Alessandro PAGLIAROLI**

UNICH-PE-INGEO

**Sebastiano FOTI**

POLITO-DISEG

**Francesco SILVESTRI**

UNINA-DICEA

**Iolanda GAUDIOSI**

CNR IGAG

**Marco TALLINI**

UNIVAQ-DICEAA

**Giuseppe LANZO**

UNIROMA1-DISG

**Chiara VARONE**

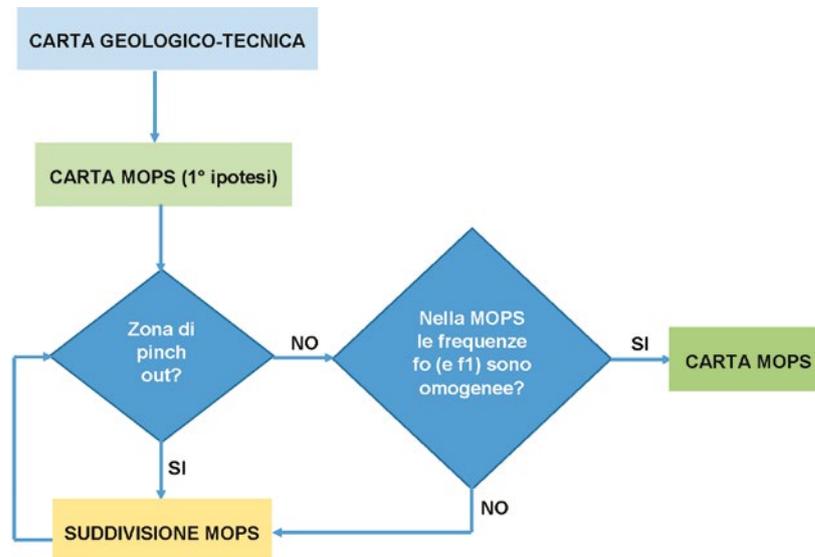
CNR IGAG

## 7.1 Premessa

Le **analisi numeriche** che conducono alla Microzonazione Sismica di livello 3 (MS3) devono essere in primo luogo basate sulla preventiva definizione delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) incluse le zone caratterizzate da instabilità ( $ZA_{FR}$ ) con l'esclusione delle  $ZA_{FR}$  qualora il corpo di frana abbia spessori inferiori ai 10 m, di quelle  $ZA_{FR}$  già corrispondenti alla categoria R3-R4 secondo la classificazione PAI o già acquisite come vincolo territoriale a valle di precedenti studi di MS1 e dei buffer associati a  $ZA_{FAC}$  o  $ZA_{FPAC}$ .

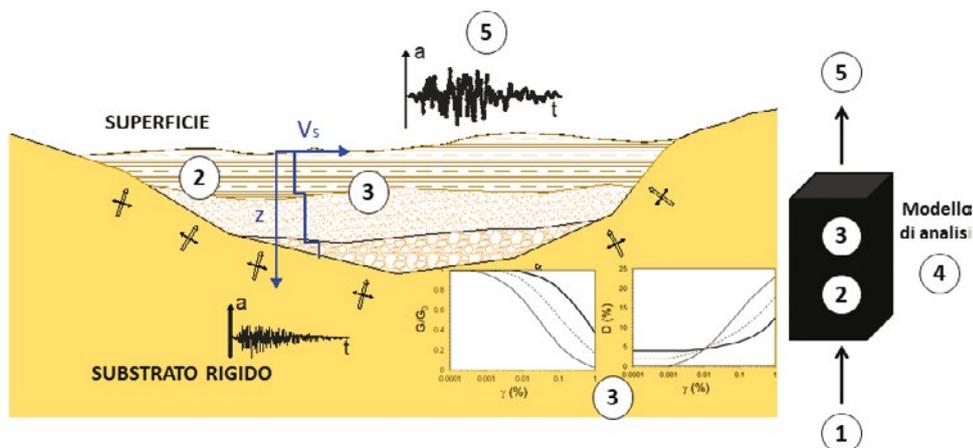
Si ricorda che per la definizione delle microzone si deve tener conto anche delle zone di "pinch out", ovvero di quelle aree in cui, lungo la sezione geologico-tecnica, una o più unità si assottigliano lateralmente fino a scomparire secondo il diagramma di flusso sintetizzato in **Figura 7.1**, che prevede:

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



**FIGURA 7.1**  
Diagramma di flusso  
per la definizione delle  
MOPS.

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



**FIGURA 7.2**  
Elementi essenziali per  
le analisi numeriche.

- ① definizione del **moto sismico di riferimento** (accelerogramma)
- ② **modello geometrico di sottosuolo** (stratigrafia, morfologia superficiale e sepolta)
- ③ determinazione sperimentale e modellazione **proprietà meccaniche non lineari**
- ④ **analisi numerica non lineare** della risposta sismica di profili e sezioni
- ⑤ rappresentazione **moto in superficie** mediante accelerogrammi, spettri di risposta etc.

## 7.2 Scelta del modello di analisi e del codice di calcolo

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

Tale scelta è strettamente legata alle condizioni geologiche, geomorfologiche e litostratigrafiche del sito in analisi. In linea di principio, i codici 1D possono essere utilizzati solo per condizioni che prevedano morfologia superficiale, unità litotecniche e tetto del substrato sismico sub-orizzontali. Il fattore di forma della morfologia superficiale o sepolta influenza la scelta della schematizzazione geometrica (1D, 2D, 3D) per l'analisi dell'amplificazione stratigrafica e/o topografica di bacini e creste (Figura 7.3).

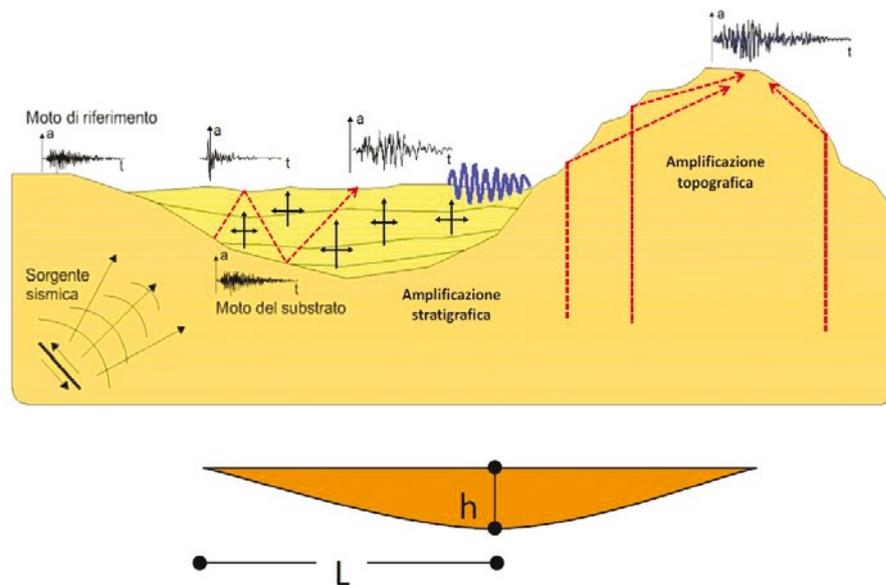
La presenza di bacini sepolti dà origine a specifiche fenomenologie che possono essere modellate solo facendo ricorso a modelli 2D. La prima fenomenologia riguarda la presenza di fenomeni di risonanza complessiva del bacino sepolto. L'eventuale occorrenza di questo fenomeno può essere diagnosticata utilizzando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

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

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

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

dove  $C_v$  è il rapporto tra la velocità delle onde S,  $V_s$ , nel substrato sismico e quella media nei terreni di riempimento della valle. I codici di calcolo 1D possono essere utilizzati per la zona centrale della valle e solo nel caso in cui sia soddisfatto il più restrittivo dei due criteri precedenti. Un secondo fenomeno è legato alla generazione di onde superficiali in corrispondenza del raccordo fra le coperture del bacino ed i materiali incassanti. Laddove in questa zona si realizzino marcati contrasti di impedenza sismica ( $>3$ ) le

**FIGURA 7.3**

Fattori morfologici influenti sull'amplificazione.

onde superficiali possono generare significativi aumenti del livello di scuotimento alla superficie delle coperture del bacino. L'estensione delle zone interessate da questo fenomeno dipende largamente dalle caratteristiche dei materiali di riempimento (essenzialmente lo smorzamento materiale). Quindi, in presenza di marcati contrasti laterali di impedenza sismica in prossimità delle superficie, risulta necessaria la modellazione 2D della risposta sismica locale

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

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

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

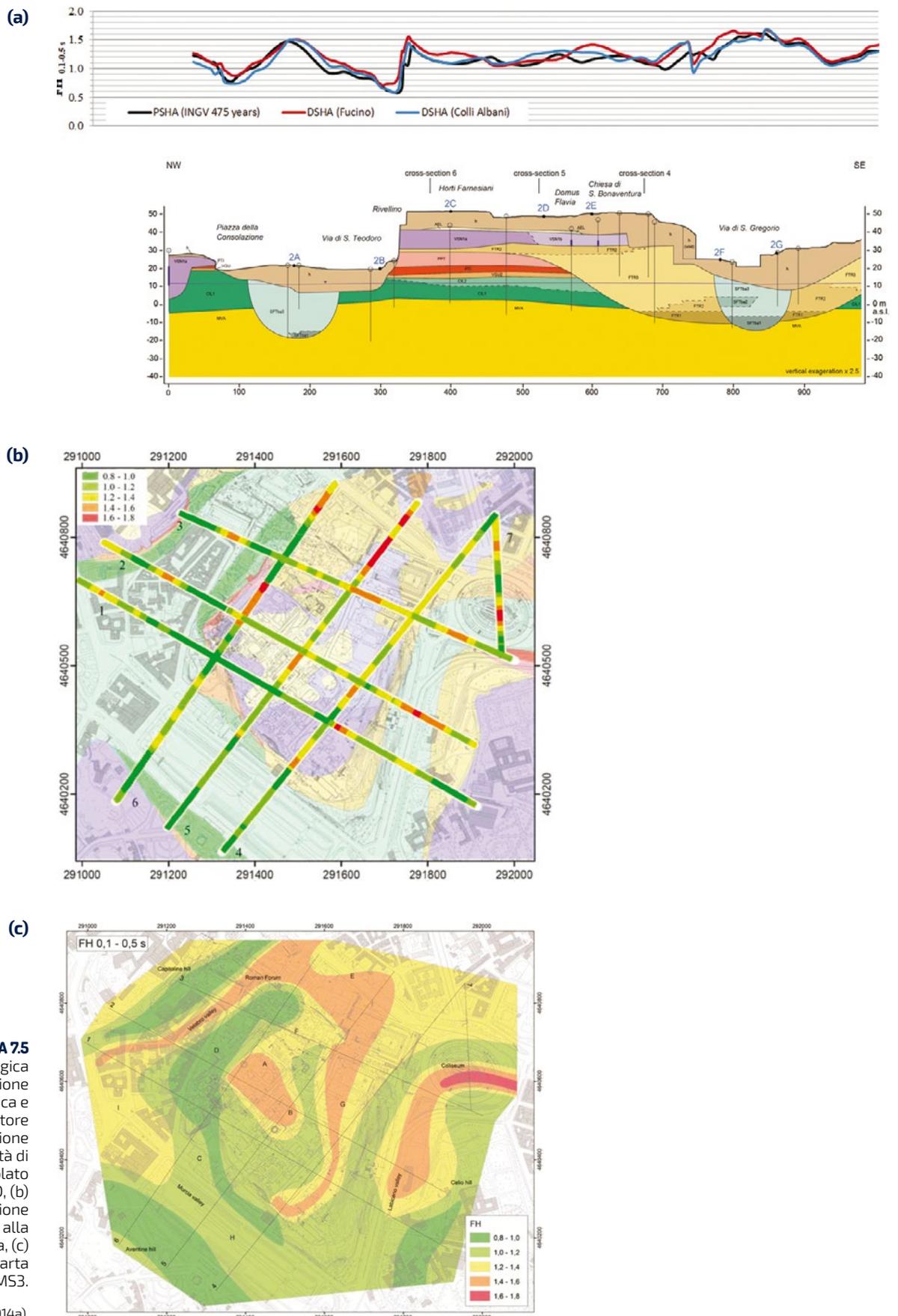
Per le analisi 2D si consiglia di utilizzare programmi che prevedono almeno l'analisi lineare equivalente con frontiera assorbente nel caso di effetti di valle e programmi con elementi al contorno nel caso di effetti morfologici in roccia.

