

Valutazione dello spessore dei corpi di frana tramite sismica passiva tomografica: applicabilità della tecnica in assenza di indagini di taratura

Alberto Caprara

Laureato in Geoscienze applicate, Università di Bologna,

secondo a pari merito del Premio di laurea "Gianfranco Bruzzi" - Edizione 2011

1. INTRODUZIONE

1.1 Scopo del lavoro

Grazie alle continue innovazioni tecnologiche e alla maggior conoscenza dei fenomeni fisici che coinvolgono i terreni superficiali, si sta diffondendo l'impiego di tecniche di sismica passiva. In questo ambito, il Tromino[®], vista la semplicità di utilizzo ed interpretazione dei dati e i bassi costi di indagine, ha riscosso ampio successo come strumento per la caratterizzazioni sismica dei suoli. Per questi motivi il Servizio Geologico dell'Emilia Romagna ha deciso di verificare la validità del suo utilizzo come strumento per un'analisi speditiva degli spessori di coltre dei movimenti franosi.

È stato scelto un campionario di sedici frane ben note dell'Appennino Settentrionale, nel settore caratterizzato dalle coltri Liguri, nella valle del Fiume Reno (undici frane), e nel settore romagnolo caratterizzato dal substrato roccioso delle Unità Umbro-Marchigiano-Romagnole (cinque frane).

La Comunità Montana dell'Alta-Media Valle del Reno, il Servizio Tecnico di Bacino del Fiume Reno e il Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico - Ambientali hanno fornito le descrizioni stratigrafiche di tutti i sondaggi eseguiti in ogni corpo di frana. I dati sono stati raccolti ed elaborati in un foglio di calcolo.

Sono state effettuate centoventisette misure tomografiche, associate ad ogni sondaggio nel quale fosse segnalato il substrato, e analizzate varie volte utilizzando metodologie differenti al fine di poter effettuare un confronto tra i valori estrapolati e quelli osservati dai sondaggi. Perciò, a partire dal lavoro del Dott. Sciascia, nel quale sono state analizzate le stratigrafie di tutti i sondaggi e ne sono state ricavate le unità stratigrafiche di riferimento, si è proceduto con una serie di analisi che hanno permesso di ricavare i valori medi di V_s delle unità

della coltre. Utilizzando il software dedicato *Grilla*, che consente di elaborare le registrazioni sismiche, è stato possibile estrapolare gli spessori degli strati imponendo le velocità delle onde S ottenute. È stato possibile infine fare un confronto tra i valori estrapolati dall'analisi e quelli osservati dai sondaggi.

1.2 Fasi del lavoro

Il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi:

1. Scelta delle frane campione in base ai dati disponibili e alla conoscenza pregressa del cinematisimo.
2. Raccolta e analisi delle descrizioni stratigrafiche dei sondaggi a carotaggio continuo eseguiti sulle frane selezionate.
3. Esecuzione delle misure tomografiche con Tromino[®] nelle vicinanze dei sondaggi esaminati e ubicazione dei punti di misura tramite GPS *Trimble*.
4. Elaborazione delle tracce tramite l'utilizzo del software dedicato *Grilla*, imponendo la profondità dello strato di coltre in base ai dati emersi dall'analisi del Dott. Sciascia (Sciascia 2009).
5. Calcolo della velocità media delle onde S nello strato di coltre per le frane in terra e per quelle in roccia.
6. Ulteriore elaborazione delle misure, imponendo le velocità medie ricavate dalle analisi precedenti e dai dati ottenuti con lo strumento SOILSPY Rosina.
7. Studio dei valori ottenuti e confronto tra i dati estrapolati e i dati ricavati da sondaggio.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La successione stratigrafica affiorante nell'area dello studio è rappresentata dai termini del Dominio Ligure, Epiigure e dai termini della successione Umbro-Mar-



Figura 1 - Schema geologico semplificato dell'Appennino settentrionale nel quale vengono indicati i principali protagonisti della struttura geologica del territorio emiliano-romagnolo. Le linee più spesse indicano i contatti tettonici importanti (da Mutti et al. 1975, semplificata)

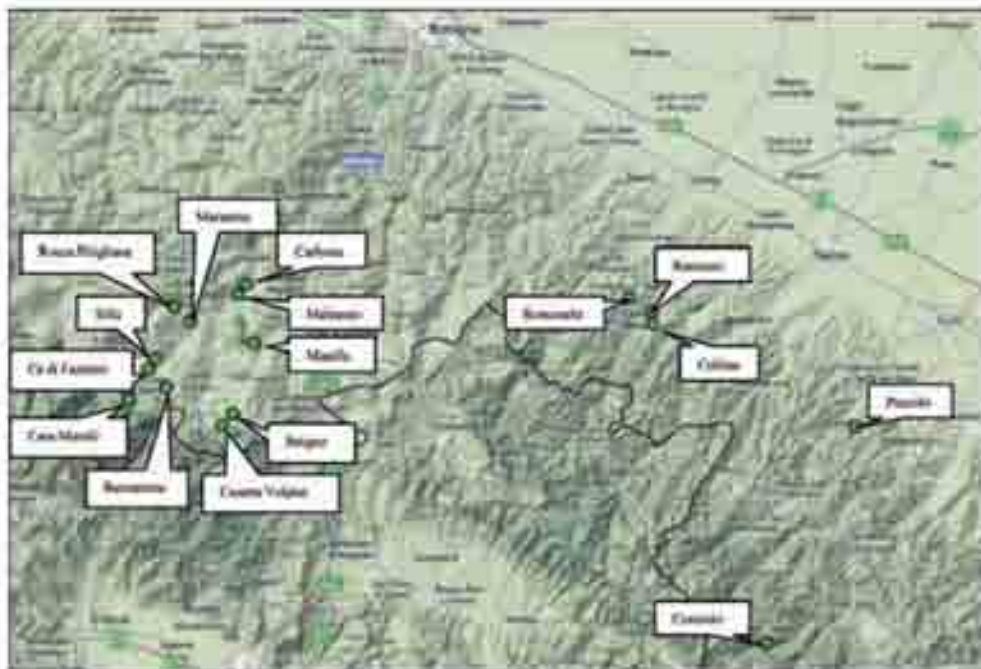


Figura 2 - Ubicazione geografica dell'area di studio

chigiana-Romagnola (Fig. 1). La successione si estende, temporalmente, dal Giurassico sino all'Eocene Medio (Argille a Palombini, Formazione Marnoso Arenacea, ecc.).

