

PROVINCIA FORLI'-CESENA

Settore Pianificazione Territoriale

REDAZIONE DELLA CARTA DI MICROZONAZIONE SISMICA DI II° LIVELLO

COMUNE DI DOVADOLA

RELAZIONE TECNICA

Data: Giugno 2013

Archivio 1255/2013

1255-MICROZONAZIONE SISMICA

Impresa esecutrice:



PROGEO S.r.L.
Via Talete 10/8
47100 Forlì
tel. 0543/723580
fax. 0543/721486
mail.progeo@gmail.com
www.progeo.info



Il Direttore Tecnico per l'impresa:

Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2008 n° 2619-A

Sommario

1	PREMESSA.....	4
2	RIFERIMENTI NORMATIVI E SPECIFICHE TECNICHE.....	4
3	INDAGINI PRELIMINARI.....	6
3.1	Individuazione delle aree di indagine.....	6
3.2	Raccolta di tutti i dati pregressi esistenti nell'area	7
3.3	Descrizione della carta geologico-tecnica	7
4	NUOVE INDAGINI	8
4.1	Metodologia HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)	8
4.1.1	Basi teoriche.....	9
4.1.2	Attrezzature e modalità esecutive.....	10
4.2	Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)	11
4.2.1	Descrizione del metodo	11
4.2.2	Modalità di acquisizione	13
4.2.3	Elaborazione dati e stima della curva di dispersione.....	14
4.2.4	Interpretazione geofisica dei dati	16
4.3	Indagine Down-Hole (DH)	16
4.3.1	Sorgente di energia.....	16
4.3.2	Apparato di ricezione	17
4.3.3	Operazioni di campagna.....	17
4.3.4	Acquisizione dati.....	17
4.3.5	Elaborazione dati.....	18
4.3.6	Preprocessing	19
5	RISULTANZE	24
5.1	Carta delle Indagini.....	24
5.2	Carta delle frequenze fondamentali di risonanza	25
5.3	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)	26
5.3.1	Descrizione delle microzone omogenee individuate (MOPS).....	28
5.4	Carta delle Vsh.....	29
5.5	Microzonazione sismica, livello 2	30
5.5.1	Calcolo dei fattori di amplificazione stratigrafica	31
5.5.2	Gli effetti topografici.....	32

ELENCO TAVOLE REALIZZATE

Carta delle indagini	scala 1:5.000
Carta geologico tecnica per la micro zonazione sismica	scala 1:5.000
Carta delle frequenze fondamentali	scala 1:5.000
Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (M.O.P.S.)	scala 1:5.000
Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	scala 1:5.000
Carta di microzonazione sismica (livello 2)	scala 1:5.000

ELENCO ALLEGATI FUORI TESTO

Indagini geofisiche
Dati di base
Dati in supporto informatico

PROVINCIA FORLÌ-CESENA
Settore Pianificazione Territoriale

REDAZIONE DELLA CARTA DI MICROZONAZIONE SISMICA DI II° LIVELLO

COMUNE DI DOVADOLA

C.I.G. Z760504809

C.I.G. ZC1050507C

1 PREMESSA

Le indagini geologico-tecniche di supporto alla Variante generale al Piano Strutturale, hanno previsto la realizzazione di uno studio di Microzonazione Sismica (MS) di livello 1 e livello 2 in ottemperanza a quanto previsto dal DGR n.1302 del 10 settembre 2012, secondo le specifiche contenute all'interno degli "indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" approvati il 13 novembre 2010 dalla commissione tecnica per la microzonazione sismica; OPCM .3907.

2 RIFERIMENTI NORMATIVI E SPECIFICHE TECNICHE

Lo studio e le indagini geofisiche sono state condotte secondo le specifiche tecniche contenute dai seguenti testi di riferimento normativo e tecnico:

- OPCM n. 3907 del 13.11.2010, che disciplina i contributi economici per gli interventi di prevenzione del rischio sismico, previsti dall' Art. 11 della Legge n. 77 del 24/06/2009
- DGRT N.1302 del 10.09.2012, recepimento a livello regionale dell' OPCM n. 3907/2010 che individua i territori nei quali è prioritaria la realizzazione degli studi di Microzonazione Sismica, le modalità di predisposizione delle specifiche tecniche per la realizzazione dei suddetti studi, le modalità di recepimento e utilizzo dei risultati degli studi di MS in fase di pianificazione e i criteri di selezione dei soggetti realizzatori degli studi di MS.

Le specifiche tecniche e gli standard di riferimento con cui è stato condotto lo studio di MS di

livello 1, indicate dalla struttura Servizio Sismico regionale, sono le seguenti:

- Indirizzi e Criteri di Microzonazione Sismica del Dipartimento della Protezione Civile Nazionale (ICMS) approvati il 13 novembre 2008 dalla Conferenza delle regioni e delle Province autonome;
- Progr n. 112 del 2 maggio 2007 – Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica
- Indicazioni contenute nel Volume di Ingegneria Sismica 2/2011.
- Standard per la stesura della carta delle indagini e l'informatizzazione: Standard di rappresentazione ed archiviazione informatica - Commissione Tecnica per il monitoraggio degli studi di Microzonazione Sismica, (articolo 5, comma7 OPCM 3907/2010);

Lo studio di MS di livello 1 rappresenta un livello propedeutico a successivi studi di MS (livello 2 e 3) ed è consistito in una raccolta organica e ragionata dei dati di natura geologica, geofisica e geotecnica preesistenti e/o acquisite al fine di suddividere il territorio comunale in microzone qualitativamente omogenee dal punto di vista del comportamento sismico. Tale approfondimento è finalizzato alla realizzazione della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) e quindi alla valutazione della pericolosità con la finalità di guidare le scelte nella pianificazione attuativa, nell'ottica di perseguire la ed assicurare la riduzione del rischio sismico, evidenziando le criticità e identificando le aree per le quali sono richiesti studi di approfondimento. Conseguentemente lo studio di livello 2, come seconda fase, ha l'obiettivo di valutare la risposta sismica locale e la microzonazione sismica del territorio indagato. Il secondo livello è stato quindi realizzato utilizzando l'analisi semplificata conforme al progr n. 112 del 2 maggio 2007. Ritenuta sufficiente, per gli ambiti suscettibili di urbanizzazione e per gli interventi sul territorio urbanizzato, nelle aree pianeggianti e sub-pianeggianti, incluse le zone di fondovalle appenniniche, con stratificazione orizzontale e sub-orizzontale. Tale analisi ha lo scopo di valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale per l'elaborazione della carta di microzonazione. Questa fornisce indicazioni essenziali per l'elaborazione e approvazione del PSC (o del PTCP7) e delle sue varianti indicando:

- quali ambiti di riqualificazione e nuovo insediamento possano essere attuati senza la necessità di eseguire nuove indagini;
- quali ambiti di riqualificazione e nuovo insediamento siano subordinati allo svolgimento di ulteriori indagini e quindi di un livello 3 di MS.

3 INDAGINI PRELIMINARI

Di seguito vengono riassunte le fasi che hanno interessato le indagini preliminari svolte.

3.1 Individuazione delle aree di indagine

Come prima fase è stata concordata con l'Amministrazione la perimetrazione dei centri urbani maggiormente significativi su cui condurre lo studio di MS di livello 1 e livello 2, individuati all'interno delle aree definite "urbanizzabili" ed "urbanizzate" nel PSC comunale

Si tratta di aree localizzate principalmente sia attorno l'agglomerato comunale sia diffuse in maniera discreta lungo l'asta fluviale del fiume Montone. I siti indicati sono quindi concentrati per la maggior parte all'interno delle zone pedemontane del comune, caratterizzate dalla presenza della maggior parte dalle infrastrutture esistenti e dove si concentra pressoché la totalità delle residenze e delle attività artigianali, industriali e commerciali.

Nella figura sottostante (fig. 1) vengono visualizzate le aree dove è stato effettuato lo studio di microzonazione (in rosa)