### 7.3 Scelta delle sezioni e delle verticali da analizzare

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

In linea di principio, dato che i risultati devono condurre alla costruzione di una mappa di MS3, è necessario che la distribuzione delle sezioni e delle verticali permetta di

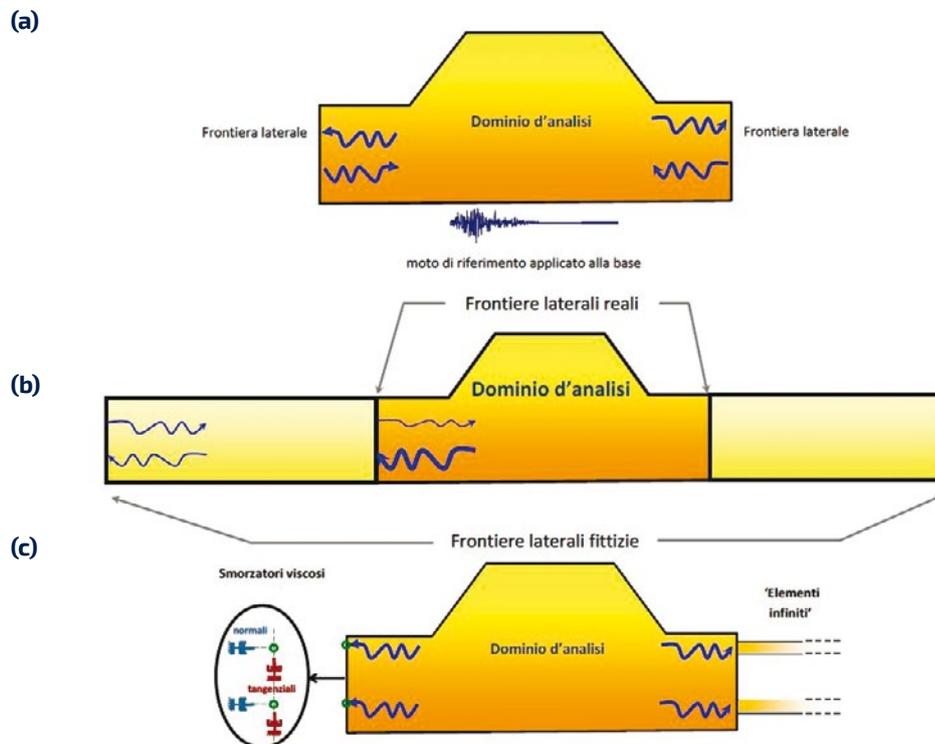




## 7.4 Estensione laterale delle sezioni per la modellazione numerica 2D

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

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



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

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

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

## 7.5 Definizione del substrato sismico per le simulazioni numeriche

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

## 7.6 Discretizzazione dei modelli

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

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

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

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

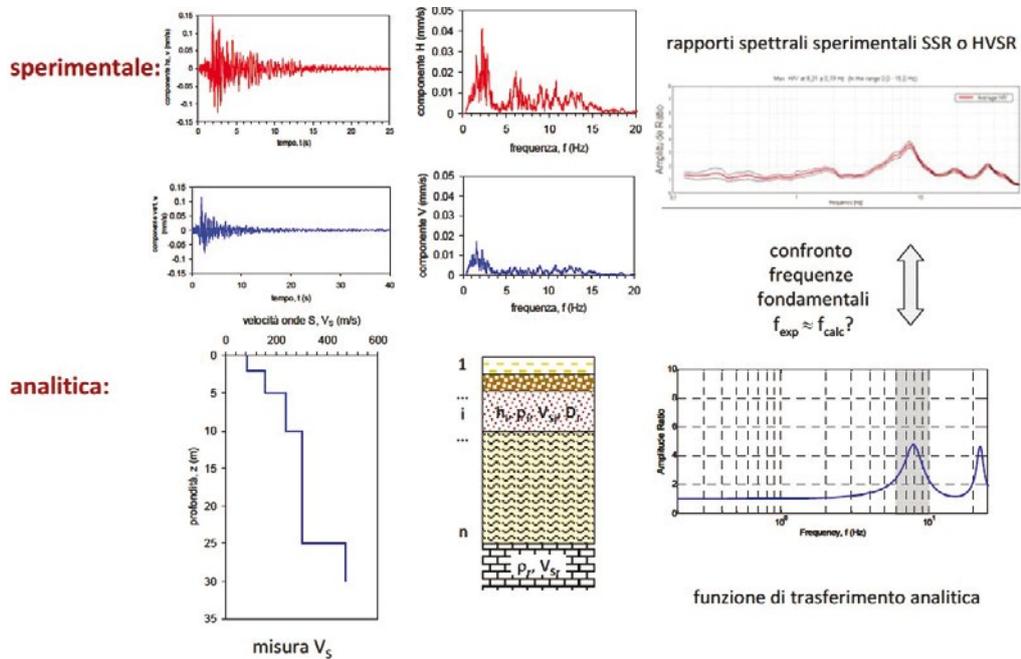
Nel caso di modelli 2D a maglie quadrangolari è opportuno che la larghezza media dell'elemento sia inferiore a  $3 h_{max}$  vicino alla frontiera laterale e  $5 h_{max}$  al centro della sezione. Nel caso di modelli 2D a maglie triangolari è opportuno che nella discretizzazione siano seguiti i criteri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

## 7.7 Validazione modello di sottosuolo in base ai rapporti spettrali

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

È stato già ricordato che il confronto tra la funzione di trasferimento sperimentale e quella numerica deve essere effettuato tenendo conto delle condizioni morfologiche del sito ove sono state installate le postazioni sismiche. In altre parole, se la misura

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



sperimentale è stata eseguita in un sito a morfologia marcatamente 2D o 3D, anche le analisi numeriche dovranno riprodurre tale complessità morfologica.

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

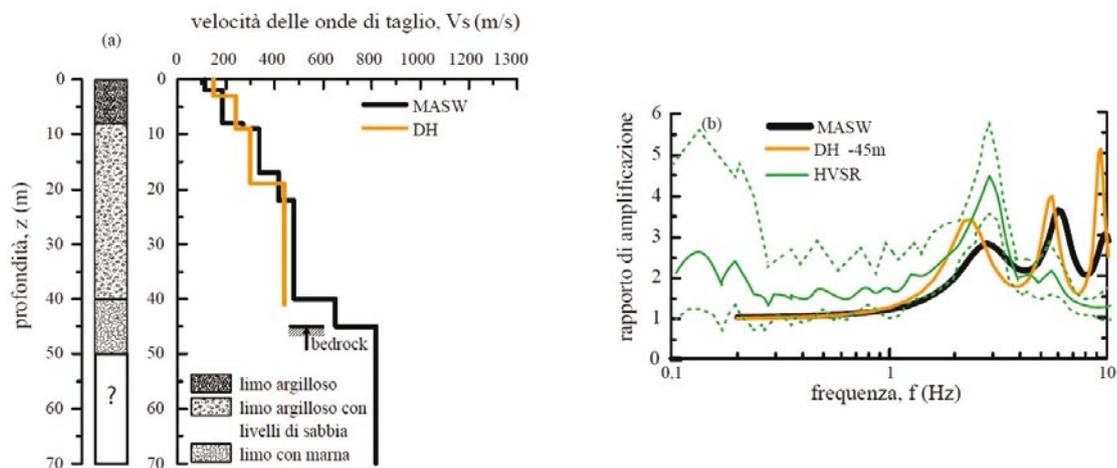
## 7.8 Definizione degli accelerogrammi e delle caratteristiche di non linearità dei terreni

Gli accelerogrammi da utilizzare in input per le simulazioni numeriche saranno i 7 accelerogrammi forniti dall'Unità Tematica trasversale "Input sismico" (UTIS, definita a seguito dell'Ordinanza n.24 del 12 Maggio 2017) e per i comuni della Regione Lazio i 5 accelerogrammi forniti dalla Regione Lazio (previa ulteriore comunicazione e/o indirizzo da parte del CentroMS).

Le curve di variazione del modulo di rigidità al taglio normalizzata e del rapporto di smorzamento in funzione della deformazione di taglio da assumere per ogni unità litotecnica saranno fornite dal CentroMS attraverso le UOTR.

**FIGURA 7.8**

(a) stratigrafia e profili di velocità da prove DH e MASW;  
 (b) confronto tra rapporti spettrali H/V e funzioni di amplificazione analitiche basate sui profili di velocità DH e MASW.



## 7.9 Risultati

Ai fini della restituzione finale nelle carte di MS3, i risultati, per ciascuna microzona, sono espressi sia in termini di spettro di risposta elastico in accelerazione al 5% dello smorzamento critico, sia in termini di Fattore di Amplificazione. In particolare, la procedura di elaborazione dei risultati delle analisi 1D e 2D, prevede i seguenti passi:

1. Definizione dello spettro di risposta in accelerazione (SPRE). Per ciascun set di input sismici (forniti da UTIS ed eventualmente dalla Regione) è calcolata la media degli spettri di risposta elastici in accelerazione, nell'intervallo di periodi 0.0-1.1s. Gli spettri in superficie e quelli di input andranno riferiti al 5% dello smorzamento critico e calcolati per una sequenza di periodi che verrà definita dal CentroMS. Lo spettro medio così ottenuto può essere poi confrontato con quello dell'approccio semplificato delle NTC, laddove applicabile.
2. Definizione del Fattore di Amplificazione (FA). Per ogni input sismico, FA è ottenuto come rapporto tra l'integrale dello spettro elastico in accelerazione di output e l'integrale dello spettro elastico in accelerazione di input, nei tre intervalli di periodo 0.1-0.5, 0.4-0.8, 0.7-1.1s. Per ciascun set di input sismici (forniti da UTIS ed eventualmente dalla Regione) è calcolato poi separatamente il fattore di amplificazione medio relativo alla microzona.

Nel caso in cui siano disponibili input sismici forniti dalla Regione, si riporteranno sulle carte di MS3 i valori di FA e i relativi SPRE medi riferiti ai soli input sismici forniti da UTIS. Nelle relazioni di consegna saranno riportati anche i valori dei fattori di amplificazione e degli spettri di risposta elastici ottenuti con l'uso degli input sismici forniti dalla Regione.

Si ricorda che, in accordo con IUO, ad ogni microzona ricadente nelle aree perimetrare, eventualmente suddivisa in più microzone in funzione delle caratteristiche geologiche-morfologiche e dei risultati delle analisi numeriche (vedi premessa), dovrà avere associato un FA e relativo spettro medio ottenuto in accordo con la soprariportata procedura.