3. DESCRIZIONE DELLE FRANE CAMPIONE

Al fine di analizzare i dati forniti dallo strumento Tromino[®] si è reso necessario identificare una serie di movimenti franosi, già oggetto di studio ed interpretazione da parte

di enti (Comunità Montana della Media e Alta Valle del Reno, Servizio Tecnico di Bacino, Università degli Studi di Bologna), dei quali fossero note la storia, le dinamiche di movimento e la geometria. La disponibilità di tali dati è stato il fattore principale per la scelta delle frane da analizzare.

Altro fattore fondamentale per la scelta delle frane campione è stata la quantità di dati disponibili per ogni singolo movimento franoso. Si è preferito scegliere frane che presentassero il maggior numero di dati (stratigrafia da sondaggi a carotaggio continuo e dati inclinometrici).

3.1 Le frane campione

Nella tabella 1 viene riportato un elenco dei fenomeni rappresentativi studiati, divisi secondo le due tipologie di frana identificate: undici frane in terra e cinque in roccia (fig.2).

Le prime sono situate nell'Alta Valle del Reno e nei bacini dei suoi affluenti, in Provincia di Bologna, all'interno delle complessive ligure, generalmente classificate come scivolamenti rototraslativi che evolvono in colata; le seconde sono situate nella Valle del Bidente e nella Valle del Senio, in Provincia di Forlì - Cesena e in provincia di Ravenna, all'interno delle Unità Umbro - Marchigiane, generalmente classificate come scivolamento su strato. In questo articolo verranno presentati i dati, le elaborazioni e i risultati ottenuti facendo riferimento in particolare a due esempi scelti tra gli ambiti di lavoro: uno per le frane in terra (Rocca Pitigliana) e uno per le frane in roccia (Pezzolo).

Per le due frane è presentata una descrizione della geomorfologia, del cinematisma e dei dati geognostici disponibili.

Per ogni singola frana è realizzata una cartografia che riporta le formazioni geologiche dell'area, i limiti del corpo di frana e i punti nei quali sono state eseguite le misure (Fig. 4 e 5).

I corpi di frana sono distinti in frana attiva, frana quiescente, ultima riattivazione e area di possibile attivazione (Fig. 2).

Nella descrizione delle indagini disponibili si è tenuto conto solamente dei sondaggi utilizzati per l'analisi delle misure tromografiche. Sono stati esclusi i sondaggi a distruzione di nucleo. Nel caso fossero presenti più sondaggi eseguiti nell'intorno di un punto, è stato scelto il più rappresentativo, ovvero quello che si spinge a maggior profondità e/o quello che presenta un maggior dettaglio nella descrizione del sondaggio escludendo i rimanenti dall'analisi.

Successivamente alla descrizione di ogni frana campione, verranno analizzate le stratigrafie dei sondaggi a carteggio continuo eseguiti su ognuna di esse.



Figura 3 - Legenda della cartografia utilizzata per i corpi di frana e i punti di misura

Materia	Nome Frana	Comune	Eventi-CTR
Terra	Reggio	Carruggio - BO	22033 - 22034
	Bonetto	Cast. S. Cass. - BO	22192
	La S. Vento	Fonti Tevere - BO	21591 - 21592 - 21593 - 21594
	Calice	Vigolo - BO	22711
	Cost. Melli	Fonti Tevere - BO	21194
	Castra Vigolo	Carruggio - BO	22031
	Milano	Vigolo - BO	22710 - 22711
	Morone	Vigolo - BO	22712
	Altole	Carruggio - BO	22029 - 22713 - 22714
	Rocca Pitigliana	Gaggio Montano - BO	23611 - 23713
	Stia	Gaggio Montano - BO	22612 - 22613
Roccia	Colto	Cast. S. Cass. - BO	22191 - 22192
	Orsola	S. Maria S. F. - FC	20562
	Passo	Donato - FC	21471
	Passo	Cast. S. Cass. - BO	22191
	Passo	Reggio-Tossignano - BO	22194

Tabella 1 - Elenco delle frane studiate

ROCCA PITIGLIANA

Ubicazione geografica: l'area in frana ricade negli elementi 23611 e 23713 della CTR in scala 1:5.000 della Regione Emilia-Romagna e lambisce il centro abitato di Rocca Pitigliana (comune di Gaggio Montano - Fig. 4).

Geologia e geomorfologia: la frana si sviluppa prevalentemente su terreni interessati dalla F.ne delle Argille a Palombini (APA) i quali, nella zona di deposito, sovrascorrono litotipi prevalentemente arenacei ascrivibili al membro delle Arenarie di Anconella (ANT4a).

Il fronte di sovrascorrimento si sviluppa con direzione circa E - O poco a sud dell'abitato di Rocca Pitigliana, ed in corrispondenza di questo allineamento si è impostato presumibilmente il corso del torrente Marano.

Il principale nucleo abitativo, Rocca Pitigliana, è impostato su un dosso strutturale che rappresenta un elemento geomorfologico di maggiore stabilità rispetto alle aree adiacenti, zone di impluvi, nelle quali si possono riscontrare indizi di movimenti in atto.

La frana è composta da due impluvi, uno inferiore, che chiameremo 1, a quota 600 m s.l.m. e uno superiore che chiameremo 2 a quota 720 m s.l.m. che si uniscono verso valle presso il centro abitato di Cà di Gollì. Il fenomeno si presenta in evoluzione per l'impluvio 1, mentre per quanto riguarda lo stato di attività dell'impluvio 2, questo si può ritenere quiescente o inattivo.

Il movimento di frana dell'impluvio 1 è contraddistinto da una forma stretta e allungata, caratterizzato da una corona di frana ben evidente posta a quota 625 m s.l.m. da cui si è riattivato il movimento.

La frana è classificabile come scorrimento traslativo in terra che evolve verso valle in un movimento di tipo colata.

Ultima riattivazione: nell'ottobre del 1999 è avvenuta l'ultima riattivazione, durante la quale si è verificata una riattivazione alcune decine di metri a valle rispetto alla

nicchia precedente. Questo ultimo evento franoso non sembra aver prodotto una retrogressione della nicchia esistente, ma solo una rimobilizzazione interna al vecchio corpo di frana.

Indagini disponibili: sono stati considerati nove sondaggi a carotaggio continuo, solo uno dei quali vede installato un piezometro (4i), mentre tutti gli altri hanno installato un tubo inclinometrico.

Lo studio dei dati raccolti mostra una profondità media della superficie di scorrimento a circa -8,5 m dal piano campagna nella zona di accumulo, mentre gli spessori sono molto inferiori (-3 m e -5 m) nella corona e nel canale.

