## COMBINAZIONE DI DIVERSE TECNICHE GEOFISICHE DI SUPERFICIE FINALIZZATE ALLA INDIVIDUAZIONE DELLA SISMO-STRATIGRAFIA PER LA MICROZONAZIONE

M. Compagnoni, S. Munda, F. Pergalani

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, Italia

**Premessa.** Lo scopo del lavoro è la combinazione di diverse tecniche geofisiche di sismica superficiale, finalizzate alla individuazione della sismo-stratigrafia (spessori, velocità delle onde di taglio) per studi di microzonazione sismica (ICMS, 2008) ed analisi di risposta sismica locale (NTC, 2008), in siti di cui non si dispone di conoscenze pregresse di tipo geofisico.

Attualmente, in Regione Lombardia, le indagini geofisiche eseguite in fase di progettazione degli interventi, soprattutto per quelli di importanza ordinaria, sono finalizzate esclusivamente alla valutazione del parametro di normativa  $V_{s30}$ . Tali indagini, seppure considerate esaustive ai fini del rispetto della normativa nazionale vigente, forniscono in termini di sismo-stratigrafia dati che possono essere considerati di bassa attendibilità, soprattutto nei casi in cui si voglia o si debba, per rispetto di prescrizioni legate alla normativa regionale, eseguire analisi più approfondite di livello 3 o di risposta sismica locale. Inoltre le situazioni che presentano un substrato rigido "superficiale" sono piuttosto rare, in quanto tale orizzonte è spesso posto a profondità superiori rispetto a quelle investigabili con le tecniche geofisiche attive in uso abitualmente; del resto anche le tecniche geofisiche passive abitualmente impiegate (tecnica HVSR) forniscono risultati in termini di sismo-stratigrafia piuttosto incerti, soprattutto in quei contesti geologici in cui le caratteristiche dinamiche dei materiali sono poco conosciute.

Per queste motivazioni risulta importante definire con maggior attendibilità la sismostratigrafia di riferimento di un sito e quindi una procedura di indagine tale da soddisfare questi obiettivi, sempre compatibilmente con i tempi e le risorse economiche disponibili.

A tal fine è stato scelto come sito campione un'area posta in Comune di Ghedi (BS), caratterizzata dalla presenza di alternanze di ghiaie da medie a grossolane e sabbie da medie a fini, di origine alluvionale, di spessore di alcune centinaia di metri, nella quale si dispone esclusivamente di un sondaggio a carotaggio continuo.

L'area scelta rappresenta uno scenario geologico e geomorfologico molto diffuso in Regione Lombardia, in quanto tipico dell'alta pianura lombarda a nord della linea delle risorgive: queste tipologie di depositi sono caratterizzati dalla presenza di corpi lenticolari di granulometria medio-fine immersi in materiali grossolani talora ciottolosi, con soggiacenza della falda compresa tra i 10 e i 20 m.

Il lavoro ha la finalità di proporre una metodologia basata sulla combinazione delle diverse tecniche di sismica superficiale, definendo una specifica sequenza delle indagini, al fine di vincolare le elaborazioni successive, compensando l'assenza di conoscenze pregresse, e ottimizzare il risultato finale.

**Indagini effettuate.** Per la caratterizzazione geofisica dell'area di indagine sono state svolte le seguenti indagini geofisiche:

- n. 8 indagini HVSR, utilizzando sismometri a 3 componenti Trillium Compact della Nanometrics (20 s);
- n. 1 indagini MASW, utilizzando 24 geofoni verticali, risonanza 4.5 Hz;
- n. 1 indagini di sismica a rifrazione in onde P, utilizzando 24 geofoni verticali, risonanza 4.5 Hz;
- n. 1 indagine di sismica a rifrazione in onde SH, utilizzando 24 geofoni orizzontali, risonanza 8 Hz;
- n. 2 array sismici, utilizzando gli 8 sismometri Trillium Compact della della Nanometrics a 20 s, con 2 geometrie circolari.

In Fig. 1 sono riportate le ubicazioni di tutte le indagini, ove con i pallini rossi e blu sono indicate le posizioni dei sismometri utilizzati negli array 2D, con la linea azzurra la traccia dello

stendimento di geofoni delle indagini MASW e di sismica a rifrazione e con i triangoli gialli i punti di scoppio:

I sensori a 3 componenti sono stati posizionati secondo due configurazioni circolari, prevedendo un sensore al centro della circonferenza di raggio rispettivamente pari a 60 m (array60) e 120 m (array120), e i 7 sensori restanti equispaziati tra loro, in modo che la distanza tra i due sensori sia pari rispettivamente a 52 m e 104 m. Le acquisizioni sono state effettuate per una durata complessiva di 4 ore con frequenza di campionamento pari a 200 Hz.