## 7.10 Bibliografia di riferimento

- Bard P., Y., Bouchon M.** (1985)  
*The two dimensional resonance of sediment filled valleys.* Bull. Seism. Soc. Am. 75: 519–541.
- Cividini A., Pergalani F., Compagnoni M., Parisi A.** (2017).  
*On the evaluation of Local Response Spectra according to the Italian Design Code,* 15th International Conference of the International Association for Computer Method and Advances in Geomechanics IACMAG, 19–23 October, Wuhan, China.
- Di Capua G., Compagnoni M., Di Giulio G., Marchetti M., Milana G., Peppoloni S., Pergalani F., Sapia V.** (2014).  
*The seismic microzonation of level 3 of Sant'Agata Fossili (northern Italy) based on a multidisciplinary approach.* Annals of Geophysics, 57, 1, 50189; DOI:10.4401/ag-6363.
- Evangelista L., Landolfi L., d'Onofrio A., Silvestri F.** (2016).  
*The influence of the 3D morphology and cavity network on the seismic response of Castelnuovo hill to the 2009 Abruzzo earthquake.* Bull Earthquake Eng, 14, pp. 3363- 3387.
- Landolfi L.** (2013).  
*Analisi della risposta sismica locale in condizioni complesse di sottosuolo: il caso di Castelnuovo (AQ).* Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geotecnica XXV ciclo, Università di Napoli Federico II.
- Lanzo G., Silvestri F., Costanzo A., d'Onofrio A., Martelli L., Pagliaroli A., Sica S., Simonelli A.** (2011).  
*Site response studies and seismic microzonation in the Middle Aterno valley (L'Aquila, Central Italy).* Bull Earthquake Eng, n. 9, pp. 1417-1442.
- Pagliaroli A., Lanzo G., Sanò T.** (2007).  
Confronto fra tre codici di calcolo 2D della risposta sismica locale. Atti del XII Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", ANIDIS, Pisa, 10-14 giugno 2007, Edizioni Plus – Pisa University Press, Pisa, DVD articolo #45. ISBN: 978-88-8492-458-2, 12 pp.
- Pagliaroli A., Quadrio B., Lanzo G., Sanò T.** (2014a).  
*Numerical modelling of site effects in the Palatine hill, Roman Forum and Coliseum archaeological area.* Bulletin of Earthquake Engineering, 12, pp. 1383–1403.
- Pagliaroli A., Moscatelli M., Raspa G., Naso G.** (2014b).  
*Seismic microzonation of the Central Archeological Area of Rome: results and uncertainties.* Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 1405–1428.
- Santucci de Magistris F., d'Onofrio A., Evangelista L., Foti S., Maraschini M., Monaco P., Amoroso S., Totani G., Lanzo G., Pagliaroli A., Madaï C., Simoni G., Silvestri F.** (2013).  
*Geotechnical characterization of the Aterno valley for site response analyses.* Rivista Italiana di Geotecnica, 47 (3), 65-86.
- Silvestri F., d'Onofrio A.** (2014).  
*Risposta sismica e stabilità di centri abitati e infrastrutture.* In: La Geotecnica nella difesa del territorio e delle infrastrutture dalle calamità naturali, Vol. 1, pp. 5-60, AGI, ISB.



# 08

## ANALISI PRELIMINARI DI STABILITÀ DELLE ZONE DI ATTENZIONE PER FRANA NEGLI STUDI MS

A cura della **Unità Operativa Trasversale Instabilità (UOTI)**

**COORDINATORE**

**Salvatore MARTINO**

UNIROMA1-DST

**MEMBRI**

**Sara AMOROSO**

UNICH-PE-INGEO - INGV

**Vittorio CHIESSI**

ISPRA

**Carlo ESPOSITO**

UNIROMA1-DST

**Carolina FORTUNATO**

CNR IGAG

**Claudia MADIAI**

UNIFI-DICeA

**Guido MARTINI**

ENEA

**Paolo MESSINA**

CNR IGAG

**Francesco SILVESTRI**

UNINA-DICEA

**Paolo TOMMASI**

CNR IGAG

**Marco AMANTI**

ISPRA

## 8.1 Premessa ed indicazioni generali

**Scopo del documento è fornire un insieme di indicazioni riguardo** alle attività da realizzare per gli studi di approfondimento delle zone instabili e per frana per la presenza di cavità sotterranee, in ottemperanza a quanto richiesto dall'Ordinanza 79 emanata dal Commissario straordinario alla ricostruzione per il sisma del 2016. Nel loro complesso, le attività di cui alla succitata Ordinanza consistono in:

1. Indagini geologiche di campo e geomorfologiche di campo e telerilevamento per una più approfondita caratterizzazione delle zone segnalate come instabili (ZA) nei precedenti studi;
2. Pianificazione ed esecuzione di indagini geognostiche e/o geofisiche per la caratterizzazione geologica, geotecnica e sismostratigrafica delle aree instabili.
3. Valutazione della risposta sismica locale di tutte le aree instabili, in termini di Fattori di Amplificazione (FA) sintetici relativi a tre intervalli di periodi (0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s e 0.7-1.1 s), spettri di risposta elastici ed accelerogrammi in superficie.
4. Analisi preliminari di stabilità (e di propagazione per frane a cinematica rapida quali cadute blocchi, valanghe di roccia e debris flows) delle zone instabili per frana, nei casi in cui ad esito delle attività di cui ai punti 1 e 2 venga confermata l'effettiva presenza di movimenti in atto o potenziali. Tali analisi andranno eseguite sia per le instabilità individuate nella fase 1 di MS sia per quelle segnalate in strumenti ufficiali sovraordinati quali PAI o in DB istituzionali quali IFFI. Per le frane di tipo colata lenta non si rendono necessarie analisi numeriche.
5. Analisi pseudo-statiche per lo screening da ZA a ZS e dinamiche sulle frane potenzialmente innescate / rimobilizzate da sollecitazione dinamica, con valutazione della probabilità di eccedenza rispetto ad una soglia critica di spostamento.
6. Revisione ed aggiornamento di precedenti studi di MS.

Per ciò che concerne maggiori dettagli sulle modalità di esecuzione di rilevamenti, indagini ed analisi di stabilità si propongono i seguenti riferimenti:

- CNG Progetto qualità 2010 4  
Parte Seconda ALLEGATI ANALISI DI PERICOLOSITÀ GEOLOGICA.
- AGI 2005 Aspetti Geotecnici della Progettazione in Zona Sismica.

Qualunque sia il livello di approfondimento desiderato e conseguentemente la metodologia di analisi scelta, il piano di indagini dovrà essere finalizzato a ricavare gli elementi necessari ad una corretta modellazione del pendio o del fronte di scavo (AGI, 2005), ovvero:

- a. le caratteristiche morfologiche, geologiche e strutturali (andamento della superficie topografica, della stratigrafia e di eventuali discontinuità);
- b. le proprietà fisiche e meccaniche, sia in condizioni statiche che cicliche/dinamiche;
- c. il regime delle pressioni interstiziali;
- d. l'entità e la posizione di eventuali carichi esterni.

Si suggerisce di utilizzare indagini geofisiche per la stima del materiale potenzialmente mobilizzabile al fine di valutare il volume di riferimento relativo all'evento ipotizzato. Per le elaborazioni è necessario utilizzare un DTM di dettaglio. Si consiglia di verificare la disponibilità del LIDAR proveniente da Piano Straordinario di Telerilevamento (Portale Cartografico Nazionale); se non disponibile si può ipotizzare l'esecuzione di un rilievo ad hoc con tecniche tradizionali o tramite laser scanner o drone dell'area interessata dal fenomeno.

Qualora vengano commissionate indagini di tipo laser scanner o fotografiche dovranno essere riportate le caratteristiche delle attrezzature e le modalità di rilievo (ubicazione e angolo dei punti di scansione/ripresa, distanza dalla parete, numero di rilievi, ecc.). La presentazione delle caratteristiche delle discontinuità ottenute per elaborazione dei dati (reticoli, diagrammi a blocchi, distribuzioni di frequenza, ecc.) avviene con i medesimi criteri dei rilievi tradizionali. Si dovranno allegare:

1. la distribuzione dei punti della parete misurati,
2. la ricostruzione 3D della parete con maglia triangolare,
3. un'immagine d'insieme e immagini di dettaglio della parete,
4. gli elementi strutturali (tracce e aree di discontinuità) individuati.

Le rappresentazioni potranno essere sia separate, sia sovrapposte purché distinguibili tra loro. Si ricorda che nelle zone che al termine dello studio dovessero essere riclassificate come MOPS è necessario valutare spessori e velocità per la successiva determinazione dei FA. Un ulteriore punto da evidenziare riguarda la conoscenza della franosità pregressa del territorio, rilevante ai fini della definizione dello stato di attività e che deve andare ad aggiungersi alle informazioni derivate dagli inventari disponibili: dovranno pertanto essere effettuate analisi e valutazione di eventi precedenti, sia recenti che storici, attraverso ricerche bibliografiche e interviste con la popolazione. In particolare, dovranno essere reperiti i documenti di natura tecnica presenti negli archivi degli uffici tecnici dei Comuni.

## 8.2 Frane rotazionali e traslative in terra

Il principale strumento per condurre le analisi di stabilità è rappresentato dal modello geologico e geotecnico del versante instabile. Il modello geologico e geotecnico sarà sintetizzato in almeno una sezione longitudinale al corpo di frana; nel caso di frane di dimensioni rilevanti e/o in condizioni particolari potrebbe essere opportuno realizzare più di una sezione. Il modello deve sintetizzare le seguenti informazioni:

1. geometria del pendio;
2. zonazione della sezione in unità lito-tecniche, tenendo conto di contatti stratigrafici, tettonici, coperture, ...
3. geometria della superficie di scorrimento (se in presenza di frane di seconda generazione) o dell'interfaccia tra massa in deformazione e substrato "indeformato" (se individuabile con prospezioni dirette/indirette);
4. posizione della falda (se rilevata) e suo possibile intervallo di variazione di quota (stimato).

### 8.2.1 GEOMETRIA DEL PENDIO

Per quanto riguarda il punto 1, la sezione topografica sarà realizzata in corrispondenza di una o più tracce concordate tra affidatari e CentroMS, sulla base di modelli digitali del terreno (se disponibili ed a risoluzione adeguata, cioè non inferiore a 5 metri) o di carte tecniche ad adeguata risoluzione (non minore di 1: 2.000 – 1: 5.000) o di rilievi topografici eventualmente effettuati ad-hoc. Si rammenta inoltre di verificare la presenza della copertura LIDAR realizzata nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento e citata nella parte generale, avente risoluzione 1x1 metri.

## 8.2.2 ZONAZIONE LITOTECNICA

La zonazione in unità litotecniche della sezione di riferimento deriva dalla trasposizione sulla sezione geologica, adeguatamente vincolata alla/e stratigrafie di sondaggio (già disponibili e/o derivanti da apposite indagini geognostiche) delle proprietà fisico-meccaniche misurate e/o stimate da indagini di sito. A tale proposito si segnala che un elemento da tenere in debita considerazione nella pianificazione delle indagini è la quantità e qualità di dati pregressi: è infatti necessario disporre di un pacchetto minimo di informazioni relativo alla caratterizzazione geotecnica dei terreni, con particolare riferimento a quelli interessati dai processi gravitativi.

I parametri essenziali sono:

- Proprietà fisiche: composizione granulometrica dei litotipi e peso dell'unità di volume. In prima approssimazione o in caso di impossibilità di effettuare misure quantitative, si potrà fare riferimento agli standard ASTM D 2488 o UNI EN ISO 14688 per l'attribuzione di una classe granulometrica.
- Proprietà meccaniche: parametri di resistenza al taglio (in accordo con il criterio Mohr-Coulomb - coesione ed angolo di attrito) in condizioni drenate ( $c'$ ,  $\phi'$ ) e, ove possibile, non drenate ( $c_v$ ).