PEZZOLO

Ubicazione geografica: il versante in studio è situato all'interno del bacino idrografico del fosso della Casina, subordinato al bacino del fiume Montone, nel comune di Dovadola (FC), ricadente nell'elemento 254072 della CTR a scala 1:5000 della Regione Emilia Romagna (Fig. 5).

Geologia e geomorfologia: il substrato del versante è costituito dalla Formazione Marnoso-Arenacea e in par-

ticolare dal membro di Castel del Rio (FMA12b) in litofacies arenaceo-pellica. Gli strati sono in assetto strutturale a franapoggio, con direzione di immersione 120° N e inclinazione di 10°. La valle risulta asimmetrica proprio a causa dell'assetto strutturale degli strati: dove questi sono disposti a franapoggio il versante ha pendenze inferiori (inclinazione simile a quella degli strati), dove gli strati sono disposti a reggipoggio il versante ha un'inclinazione molto maggiore (a volte verticale).

Il movimento della frana è classificato come scorrimento traslativo su strato. La superficie di scivolamento è costituita da un sottile strato pellico a circa 29 metri di profondità.

Ultima riattivazione: nell'aprile 2005 la zona si è riattivata causando lo spostamento in blocco di un'area di circa 30.000 metri quadri con spessore di 29 metri. Successivamente il deposito ha subito una rapida disaggregazione dovuta ad agenti meteorici e all'azione dell'uomo.

Indagini disponibili: il sito consente uno studio diretto della stratigrafia grazie alle pareti verticali che delimitano la corona e il deposito. Nel maggio 2009 è stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo a monte della zona di distacco (7i).

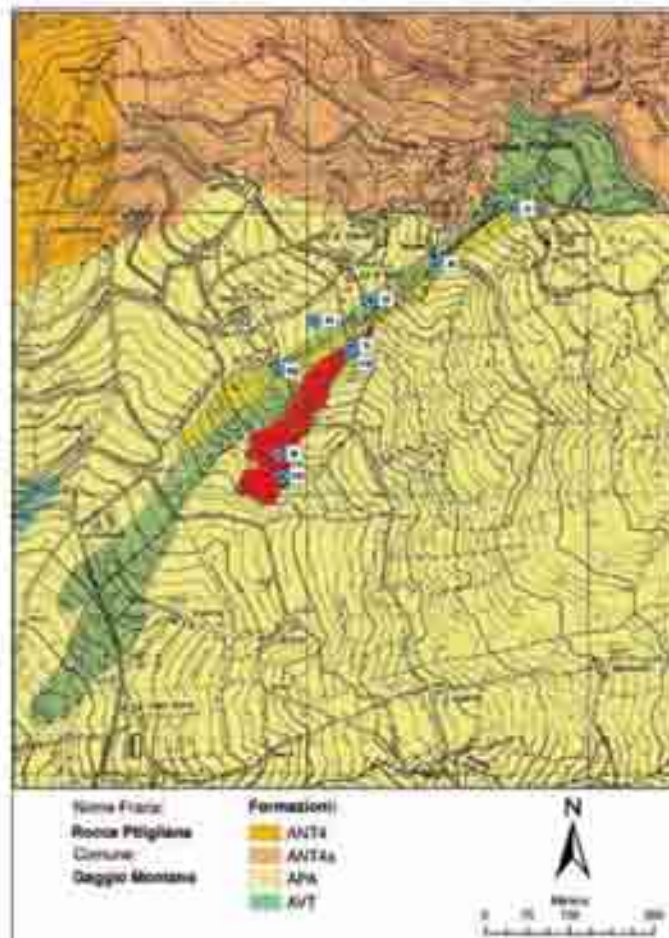


Figura 4 - Rappresentazione cartografica della frana di Rocca Pièglione (geologia, geomorfologia e punti di indagine)

3.2 La stratigrafia delle frane

Per ogni frana viene riportata una tabella (cfr tab. 3 e 4), nella quale si riporta la descrizione dei sondaggi utilizzati, suddividendoli nelle unità precedentemente descritte. La prima colonna mostra la sigla identificativa del sondaggio; la seconda il tipo di strumentazione installata (P = piezometro; I = inclinometro; - = strumentazione ignota); la terza indica la profondità della superficie di scivolamento, tratta da un'analisi di dati inclinometrici.

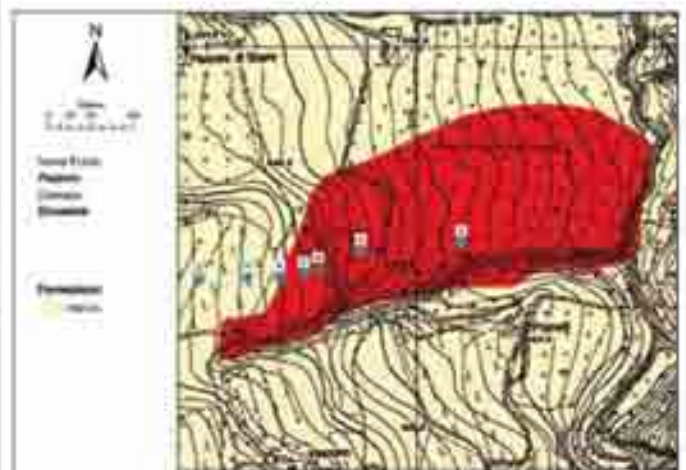


Figura 5 - Rappresentazione cartografica della frana di Pezzolo (geologia, geomorfologia e punti di indagine)

Simbolo	Descrizione
+	Profondità superficiale
-	Non sono registrati movimenti
o	Non ci sono dati

Tabella 2 - Descrizione stratigrafica dei sondaggi

Sondaggio	Strumentazione	Profondità superficiale di scorrimento (m)	Unità	Spessore (m)
11	I	8,5	1	1,4
			2	1,4
			3	6,6
			4	20,6
31	I	6,0	1	1,7
			2	4,8
			3	5,0
			4	8,5
41	P		1	1,3
			2	3,0
			3	15,7
51	I	11,0	1	0,7
			2	0,7
			3	9,6
			4	9
71	I	3,0	1	5,6
			2	11,4
			3	7,0
			4	4,0
91	I	2,5	1	12,5
			2	7,5
131	I	4,5	1	7,0
			2	10,0
			3	7,0
			4	2,0
141			1	13,0
161	I	1,5	1	3,6
			2	17,4

Tabella 3 - Descrizione stratigrafica dei sondaggi di Rocca Pitigliana

Nel caso non sia chiara la lettura dei dati inclinometrici vengono utilizzati i simboli riportati nella tabella 2.