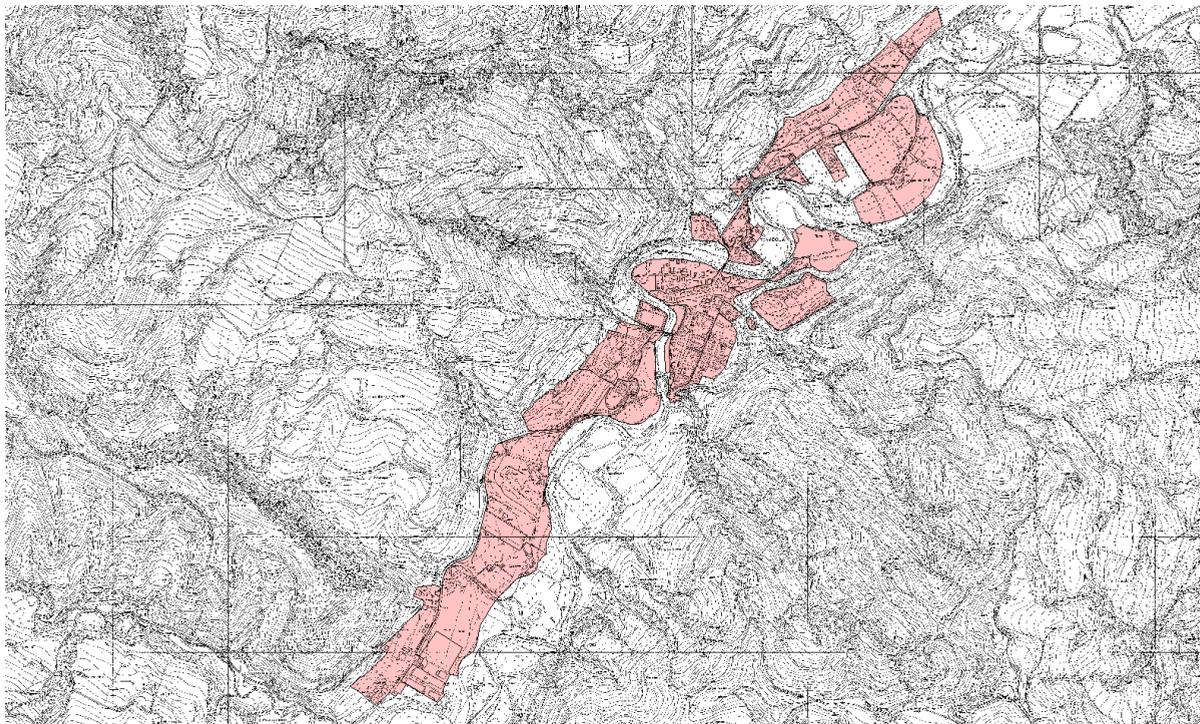


Fig. 1 Area di studio Dovadola

La parte collinare del comune è stata esclusa dallo studio di MS in quanto non sono presenti frazioni abitate e neppure insediamenti sparsi e previsioni insediative o infrastrutturali.

3.2 Raccolta di tutti i dati pregressi esistenti nell'area

Come prima fase è stato effettuata una approfondita ricerca dei dati geologici, geotecnici e geofisici che ha comportato un aggiornamento del quadro dei dati di base (Allegato), tramite le seguenti attività:

- ricerca presso l'Ufficio tecnico del comune di tutti i dati puntuali relativi ad indagini in situ allegare alle pratiche edilizie sia di interventi diretti che di piani attuativi;
- ricerca all'interno dei data base della regione Emilia Romagna, attraverso il predisposto geoportale sia per quanto riguarda le prove in situ che del materiale cartografico in formato vettoriale e raster utile per la realizzazione dei nuovi elaborati cartografici;
- ricerca nel database aziendale di prove utili geofisiche utili e pertinenti alla presente studio di micro zonazione sismica.

Sulla base dei sopracitati dati raccolti è stata realizzata una preliminare carta delle indagini sulla base della quale impostare il piano di esecuzione delle nuove indagini geofisiche.

3.3 Descrizione della carta geologico-tecnica

Nella carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica vengono rappresentate le informazioni riguardanti i litotipi affioranti, distinti in primis tra terreni di copertura e substrato geologico (nel caso del presente lavoro, substrato considerato sempre rigido); lo spessore minimo delle coperture rappresentate è di 3 metri; la litologia dei terreni è stata descritta tramite sistema di classificazione Unified Soil Classification System (leggermente modificato, ASTM, 1985) come descritto dagli "Indirizzi e criteri per la micro zonazione sismica". Inoltre è stata aggiunta una sigla che descrive l'ambiente deposizionale del litotipo. Sono riportate inoltre le forme di superficie ritenute significative quali conoidi alluvionali, orli di scarpate morfologiche con altezza compresa tra 10 e 20 metri e creste, oltre ad elementi tettonico-strutturali quali, nel caso in esame, faglie dirette e faglie dirette inferite non attive. Vengono altresì rappresentati i seguenti elementi geologici ed idrogeologici:

- giaciture degli strati;
- l'ubicazione di sondaggi che hanno raggiunto il substrato (con indicazione della profondità ove il substrato è stato rinvenuto) e l'ubicazione di sondaggi che non hanno raggiunto il substrato (con indicazione della massima profondità raggiunta dalla perforazione);
- Zone di instabilità di versante
- Faglie e lineamenti tettonici inattivi

In carta sono riportate le tracce di sezioni topografiche realizzate e mostrate nell'omonima tavola; le stesse tracce sono state utilizzate successivamente come tracce di approfondimento per lo studio delle amplificazioni di origine topografica. È inoltre inserita la traccia della sezione litostratigrafica realizzata e predisposta per tagliare trasversalmente il comune.

4 NUOVE INDAGINI

Sulla base della preliminare carta delle indagini, della carta geologico tecnica precedentemente realizzate è stata imbastita, su incarico dell'amministrazione comunale di Dovadola, una campagna di nuove indagini geofisiche in sito, posizionate e realizzate secondo i criteri definiti al par. 3.4.2 degli ICMS.

In particolare le indagini in sito sono consistite in:

- 27 Prove di sismica passiva HVSR con lo scopo di definire le frequenze caratteristiche fondamentali di risonanza dei siti;
- 5 Indagini MASW per la modellazione dei profili Vs30;
- 1 Sondaggio a Carotaggio conino con annessa relativa prova down-hole utile a determinare la velocità delle onde di compressione (P) e della velocità delle onde di taglio (S) all'interno dei terreni di copertura

Le planimetrie con la corretta ubicazione, le foto e i grafici dei risultati, redatti sulla base degli standard previsti, sono riportati in accordo con le direttive degli ICMS

Di seguito sono riportate le metodologie operative di realizzazione delle indagini effettuate.

4.1 Metodologia HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)

La metodologia, chiamata anche tecnica di Nakamura (1989), è stata introdotta da Nogoshi e Igarashi (1971) sulla base degli studi di Kanai e Tanaka (1961). Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (seismic noise) e permette di valutare gli effetti locali di sito. La tecnica proposta da Nakamura assume che i microtremori (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali, le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo

strato soffre su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito. Per l'applicazione e l'interpretazione di questa tecnica è fondamentale una buona conoscenza dell'ingegneria sismologica combinata con un background di informazioni relative alle caratteristiche geologiche, geofisiche e geotecniche del sito. Questa tecnica presenta il vantaggio di poter essere adoperata pressoché ovunque, purché siano garantite l'assenza di forti vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze del punto di misura. Il metodo è generalmente applicato per studi di microzonazione e per valutare la risposta sismica locale.

4.1.1 Basi teoriche

Le basi teoriche dell'HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) in un sistema stratificato in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D) è abbastanza semplice. Si consideri un sistema in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità (ρ_1 e ρ_2) e le diverse velocità delle onde sismiche (V_1 e V_2). Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene parzialmente riflessa dall'orizzonte che separa i due strati, e questa una volta riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente (λ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore h del primo strato. In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza (f_r) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{p1}/(4h)$$

mentre quella relativa alle onde S è:

$$f_r = V_{s1}/(4h)$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSR mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati. Questo, insieme ad una stima della velocità, è in grado di fornire previsioni sullo spessore h degli strati. Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto, ma la prassi di usare il rapporto degli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto. La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo. Si rileva inoltre come i microtrempi siano solo in parte costituiti da onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994).

Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità dell'onda di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S.

L'applicabilità pratica della semplice formula sopra riportata relativa alle onde S è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica sia nell'ambito ingegneristico. Poiché la situazione illustrata è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSR è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (Ibs-Von Seht e Wohleberg, 1999).

4.1.2. Attrezzature e modalità esecutive

La misura prevede la registrazione, senza utilizzo di alcun strumento di energizzazione del terreno, del microtremore sismico ambientale nel dominio del tempo, sulle tre componenti dello spazio attraverso il posizionamento di adeguati strumenti sismometrici costituiti da sensori tridimensionali.

Per queste misure è sconsigliato l'impiego di accelerometri, non sufficientemente sensibili a frequenze inferiori a 1 Hz, né di accelerometri sismologici.

Essendo la stabilità una caratteristica fondamentale non sono impiegabili sismometri broadband con periodo naturale > 20 sec. in quanto richiedono lunghi tempi di stabilizzazione, come non sono raccomandabili sensori con frequenza naturale inferiore alla più bassa frequenza di interesse.

Indicativamente, la frequenza di sito è funzione diretta della vicinanza del bedrock dalla superficie topografica e della rigidità dei materiali.

Per l'installazione lo strumento di misura dovrà essere orientato secondo le direzioni geografiche (E e W) e dovrà essere dotato di bolla sferica per il posizionamento mentre l'accoppiamento con la superficie dovrà essere diretto o assicurato con piedini o puntazze in terreni morbidi.

Bisognerà altresì fare attenzione alla presenza di radici, sottoservizi, vicinanza edifici, vento ecc., in quanto creano disturbo nel segnale H/V inducendo una forte perturbazione a bassa frequenza.

Per uno studio di risposta di sito è consigliabile effettuare almeno tre misure per punto, possibilmente in tempi diversi durante la giornata, da cui derivare il valore di frequenza di risonanza.