Se acquisiti con apposite indagini, tali parametri potranno essere determinati tramite prove di laboratorio su campioni a basso grado di disturbo, a tensioni di confinamento dettate dalla profondità stimata della superficie di scorrimento. Lo scopo è quello di ottenere valori in condizioni drenate e non drenate almeno per i terreni a grana fine ovvero stimati tramite prove in foro (SPT) o DPSH per i terreni a grana più grossolana, difficilmente campionabili. L'entità dei volumi (e di conseguenza, delle aree nella/e sezione/i di riferimento) entro i quali possono essere trasposti i valori così misurati o stimati sarà determinata su base di giudizio esperto. Le indagini geofisiche, se opportunamente tarate e vincolate con verticali stratigrafiche note, forniranno un importante ausilio nella verifica della continuità delle unità geologiche e litotecniche.

## 8.2.3 GEOMETRIA DELLA SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO

È possibile distinguere sostanzialmente 2 fattispecie:

**Frane Accertate.** Si tratta di frane cosiddette di seconda generazione, che sono cioè passibili di riattivazione: la geometria della superficie di scorrimento potrà essere – in prima analisi – ricostruita sulla base di vincoli geomorfologici e, ove disponibili o realizzati allo scopo, stratigrafici da perforazione geognostica. Le indagini geofisiche, capaci di cogliere il contrasto reologico (declinato secondo le varie grandezze indagate, quali Vs, resistività, ecc...) tra la massa in frana e le formazioni sottostanti e circostanti qualora questo sia significativo, sono un ausilio rilevante sia per la conferma delle ipotesi sulla profondità che per valutarne l'andamento "plano-altimetrico".

**Frane da approfondire.** Nelle zone segnalate come  $ZA_{FR}$ , e definibili come aree potenzialmente franose (APF nelle linee guida allegate a ICMS) per le quali si rendono necessari approfondimenti per mancanza di indizi chiari e definitivi, le ipotesi sulla posizione della (eventuale) superficie di scorrimento dedotte dal rilievo di campo sono meno robuste. In questi casi il contributo delle indagini geofisiche – ed in particolare le informazioni in merito alla posizione del contrasto di Vs o altre grandezze – diventa estremamente rilevante. La validazione delle ipotesi è demandata alla successiva fase di analisi numerica che, introdotta in aggiunta ai dettami delle linee guida allegate ad ICMS, rappresenta un momento importante per irrobustire le ipotesi di partenza e/o per calibrare i parametri geotecnici ai fini delle successive analisi di stabilità in condizioni dinamiche.

### 8.2.4 PRESENZA DELLA FALDA

La presenza di una falda ha ovviamente una forte influenza sulle condizioni di stabilità; la presenza e la posizione della falda possono essere rilevate da evidenze di campo (emergenze idriche) e/o indagini di sito (da campagne di indagine pregresse o realizzate nell'ambito del presente studio di approfondimento). In mancanza di dati diretti è importante fare ipotesi sulla possibile formazione di falde, anche effimere, in concomitanza di eventi pluviometrici significativi: in tal senso il ruolo chiave è giocato dal modello geologico del versante che può mettere in evidenza la presenza di orizzonti superficiali ad alta permeabilità tamponati al di sotto da livelli a permeabilità più bassa. La stima della permeabilità può essere effettuata sulla base della composizione granulometrica e dello stato di fratturazione, per le rocce.

### 8.2.5 ANALISI PRELIMINARI DI STABILITÀ

Per le analisi preliminari di stabilità potranno essere adottati approcci 2D semplificati ed in condizioni statiche secondo metodi all'equilibrio limite (ELG). In particolare, in accordo ed in continuità metodologica con le linee guida, che per le successive analisi di screening da ZA a Z5 suggeriscono approcci di calcolo semplificati, ed in ragione del quadro conoscitivo che necessariamente non sarà commisurato – in termini di qualità e quantità dei dati – alle esigenze di modellazioni più avanzate, si ritiene ragionevole l'approccio analitico con i comuni metodi dei volumi parziali (conci). Nel caso di movimenti traslativi in situazioni stratigrafiche e idrauliche molto semplici (ad es. movimenti di coltri di frana/degradazione su pendii regolari) è consigliata anche un'analisi preliminare con lo schema di pendio indefinito. Tra i vari metodi di calcolo disponibili, tra i quali si segnalano quelli di **Bishop** (1955), **Janbu** (1955, 1973), **Morgenstern and Price** (1965), **Spencer** (1967), **Sarma** (1979), la scelta sarà funzione della geometria della superficie di scorrimento e delle **caratteristiche geometriche**. È buona pratica effettuare la valutazione con differenti metodi.

L'analisi di stabilità preliminare deve essere intesa come strumento con valenza multipla:

- Di calibrazione dei parametri geotecnici per le frane ben riconoscibili e vincolate, in termini di geometria, da dati di campo e/o evidenze geognostiche / geofisiche. In questi casi infatti si consiglia di utilizzare metodi che prevedono la possibilità di fissare la posizione della superficie di scorrimento per calcolare il relativo fattore di sicurezza (FS). Tenuto conto delle incertezze che comunque gravano sull'esatto posizionamento della superficie, è altresì consigliato di effettuare anche una ricerca della superficie a minimo valore di FS (critica) utilizzando, nel caso di superfici approssimabili a superfici circolari, una maglia dei centri di dimensioni ridotte ed in un intorno molto ravvicinato al centro rappresentativo della superficie ipotizzata in prima istanza. La calibrazione consiste nel far variare i parametri geotecnici entro un range prestabilito e vincolato dalla variabilità dei dati realmente misurati / stimati, fino ad ottenere valori di FS prossimi all'unità. Si tratta in altri termini di un processo di *back-analysis* del fenomeno osservato.
- Di validazione delle ipotesi sulle frane "incerte", effettuando la ricerca automatica della superficie critica e confrontando il risultato con le ipotesi di partenza. In questi casi, mancando il vincolo relativo alla posizione della superficie di scivolamento, non sarà possibile effettuare la calibrazione dei parametri, che dovranno essere quindi giocoforza attribuiti in modo "deterministico" **ovvero con una variabilità contenuta**.
- Di ricostruzione di scenari idraulici. Sia per le frane certe che incerte è infatti essenziale tenere conto dell'insorgenza di pressioni neutre all'interno del versante. In questo senso, nella fase preliminare sarà importante svolgere analisi di sensibilità del sistema alla forzante idraulica, cioè calcolando il valore di FS per differenti valori di pressione

interstiziale (la superficie piezometrica verrà assunta in condizioni idrostatiche, infatti non si ritiene necessario in questa fase simulare i moti di filtrazione, a meno che non siano disponibili dati sufficienti per la ricostruzione della rete di flusso). Si partirà sempre da condizioni asciutte (assenza di falda) per poi considerare un aumento discreto (quindi a gradini) della superficie piezometrica fino al valore che porta  $FS = 1$ , valutando poi la effettiva possibilità che si realizzi uno scenario più gravoso sulla base del giudizio esperto, qualora non si disponga di dati quantitativi sito-specifici.

Per ciò che concerne gli strumenti di calcolo, oltre ai numerosi *software* commerciali disponibili per analisi all'equilibrio limite, a puro titolo di esempio si segnala la presenza di applicazioni freeware di comprovata affidabilità, quale SSAP2010 (SLOPE STABILITY ANALYSIS PROGRAM - [www.ssap.eu/](http://www.ssap.eu/)).

Si suggerisce, inoltre, di realizzare le sezioni in formato dwg e/o dxf e di restituire in formato tabellare tutte le coordinate dei punti che definiscono i limiti delle sezioni analizzate (superficie topografica, limiti tra litotipi, superficie di scorrimento, posizione della superficie piezometrica).

## 8.2.6 ANALISI DI STABILITÀ IN CONDIZIONI PSEUDO-STATICHE E DINAMICHE

Per le frane confermate come tali e/o definite con maggior dettaglio e comunque NON ricadenti nella classe dei colamenti a cinematica lenta, saranno condotte analisi volte alla verifica della effettiva mobilità sismo-indotta tramite:

Applicazione di analisi di stabilità ELG con approccio pseudo-statico: determinazione di  $K_c$  (in funzione di diversi livelli piezometrici) e confronto con il valore della componente orizzontale equivalente dell'accelerazione sismica attesa ( $K_h$ ).

Analisi di mobilità in condizioni sismiche per le frane per le quali  $K_c \leq K_h$ . Per l'input saranno considerate *time-histories* reali selezionate in base a criteri di sorgente, sito e spettro-compatibilità. Il calcolo degli spostamenti cosismici cumulati sarà effettuato con il metodo Newmark (1965), da cui sarà possibile determinare la probabilità di superamento (Pecc) di una soglia critica di spostamento (entità della soglia 10 cm). Tale probabilità esprime di fatto la pericolosità. Le aree di espansione (AE) saranno definite, in accordo con le linee guida allegate a ICMS, tramite l'applicazione di un *buffer*.

## 8.3 Debris flows

Per questa tipologia di dissesto il risultato atteso delle analisi consiste in una valutazione dell'area potenzialmente invasa, e quindi direttamente impattata, dalla massa di materiale mobilizzato.

### 8.3.1 SCHEMA DI LAVORO

#### a) Rilievi e indagini dirette finalizzati a:

- Analisi geologica e geomorfologica del bacino tramite un rilievo di dettaglio con particolare attenzione agli aspetti idraulici. È opportuna anche un'analisi granulometrica speditiva dei materiali trasportati.
- Stima dei volumi massimi rimobilizzabili nel bacino (magnitudo), sia tramite relazioni empiriche che mediante misure in situ.
- Valutazione del grado di incisione del canale principale nei vari settori della conoide.
- Individuazione delle zone che possono modificare, catturare o deviare il deflusso (paleovalvei, viabilità e attraversamenti di fondo alveo, bacini naturali di espansione, ecc.).

**b) Analisi idrologiche a partire da dati esistenti per:**

- costruzione di curve di possibilità climatiche.
- stima di un idrogramma di piena, sia di eventi passati che per eventi aventi un dato tempo di ritorno.

**c) Approfondimento degli aspetti idraulici relativi a:**

- Individuazione e descrizione dei punti critici sul bacino (sezioni ristrette, attraversamenti, curve, ecc.).
- Delimitazione dei settori con diversa influenza sul deflusso delle portate solido-liquide (restringimenti, diminuzione della pendenza, curve).
- Censimento e valutazione in termini di efficacia e di efficienza delle opere idrauliche nel bacino e sulla conoide.
- Censimento degli attraversamenti (ponti e passerelle) e valutazione della loro influenza sul deflusso.

**8.3.2 VALUTAZIONE DEL RUN-OUT**

La valutazione delle aree di espansione delle colate rapide di detrito (AE secondo le linee guida allegate a ICMS, da associare alle relative ZA), coincidente con il *run-out*, può essere effettuata con strumenti di calcolo *freeware*, tra i quali si segnalano:

**A) DFLOWZ**

Questo programma è proposto da Berti M., Simoni A. (2014). DFLOWZ: a free program to evaluate the area potentially inundated by a *debris flow*. *Computers & Geosciences*, 67, 14-23.

Si tratta di un'applicazione gratuita che fornisce una valutazione preliminare dell'area potenzialmente inondata da un flusso di detriti. Il metodo si basa inizialmente sul modello empirico-statistico proposto da Iverson et al. (1998) per prevedere le aree interessate dall'invasione a partire dal volume della colata (Modello LAHARZ). Il modello si basa sulla semplice osservazione che maggiore è il volume del flusso, maggiore è l'area del flusso trasversale e l'area planimetrica inondata. Sono stati studiati coefficienti che possano essere considerati di validità generale per i flussi di detriti non vulcanici, poiché non è stata rilevata alcuna differenza sistematica tra i set di dati raccolti in diversi ambienti geologici. La mobilità dei flussi di detriti è sicuramente influenzata dal contenuto di acqua, dalla distribuzione dei granuli o dalla disponibilità di detriti, ma queste differenze sono mascherate dalla dispersione dei dati a causa delle incertezze di misurazione.