Nella Tabella 3, nella quarta colonna viene indicato il tipo di unità rilevata, mentre la quinta riporta il relativo spessore. Lo spessore dell'ultima unità non rappresenta la base dell'unità ma è relativo al fondo foro.

Viene fornita, inoltre, una restituzione grafica dei sondaggi, affiancati tra loro (fig. 6 e 7).

Sia nelle tabelle sia nelle figure, i colori corrispondono a quelli scelti per ogni unità, mentre la linea rossa, nella rappresentazione dei sondaggi, indica, se presente e netta, la superficie di scorrimento.

ROCCA PITIGLIANA

Le stratigrafie dei sondaggi (tab. 3) indicano un substrato a profondità variabile tra 3 e 5 metri nella zona sottostante la corona e oltre 10 metri lungo il corpo della frana. Solo il sondaggio 41, che si trova nel tratto di versante

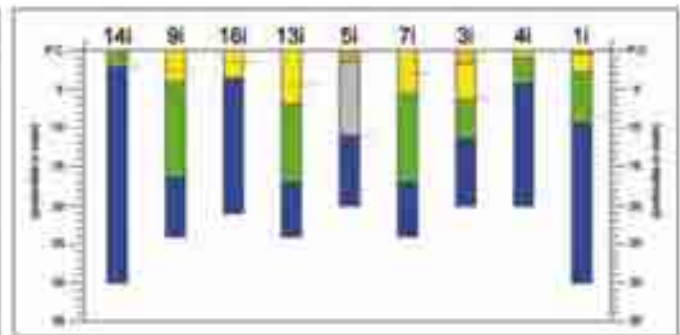


Figura 6 - Restituzione grafica dei sondaggi di Rocca Pitigliana

Sondaggio	Strumentazione	Profondità superficiale di scorrimento (m)	Unità	Spessore (m)
71	I	X	1	5,3
			2	28,7

Tabella 4 - Descrizione stratigrafica dei sondaggi di Pezzolo



Figura 7 - Restituzione grafica del sondaggio 71 di Pezzolo

nel quale la frana è canalizzata, mostra un substrato a 4,3 metri di profondità. La superficie di scorrimento si trova sempre all'interno della coltre, tranne nel sondaggio 51 nel quale i dati inclinometrici mostrano un movimento alla base di un trovante arenitico, indicato con una campitura puntinata nella figura 6, dello spessore di 9,6 metri.

PEZZOLO

L'analisi dell'unico sondaggio eseguito, mostra una coltre di 5,3 metri al di sopra di un substrato roccioso. Non sono ancora state eseguite misure inclinometriche, sebbene in campagna si può osservare una superficie di scorrimento posta a 28 metri di profondità, alla base di scarpata di frana.

Nel mesi di maggio e giugno del 2009, è stata eseguita una campagna di indagini tromografiche nelle zone interessate dallo studio effettuando centosei misure tromografiche nelle frane in terra e trentasette misure tromografiche nelle frane in roccia per un totale di centoquarantatré acquisizioni. Di queste centoquarantatré acquisizioni, quarantuno sono state eseguite su corpi di frana attivi, cinquantatré su corpi di frana quiescenti, ventuno su corpi di frana di ultima riattivazione e ventotto fuori dal corpo di frana.

3.3 Misura di sismica passiva con tromografo digitale

La sismica tromografica è una tecnica passiva che studia le onde a bassa frequenza e di bassa entità del terreno (microtremori) generati dall'attività dinamica terrestre, da fenomeni atmosferici e dall'attività antropica.

Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde sismiche (sia di terremoto che di microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di "guida d'onda", attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica di "ray tracing", rimane comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che conserva le informazioni relative alla struttura locale attraversata dalle onde in esame.

La tecnica maggiormente utilizzata per l'estrazione di tali informazioni è detta HVSR (*Horizontal to Vertical Spacial Ratio*), applicata da Nogoshi e Igarashi (1970) e poi da Nakamura (1989). Essa consiste nello studio dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale, per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. È ormai ampiamente riconosciuto in letteratura che l'HVSR è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei sottosuoli.

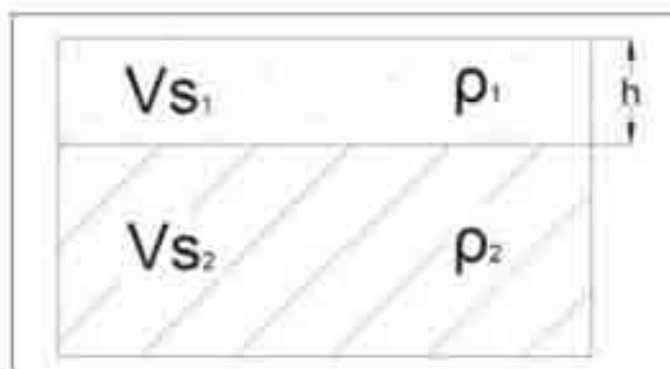


Figura 8 - Modello ideale del terreno

Inoltre si riconosce che le singole componenti del rumore ambientale possono registrare ampie variazioni in funzione dei disturbi naturali e antropici, mentre il rapporto delle componenti orizzontali con la componente verticale risulta stabile, conservando il picco della frequenza di risonanza fondamentale.

La tecnica HVSR può essere applicata in campo geologico per fornire una prospezione geologica del sottosuolo.

In un modello ideale di terreno costituito da due strati (1 e 2) con diversa densità (ρ_1 e ρ_2) e diverse velocità delle onde S (V_{s1} e V_{s2}), secondo la formula (I):

$$f_r = \frac{V_{s1}}{4h}$$

dove:

- f_r è la frequenza di risonanza dello strato 1;
- V_{s1} è la velocità delle onde S nello strato 1;
- h è lo spessore dello strato 1,

è possibile mettere in relazione la frequenza di risonanza dello strato superficiale con il suo spessore e con la velocità delle onde S al suo interno.

Questo metodo, nella sua forma estesa e completa, viene utilizzato per la ricostruzione di modelli multistrato complessi, in grado di fornire parametri fisici del terreno. Come è possibile notare, all'interno dell'equazione (I) sono presenti tre incognite. Dalla misura tromografica si ottiene unicamente il valore della frequenza di risonanza degli strati (f_r), per cui l'equazione risulta indeterminata. È necessario fornire un valore di riferimento (V_{s1} o h), detto "vincolo", che ne consenta la soluzione. Tale valore può giungere da altre indagini o da bibliografia.