La strumentazione di acquisizione presenta le seguenti specifiche:

1. trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza ($< 1-2$ Hz);
2. amplificatori;
3. digitalizzatore;
4. frequenza di campionamento: > 50 Hz;
5. convertitore A/D (analogico digitale) a 24 bit;
6. durata registrazione: > 10 minuti;
7. collegamento al tempo GPS per la referenziazione temporale

Utilizzando questo metodo, sulla base di mappature areali in frequenza di sito è stato possibile valutare la variabilità degli spessori nelle varie aree indagate, in funzione della tipologia di deposito e con l'ausilio di una calibrazione effettuata attraverso le stratigrafie provenienti dalle prove preesistenti e stato possibile inoltre ricavarne profili di propagazione delle onde di taglio per il calcolo del V_s 30.

4.2 Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)

L'analisi della propagazione delle onde superficiali entro il sottosuolo con la metodologia M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves) per la determinazione della velocità delle onde di taglio (V_s) è stata effettuata mediante l'utilizzo di uno stendimento sismico di superficie composti da 24 geofoni da 4.5 Hz interdistanti 2.5 m per una lunghezza complessiva di 57.5 m; l'elaborazione, mediante software d'inversione, della prova sismica ha fornito un log di V_s posizionato al centro della sezione il quale permette di individuare eventuali variazioni verticali dei valori cinematici corrispondenti a variazioni delle caratteristiche meccaniche dei terreni indagati.

4.2.1 Descrizione del metodo

Considerando un semispazio elastico, omogeneo ed isotropo, si dimostra che la velocità di propagazione delle onde di Rayleigh è indipendente dalla frequenza e che il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente con la profondità, sino ad estinguersi ad una profondità circa pari ad una lunghezza d'onda [RICHART et al., 1970]. Ciò vuol dire che la profondità raggiunta dipende dalla lunghezza d'onda, e che, a diverse lunghezze d'onda corrisponde la stessa velocità di fase (V_R). In un mezzo verticalmente eterogeneo, costituito cioè da strati aventi proprietà meccaniche diverse, il comportamento delle onde superficiali è differente. In particolare, la propagazione presenta un comportamento dispersivo (a frequenze diverse corrispondono diverse velocità di fase). Ciò vuol dire che lunghezze d'onda diverse interessano strati diversi ai quali sono associati proprietà meccaniche differenziate: ogni lunghezza d'onda si propaga ad una velocità di fase che dipende dalle caratteristiche dello strato interessato dalla propagazione. Quindi, nel caso di mezzo eterogeneo, le onde superficiali non hanno una singola velocità, ma una velocità di fase che è funzione della frequenza: tale fenomeno, dipendente dalla distribuzione spaziale delle proprietà sismiche del sottosuolo è noto come dispersione geometrica e la relazione che lega la frequenza alla velocità di fase prende il nome di curva di dispersione.

Alle alte frequenze, la velocità di fase coincide con la velocità delle onde di Rayleigh dello strato più superficiale, mentre, alle basse frequenze, l'effetto degli strati più profondi diventa importante, e la

velocità di fase tende asintoticamente alla velocità dello strato più profondo come se questo fosse esteso infinitamente in profondità. La curva di dispersione gioca un ruolo centrale nell'utilizzo delle onde di Rayleigh ai fini della caratterizzazione dei terreni; infatti, è funzione delle caratteristiche di rigidità del mezzo e, posto di riuscire a misurarla sperimentalmente, può essere utilizzata (come si vedrà più avanti) per un processo inverso avente come obiettivo la stima delle caratteristiche di rigidità stesse.

La propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo verticalmente eterogeneo, è un fenomeno multimodale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, possono esistere diverse lunghezze d'onda. Di conseguenza, ad una determinata frequenza possono corrispondere diverse velocità di fase, ad ognuna delle quali corrisponde un modo di propagazione, e differenti modi di vibrazione possono esibirsi simultaneamente.

Il processo di caratterizzazione basato sul metodo delle onde superficiali, schematizzato nella figura qui di seguito presentata, può essere suddiviso in tre fasi:

- 1) Acquisizione;
- 2) Processing;
- 3) Inversione.

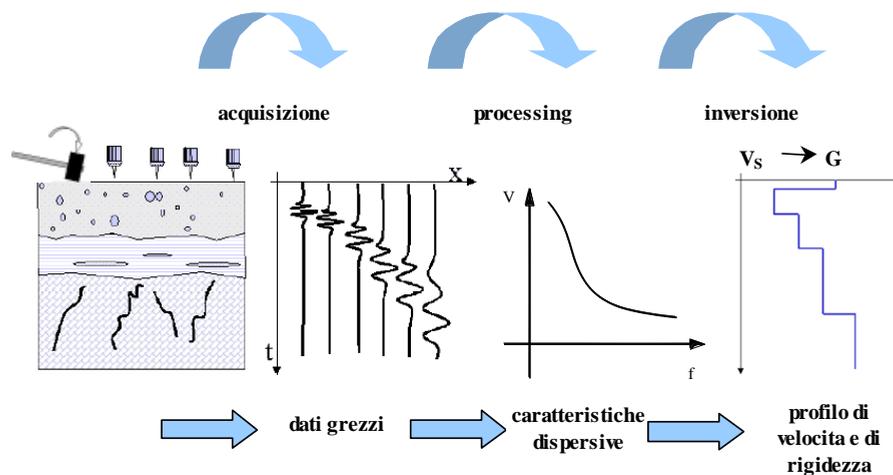


Fig. 2 Fasi del metodo delle onde superficiali (SWM)

I dati acquisiti, vengono sottoposti ad una fase di processing che consente di stimare la curva di dispersione caratteristica del sito in oggetto ovvero, la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza.

Esistono diverse tecniche di processing per estrarre dai sismogrammi le caratteristiche dispersive del sito. La metodologia più diffusa è l'analisi spettrale in dominio fk (frequenza-numero d'onda). La curva di dispersione ottenuta, viene successivamente utilizzata per un processo di inversione che fornisce come risultato finale il profilo verticale della velocità delle onde di taglio nel terreno e quindi

una stima della rigidità in funzione della profondità. Quindi, le informazioni riguardanti la curva di dispersione sperimentale (associata a un mezzo le cui caratteristiche sono incognite) vengono sfruttate per affrontare il problema inverso della caratterizzazione: se le caratteristiche dispersive del sito possono essere valutate sperimentalmente, allora è possibile valutare le corrispondenti proprietà del terreno [STROBBIA, 2002].

La risoluzione del problema inverso, deve essere preceduta da una parametrizzazione del sottosuolo, che viene di norma schematizzato come un mezzo visco-elastico a strati piano-paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati.

Come già sottolineato in precedenza, l'utilizzo di un modello monodimensionale è un'ipotesi che deve essere in linea di massima soddisfatta dal deposito di terreno per garantire la validità del risultato finale. Il processo di inversione è iterativo: a partire da un profilo di primo tentativo, costruito sulla base di metodi semplificati, ed eventualmente dalle informazioni note a priori riguardo la stratigrafia, il problema diretto viene risolto diverse volte variando i parametri che definiscono il modello. Il processo termina quando viene individuato quel set di parametri di modello che minimizza la differenza fra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione simulata). Usualmente, algoritmi di minimizzazione ai minimi quadrati vengono utilizzati per automatizzare la procedura.

4.2.2 Modalità di acquisizione

Le sezioni realizzate sono costituite ciascuna da uno stendimento sismico di superficie composto da 24 geofoni da 4.5 Hz (linee 1 e 2) e da 21 geofoni (linea 3) interdistanti 2.5 m.

Il sismografo utilizzato è un dispositivo modulare da 24 canali GEODE (Geometrics); l'intervallo di campionamento è stato selezionato a 0.5 millisecc e il tempo di registrazione è stato fissato in 8 secondi. Il sistema di energizzazione utilizzato è stato un grosso martello strumentato lasciato cadere con forza al suolo. Sono state effettuate due serie di energizzazioni esterne allo stendimento sia dal lato del ricevitore 1 sia dal lato del ricevitore 21 (Per la linea 3) e 24 (per le linee 1 e 2). L'esecuzione di più registrazioni separate invece della tradizionale procedura di stacking dei dati in acquisizione consente, senza un sensibile incremento dei tempi di acquisizione, di effettuare una serie di controlli statistici sulla qualità dei dati. In particolare è possibile stimare l'incertezza sui punti della curva di dispersione e verificare che l'ipotesi di monodimensionalità sia rispettata dal sito.

4.2.3 Elaborazione dati e stima della curva di dispersione

La fase di processing è quella che segue l'acquisizione dei dati grezzi e permette di stimare, a partire dai sismogrammi acquisiti, le caratteristiche dispersive del sito, ovvero la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza del segnale sismico (curva di dispersione sperimentale).

Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati grezzi è composto da una serie di codici scritti in Matlab™.

I dati vengono trasformati in dominio fk (frequenza-numero d'onda) tramite una doppia trasformata di Fourier e la curva di dispersione è ricavata con un algoritmo di ricerca dei massimi spettrali (ai quali è associata per l'appunto la propagazione delle onde di Rayleigh).

Qui di seguito si presenta un esempio dei vari step del processing dei dati acquisiti lungo i vari stendimenti; da destra verso sinistra sono riportati il sismogramma sintetico acquisito e lo spettro fk e la curva di dispersione.