DFLOWZ estende il modello di Iverson ai fenomeni di flusso di detriti, prendendo in considerazione anche la possibilità di flusso non confinato che si verifica su un conoide.

Tra i parametri di input del modello vi sono:

- Il DTM di riferimento
- Il volume di riferimento dell'evento
- Le aste fluviali coinvolte

**B) FLOW-R**

Per la perimetrazione delle aree suscettibili ai fenomeni franosi a cinematica rapida si può utilizzare anche il programma Flow-R (*flow path assessment of gravitational hazards at a regional scale*. In Horton et al., 2013).

Esso si basa su un modello numerico semi-empirico che utilizza algoritmi fondati su ipotesi semplificate che, trascurando completamente il volume dell'evento, permette una stima della pericolosità anche a livello regionale. Il modello è stato sviluppato da alcuni ricercatori dell'Università di Losanna (Svizzera) ed è stato applicato con buoni risultati a diversi casi studio, mostrandosi utile non solo per la modellazione dei *debris flow*, ma

anche per altri pericoli naturali quali valanghe, caduta massi e alluvioni.

Si suggerisce questo mezzo di calcolo per la sua relativa semplicità di utilizzo; infatti, l'unico dato strettamente necessario è rappresentato dal modello digitale del terreno (DTM), fornito in formato ASCII.

La scelta dei dati e degli algoritmi di dispersione (leggi di attrito o di perdita energetica) da utilizzare nei calcoli è libera, e permette così una più accurata calibrazione del modello per ogni singolo caso studio.

Il processo sviluppato dal programma si divide in due fasi: la prima prevede l'individuazione delle aree sorgente partendo dai dati inseriti dall'utente; la seconda, invece, prevede il calcolo dell'area raggiunta dalla colata detritica e si divide a sua volta in due parti: una per il calcolo dell'espansione della colata ed una per il calcolo del massimo runout.

Gli output del modello sono costituiti da tre layer raster in formato ASCII: uno in cui sono evidenziate le aree sorgente, uno che mostra la massima energia cinetica del debris flow in ogni singola cella, e uno che mostra la probabilità di propagazione di ogni singola cella.

Questo approccio richiede un modello digitale di elevazione (DTM) sul quale definire le aree di origine mediante criteri morfologici. Successivamente, dalle aree sorgente così individuate, vengono propagate colate di detrito definite sulla base di leggi d'attrito semplificate e di algoritmi di direzione di flusso.

Il calcolo della propagazione fornisce una gamma di possibili eventi che è opportuno confrontare con la zona interessata al fine di valutare la precisione dei risultati e per regolare i parametri del modello.

Si suggerisce di lavorare attraverso una ricostruzione di *back-analysis* degli eventi pregressi, variando i parametri sopra descritti.

In sintesi, si deve operare su:

- a. definizione delle aree di innesco;
- b. calibrazione dei parametri che definiscono la direzione del flusso;
- c. settaggio dei parametri energetici che influenzano l'area di invasione.

## 8.4 Frane in roccia

In questa sezione si fa riferimento sia ai problemi di instabilità su pareti rocciose, sia alle frane che coinvolgono porzioni più vaste del versante in roccia.

### 8.4.1 SITUAZIONI DI INSTABILITÀ SU PARETI ROCCIOSE

In questa categoria ricadono i distacchi di uno o più blocchi di roccia dalla parete rocciosa con diversi cinematismi (scivolamenti, ribaltamenti, ecc.).

Una prima situazione (situazione **a**) è quella in cui non è possibile verificare le condizioni di stabilità della parete ma si assume la concreta possibilità di distacco sulla base di evidenze di sito e dati di archivio. In questo caso si eseguirà solamente l'analisi del moto dei blocchi distaccati o dall'ammasso (analisi di caduta blocchi), una volta assunti il punto di distacco e le dimensioni dei blocchi sulla base dei rilievi strutturali della parete.

Una seconda situazione (situazione **b**) è quella in cui è possibile eseguire un'analisi di stabilità della porzione di ammasso potenzialmente instabile. In alcuni casi la verifica potrà

essere fatta su porzioni dell'ammasso la cui geometria è ben individuabile (**b1**). In altri casi (**b2**), anche se non vi sono situazioni di potenziale instabilità individuabili con precisione, potranno essere condotte analisi di stabilità su blocchi/cunei" tipo" con cinematicismi di instabilità resi ammissibili dall'assetto strutturale dell'ammasso roccioso e l'orientazione della parete. Anche in questo caso verranno effettuate le analisi di caduta blocchi.

Anche se orientativamente si deve tendere a effettuare una analisi di stabilità preliminare, le indagini per acquisire gli elementi necessari a realizzare le attività nelle situazioni del tipo (**a**) e (**b**) sono in parte diverse.

Nel caso a) si dovranno acquisire gli elementi per:

1. ricostruire la superficie della parete e del pendio sottostante in 3D o lungo appropriate sezioni;
2. valutare i coefficienti di restituzione (litologia affiorante e stato di addensamento del terreno, morfologia a piccola scala non rilevabile dalla topografia e copertura vegetale);
3. individuare le zone della parete maggiormente soggette a distacchi potenziali;
4. valutare il volume dei blocchi potenzialmente distaccabili dalla parete rocciosa;
5. determinare la litologia della roccia e valutare la resistenza e densità del materiale roccioso.

I dati di cui al **punto 1**, potranno essere generalmente ricavati dalla cartografia esistente di maggior dettaglio (scala 1:5.000- 1:2.000) solamente nel caso di propagazione su distanze elevate, in cui l'altezza della parete da cui si distaccano i blocchi abbia una importanza relativa. In caso contrario bisognerà prevedere dei rilievi remoti, quali rilievi laser scanner o fotogrammetrici digitali da terra o da drone.

I rilievi remoti potranno essere utilizzati anche per le attività di cui ai **punti 3** e **4**., laddove non sia possibile eseguire rilievi diretti tradizionali sulla parete o dove si osservi che l'assetto strutturale nelle zone rilevabili è diverso rispetto ad altre zone della parete, specie se ad altezze maggiori. In particolare, per i rilievi di cui al **punto 4**., una volta individuate le famiglie di discontinuità, se ne dovrà valutare la spaziatura (in termini di curva di spaziatura cumulata, laddove il campione statistico delle spaziature lo consenta), e quindi stimare il volume dei bocchi potenzialmente isolabili dai giunti dalle famiglie anzidette.

Nelle situazioni di tipo (**b**), laddove il rilievo strutturale tradizionale diretto non sia possibile o significativo, si utilizzeranno ugualmente rilievi remoti. In questo caso l'attenzione maggiore dovrà essere posta nella determinazione delle giaciture delle discontinuità. I rilievi diretti o remoti dovranno fornire, inoltre, le dimensioni dei blocchi/cunei da verificare e la giacitura del fronte roccioso. Nelle situazioni di tipo (**b**) più difficile sarà la valutazione dei parametri geomeccanici (scabrezza e resistenza delle superfici delle discontinuità). Questi potranno essere ricavati su zone dell'ammasso accessibili attraverso misure speditive su giunti continui (profilometro, martello di Schmidt "tipo L"). Per l'esecuzione delle prove si rimanda alle raccomandazioni dell'ISRM. Dalle raccomandazioni dovranno anche essere ricavate indicazioni sulle altre condizioni delle discontinuità da includere nel rilievo (riempimento, presenza dei ponti di roccia, apertura). Laddove possibile i rilievi remoti devono essere validati con rilievi tradizionali. In queste situazioni, nel caso di gran lunga più frequente di scivolamento, i corpi frana sono costituiti da roccia poco fratturata e delimitati da una o un numero limitato di discontinuità. Pertanto si potrà assumere uno schema di cuneo rigido in cui si considera la resistenza al taglio lungo le singole discontinuità espressa con il criterio di Mohr-Coulomb.

### 8.4.2 FRANE SU VERSANTI ROCCIOSI

In questo caso, nella stesura del piano delle indagini e nella loro esecuzione, l'attenzione va posta sui seguenti aspetti:

1. rilievo degli elementi geomorfologici riconducibili alle caratteristiche geometriche e cinematiche del movimento;
2. stato di fratturazione dell'ammasso (soprattutto in termini di spaziatura, estensione delle discontinuità, numero e giacitura delle famiglie) e condizioni delle discontinuità;
3. presenza di elementi strutturali alla scala del versante (discontinuità principali) e loro caratteristiche di scabrezza a grande scala;
4. grado di allentamento e intensità dello stato di fratturazione nelle varie zone dell'area in frana, con particolare riguardo alle fasce di taglio in corrispondenza della superficie di scorrimento di scivolamenti planari/rotazionali;
5. eventuali variazioni della litologia e della struttura dell'ammasso (ad esempio stratificazione) all'interno del versante.

Le indagini per le valutazioni di cui **punto 3.** assumono più importanza quando l'ammasso viene assimilato ad un discontinuo e le discontinuità controllano il cinematismo. Le indagini per le valutazioni di cui al **punto 2.** sono fondamentali per frane in cui l'ammasso è assimilabile ad un continuo equivalente ad un discontinuo (superfici di rottura non controllate da elementi strutturali e sostanziale omogeneità dell'ammasso) attraverso indici di qualità (RMR intrinseco, GSI).

I rilievi potranno essere eseguiti in modo tradizionale su affioramento e accoppiati a rilievi remoti, qualora i primi non fossero realizzabili o troppo localizzati. I rilievi dello stato di fratturazione e la ricostruzione della stratigrafia nell'area in frana da sondaggi a carotaggio continuo, ove la logistica lo consenta, forniscono eccellenti informazioni (sondaggi a carotaggio continuo con analisi dello stato di fratturazione e log stratigrafici). Questi vanno accoppiati, sempre se la logistica lo consente, a profili di sismica o ad altre indagini geofisiche, una volta valutata la loro significatività ai fini della delimitazione del corpo frana e della valutazione della qualità dell'ammasso roccioso.

Sugli affioramenti e sulle carote di sondaggio va eseguito il rilievo geomeccanico. Prove meccaniche su campioni particolarmente significativi possono essere utili.

In questi casi il rapporto molto elevato tra dimensioni corpo frana e spaziatura media delle discontinuità rende possibile, qualora la superficie di scorrimento non utilizzi discontinuità principali molto estese, schematizzare l'ammasso con un continuo equivalente a un discontinuo, la cui resistenza al taglio, espressa attraverso coesione ( $c'$ ) ed angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  efficaci, ottenuti a partire da criteri per ammassi di questo tipo, che si basano anche sull'impiego di indici di qualità dell'ammasso roccioso. I metodi di analisi e i criteri per la scelta dei parametri sono gli stessi visti per le terre.

### 8.4.3 RILIEVI REMOTI

I rilievi remoti possono essere del tipo laser scanner (LS) e fotogrammetrico digitale (FD) da terra o da drone. In tutti i rilievi lo strumento fornisce una nuvola di punti in un sistema di coordinate tridimensionale ognuno dei quali corrisponde ad una riflessione del fascio laser. Tutti i rilievi vanno accoppiati all'immagine fotografica ad alta risoluzione che aiuti nella individuazione degli elementi strutturali e morfologici.

I rilievi saranno preceduti da una ricognizione per capire dimensioni e forma della parete e orientazione approssimativa delle superfici di discontinuità rilevabili. In tal modo, in base alla precisione richiesta, si potranno decidere distanza e orientazione del rilievo rispetto alla parete, numero e ubicazione delle scansioni/ripresе e tipo di attrezzatura.