3.4 Strumentazione

Tutte le registrazioni dei microtremori sono state effettuate con il tromografo digitale Tromino[®], prodotto da Micromed S.p.A., che è un registratore disegnato specificamente per le acquisizioni del rumore sismico. Lo strumento è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati secondo le tre componenti spaziali (N-S, E-W e Up-Down), che consentono di acquisizione digitale in alta definizione dei microtremori (ampiezze d'onda inferiori a 10 μm), nel campo delle frequenze 0 - 200 Hz. In seguito ad una registrazione di un determinato tempo t , tale segnale digitalizzato viene elaborato tramite software dedicato, Grilla, il quale esegue un'elaborazione per ognuna delle componenti del moto e ne fornisce i grafici relativi.

SPECIFICHE TECNICHE	
Costruttore	Miramal S.P.A.
Apparato	TRIMINO® sistema ultrapiatto di acquisizione del rumore sismico
Classificazione	CISPR 11 - EN 55011, Gruppo 1, Classe B.
Conformità agli standard	EN 51011; IEC 61000-4-2; IEC 61000-4-3; IEC 61000-4-3
Voltaggio interno	+3.3 V, +1.8 V per la sezione analogica
Numero di canali	3+1 analogici
Amplificatori	tutti i canali con input differenziali
Rumore	< 0.1 μ V c.m.a. @128 Hz sampling
Impedenza dell'input	10 ⁷ Ohm
Range di frequenza	DC - 500 Hz
Frequenza di campionamento	16384 Hz per canale
Frequenza di sovracampionamento	32x, 64x, 128x
Conversione A/D	equivalente a 24 bit
Massimo input analogico	31.2 mV (781 mV/div)
GPS	12 canali con time-marker (precisione 1 μ s), può essere visualizzato anche durante l'acquisizione
Livello	a livello d'aria, elevata precisione orizzontale, sensibilità 1° d'arco (0.002°)
Dimensione e peso	10 x 14 x 7,7 (altezza) cm 1,1 kg contenitore di alluminio
Accoppiamento col terreno	in parte a macchina ecologica
Impermeabilità	indice di protezione IP > 65 (resistente alla polvere, resistente agli spruzzi)
Sensori	3 velocimetri (dattiloscandali) originali ad alta risoluzione, stabilizzati quando non in acquisizione

Tabella 5 - Principali specifiche tecniche dello strumento di acquisizione.

Nella tabella 5 sono riportate le principali caratteristiche tecniche dello strumento, secondo le indicazioni fornite dalla ditta costruttrice.

4. METODOLOGIE E MISURE IN SITO

Ogni misura è stata svolta posizionando lo strumento nelle immediate vicinanze delle torrette che indicano la parte esterna dello strumento inserito nel punto in cui è stato eseguito il sondaggio; in questo modo è possibile avere un confronto tra le misure acquisite e la stratigrafia reale del punto. Nei casi in cui non è stata trovata la torretta, si è cercato di posizionare lo strumento nel punto indicato dalla cartografia dell'ubicazione dei sondaggi fornita dalla Comunità Montana Alta e Media Valle del Reno, dal Servizio Tecnico Bacino Reno e dall'Università di Bologna.

In ogni frana, lo strumento è stato accoppiato al terreno in modo che la freccia indicante il Nord sul Tromino® fosse perpendicolare all'asse della frana, orientando il dispositivo con la bussola; in questo modo è possibile notare amplificazioni orizzontali nel caso fossero presenti in tutte le misure della medesima frana.

Ogni misura è stata trasferita sul computer e analizzata con il software dedicato Grilla, il quale permette di as-

segnare ad ogni misura un nome identificativo. Ad ogni traccia è stato caricato il nome della frana e il nome del sondaggio creando un database di tutte le misure raccolte. Oltre a creare un database di misura, il software crea grafici HVSR attuando alcune operazioni. In sintesi, Grilla elabora il segnale dei velocimetri, acquisito in ciascun sito per un tempo t (di 12 minuti) e digitalizzato a 24 bit (equivalenti) da Tromino®, per ciascuna delle 3 componenti del moto, compiendo le seguenti operazioni:

- divide il tracciato acquisito in finestre di lunghezza L (20 secondi),
- elimina il trend da ciascuna finestra,
- ne fa il taper con una finestra Bartlett,
- fa il "pad" di ciascuna finestra a zero,
- calcola la trasformata veloce di Fourier (FFT) per ciascuna finestra,
- rende lo spettro di ampiezza per ciascuna finestra,
- liscia lo spettro di ogni finestra secondo la funzione di
- lisciamento f ,
- calcola il rapporto spettrale HVSR ad ogni frequenza, per ciascuna finestra.

La funzione HVSR finale per ciascuna frequenza è data dalle medie degli HVSR di ciascuna finestra. Per produrre l'HVSR finale le componenti orizzontali sono mediate tra loro con la media geometrica e vengono poi divise per la componente verticale.

4.1 Campagna di indagini

Sulla frana di Rocca Pitigliana (fig. 4) sono state effettuate nove misure, due nell'area attiva, due nell'area quiescente, quattro nell'area di ultima riattivazione e una fuori frana. Gli unici sondaggi non trovati sono l'11 e il 51 (tab.3). Lo strumento è stato posizionato con un angolo di 120°N.

Sulla frana di Pezzolo (fig. 5) è stato eseguito un solo sondaggio (71) sopra la corona di frana; vicino ad esso è stata effettuata una misura. Altre sei misure sono state acquisite nel corpo di frana; di queste, tre sono nell'area attiva, una nell'area quiescente, una sull'area di ultima riattivazione e una fuori frana. Lo strumento è stato posizionato esattamente verso Nord.

5. INTERPRETAZIONE TROMOGRAFIE

Di seguito sono riportate le analisi effettuate sulle misure tromografiche eseguite nei pressi dei sondaggi realizzati sulle due frane prese ad esempio, descritte al capitolo 3. Tale procedura è stata seguita anche per gli altri casi di studio.

Lo scopo delle analisi è verificare la possibilità di utilizzare un valore medio di velocità delle onde S per lo strato di coltre, distinguendo le frane in base al materiale coinvolto nel processo.