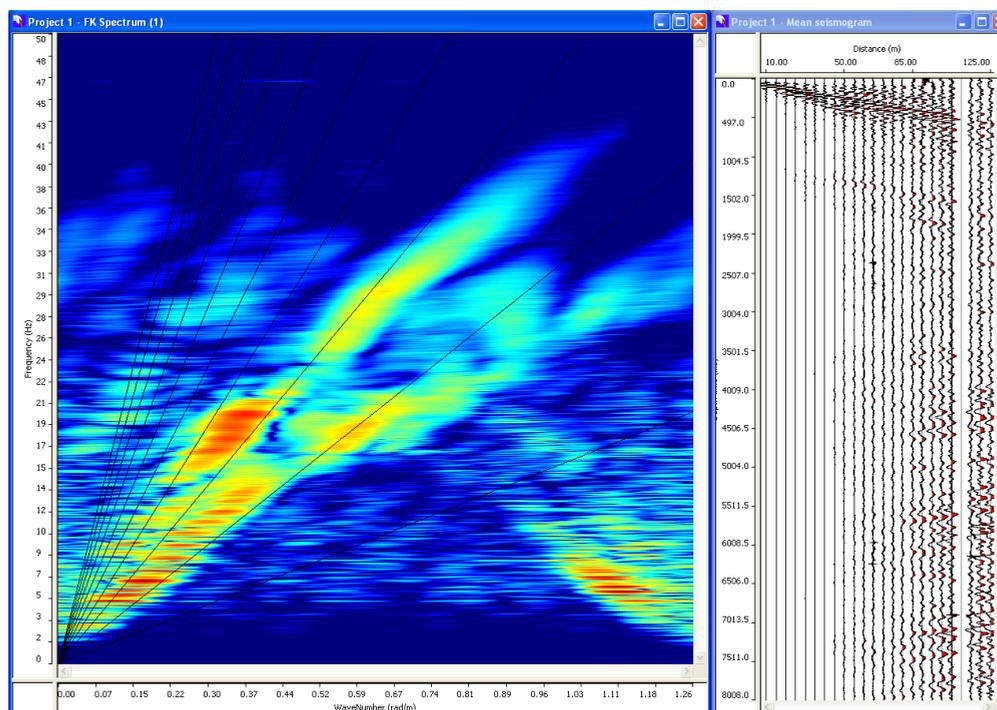


Fig. 3 Esempio dei vari step del processing: sismogramma, spettro fk.

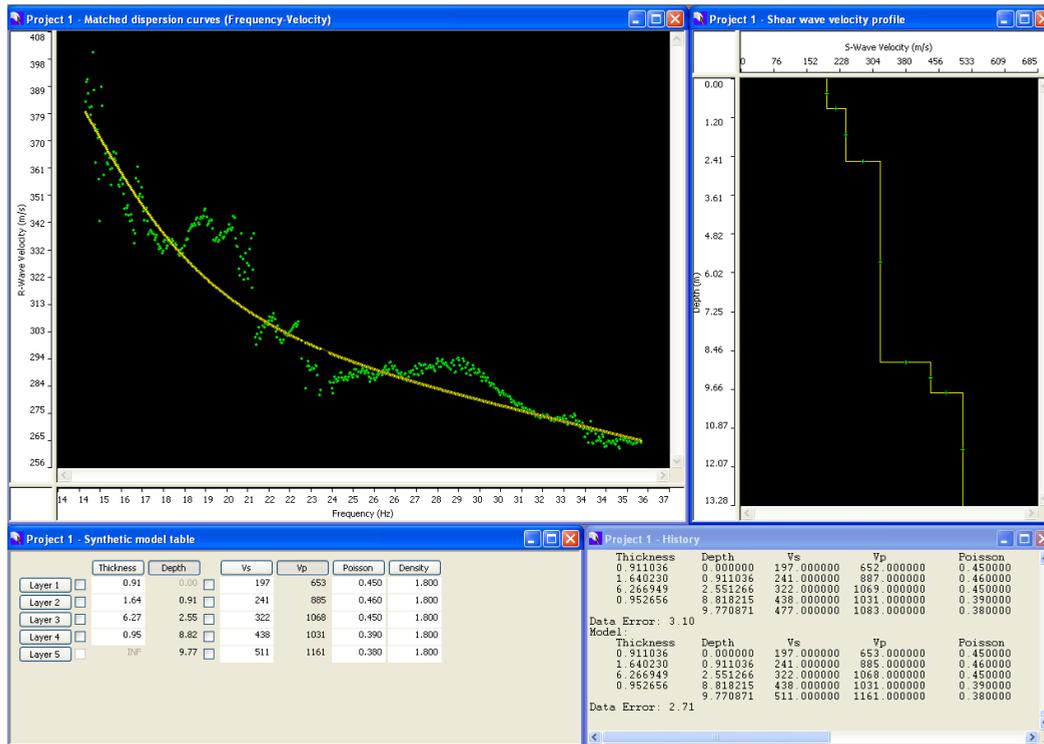


Fig. 4 Esempio dei vari step del processing: curva di dispersione e modello (Software "SWAN")

Un confronto tra varie curve di dispersione può denotare differenze tra le stesse che possono essere imputate a varie cause quali eventuali variazioni di quota dei geofoni o, in secondo luogo, a variazioni laterali, lungo lo stendimento, delle caratteristiche meccaniche del sottosuolo. Analizzando poi le curve di dispersione si possono altresì notare la presenza di diversi modi di vibrazione; l'energia cioè tende a propagarsi maggiormente sul modo fondamentale verso basse frequenze oppure secondo modi più elevati di vibrazione. Lo spettro f_k può poi mettere in evidenza un intervallo di frequenze significativamente ampio; a seconda dei casi, è possibile una concentrazione di energia verso varie frequenze o, dall'altro lato, una propagazione di energia che presenta un livello simile.

Dall'analisi della curva di dispersione ottenuta, si può poi risalire alla determinazione delle caratteristiche dei terreni investigati; dall'esempio proposto nell'immagine suddetta si nota come la curva apparente, relativa ai massimi assoluti ed evidenziata in figura con gli asterischi neri, sembra seguire in modo regolare l'andamento del primo modo fino a frequenze di circa 40 Hz. Tali tratti di curva indicano coerentemente una crescita della velocità delle onde di Rayleigh al diminuire della frequenza (e dunque all'aumentare della profondità). In particolare, nell'esempio proposto, la frequenza di taglio dei modi superiori sembra indicare che, dopo uno strato di materiale relativamente lento fino a circa 15 m, vi sia una serie di strati a caratteristiche meccaniche maggiori che presentano velocità fino a 400 – 450 m/s (velocità Onde di Rayleigh).

Analizzando quindi le curve di dispersione, e soprattutto mediante la possibilità di distinguere facilmente i singoli modi all'interno della curva di dispersione stessa, permette di ottenere un modello di primo tentativo più affidabile e quindi avere un problema di inversione meglio condizionato.

4.2.4 Interpretazione geofisica dei dati

Come accennato in precedenza, l'inversione è l'ultima delle tre fasi che caratterizzano il metodo delle onde superficiali e consente di ottenere, a partire da un profilo di primo tentativo e da una curva di dispersione sperimentale ricavata in sito, un modello stratigrafico finale. L'inversione è stata effettuata mediante l'algoritmo Damped Least Squares, con inversione automatica del primo modo e discretizzazione fitta di profondità. Il modello viene successivamente semplificato diminuendo la parametrizzazione e quindi riducendo il numero di strati. Le profondità vengono corrette infine secondo la modalità trial and error. I risultati ottenuti dal processo di inversione riportano poi per ogni stendimento acquisito, il profilo di velocità delle onde S in funzione della profondità.

L'elaborazione della prova ha fornito un log sismico posizionato al centro della sezione dal quale sono stati poi ricavati gli indici Vs30 e Vsh (velocità media pesata delle onde S sino al bedrock rigido).

4.3 Indagine Down-Hole (DH)

La tecnica down-hole prevede la misura dei tempi di propagazione delle onde di compressione (P) e di taglio (S) tra il punto di energizzazione in superficie (shot) ed il punto di ricezione mobile in profondità entro il foro di sondaggio.

4.3.1 Sorgente di energia

Per effettuare tali operazioni è necessario utilizzare una sorgente di energia, del tipo superficiale, non polarizzata.

Nel caso in esame si è scelta una sorgente di energia che potesse garantire una buona risposta sismica in alta frequenza oltre a caratteristiche dinamiche ripetitive similari; il generatore usato e denominato "Hammer Blow" è rappresentato da un maglio di 10 Kg usato da un operatore lasciato cadere con forza da circa 2 m.

4.3.2 Apparato di ricezione

Deve essere provvisto di un apposito meccanismo di ancoraggio alle pareti del foro durante la registrazione dell'impulso e di disancoraggio per essere mobilizzato lungo la verticale del sondaggio stesso.

La sonda calettata in foro utilizza un sensore noto con il nome di "Geofono 3D".

Tale strumento è formato da tre geofoni da 14 Hz. smorzati del 70%, dei quali uno con l'asse funzionale verticale (V) e due orizzontali (H1 e H2) fra loro ortogonali.