Nei rilievi LS è preferibile evitare elevati angoli tra la linea di vista media dello scanner e l'inclinazione della parete. Ugualmente si dovrebbe posizionare lo strumento (distanza dal fronte e area di sovrapposizione laterale tra scansioni contigue) in modo che l'angolo di campo orizzontale non superi  $50^\circ$ . La sovrapposizione tra rilievi contigui dovrebbe essere pari ad almeno il 20%. La spaziatura ottimale di punti della nuvola dipende dall'applicazione. In generale una spaziatura non superiore a 20 mm è consigliabile per la maggior parte delle applicazioni geotecniche. Per fronti di altezza elevata la spaziatura può arrivare sino a 50 mm.

Nei rilievi FD, siano essi da terra o da piattaforma aerea, si possono eseguire più tipi di rilievo: riprese affiancate tutte con asse obiettivo normale alla parete o riprese con diversi angoli asse obiettivo-parete rocciosa. Le coordinate dei punti vanno georeferenziate eseguendo un rilievo topografico per determinare le coordinate di almeno tre dei punti di controllo. Più punti di controllo si misurano oltre ai tre minimi, migliore è la stima dell'accuratezza dei dati e minori gli errori.

Per ricavare i parametri di giacitura di una discontinuità questa deve essere esposta su un'area (patch) su cui siano state rilevate le coordinate di un certo numero di punti della nuvola (almeno quattro). Ciò può essere eseguito attraverso codici di elaborazione delle nuvole di punti. La stima della giacitura migliora all'aumentare del numero di punti analizzato. Nel caso l'area sia molto vasta si può determinare la scabrezza a grande scala e la variabilità di giacitura, utili per dare una misura della dispersione dei risultati.

Spaziatura ed estensione si determinano sulle tracce delle discontinuità, di preferenza individuate manualmente. Si possono ricavare sia la spaziatura apparente (sulle immagini 2D) che quella reale sulle nuvole di punti o le immagini 3D. Quest'ultima si misura, per ciascun sistema, su un allineamento perpendicolare al sistema. Per discontinuità di estensione modesta la spaziatura non può essere determinata su un singolo allineamento ma va determinata su più allineamenti.

Ai fini della misura di giacitura, per evitare, almeno in parte, di trascurare le discontinuità sub-parallele alla linea di vista dell'apparecchio laser/fotografico si consiglia di eseguire più rilievi con diverse angolazioni. Sono disponibili relazioni teoriche per la quantificazione dell'accuratezza del rilievo in funzione dell'orientazione delle discontinuità misurate (*Ferrero et al. 2008*).

## 8.5 Bibliografia di riferimento

- Bishop, A.W.**, (1955),  
*"The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes"*, Geotechnique, Vol. 5, pp 7 - 17.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica**, (Roma, 2017),  
*Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR)*. versione 1.0.
- Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII - n. 2 - 2011
- Ferrero A.M., Forlani G., Roncella R., Voyat H.I.**, (2008),  
*Advanced geo structural survey methods applied to rock mass characterization. Rock Mechanics and Rock Engineering. Springer, Wien.*
- 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 - Indirizzi e Criteri per la Microzonazione sismica.*
- Gruppo di Lavoro MS-AQ** (2010)  
*Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana. Regione Abruzzo - Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 3 vol. e Cd-rom.*
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L.** (2014),  
*The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides*, 11, pp. 167-194
- Janbu, N.** (1954),  
*Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis. European Conference on Stability Analysis, Stockholm, Sweden.*
- Janbu, N.** (1973),  
*Slope Stability Computations. Embankment Dam Engineering - Casagrande Volume*, R.C. Hirschfeld and S.J. Poulos, eds., John Wiley and Sons, New York, pp 47-86.
- Morgenstern, N.R. and Price, V.E.** (1965),  
*The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. Geotechnique*, Vol.15, No.1pp.7793.
- Newmark NM** (1965),  
*Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique*, London 15(2): 139-160
- Sarma S. K.** (1979),  
*Stability analysis of embankments and slopes. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1979, 105, 1511-1524
- Spencer, E.** (1967),  
*A Method of Analysis of The Stability of Embankments Assuming Parallel Interslice Forces. Geotechnique*, 17, pp. 11-26

**09**

**ALLEGATI**

## Allegato Cap. 3.1

### Scheda di raccolta dati per rilevamento coperture



LOGO DITTA

RIFERIMENTI STAZIONE RILEVAMENTO	CODICE AFFIORAMENTO			CODICE FOTO	
	BREVE DESCRIZIONE LOCALIZZAZIONE				
	COORDINATE	LAT		LONG	
	DIMENSIONI AFFIORAMENTO (m)	H		L	
	SPESSORE VISIBILE IN AFFIORAMENTO (m)		STIMA SPESSORE REALE (m)		
DESCRIZIONE	TIPOLOGIA COPERTURA*				
	DESCRIZIONE GRANULOMETRICA e/o CLASSE USCS (Tab. 7)				
	CEMENTAZIONE**				
Note					

\* es. coltre di alterazione, colluvio, detrito di versante, deposito alluvionale sospeso

\*\* indicare solo se la copertura è sciolta o al massimo poco cementata

## Allegato Cap. 3.2

### Scheda di raccolta dati per rilievo **geomeccanico**



LOGO DITTA

RIFERIMENTI STAZIONE RILEVAMENTO	CODICE STAZIONE			CODICE FOTO	
	BREVE DESCRIZIONE LOCALIZZAZIONE				
	COORDINATE	LAT		LONG	
	DIMENSIONI AFFIORAMENTO (m)	H		L	
	ORIENTAZIONE Versante	Inclinazione		Immersione	

DESCRIZIONE AMMASSO	LITOLOGIA					
	TIPO AMMASSO (vedi tab. 1)					
	GRADO ALTERAZIONE AMMASSO (vedi tab. 2)					
	GSI (vedi tab. 3a o 3b)					
	FREQUENZA GIUNTI (λ)					
		Lv - verticale (m)		numero giunti lungo Lv (NLv)		NLv/Lv
Lo - orizzontale (m)			numero giunti lungo Lo (NLo)		NLo/Lo	
Ld - diagonale (m)			numero giunti lungo Ld (NLd)		NLd/Ld	

GEOMETRIA DISCONTINUITA'	N. SISTEMI DISCONTINUITA'						
	ORIENTAZIONE MEDIA	famiglia #1	Tipo		inclinazione		immersione
		famiglia #2	Tipo		inclinazione		immersione
		famiglia #3	Tipo		inclinazione		immersione
		famiglia #4	Tipo		inclinazione		immersione
		famiglia #5	Tipo		inclinazione		immersione
	SPAZIATURA delle famiglie (m)	famiglia #1	MIN		MAX		MEDIA
		famiglia #2	MIN		MAX		MEDIA
		famiglia #3	MIN		MAX		MEDIA
		famiglia #4	MIN		MAX		MEDIA
		famiglia #5	MIN		MAX		MEDIA
	PERSISTENZA rapporto tra la somma delle lunghezze dei tratti di discontinuità rispetto alla lunghezza totale (ponti+discontinuità)	famiglia #1	MIN		MAX		MEDIA
		famiglia #2	MIN		MAX		MEDIA
		famiglia #3	MIN		MAX		MEDIA
		famiglia #4	MIN		MAX		MEDIA
famiglia #5		MIN		MAX		MEDIA	

CARATTERISTICHE SUPERFICI DISCONTINUITA'	JCS*					Test ISRM (vedi tab. 5)	ALTERAZIONE (vedi tab. 6)
	da sclerometro Tipo L (Martello di Schmidt)						
	Numero di rimbalzo (letto sullo sclerometro Tipo L)					inclinazione martello rispetto all'orizzontale	
		JRC* (vedi tab. 4)	Giunto Alterato	Giunto fresco			
	famiglia #1						
	famiglia #2						
	famiglia #3						
famiglia #4							
famiglia #5							

\* su almeno una media di tre giunti della stessa famiglia

## Allegato Cap. 3.3

### Scheda di raccolta dati per rilevamento frane



LOGO DITTA

RIFERIMENTI STAZIONE RILEVAMENTO	CODICE FRANA*			CODICE FOTO	
	BREVE DESCRIZIONE LOCALIZZAZIONE				
	COORDINATE**	LAT		LONG	
	CODICE FRANA IFFI		COORDINATE PIFF (da IFFI)		

\*riferito in maniera univoca alle frane riportate nella carta geologico-  
tecnica

\*\* UTM WGS84 33N

DESCRIZIONE FRANA	TIPOLOGIA FRANA***	
	MATERIALE ACCUMULO****	

\*\*\* vedasi classificazione come da progetto IFFI

\*\*\*\* compilare la relativa scheda per le coperture

DESCRIZIONE MATERIALE DI FRANA	DESCRIZIONE GRANULOMETRICA e/o CLASSE USCS (Tab. 7)	
	CEMENTAZIONE^	

^ descrivere se sciolto o cementato

NOTE		FOTO

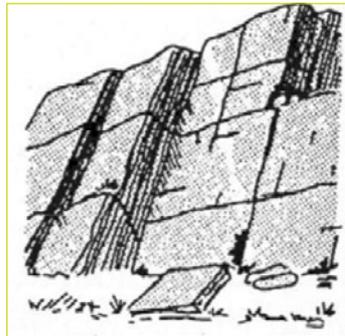
**Allegato Cap. 3.4**  
**Riferimenti per la compilazione delle schede**



A



B



C



D

**TABELLA 1**  
 Descrizione della struttura di ammasso roccioso:

- a) a blocchi,
- b) irregolare,
- c) lastriforme,
- d) colonnare.

DENOMINAZIONE	DESCRIZIONE	GRADO
Fresca	Nessun segno di alterazione visibile nel materiale roccioso, se non leggera decolorazione su discontinuità principali.	I
Leggermente alterata	Decolorazione del materiale roccioso e delle discontinuità. Tutto il materiale roccioso può essere decolorato e talvolta può essere molto meno resistente della roccia fresca.	II
Moderatamente alterata	Meno della metà del materiale roccioso è decomposto e/o disgregato. Roccia fresca o decolorata è presente o come uno scheletro discontinuo o all'interno di singoli blocchi.	III
Fortemente alterata	Più della metà del materiale roccioso è decomposto e/o disgregato. Roccia fresca o decolorata è presente o come uno scheletro discontinuo o all'interno di singoli blocchi.	IV
Completamente alterata	Tutto il materiale roccioso è decomposto e/o disgregato come un terreno. La struttura originaria dell'ammasso è ancora largamente intatta.	V
Suolo residuale	Tutto il materiale roccioso è diventato un terreno. Le strutture dell'ammasso roccioso e dei materiali rocciosi sono distrutte. Vi è un forte cambiamento di volume ma il terreno non ha subito trasporti significativi.	VI

**TABELLA 2**  
 Descrizione del grado di alterazione dell'ammasso roccioso.

**GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)**

From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.