Al fine di fare un'ulteriore verifica del valore medio di Vs ricavato dalle analisi, è stata eseguita un'elaborazione aggiuntiva delle misure, per le frane in terra, utilizzando il dato di Vs ricavato dall'indagine in sito effettuata con lo strumento SOILSPY Rosina. È stata utilizzata la tecnica d'indagine M.A.S.W. (Park et al., 1999), con uno stendimento sismico composto di sedici geofoni, abbinata al software dedicato Rosina. Questa tecnica permette di ricostruire l'assetto sismo-stratigrafico del sottosuolo, in maniera non invasiva.

Le analisi delle tracce sono state effettuate dalla Dott.sa Castellaro.

5.1 Metodologia di interpretazione

Il software dedicato Grilla, analizza ed elabora i dati raccolti da Tromino® e fornisce tre grafici di output:

- andamento di H/V sulla frequenza,
- andamento delle singole componenti sulla frequenza,
- andamento di H/V nel tempo della registrazione.

Per ricavare la stratigrafia del punto di misura bisogna inserire lo spessore degli strati, la velocità delle onde S

e la densità di ogni strato ed il programma elabora una curva sperimentale sul primo dei tre grafici. Variando i parametri immessi, si riesce a far coincidere i picchi della curva sperimentale con i picchi di risonanza della curva H/V registrati nel sito.

Per poter interpretare in modo corretto la stratigrafia, è necessario individuare il picco di risonanza relativo al passaggio tra la coltre e il substrato, riconoscibile nei grafici come:

- il picco di maggior entità,
- il picco, solitamente, a frequenze minori,
- il picco positivo di H/V legato ad un picco negativo della componente verticale, nel grafico delle componenti.

5.2 Estrapolazione del valore medio di Vs per la coltre

Dallo studio dei sondaggi è stata ricavato lo spessore dell'unità di coltre. Questo valore è stato inserito nel programma Grilla ed è stato utilizzato come parametro noto (vincolo) e mantenuto fisso nell'analisi, facendo variare il dato di velocità delle onde S degli strati, fino a consentire la sovrapposizione delle due curve.

Dalle analisi effettuate si ricavano per ogni prova valori di Vs dello strato di coltre che, mediati per le due tipologie di frane, forniscono i seguenti valori:

Dalle misure effettuate con lo strumento SOILSPY Rosina, elaborate dalla Dott.sa Castellaro, è stata ricavata la seguente velocità delle onde S per lo strato di coltre.

Frana	Tromino-Geo	Vs media (m/s)	Deviazione standard
Terra	261	236	19,7
Rocce	24	236	17,4

Tabella 6 - Velocità media delle onde S nei due tipi di frane

Materiale	Vs [m/s]
Terra	160

Tabella 7 - Velocità media delle onde S nei due tipi di frane ricavate dallo strumento SOILSPY Rosina

5.3 Analisi con il valore di Vs medio della coltre

Nelle tabelle 8 e 9 vengono presentati i dati ottenuti dalle analisi effettuate imponendo le velocità medie dello strato di coltre per le frane in terra e in roccia, ricavate dall'analisi precedente, e l'analisi effettuata con il valore di Vs ricavato dallo strumento SOILSPY Rosina.

Frane in terra	Sondaggio	Spessori coltre reali (m)	Spessori Coltre stimati (m) con Vs 160 m/s	Spessori Coltre stimati (m) con Vs 230 m/s
Rocca Pignone	11	9,4	8,1	12
	31	11,5	1	4,8
	41	4,3	6,2	9
	51	11	4	11
	71	17	2,5	8
	91	16,5	4	1,3
	131	17	3	7,6
	141	2	1,3	2,2
	161	3,6	4,5	7

Tabella 8 - Spessori della coltre ricavati imponendo varie velocità alle misure eseguite sulla frana di Rocca Pignone

Frane in terra	Sondaggio	Spessori coltre reali (m)	Spessori Coltre stimati (m) con Vs 230 m/s
Pezzo	T1	3,3	8

Tabella 9 - Spessori della coltre ricavati imponendo varie velocità alle misure eseguite sulla frana di Pezzo

5.4 Validità della Vs media

Dai dati ricavati imponendo una velocità media delle onde S nello strato di coltre, è possibile fare un confronto con i valori di profondità del substrato osservati dai sondaggi a carotaggio continuo. Sono state così elaborati tre grafici riportanti sull'asse delle ordinate il valore di profondità del *bedrock* estrapolato dalle tre analisi, mentre sulle ascisse il valore reale di profondità del substrato. È riportata nel grafico anche la serie dei dati ottenuti suddividendo in intervalli di 5 metri gli spessori reali della coltre, facendone la media dei valori per ogni intervallo dei dati reali e per i relativi dati estrapolati.

Inoltre nel grafico sono presenti le linee di tendenza delle serie del grafico e i valori del coefficiente R^2 . La linea rossa è la retta a 45° sulla quale i valori degli assi risultano uguali tra loro.

FRANE IN TERRA

Come si può notare dai grafici, si verifica una certa diffusione dei punti sia per la velocità di 160 m/s sia per la velocità di 230 m/s, compensata solo facendo una media dei valori delle classi, in intervalli da 5 metri.

Il coefficiente di determinazione (nel grafico: R^2), proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato, mostra valori molto simili per i due tipi di elaborazione (0,449, per le analisi con velocità di 160 m/s, e 0,4232, per le analisi con velocità di 230 m/s), in una scala che va da 0 a 1.

Il dato migliora significativamente se si considerano i valori medi degli intervalli di 5 metri. Il valore di R^2 si trasforma in 0,9192 per le analisi con velocità di 160 m/s e in 0,929 per le analisi con velocità di 230 m/s.

È da osservare anche l'andamento delle linee di tendenza nei due grafici: per le analisi con velocità di 160 m/s la linea di tendenza dei dati risulta avere, rispetto alla linea

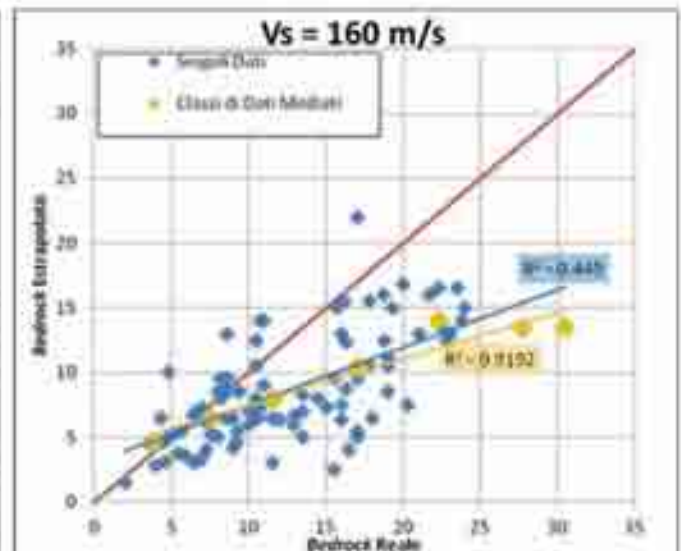


Figura 9 - Grafico degli spessori di coltre ricavati con Vs 160 m/s sugli spessori reali di tutte le frane