Oltre alla sonda calettata entro il foro si utilizza in superficie un geofono (geofono del time break), applicato all'apparato energizzatore, il quale costituisce il dispositivo di trigger per l'inizio della registrazione ed un geofono di riferimento (geofono del t0) ad alta frequenza (100 Hz), posizionato nelle vicinanze della bocca del foro od in un altro punto che rimane fisso per tutte le misure effettuate nel sondaggio e che costituisce il dispositivo di controllo affinché tutti gli impulsi sismici siano in fase per correzioni nella fase di preprocessing.

4.3.3 Operazioni di campagna

Eseguito il collegamento del cavo elettrico per i 3 canali della sonda 3D allo switch di selezione canali posizionato tra il sismografo e la sonda stessa e collegati altresì al medesimo switch i cavi elettrici sia per il geofono di riferimento in superficie sia per il geofono del time break sull'apparato energizzatore si è effettuato il posizionamento della sonda 3D alla bocca del foro e si sono realizzati alcuni shot di prova allo scopo di tarare i parametri di acquisizione dello strumento di registrazione dati. Effettuata la taratura della strumentazione si è proceduto alla prospezione down-hole. A partire dalla bocca del sondaggio si è calettata la sonda 3D entro il foro, si è effettuato quindi lo shot e immediatamente dopo si è acquisito e registrato il segnale su hard disk presente sul sismografo. Tale procedura è continuata finché non si è coperta tutta la profondità investigabile del foro.

4.3.4 Acquisizione dati

Gli impulsi sismici ricevuti dalla sonda in foro sono stati acquisiti utilizzando l'apparecchiatura EG&G Geometrics Geode tramite la quale, dopo amplificazione, conversione analogico/digitale e filtraggio, sono trasferiti e registrati su supporto magnetico.

I files dei dati sono così realizzati:

canale 1 - segnale del geofono di riferimento

- canale 2 - segnale del geofono verticale (V)
- canale 3 - segnale del geofono orizzontale (H1)
- canale 4 - segnale del geofono orizzontale (H2)

In tal modo, per ogni step di misura di 1 metro in profondità, si possono analizzare i first break imputabili all'arrivo dell'onda di compressione (P) sia sul geofono del canale 1 di riferimento sia sul geofono (V) del canale 2 mentre sui geofoni (H1) e (H2) dei canali 3 e 4 si analizza l'impulso in opposizione di fase relativo all'onda di taglio (S).

Per evidenziare un ottimo arrivo delle onde di taglio è necessario avere una relativamente bassa amplificazione per i due geofoni H; questi avranno una bassa sensibilità alla componente verticale dell'onda di compressione ed invece un'ottima sensibilità per la componente orizzontale dell'onda di taglio.

4.3.5 Elaborazione dati

Il procedimento elaborativo si sviluppa fondamentalmente in due fasi.

Elaborazione sismogrammi

- display sismogrammi
- fast fourier transform (F.F.T.)
- convoluzione
- lettura first break

L'ultimo punto è quello che produce le dromocrone per l'analisi dei down-hole.

Elaborazione delle sezioni down-hole

- analisi delle velocità – generalizzazione tempo- profondità
- routine di ottimizzazione
- routine per trasferimento dati in un sistema C.A.D.

Esprimendo in parole i punti sopraindicati si può affermare che una volta ottenute le velocità delle onde di compressione (V_p) e di taglio (V_s) entro i fori vengono calcolate tramite programmi all'elaboratore le distribuzioni areali di V_p e V_s (variazioni di consistenza del materiale) ottimizzando

l'elaborazione mediante assemblaggio delle risultanze di una molteplicità di registrazioni sismiche e tramite trasformazioni dei dati da valori numerici ad informazioni grafiche per plot delle risultanze.

Come si è visto il procedimento elaborativo si sviluppa fundamentalmente in due fasi: la prima è relativa allo studio delle tracce sismiche, la seconda riguarda lo studio delle velocità V_p e V_s lungo la verticale del foro.

Vengono riportati qui di seguito i principali step dell'elaborazione dove viene fatta una differenziazione del materiale in celle unitarie (una cella per ogni sensore).

4.3.6 Preprocessing

In questa fase si utilizzano sia programmi originali all'elaboratore sia routine sviluppate dalla I.C.I. (Interactive Concepts Incorporated) distribuite dal Kansas Geological Survey.

a) Traduzione tracce sismiche

Questa fase di preprocessing permette di convertire il formato con cui i dati sismici sono registrati dal sismografo EG&G GEOMETRICS GEODE in quello dei programmi elaborativi.

b) Gathering dei canali 1, 2, 3 e 4

Fase di preprocessing nella quale vengono riunite le tracce omologhe dei sismogrammi acquisiti in un'unico file di dati: si realizzano pertanto n° 4 file, ognuno dei quali rappresenta la raccolta di tutte le tracce corrispondenti.

Gather 1 traccia 1 (onda di compressione P ricevuta dal geofono verticale in superficie=riferimento "T0" per correzioni time break)

Gather 2 traccia 2 (onda di compressione P ricevuta dal geofono verticale V nella sonda 3D alle varie profondità nel foro)

Gather 3 traccia 3 (onda di taglio S ricevuta dal geofono orizzontale H1 nella sonda 3D alle varie profondità nel foro)

Gather 4 traccia 4 (onda di taglio S ricevuta dal geofono orizzontale H2, ortogonale all'H1 nella sonda 3D, alle varie profondità nel foro)

c) Analisi dei singoli gather

Viene effettuata l'analisi del gather 1 onde ricavare, traccia per traccia, la correzione da apportare, in millisecondi alle corrispondenti tracce 2, 3 e 4 (della stessa profondità) relative ai diversi shot effettuati in ciascun foro per investigare l'intera profondità.

L'analisi, che si sviluppa con criteri statistici, definisce un termine di riferimento 0 e gli spostamenti positivi o negativi di ciascuna traccia.

d) Analisi spettrale (F.F.T.)

Vengono realizzate le analisi spettrali in frequenza (Fast Fourier Transform) di alcune tracce campione relative ai gather 2, 3 e 4 a finestre sia nei settori con rumore di fondo sia in quelli con segnale utile (onda P e onda S).

Note queste frequenze fondamentali si procede alla costruzione di appositi filtri digitali per ridurre il rumore di fondo ed esaltare i segnali utili.

e) Stacking canali 3 e 4

Somma dei canali 3 e 4 (orizzontali) con rotazione dell'asse di vibrazione lungo la direzione della massima fase coerente.

Il procedimento viene realizzato mediante elaborazioni statistiche con ricerca automatica delle massime fasi coerenti delle onde di taglio (S).

Si ottiene pertanto un nuovo file di dati (canale 5) delle onde di taglio.

f) First break peak canali 2 e 5

Lettura dei primi arrivi dell'onda di compressione P e di taglio S. Nei nuovi files di dati creati al punto b) e al punto e) dall'assemblaggio delle varie tracce sismiche vengono considerati i files dei canali 2 (assemblaggio onde P) e dei canali 5 (assemblaggio onde S).

g) Muting

Operazione che riduce il segnale sismico dal tempo 0 al time break letto sulle singole tracce al passo (f) e che accentua visivamente i primi arrivi. Viene così ridotto il disturbo aleatorio costituito da rumore di fondo non eliminabile dall'operatore in fase di filtraggio (punto c) in quanto caratterizzato dalle stesse frequenze del segnale utile.

h) Plot

Stampa finale delle tracce sismiche relative alle onde di compressione e di taglio.

2.7. Processing tomografico

Questo consiste nell'interpretazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione P e di taglio S. Per l'analisi di questi dati sono stati utilizzati programmi al calcolatore di utilità, originali della Progeo. Il procedimento di calcolo si sviluppa secondo i seguenti step.

i) Definizione della geometria della ricerca

- coordinate del sensore in pozzo (3D),
- posizionamento punto di shot.

l) Input tempi di arrivo onde P e onde S

Realizzazione dei file dei dati relativi ai tempi di arrivo delle onde P ed S associate alle coordinate spaziali delle stazioni di misura.

m) Input modello di velocità

In base alle conoscenze stratigrafiche e sismiche vengono definiti degli intervalli a velocità costante lungo l'asse del foro in funzione dei quali viene realizzato il ray tracing (step n).

n) Ray tracing

Vengono create le traiettorie dei raggi sismici in base ai modelli di velocità definiti allo step m).

Per il calcolo si sono utilizzati i seguenti parametri:

- anisotropia ellittica (massima velocità in senso verticale)
- tolleranza lineare (.05%)
- tolleranza angolare (1")
- numero di iterazioni (500)
- multi pathing (on)
- plane layer (on)

o) Definizione dei parametri di calcolo

Il programma utilizzato necessita, per il calcolo della sezione in profondità lungo la verticale del foro e in funzione dei valori di velocità, dei seguenti parametri di calcolo:

- definizione tipo di griglia (1 cella ogni metro)
- tipo di anisotropia del mezzo investigato (verticale)
- numero di iterazioni (500)
- algoritmo di calcolo (S.I.R.T.)

L'algoritmo S.I.R.T. (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) crea un'immagine di velocità apprezzabile, sufficientemente stabile e che converge velocemente verso i valori sperimentali. Qui sotto è presentata un'immagine del software di elaborazione.

p) Analisi delle risultanze

Queste vengono inizialmente valutate dal punto di vista statistico attraverso gli scarti quadratici e le varianze dei tempi calcolati rispetto a quelli definiti in input.