STRUCTURE	SURFACE CONDITIONS				
	DECREASING SURFACE QUALITY →				
 <p><b>INTACT OR MASSIVE</b> - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90	80	70	N/A	N/A
 <p><b>BLOCKY</b> - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80	70	60	50	40
 <p><b>VERY BLOCKY</b> - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>	70	60	50	40	30
 <p><b>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY</b> - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>	60	50	40	30	20
 <p><b>DISINTEGRATED</b> - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>	50	40	30	20	10
 <p><b>LAMINATED/SHEARED</b> - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

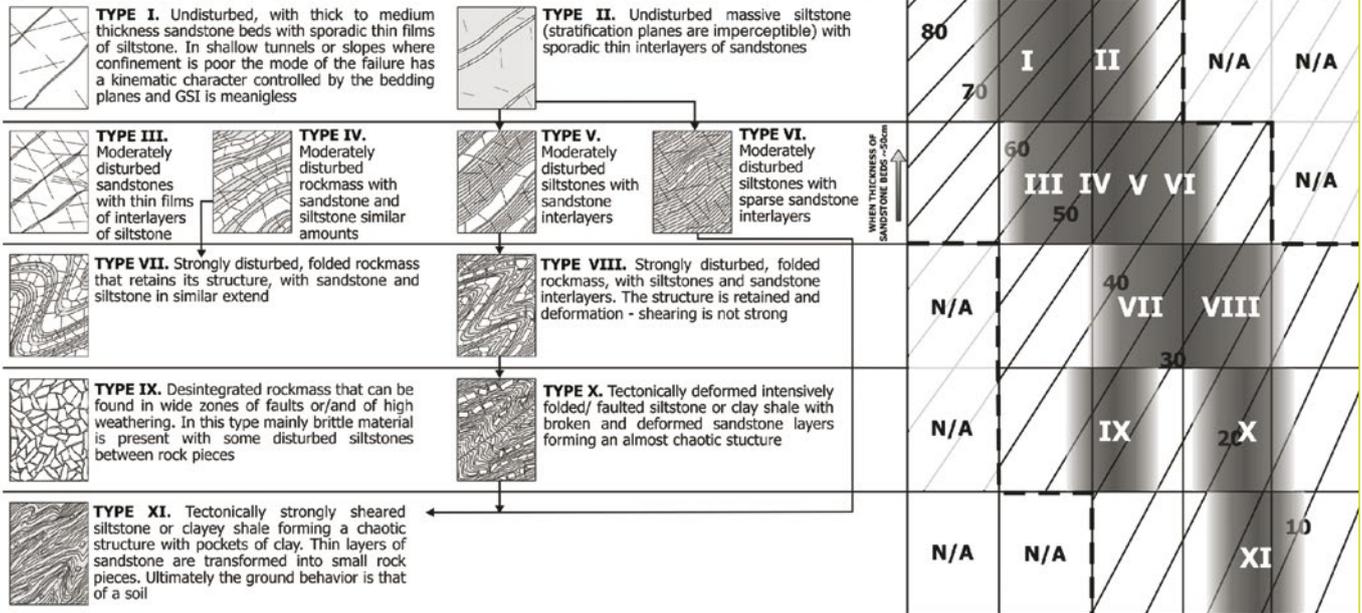
**VERY GOOD** Very rough, fresh unweathered surfaces  
**GOOD** Rough, slightly weathered, iron stained surfaces  
**FAIR** Smooth, moderately weathered and altered surfaces  
**POOR** Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments  
**VERY POOR** Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings

TABELLA 3A

**GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI) FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH (V. Marinos, 2007)**

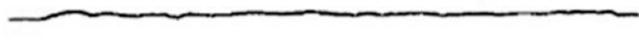
Heterogeneous rockmasses are meant those with alternating layers of clearly different lithology types with significant differences in their strength properties. For flysch, a typical formation with heterogeneous rock masses, these alternations are consisting of sandstones and siltstones. Clay shales may be present. From a description of the lithology, structure and surface conditions of discontinuities (particularly of the bedding planes), choose a box in the chart. **The selection of the structure should be based on the tectonic disturbance (undisturbed, slightly disturbed, strongly disturbed - folded, desintegrated, sheared), the proportion of siltstones against sandstones and the expressed or not stratification inside the siltstone layers. In the type IV and V when the thickness of sandstone beds exceed 50cm an increase of the GSI value by 5 is suggested. From type IV and the following types, the stratification planes are perceptible inside the siltstone mass. Locate the position in the box that corresponds to the conditions and estimate the average value GSI from the contours.** The determination of the structure and the condition of discontinuities may range between two adjacent fields. Note that the Hoek - Brown criterion does not apply to structurally controlled failures. Where unfavourably oriented continuous weak planar discontinuities are present, these will dominate the behaviour of the rock mass. The strength of some rock masses is reduced by the presence of groundwater and this can be allowed for by a slight shift to the right in the columns for fair, poor and very poor conditions. Water pressure does not change the value of GSI and it is dealt with by using effective stress analysis.

**STRUCTURE AND COMPOSITION**



N/A Means geologically impossible combination. In the non - shadowed areas, such rockmasses are not impossible to find but it is very unusual  
 → Direction of tectonic disturbance and deformation of equivalent rockmass lithology

TABELLA 3B

	$JRC = 0 - 2$
	$JRC = 2 - 4$
	$JRC = 4 - 6$
	$JRC = 6 - 8$
	$JRC = 8 - 10$
	$JRC = 10 - 12$
	$JRC = 12 - 14$
	$JRC = 14 - 16$
	$JRC = 16 - 18$

**TABELLA 4**  
Profili di rugosità e relativi valori di JRC.

GRADO	DENOMINAZIONE	PROVE DI IDENTIFICAZIONE	RESISTENZA A COMPRESIONE UNIASSIALE (MPA)
S1	Argilla molto morbida	Facilmente penetrabile di molti centimetri con il pugno.	< 0,025
S2	Argilla morbida	Facilmente penetrabile di molti centimetri con il pollice.	0,025-0,25
S3	Argilla soda	Può essere penetrata di diversi centimetri con il pollice, con sforzo moderato.	0,05-0,10
S4	Argilla rigida	Facilmente intaccata col pollice ma penetrata solo con grande sforzo.	0,1-0,25
S5	Argilla molto rigida	Facilmente intaccata con l'unghia del pollice.	0,25-0,50
S6	Argilla dura	Intaccata con difficoltà con l'unghia del pollice.	> 0,50
R0	Roccia estremamente debole	Intaccata con l'unghia del pollice.	0,25-1,0
R1	Roccia molto debole	Si frammenta con un colpo deciso dato con la punta del martello da geologo; può essere scalfita con il coltello.	1,0-5,0
R2	Roccia debole	Può essere scalfita con difficoltà; un colpo deciso con la punta del martello	5,0-25
R3	Roccia mediamente resistente	Non può essere graffiata o scalfita con il coltello; un campione può essere rotto con un unico colpo deciso del martello.	25-50
R4	Roccia resistente	È necessario più di un colpo di martello per rompere un campione.	50-100
R5	Roccia molto resistente	Sono necessari molti colpi di martello per rompere un campione.	100-250
R6	Roccia estremamente resistente	Il campione può essere solo scheggiato con il martello.	> 250

**TABELLA 5**  
Manual Index  
Test per la stima della resistenza a compressione uniassiale.

DENOMINAZIONE	DESCRIZIONE
Fresco	Non vi sono segni visibilmente di alterazione del materiale roccioso.
Decolorato	Il colore della roccia fresca originale è cambiato. Si dovrebbe indicare il grado del cambiamento. Se questo riguarda un particolare costituente mineralogico, ciò deve essere indicato.
Decomposto	La roccia è alterata sino alle condizioni di un terreno in cui la struttura originaria è ancora intatta ma alcuni o tutti i gradi sono decomposti.
Disgregato	La roccia è alterata sino alle condizioni di un terreno in cui la struttura originaria è ancora intatta. La roccia è friabile ma i grani non sono decomposti.

**TABELLA 6**  
Descrizione del grado di alterazione delle superfici dei giunti.

**NOTA:**  
I gradi di alterazione sopra descritti possono essere ulteriormente suddivisi utilizzando dei termini qualificativi: per es. «leggermente decolorato», «moderatamente decolorato», «fortemente decolorato».

	SIGLA	CRITERI DI IDENTIFICAZIONE DI TERRENO	
TERRENI GRANULARI	DEPOSITI A BLOCCHI	BW	Se il deposito è clasto-sostenuto valuta se è ben assortito (W) o poco assortito (P), stimando qualitativamente la distribuzione granulometrica
		BP	
		BSM	Se il deposito è matrice-sostenuto valuta se la matrice è sabbioso-limosa (SM) o limoso-argillosa (MC)
		BMC	
	GHIAIE	GW	Se la ghiaia è pulita valuta se è ben assortita (W) o poco assortita (P), stimando qualitativamente la distribuzione granulometrica
		GP	
		GM	Se la ghiaia contiene del fino valuta se il fino è limoso (M) o argilloso (C) al tatto
		GC	
	SABBIE	SW	Singoli grani di sabbia possono essere distinti a occhio nudo. Se la sabbia è pulita valuta se è ben assortita (W) o poco assortita (P), stimando qualitativamente la distribuzione granulometrica. Se la sabbia contiene del fino valuta se il fino è limoso (M) o argilloso (C) al tatto
		SP	
		SM	
		SC	
TERRENI COESIVI	LIMI E ARGILLE	ML	Se il terreno è a bassa plasticità (poco lavorabile) valutare se è prevalentemente limoso (granulare al tatto, M), argilloso (C) o organico (colore nero, O)
		MC	
		OL	
	LIMI E ARGILLE	MH	Se il terreno è ad alta plasticità (molto lavorabile) valutare se è prevalentemente limoso (granulare al tatto, M), argilloso (C) o organico (colore nero, O)
		CH	
		OH	
	TORBE	PT	Contiene materiale organico fibroso (colore nero)

**TABELLA 7**

Schema per la classificazione USCS su base qualitativa.

**N.B.**

Le tabelle **1, 2, 5 e 6** sono tratte e modificate da "Metodologie per la descrizione quantitativa delle discontinuità nelle masse rocciose" (1993, Rivista Italiana di Geotecnica, 2:151-197), che rappresenta la traduzione in italiano delle raccomandazioni ISRM.

**Allegato Cap. 4.1**  
**Scheda metadati indagini HVSR**



Foglio Campagna acquisizione HVSR

Campagna		Data	
Sito		Operatore	
Strumento Acquisitore		Sismometro Tipo	
Frequenza Sismometro		Fondo scala	
Freq. Campionamento		GPS LOC	
Inizio Registrazione		Durata (sec)	
NOME FILE		FORMATO FILE	
Coordinate			
	GPS	UTM	ALTRO
Latitudine			
Longitudine			
Quota (m)			

**Indicazioni sul Sito:** (Città, Frazione, via, proprietario, telefono e altri riferimenti per la sua individuazione)

Mappa

Foto

**INSTALLAZIONE SISMOMETRO: ACCOPPIAMENTO**

Roccia       Asfalto       Sabbia       Erba  
 Terreno Riporto       Terreno\_compatto       Terreno\_bagnato       Terreno\_secco  
 Cemento       Sterrato       Pavimentazione       Marciapiede

**Modalità Accoppiamento Sismometro Terreno:**  
 (appoggiato, interrato, cementato).....

**INSTALLAZIONE SISMOMETRO : GEOLOGIA**

Roccia       Terreno       Detrito       Riporto



Foglio Campagna acquisizione HVSR

LOGO DITTA

**altro/commento:** .....**INSTALLAZIONE SISMOMETRO : POSIZIONAMENTO in**

- |   |   |  |                                       |
|---|---|--|---------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Città_via_principale | <input type="checkbox"/> Città_via_secondaria | <input type="checkbox"/> Città_cortile | <input type="checkbox"/> Città_parco  |
| <input type="checkbox"/> Strada_principale    | <input type="checkbox"/> Strada_secondaria    | <input type="checkbox"/> Mura          | <input type="checkbox"/> Mura_antiche |
| <input type="checkbox"/> Aperta_campagna      | <input type="checkbox"/> Galleria             | <input type="checkbox"/> Cunicolo      |                                       |

**altro/commento:** .....**INSTALLAZIONE GEOFONO : VICINANZA**

- |  |   |  |                                   |
|--|---|--|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Fiume           | <input type="checkbox"/> Canale         | <input type="checkbox"/> Fabbrica      | <input type="checkbox"/> Cantiere |
| <input type="checkbox"/> Lavori_stradali | <input type="checkbox"/> Alberi         | <input type="checkbox"/> Ponti         | <input type="checkbox"/> Viadotti |
| <input type="checkbox"/> Mura            | <input type="checkbox"/> Gallerie       | <input type="checkbox"/> fognature     |                                   |
| <input type="checkbox"/> Edifici_nessuno | <input type="checkbox"/> Edifici_scarsi | <input type="checkbox"/> Edifici_densi |                                   |

distanza\_edificio\_vicino:.....numero\_piani\_edificio\_vicino:.....