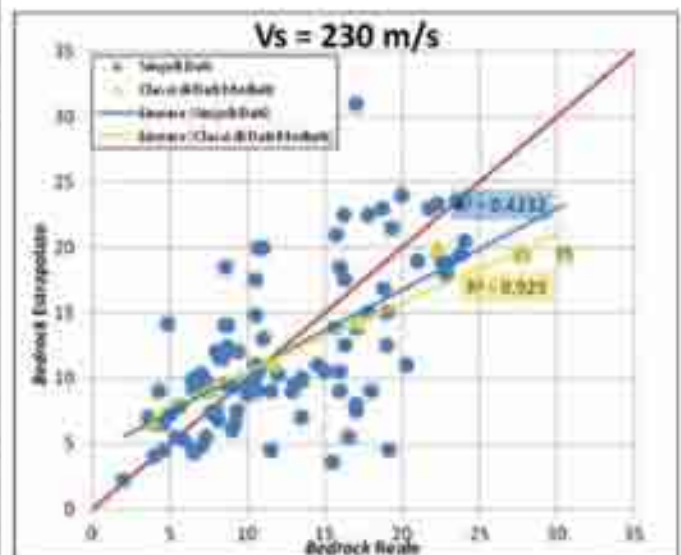


Figura 10 - Grafico degli spessori di coltre ricavati con Vs 230 m/s sugli spessori reali

teorica a 45°, un angolo più ampio rispetto alla linea di tendenza ricavata con le analisi effettuate con la velocità di 230 m/s. Risulta che, imponendo alla coltre la velocità di 160 m/s per le onde S, si ottiene una maggiore sottostima dei valori di profondità, rispetto all'utilizzo della velocità di 230 m/s.

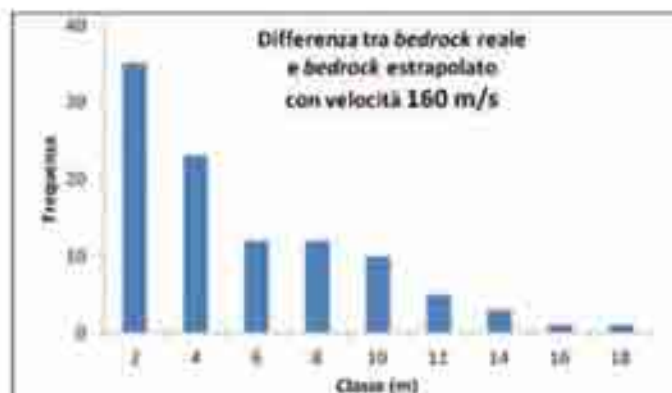


Figura 11 - Istogramma di frequenza dei valori di differenza tra gli spessori di coltre ricavati dal sondaggio e quelli estrapolati con $V_s = 160$ m/s.

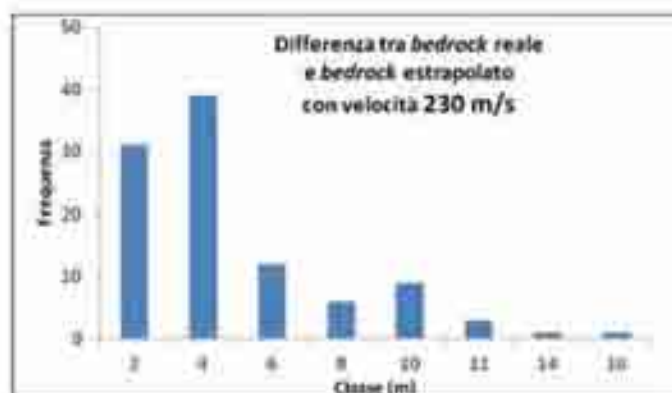


Figura 12 - Istogramma di frequenza dei valori di differenza tra gli spessori di coltre ricavati dal sondaggio e quelli estrapolati con $V_s = 230$ m/s.

Gli istogrammi di frequenza (fig. 11) mostrano come la maggior parte dei dati, il 56,9%, sia affetto da un errore stimato inferiore a 4 metri, mentre il 34,3 % ha un errore inferiore a 2 metri nel determinare la profondità della coltre. Il 9,8 % dei dati ha una differenza tra il dato di profondità del bedrock da sondaggio e quello ricavato dall'interpretazione della misura maggiore a 10 metri. In un solo caso si ottiene un errore superiore a 16 metri.

Per le analisi effettuate imponendo alle onde S una velocità di 230 m/s (fig. 12), nel 68,6 % dei casi si ottengono errori inferiori a 4 metri. Risulta, però, inferiore la percentuale di dati con differenza inferiore a 2 metri (30,4 %) rispetto a quella dei dati con errori compresi tra 2 e 4 metri (38,2 %).

Con errori maggiori a 10 metri sono risultate il 5 % delle analisi, mentre solo un dato ha un errore superiore a 14 metri.

FRANE IN ROCCIA

Sono disponibili pochi dati per le frane in roccia, ma è comunque possibile osservare la tendenza generale delle misure.

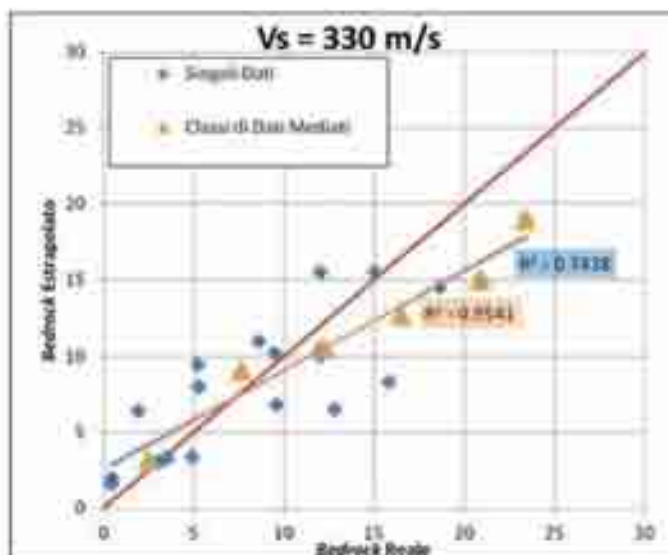


Figura 13 - Grafico degli spessori di coltre ricavati con $V_s = 330$ m/s sugli spessori reali.