In base a tali valori possono essere modificati i parametri di calcolo per una migliore ottimizzazione.

Si passa in seguito all'analisi delle velocità intergeofoniche relative alle onde P ed S dalla quale si ricava un modello di velocità più adeguato (a tale modello si farà riferimento in seguito come velocità intervallari).

Il calcolo riprende perciò dallo step m) con l'input del nuovo modello di velocità e si procede fino a quando gli scarti e le varianze divengono minimi.

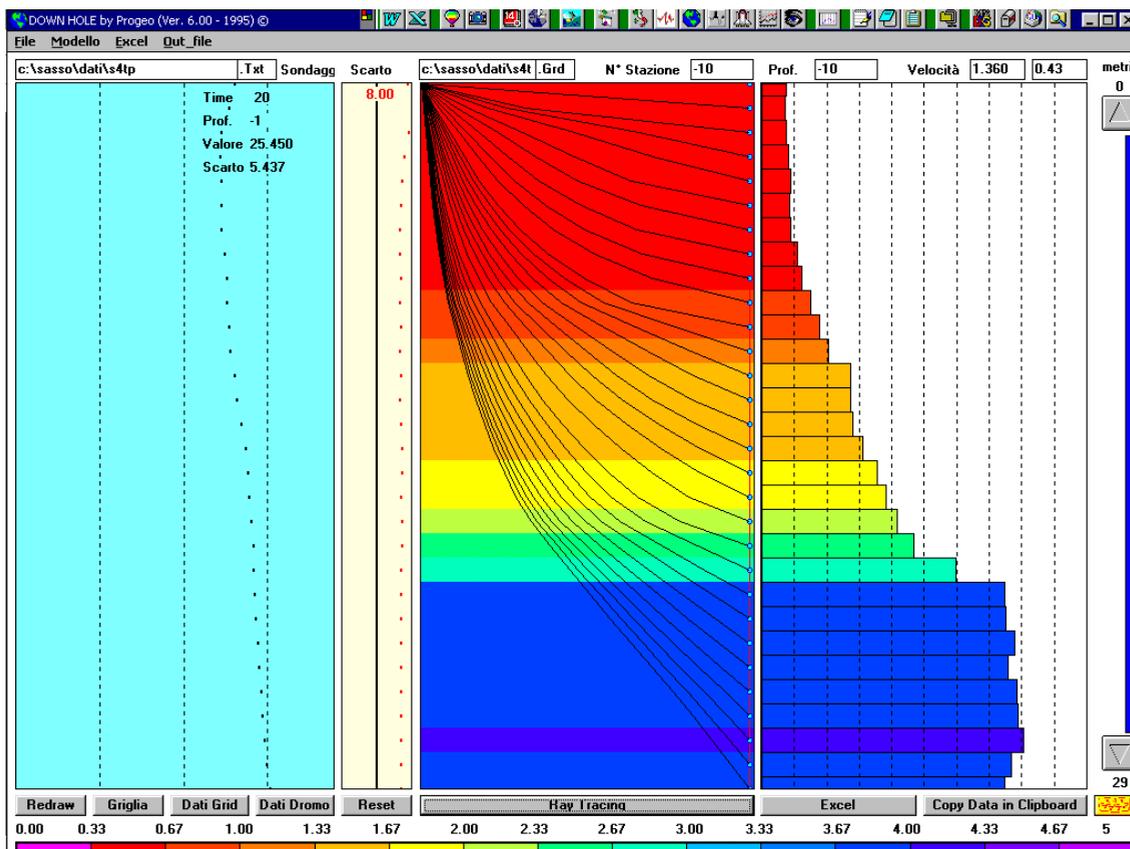


Fig. 5 Software di elaborazione Down Hole

q) Conversione in immagini computerizzate

La prospezione down hole con elaborazione tomografica si concretizza nella definizione di celle analitiche elementari; per ogni cella il valore della velocità tomografica rappresenta il valore medio risultante dei valori differenziali relativi a tutti i tragitti elementari dei raggi di investigazione che attraversano la cella considerata. Le caratteristiche geometriche dei fasci intersecati dalle linee di rilevazione e l'apporto statistico di acquisizioni consentono di realizzare, con facilità di estrema analisi e sintesi coerente, il processo di elaborazione che conduce alla definizione delle microzonature. Viene così realizzata la conversione dei dati nelle immagini tipiche della grafica computerizzata: per scansione in celle elementari di intensità graduata e minime dimensioni. La determinazione delle celle elementari che definiscono la rappresentazione tomografica deriva dalle variazioni dei parametri cinematici V_p e V_s in funzione del grado di consistenza differenziata del materiale.

L'elaborazione della prova ha fornito i log grafici dei parametri elastici e dinamici relativi ai valori di velocità delle onde di compressione (P) e di taglio (S) nonché ai valori dei moduli elastici dinamici (elasticità o di Young, taglio, compressibilità) e del coefficiente di Poisson. Elaborando ulteriormente i logg delle onde di taglio so sono inoltre ricavati i valori degli indici V_{s30} e V_{sh} (velocità media pesata delle onde S sino al bedrock rigido).

5. RISULTANZE

Gli elaborati conclusivi realizzati e le loro metodologie di elaborazione sono descritti di seguito e corrispondono rispettivamente a:

- 1 Carta delle Indagini
- 2 Carta delle frequenze fondamentali di risonanza
- 3 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)
- 4 Carta delle Vsh
- 5 Carta di microzonazione sismica, livello 2

5.1 Carta delle Indagini.

La "Carta delle Indagini" riporta l'ubicazione e l'indicazione della somma dei dati esistenti sul territorio comunale di Dovadola derivante dalla somma dei

- dati di base raccolti

- dati derivanti dalla campagna di indagine geofisica condotta per lo studio di MS

L'insieme dei dati raccolti, ha permesso di disporre di un totale di oltre 383 dati puntuali così suddivisi e rappresentati, in forma simbolica e per tipologia, secondo la legenda prevista negli standard per l'informatizzazione degli studi di MS con riferimento agli Indirizzi e Criteri di Microzonazione sismica (ICMS) a cura della Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile e catalogati e archiviati mediante software Arc-Gis.

Quant.	Sigla	Descrizione
19	CPT	Prove penetrometriche statiche con punta meccanica
32	DL	Prova penetrometrica dinamica leggera
3	DP	Prova penetrometrica dinamica pesante
2	DH	Down Hole
7	MASW	Prospezione sismica MASW
5	HVSR	Microtremore a stazione singola
29	S	Sondaggio a carotaggio continuo
17	T	Trincea o pozzetto esplorativo
114	Totale punti indagati	

Oltre al reperimento dei dati di base, (prevalentemente prove penetrometriche dinamiche) è stato necessario operare correlazioni tra le diverse prove presenti in zone di territorio adiacenti al fine di individuare caratteristiche comuni degne di essere messe in evidenza.

Si sottolinea, infine, che il numero dei dati di base attraverso i quali si può caratterizzare il substrato di un territorio è una componente dinamica; la validità e l'attendibilità dei risultati raggiunti, è legata al numero dei punti di controllo disponibili; è necessario, quindi, un continuo aggiornamento, via, via che saranno acquisiti nuovi dati.

5.2 Carta delle frequenze fondamentali di risonanza

Nella Carta sono riporti i risultati della campagna di misure di microtremore a stazione singola HVSR, comunemente nota con il termine H/V condotte secondo gli standard e i criteri stabiliti dagli ICMS per la misura delle frequenze fondamentali dei depositi che costituiscono la copertura della pianura alluvionale.

Per una dettagliata trattazione e valutazione della procedura di acquisizione ed elaborazione e quindi della qualità del dato, si rimanda al cap. 3.4.1.

I dati di esplorazione sono costituiti da

- n. 50 misure passive eseguite ad hoc per lo studio di MS
- n. 3 misure passive ricavate dall'archivio comunale

La rappresentazione grafica scelta, data la quantità non eccessiva di dati acquisiti, è quella semplificata dei cerchi con colore variabile secondo la frequenza del picco I risultati ottenuti sono riassunti nella sottostante tabella.