**strutture\_sotterranee:** .....**CONDIZIONI ATMOSFERICHE :**

- |  |   |                                     |
|--|---|-------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> vento_forte   | <input type="checkbox"/> vento_debole   | <input type="checkbox"/> no_vento   |
| <input type="checkbox"/> pioggia_forte | <input type="checkbox"/> pioggia_debole | <input type="checkbox"/> no_pioggia |

**altro/commento** .....**RUMORE RILEVABILE:**

- |  |  |  |
|--|--|--|
| <input type="checkbox"/> Auto_nessuna          | <input type="checkbox"/> Auto_poche          | <input type="checkbox"/> Auto_tante          |
| <input type="checkbox"/> Mezzi_pesanti_nessuno | <input type="checkbox"/> Mezzi_pesanti_pochi | <input type="checkbox"/> Mezzi_pesanti_tanti |
| <input type="checkbox"/> Pedoni_nessuno        | <input type="checkbox"/> Pedoni_pochi        | <input type="checkbox"/> Pedoni_tanti        |

**ALTRE SORGENTI DI RUMORE**

.....

.....

**Allegato Cap. 4.2**  
**Scheda metadati indagini MASW**



Foglio Campagna acquisizione RIFRAZIONE/MASW

Campagna		Data	
Profilo		Operatore	
Strumento		Condizioni Meteo	
Sorgente		Formato Dati	
Frequenza Geofoni		Spaziatura Geofoni	
Freq. Campionamento		Lungh. registrazione	
Coordinate			
Inizio Profilo		Fine Profilo	
Latitudine		Latitudine	
Longitudine		Longitudine	
Quota		Quota	

Mappa

Foto

Schema geometria

Energizzazioni: 01-----02-----03-----04-----05-----06-----07-----08-----09  
 Ricevitori: 01.....06.....12.....18.....24

Energiz. N°	Posizione Energiz.	Nome file	Posizioni Ricevitori	Tracce inattive	Note (Rumore, Energ. singola, stack Energ.)

Continua



## ENGLISH SECTION

# PROTOCOLS FOR THE ACQUISITION AND PROCESSING OF DATA FOR LEVEL 3 SEISMIC MICROZONATION STUDIES IN CENTRAL ITALY

CURATED BY

**Dario ALBARELLO**

*Presidente del CentroMS*

## 1 Summary

The present guidelines were created to standardise seismic microzonation studies developed by professional geologists as part of activities planned and financially supported by the Government Commissioner for the Reconstruction of Central Italy following the earthquakes of 2016 and 2017 (cf. Ordinance 55/2018). In this situation, the Centre for Seismic Microzonation (CSM), established in 2015 thanks to contributions from a number of Academic and Research institutions ([www.centromicrozonazioneismica.it/en/](http://www.centromicrozonazioneismica.it/en/)), was charged with supervising and supporting professionals involved in seismic microzonation studies. These studies are performed in accordance with the 'Italian Guidelines for Seismic Microzonation' (IGSM), released in 2008<sup>1</sup> and subsequently updated<sup>2</sup> (WGSMLA 2010<sup>3</sup>; Various Authors 2011). A key aspect of the IGSM (shared with the TC4 methodology) is the gradual nature of the proposed approach that, to ensure the widest possible applicability, relies on three levels of microzonation studies with an increasing level of engagement and cost<sup>4</sup>:

- **level 1** this propaedeutic and semi-qualitative level is used to develop the reference geologic model (oriented toward seismic response characterisation) by identifying portions of the study area characterised by similar seismic effects (Seismically Homogeneous Microzones, SHMs). In particular, three different situations are identified with respect to the reference ground motion at a rocky site: no amplification is expected; amplification is expected due to local seismostratigraphic and geo-morphologic conditions; and, finally, earthquake induced soil instabilities (such as liquefaction, landslides or fault rupture) are expected.
- **level 2** where applicable, the effects influencing local seismic response are roughly quantified using simplified approaches. Calculations are based on the assumption that subsoil seismic response is dominated by 1D site amplification and can reliably be characterised in terms of integral parameters (e.g., average velocities in shallow sedimentary layers, resonance period of local sediments, etc.). This level produces a seismic microzonation map that associates a set of 3 Amplification Factors (AF) with the SHMs where 1D amplification effects are expected. Each AF is the ratio between the integral of the response ordinates in acceleration over a set of periods at the surface of the relevant SHM and the same integral relative to the reference site conditions (input motion).
- **level 3** this level concerns specific situations to which simplified approaches cannot be applied; they are therefore analysed using advanced quantitative techniques (2D-3D numerical simulations, laboratory studies, etc.). In these situations, AF values are calculated for sites where ground motion amplification is conditioned by rugged morphology or lateral seismic impedance contrast in the subsoil.

- 
- 1 WGSMLA (Working Group on Seismic Microzonation) (2008) Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vols. and DVD, (in Italian). [www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view\\_pub.wp?conte ntid=PUB1137](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?conte ntid=PUB1137), English version at [www.centromicrozonazioneismica.it/it/download/category/9-guidelines-for-seismic-microzonation](http://www.centromicrozonazioneismica.it/it/download/category/9-guidelines-for-seismic-microzonation)
  - 2 WGSMLA (Working Group on Seismic Microzonation for the L'Aquila Area) (2010) Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana. Regione Abruzzo, Dipartimento della Protezione Civile, 3 vols. and DVD, 796 pp. (in Italian). [www.centromicrozonazioneismica.it/it/download/category/11-microzonazione-sismica-per-la-ricostruzione-dell-area-aquilana](http://www.centromicrozonazioneismica.it/it/download/category/11-microzonazione-sismica-per-la-ricostruzione-dell-area-aquilana)
  - 3 Various Authors (2011) Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica", Ingegneria sismica, 28, 2, Patron editore Bologna, Italy, (in Italian). [www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/aggiornamento\\_indirizzi\\_microzonazione\\_sismica.pdf](http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/aggiornamento_indirizzi_microzonazione_sismica.pdf)
  - 4 [www.centromicrozonazioneismica.it/en/download-en/category/9-guidelines-for-seismic-microzonation](http://www.centromicrozonazioneismica.it/en/download-en/category/9-guidelines-for-seismic-microzonation)

With reference to microzonation activities in Central Italy, level 3 studies are carried out in 130 municipalities damaged by the 2016–2017 seismic sequence. In particular, Level 3 studies are extended to the entire inhabited area, including situations where simplified approaches were sufficient for estimating site effects.

As a consequence, simplified approaches are not considered, and quantitative 1D/2D modelling is applied extensively. Moreover, the final outcome is not restricted to a set of AF values but extended to the definition of acceleration response spectra for each SHM.

Professionals commissioned with these studies are required to apply more advanced approaches than those commonly adopted in professional practice. For this reason, the Centre for Seismic Microzonation was asked to assist professional geologists in their activities. In this framework, the present guidelines were developed to integrate training activities. This work also represented an opportunity to renew and integrate existing guidelines by implementing advancements in scientific research and benefitting from past experiences.

The aim of these new guidelines is to provide indications concerning data collection and interpretative procedures for developing advanced Level 3 microzonation studies. The guidelines concern:

1. Development of a geological model (for seismic risk assessment) of the study area; definition of SHM geometries by also identifying stable areas where reference soil conditions apply, stable areas where ground motion amplification phenomena are expected due to local seismostratigraphic and geomorphological conditions, and unstable areas where landslides, surface faulting, liquefaction effects or differential subsidence may occur during an earthquake; definition of representative geological sections for the study area and a seismostratigraphic log for each SHM;
2. Determination of Warning Zones (WZ), i.e., zones potentially prone to phenomena of instability; in particular, landslides, soil liquefaction and capable faults are of concern;
3. Evaluation of overall Local Seismic Response (LSR) (including SHMs prone to liquefaction and to landslides when the thickness of the unstable body is greater than 10 m) using 1D and 2D linear equivalent procedures; parameterized LSR in terms of representative AF values relative to three period ranges (0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s and 0.7-1.1 s) and 'elastic' response spectra.

The planning of microzonation activities for each town involves two types of operators:

- a. Professionals charged with: i) revising eventual previous studies and developing the reference geological model; ii) geophysical survey of the study area; iii) coordinating field activities relative to borehole seismic measurements, geotechnical testing (SPT) and collecting samples for laboratory evaluations of the dynamic properties of geological bodies; iv) performing 1D numerical evaluations of Local Seismic Response;
- b. Researchers operating on behalf of the CSM and charged with: i) supporting and supervising the activities of professional geologists; ii) supporting professionals during field activities and data interpretation; iii) performing bore-hole seismic measurements; iv) providing professionals with input motions and data relative to the dynamic geotechnical characteristics of subsoil materials (shear modulus reduction and damping curves, etc.) for 1D modelling of local seismic response; v) performing numerical 2D seismic response analyses where complex geometrical configurations are present.

The guidelines mainly concern the first group of operators, but also aim at standardising the actions of CSM researchers. The guidelines have been developed based on the following assumptions:

- Professionals possess the necessary skills for operating field techniques used in microzonation studies
- The procedures described in the guidelines are feasible and easily applicable after short training
- The technical tools necessary for field activities are widely available in professional practice
- The proposed procedures are compatible with financial resources supplied to professionals and with the time schedule of the project

When making use of the guidelines, professionals may consult several recent and freely available publications. In particular, the following documents:

- Indirizzi e Criteri per la Microzonazione sismica<sup>1</sup>
- Microzonazione Sismica dell'area Aquilana<sup>5</sup>
- Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica<sup>6</sup>
- Linee guida per la gestione del territorio interessato da faglie attive e capaci<sup>7</sup>
- Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante cosismiche<sup>8</sup>
- Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da fenomeni di liquefazione<sup>9</sup>

The present guidelines are not intended as mandatory indications but rather as an operational support for professionals in order to: i) expose potential critical aspects of procedures, ii) delineate procedures in line with the 'state-of-the-art' and reduce possible biases in planning and operative activities in the field iii) optimise and homogenise outcomes. Professionals commissioned with a study are requested to select the procedures most appropriate to the specific situation by ensuring satisfactory results in any case. Therefore, the use of approaches different from those described in the guidelines is possible, though it should be previously agreed upon with the CSM operators tasked with evaluating the overall quality of the microzonation study.

---

5 [www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/11-microzonazione-sismica-per-la-ricostruzione-dell-area-aquilana](http://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/11-microzonazione-sismica-per-la-ricostruzione-dell-area-aquilana)

6 [www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view\\_pub.wp?contentId=PUB28083](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB28083)

7 <https://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/20-seismic-microzonation-land-use-guidelines-for-areas-with-active-and-capable-faults-acf>

8 [www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/13-linee-guida-per-la-gestione-del-territorio-in-aree-interessate-da-instabilita-di-versante-cosismiche](http://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/13-linee-guida-per-la-gestione-del-territorio-in-aree-interessate-da-instabilita-di-versante-cosismiche)

9 <https://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/22-land-use-guidelines-for-areas-affected-by-liquefaction>

The background features a repeating pattern of concentric hexagons in a light grey color. This pattern is overlaid with several large, semi-transparent circles in shades of olive green and light grey. The circles overlap each other and the hexagonal pattern, creating a layered, geometric effect. The overall composition is abstract and modern.

STAMPA **Printaly.com srl**  
FINITO DI STAMPARE gennaio 2021