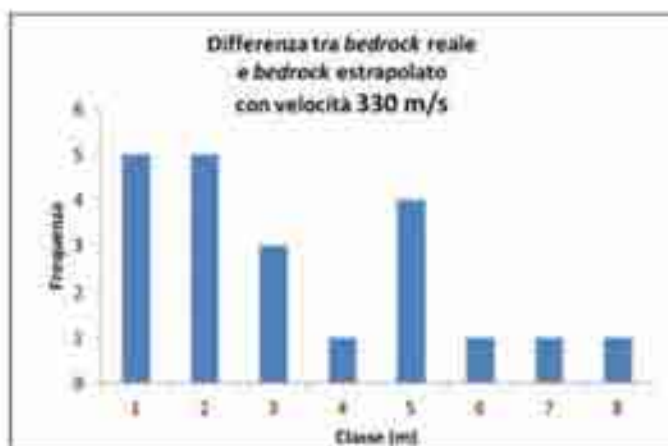


Figura 14 - Istogramma di frequenza dei valori di differenza tra gli spessori di coltre ricavati dal sondaggio e quelli estrapolati con $V_s = 330$ m/s.

Il grafico delle analisi delle misure effettuate sulle frane in roccia, elaborate con velocità delle onde S di 330 m/s, mostra una minor dispersione dei dati rispetto agli altri grafici e valori di R^2 più alti (0,7438). La linea di tendenza si discosta di $10^\circ - 15^\circ$ dalla linea teorica a 45° .

I dati mediati mostrano un valore elevato del coefficiente di determinazione (0,9541) e la linea di tendenza dei dati mediati risulta con la stessa inclinazione della linea di tendenza di tutti i dati.

Dall'istogramma di frequenza (fig. 14), nonostante i pochi dati a disposizione per l'analisi, si nota come il 61,9 % dei risultati abbia un errore inferiore a 3 metri e il 23,8 % abbia un errore stimato minore di 1 metro.

Per tre dati, su un totale di ventuno, risulta un errore superiore a cinque metri, mentre si nota che in quattro casi è stato riscontrato un errore compreso tra 4 e 5 metri.

6. CONCLUSIONI

Lo scopo di questo lavoro di tesi era di ottenere un valore medio di velocità delle onde S nello strato di coltre, per poter applicare la tecnica di sismica passiva dello strumento Tromino[®], come analisi speditiva dei depositi di frana.

Dalle analisi effettuate su centoventisette misure, è risultato un valore medio di velocità delle onde S di 230 m/s, per le frane caratterizzate dal substrato argillitico delle coltri Liguri, e 330 m/s, per le frane caratterizzate dal substrato roccioso arenitico dell'unità Umbro-Marchigiano-Romagnola.

L'esecuzione di ulteriori analisi, applicando questi valori alle misure, ha permesso di ricavare il dato di profondità della coltre. Il confronto dei dati estrapolati con quelli individuati dallo studio dei sondaggi, ha messo in evidenza una miglior stima delle profondità dello strato di coltre nelle frane in roccia. Ciò è evidenziato da una minor diffusione dei dati nel grafico in figura 5.5 e da un valore del coefficiente R2 maggiore rispetto ai dati presentati nelle figure 5.1 e 5.2 riguardanti le frane in terra.

Gli errori di misura per le frane in terra nel 68,6 % dei casi risultano inferiori a 4 metri, mentre per le frane in roccia, nel 61,3 % dei casi mostra errori inferiori a 3 metri. Sono pochi i casi nei quali l'errore supera i 14 metri. L'imprecisione in questi casi è dovuta all'incertezza nella scelta del picco di risonanza riferito al passaggio tra coltre e substrato. È evidente, in alcune misure, come il passaggio non sia caratterizzato dall'aumento repentino della velocità delle onde sismiche. In altre misure, invece, il picco individuato è, probabilmente, riferito ad una variazione delle caratteristiche geomeccaniche del mezzo, non rilevata dal sondaggio a carotaggio continuo.

7. BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- CASTELLARO S., MULARGIA F., BIANCONI L. (2005). *Passive seismic stratigraphy: a new efficient, fast and economic technique*. J. of Geotechnical and J. Environmental Geology, Vol. 3.
- COLI M. (1992) - *Tettonica estensiva dell'Appennino Settentrionale: spunti e problemi*. Studi Geologici Carneti, vol. spec. CROP 1-1A, pp.203-209.
- DALLA POZZA S. (2008) - *Dinamica di frane quiescenti tramite analisi di dati inclinometrici*. Tesi di laurea specialistica in Geoscienze Applicate, Università di Bologna.
- ELTER P. (1990) - *I lineamenti tettonici dell'Appennino a NW delle Apuane*. Boll. Soc. Geol. It., 60, 273-312.
- NAKAMURA Y. (1989): *A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface*, QR of RTRI, Vol. 30, pp. 25-33.
- NOGOSHI M E IGARASHI T. (1970): *On the propagation characteristics of microtremors*, J. Seism. Soc. Japan, Vol. 23, pp. 264-280.
- REUTER K.J. & GROSCURTH J. (1978) - *The pile of nappes in the Northern Apennines*. In: Cloos H. et al. (Eds.) "Alps, Apennines, Hellenides", schweizerbart'sche, Stuttgart: 234-243.
- RICCI LUCCHI F. E ORI G. G. (1985) - *Field excursion D: syn-orogenic deposits of a migrating basin system in the NW Adriatic Foreland*. In: P. H. Allen, P. Homewood e G. Williams (Eds.) "Excursion Guidebook", Foreland Basins Symposium, Fribourg, 137-176.
- RICCI LUCCHI F. (1986) - *The foreland basin system of the Northern Apennines and related clastic wedges: a preliminary outline*. Giornale di Geol., ser. 3, 48 (1), 165-185. Bologna.
- VAI G. B., MARTINI I. P. (1992) - *Anatomy of an Orogen. The Apennines and Adjacent Mediterranean Basins*. Kluwer Academic Publisher.
- F. SCIASCIA (2009) - *Valutazione dello spessore dei corpi di frana tramite sismica passiva tromografica: confronto con stratigrafia a carotaggio continuo*. Tesi di laurea specialistica in Geoscienze Applicate, Università di Bologna.