Cod.prova	F0	quota	indirizzo	data	Coordinata est	Coordinata nord
201-177- 01	8.56	413	Via Monte Paolo	05/02/2013	250337	4893626
201-178- 03	3.94	418	Via Monte Paolo	05/02/2013	250177	4893261
201-179-07	13.18	120	Via del Sangiovese	05/02/2013	251577	4890408
201-180-08	17.00	124	Via del Sangiovese	05/02/2013	251370	4890564
201-182-10	4.50	173	Via E. Mazzani	05/02/2013	250423	4889896
201-183-12	3.48	161	Via Mattei	05/02/2013	250078	4889612
201-184-14	6.42	162	Via Mattei	05/02/2013	249974	4889320
201-185-16	13.70	171	Via Mattei	05/02/2013	249745	4888939
201-186-18	2.25	196	Via Vaudano	05/02/2013	249439	4888709
201-187-20	15.37	174	Via Mattei	05/02/2013	249395	4888507
201-236-28	13.29	128	SS67	08/03/2013	251887	4890839
569-153-04	18.69	413	Via Monte Paolo	05/02/2013	250156	4893428

569-154-05	9.75	415	Via Monte Paolo	05/02/2013	250075	4893361
569-155-06	5.07	139	Via del Sangiovese	05/02/2013	251478	4890245
569-156-09	7.18	154	Via Guido Guerra	05/02/2013	250528	4889854
569-157-11	5.09	179	Via Guido Guerra	05/02/2013	250271	4889772
569-158-13	8.91	140	Via Mattei	05/02/2013	250219	4889440
569-159-15	15.05	160	Via Mattei	05/02/2013	249910	4889044
569-160-17	7.42	180	Via Vaudano	05/02/2013	249589	4888803
569-161-19	11.80	174	Via Mattei	05/02/2013	249532	4888595
569-201-21	13.64	139	Via Don Nadiani	15/02/2013	251082	4890019
569-215-22	5.21	170	Strada Statale 67	08/03/2013	250337	4889779
569-216-23	9.59	155	Strada Statale 67	08/03/2013	250055	4889158
569-217-24	10.65	148	Via XXV Aprile	08/03/2013	250751	4890324
569-218-25	8.01	127	Strada Provinciale 104	08/03/2013	251454	4890320
569-219-26	11.26	125	Strada Statale 67	08/03/2013	251814	4890603
569-231-27	10.03	136	Strada Statale 67	19/03/2013	251653	4890692

Tab. 1 Risultanze misure di microtremore a stazione singola

Lo scopo dell'indagine esplorativa è l'individuazione di aree caratterizzate o meno da fenomeni di risonanza nell'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico.

La frequenza di risonanza del sedimento dipende dallo spessore H del sedimento e dalla velocità "media" delle onde S del sedimento secondo la semplice relazione

$$v1 = V_s/4H$$

conoscendo lo spessore H del sedimento è possibile avere informazioni sulla velocità media delle Vs, viceversa, conoscendo la Vs è possibile definire lo spessore H.

Grazie a questa relazione attraverso la calibrazione con sondaggi e prove penetrometriche pregresse (da cui sono stati ricavati gli spessori H) è stato possibile, per la maggior parte degli HVSR realizzare un log di variazione delle velocità delle onde sismiche in profondità ricavandosi così anche i valori di Vsh.

5.3 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)

Lo studio di MS di livello 1 rappresenta un livello propedeutico a successivi studi di MS (livello 2 e 3) e si è sviluppato con la raccolta organica e ragionata dei dati di natura geologica, geofisica e geotecnica preesistenti e acquisite al fine di suddividere il territorio comunale in microzone qualitativamente omogenee dal punto di vista del comportamento sismico.

Nello specifico la MS individua e caratterizza:

- **Le Zone Stabili:** sono zone nelle quali non si ipotizzano effetti locali di alcuna natura (litotipi assimilabili al substrato sismico in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata) e pertanto gli scuotimenti attesi sono equivalenti a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;
- **Le Zone stabili suscettibili di amplificazione sismica:** sono le zone in cui il moto sismico viene modificato a causa delle caratteristiche litostratigrafiche e/o geomorfologiche del territorio;
- **Le Zone suscettibili di instabilità:** sono le zone suscettibili di attivazione dei fenomeni di deformazione permanente del territorio indotti o innescati dal sisma (instabilità di versante, liquefazioni, fagliazione superficiale).

Nella Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) sono state rappresentate le microzone omogenee, individuate sulla base di osservazioni geologiche e geomorfologiche e in relazione all'acquisizione, valutazione ed analisi dei dati geognostici e geofisici. Tali zone sono state differenziate in base alle caratteristiche lito-stratigrafiche, correlate a differenti tipologie di effetti prodotti dall'azione sismica (amplificazioni, instabilità di versante, ecc.).

Di particolare importanza a questo scopo è risultata la ricostruzione del modello geologico tecnico dell'area, l'individuazione dei litotipi costituenti il substrato rigido (ovvero dei materiali caratterizzati da valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio S significativamente maggiori di quelli relativi alle coperture localmente presenti) e da una stima di massima del contrasto di impedenza sismica atteso.

In particolare si è osservato, come, all'interno dell'area in esame il substrato sia sostanzialmente rigido (ci troviamo indistintamente all'interno del dominio della Formazione Marnoso-Arenacea) con velocità delle onde S superiori agli 800 m/s (bedrock sismico) con la presenza di coperture non superiori ai 30 m di potenza e caratterizzate da un'estrema variabilità litologia sia verticale che laterale.

Per questo motivo le microzone sono state differenziate unicamente seguendo le variazioni di spessore delle coperture, perché impossibile valutare in modo preciso e puntuale le loro variazioni litologiche tridimensionali.

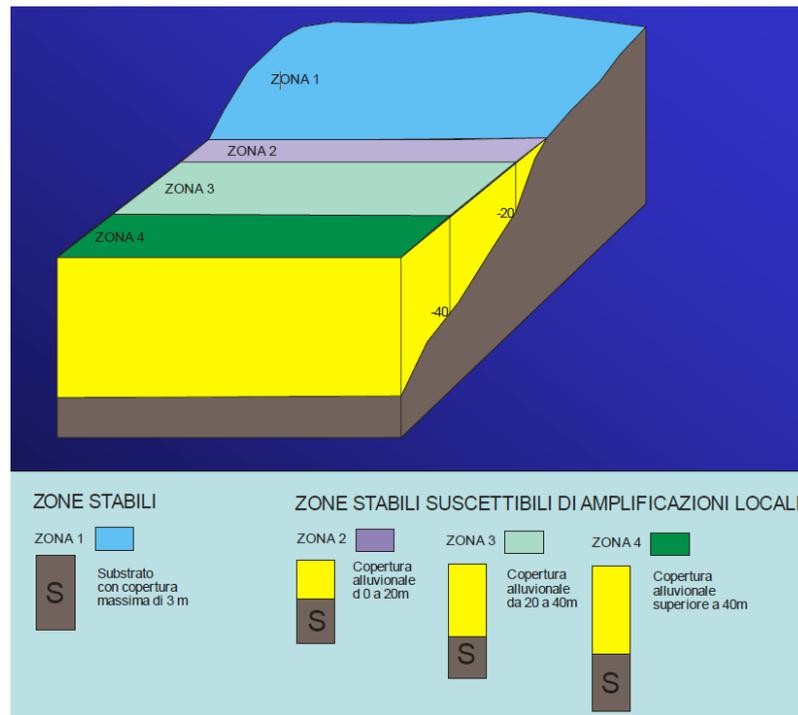


Fig. 6 Metodo utilizzato per l'individuazione delle microzone.

Come semplificato nell'immagine precedente le microzone sono state differenziate basandosi sugli spessori delle coperture, individuati sfruttando le indagini geognostiche raccolte e realizzate.

5.3.1 Descrizione delle microzone omogenee individuate (MOPS)

Segue la descrizione nel dettaglio di ogni singola Zona individuata, inserita nella Carta MOPS del presente studio.

- **ZONE STABILI** zone in cui il bedrock sismico è affiorante o sub affiorante (coperture inferiori ai 3 m) dove sono esclusi problemi di amplificazione topografica (superfici topografiche aventi inclinazione inferiore a 15°.
- **ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI**
 - Zona 1: è caratterizzata da coperture prevalentemente di tipo alluvionale con spessori compresi tra 3 e 5m su un bedrock sismico (FMA). Sono assenti inoltre problemi di amplificazione di tipo topografico.
 - Zona 2: è caratterizzata da coperture prevalentemente di tipo alluvionale con spessori compresi tra 5 e 10m su un bedrock sismico (FMA). Sono assenti inoltre problemi di amplificazione di tipo topografico.

- Zona 3: è caratterizzata da coperture prevalentemente di tipo alluvionale con spessori compresi tra 10 e 15m su un bedrock sismico (FMA). Sono assenti inoltre problemi di amplificazione di tipo topografico.
- Zona 4: è caratterizzata da coperture prevalentemente di tipo alluvionale con spessori compresi tra 15 e 20m su un bedrock sismico (FMA). Sono assenti inoltre problemi di amplificazione di tipo topografico.
- Zona 5: è caratterizzata da coperture prevalentemente di tipo alluvionale con spessori compresi tra 3 e 5m su un bedrock sismico (FMA) con la presenza di possibile amplificazione topografica (superfici topografiche aventi inclinazione superiore a 15°).
- Zona 6: è caratterizzata da coperture prevalentemente di tipo alluvionale con spessori compresi tra 5 e 10m su un bedrock sismico (FMA) con la presenza di possibile amplificazione topografica (superfici topografiche aventi inclinazione superiore a 15°).
- Zona 7: è caratterizzata da coperture prevalentemente di tipo alluvionale con spessori compresi tra 10 e 15m su un bedrock sismico (FMA) con la presenza di possibile amplificazione topografica (superfici topografiche aventi inclinazione superiore a 15°).
- Zona 8: è caratterizzata da coperture prevalentemente di tipo alluvionale con spessori compresi tra 15 e 20m su un bedrock sismico (FMA) con la presenza di possibile amplificazione topografica (superfici topografiche aventi inclinazione superiore a 15°).
- Zona 9: è rappresentata da substrato lapideo stratificato avente velocità media delle onde di taglio $S > 800$ m/s, ma affiorante e subaffiorante su superfici topografiche aventi inclinazione $> 15^\circ$; nell'area

di studio è costituito da vari membri della Formazione Marnoso-Areanacea. Tutti i membri di questa Formazione sono considerati substrato lapideo di tipo stratificato; inoltre, la velocità delle onde S in corrispondenza dei litotipi afferenti a questi membri è risultata, anche da indagini condotte ex-novo, > 800 m/s e quindi costituenti nella totalità del territorio studiato, bedrock sismico.

• ZONE SUSCETTIBILI DI INSTABILITA'

All'interno dell'area di studio è stata discriminata la presenza di zone suscettibili di instabilità di versante: in particolare sono state mappate frane di vario tipo sfruttando i dati provenienti dagli shapefile della carta geologica 1:10000 della regione Emilia Romagna.

5.4 Carta delle Vsh

È stata realizzata una carta che rappresenta la distribuzione puntuale delle prove su cui è stato possibile ricavare i log di velocità delle onde S e quindi i valori di Vsh (si parla solo di Vsh perché in

presenza di bedrock sismico le coperture non superano mai i 25 m di potenza). I dati sono stati georeferenziati attraverso piattaforma Arcgis e rappresentati con un simbolo puntuale ed un'etichetta che ne identifica il valore.

I valori calcolati sono rappresentati nella tabella sottostante:

Prova	VsH	H
201-177	270	9
201-178	307.6923	30
201-179	270	9
201-180	317.6471	9
201-182	290	29
201-183	275.6757	30
201-184	271.4779	17.6
201-185	268.5484	9
201-186	302.6549	19
201-187	270.7781	9
569-153	273.3186	6.3
569-154	295.2313	9.3
569-155	307.8738	12.3
569-156	287.5676	15.2
569-157	323.0769	18
569-158	295.1389	12.5
569-159	284.2683	7
569-160	294	14
569-161	271.8274	10.2

Tab. 2 Valori di Vsh

Il calcolo e la distribuzione delle vsh è stata indispensabile e propedeutica alla realizzazione dell'elaborato finale di secondo livello.

5.5 Microzonazione sismica, livello 2

Per l'analisi di secondo livello e il calcolo dei fattori di amplificazione è stato utilizzato il metodo semplificato proposto dal Progr n. 112 del 2 maggio 2007; analisi è ritenuta sufficiente, per gli ambiti suscettibili di urbanizzazione e per gli interventi sul territorio urbanizzato, nelle aree pianeggianti e sub-pianeggianti, incluse le zone di fondovalle appenniniche, con stratificazione orizzontale e sub-orizzontale, e sui versanti stabili con acclività $\leq 15^\circ$, in cui il deposito ha spessore costante.

Tale analisi ha lo scopo di valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale per l'elaborazione della carta di microzonazione. Questa fornisce indicazioni essenziali per l'elaborazione e approvazione del PSC (e delle sue varianti indicando:

- quali ambiti di riqualificazione e nuovo insediamento possano essere attuati senza la necessità di eseguire nuove indagini;
- quali ambiti di riqualificazione e nuovo insediamento siano subordinati allo svolgimento di ulteriori indagini

5.5.1 Calcolo dei fattori di amplificazione stratigrafica

Per calcolare i Fattori di Amplificazione (F.A.) richiesti nell'analisi semplificata devono essere state realizzate indagini geofisiche (vedi cap.3.3.4) che hanno permesso la definizione dello spessore del deposito di copertura, della profondità del bedrock (H) e della velocità equivalente delle onde di taglio per lo spessore considerato (V_{sH} e V_{s30}). Questi valori sono poi stati discretizzati dal punto di vista areale attraverso la realizzazione della carta delle Mops e delle V_{sh} .

Considerando le caratteristiche proprie dell'area di indagine, per individuare i valori di amplificazione stratigrafica sono state utilizzate le seguenti tabelle (proposte dal Progr n. 112 del 2 maggio 2007 per l'analisi semplificata) che mettono in relazione H e V_{sh} con i fattori di amplificazione di picco (F.A. P.G.A) e alle varie intensità spettrali.

APPENNINO E MARGINE APPENNINICO-PADANO

In caso di substrato marino caratterizzato da $V_s \geq 800$ m/s si devono usare le seguenti tabelle

F.A. P.G.A.

$\frac{V_{sH}}{H}$	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
5	1.6	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10	2.0	1.9	1.7	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0
15	2.0	2.0	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.2	1.0	1.0
20	2.0	2.0	2.0	1.9	1.7	1.6	1.4	1.3	1.1	1.0
25	1.9	2.0	1.9	1.9	1.8	1.6	1.5	1.3	1.2	1.0
30	1.8	1.9	1.9	1.9	1.7	1.5	1.5	1.4	1.2	1.0
35	1.7	1.8	1.9	1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.0
40	1.6	1.8	1.9	1.9	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	1.0

F.A. INTENSITA' SPETTRALE - $0.1s < T_0 < 0.5s$

$\frac{V_{sH}}{H}$	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
5	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
15	2.1	2.0	1.7	1.5	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0
20	2.3	2.3	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
25	2.2	2.4	2.2	2.0	1.7	1.5	1.4	1.2	1.1	1.0
30	2.1	2.3	2.3	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3	1.2	1.0
35	1.9	2.1	2.3	2.2	1.9	1.8	1.6	1.4	1.3	1.0
40	1.8	2.0	2.3	2.3	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.0

F.A. INTENSITA' SPETTRALE - $0.5s < T_0 < 1.0s$

$\frac{V_{sH}}{H}$	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
15	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
20	1.5	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
25	2.1	2.1	1.5	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
30	2.4	2.3	1.9	1.5	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0
35	2.5	2.4	2.3	1.8	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0
40	2.7	2.6	2.6	2.0	1.6	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0

Tab. 3 Tabella utilizzata per il calcolo semplificato di F.A

La tabella descrive i fattori di amplificazione utili per zone di margine appenninico padano con bedrock caratterizzato da velocità delle Vs superiori a 800 m/s, perfettamente in linea con le caratteristiche dell'area di studio. Va detto inoltre che i fattori di amplificazione stratigrafica nel caso di zone affioranti e sub affioranti corrispondono a 1.

5.5.2 Gli effetti topografici

Vista la natura montuoso-collinare dell'area in esame sono state individuate durante l'analisi della mops diverse zone interessate da effetti di amplificazione topografica. Gli effetti topografici possono essere trascurati per pendii con inclinazione media inferiore a 15°. Devono essere però calcolati nel caso di configurazioni geometriche bidimensionali e tridimensionali (cocuzzolo, cresta, dorsale allungata) di altezza (H) superiore a 30 metri. Per pendii con inclinazione maggiore di 15° il fattore di amplificazione stratigrafica dovrà essere moltiplicato per un fattore S_T (coefficiente di amplificazione topografica) calcolato nel seguente modo (v. fig. 7):

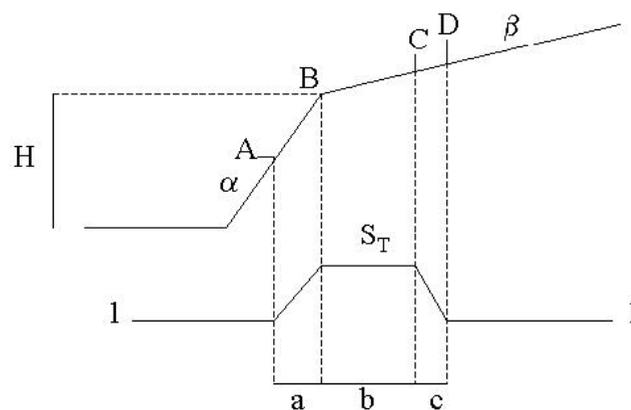


Figura 1

$$S_T = 1 + 0.8(\alpha - \beta - 0.4) \text{ sul segmento BC}$$

$$b: \text{valore minimo tra } 20\alpha \text{ e } \frac{H+10}{4}$$

α e β sono i gradienti della parte più ripida e meno ripida, rispettivamente:

$$S_T = 1 \text{ in A (a = H/3)}$$

$$S_T = 1 \text{ in D (c = H/4)}$$

S_T : si impone comunque un valore compreso tra 1 e 1.4

Fig. 7 Metodo di calcolo di S_T

Per questo sono state realizzate più sezioni topografiche su cui calcolare il fattore di amplificazione topografica in seguito da moltiplicare a quello di amplificazione stratigrafica.

Seguendo questo processo e utilizzato il valore cumulativo di Fa e St è stata realizzata una carta di micro zonazione sismica di secondo livello classificando le aree per categorie di amplificazione di picco (F.R.P.G.A) secondo le direttive degli ICMS.

Hanno collaborato:
Dott. Gabriele Pulelli
Dott. Andrea Fabbri
Dott. Stefano Tomidei
Dott. Federico Dapporto

PROGEO
Dott. Maurizio Furani



Allegati nel formato ICMS:
HVSR
Masw
Sondaggi e Down Hole
Sezioni topografiche
Cartografie