Le indagini a rifrazione e MASW sono state acquisite lungo uno stendimento lineare di geofoni equispaziati di 3 m prevedendo 6 punti di energizzazione esterni, posti rispettivamente a 20, 12 e 6 m da ciascun geofono esterno e 3 punti di energizzazione interni, posti tra il 6° e il 7°, il 12° e il 13° e tra il 18° e 19° geofono; la frequenza di campionamento è pari a 2 kHz e la durata delle acquisizioni è pari a 2 s.

**Elaborazione.** Le elaborazioni sono state effettuate secondo una metodologia consolidata, utilizzando codici di calcolo commerciali ed in particolare:

- per le elaborazioni delle acquisizioni attive con tecnica a rifrazione in onde P e SH i software WinSism10 della W-Geosoft (www.wgeosoft.ch) e Reflexw7.5 della Sandmeier software (www.sandmeier-geo.de);
- per le elaborazioni delle acquisizioni attive con tecnica MASW il software WinMasw 5.2 della Eliosoft (www.winmasw.com);
- per le elaborazioni delle acquisizioni passive a stazione singola e ad array 2D il software Geopsy, messo a punto nell'ambito del Progetto Europeo Sesame del 2004 (www.geopsy. org).

La procedura utilizzata prevede come primo passo l'elaborazione delle acquisizioni a stazione singola con tecnica HVSR, al fine di verificare l'omogeneità dell'area investigata e l'eventuale presenza di contrasti di impedenza sismica tali da generare picchi significativi nella curva HV.



Fig. 1 - Ubicazione dei punti di indagine eseguite.

Successivamente si è proceduto all'interpretazione delle acquisizioni attive in termini di sismica a rifrazione in onde P ed onde SH, mediante l'individuazione del primo arrivo, la ricostruzione delle relative dromocrone e la predisposizione di sezioni bidimensionali in termini di velocità  $V_p e V_{SH}$ . Tali indagini hanno permesso di individuare l'intervallo di variabilità dei parametri  $V_p e V_{SH}$  e dello spessore delle diverse unità sismo-stratigrafiche presenti nel primo sottosuolo (profondità d'indagine dell'ordine dei 20 m).

Le acquisizioni attive eseguite in corrispondenza dei punti di energizzazione con sorgente verticale (mazza battente) posti esternamente allo stendimento di geofoni verticali sono state elaborate in termini di spettri di velocità nel dominio fk, dal quale è stato eseguito il picking manuale della curva di dispersione del modo fondamentale delle onde di Rayleigh; la curva di dispersione così individuata è stata considerata attendibile fino a frequenze dell'ordine dei 10-15 Hz. Al fine di verificare la correttezza del picking della curva di dispersione ed escludere l'eventuale inclusione di possibili modi superiori delle onde di Rayleigh, problematica molto frequente, sono state elaborate anche le acquisizioni attive eseguite in corrispondenza dei punti di energizzazione eseguiti con sorgente trasversale posti esternamente allo stendimento di geofoni orizzontali orientati con asse trasversale allo stendimento, al fine di identificare le caratteristiche dispersive delle onde di Love; tali acquisizioni generalmente permettono di ottenere spettri di velocità meglio definiti e meno disturbati dalla presenza dei modi superiori, in quanto il campo d'onda delle onde di Love è meno soggetto a fenomeni di scattering. L'utilizzo dell'analisi delle onde di Love, quando presenti, consente un doppio controllo sull'attendibilità dell'interpretazione data.

Le componenti verticali delle acquisizioni passive eseguite lungo gli array 2D sono state elaborate con metodo fk per individuare la curva di dispersione delle onde di Rayleigh nella banda di frequenza inferiore ai 10-15 Hz; il limite inferiore di attendibilità della curva è controllato dalle caratteristiche strumentali e spaziali dei ciascun array 2D (nel caso in esame la frequenza minima di attendibilità per l'array con raggio pari a 60 m è dell'ordine di 2.0-2.5 Hz, mentre per l'array con raggio pari a 120 m è dell'ordine di 0.7-0.8 Hz).

I tre tratti di curva di dispersione così individuati (MASW, array60, array120) sono stati assemblati in un'unica curva, da invertire mediante processo di inversione, utilizzando come spazio di ricerca gli intervalli di variabilità individuati mediante l'indagine di sismica a rifrazione per il primo tratto delle curva, mentre per gli altri due tratti delle curva sono stati imposti intervalli di variabilità più ampi in termini di spessori e velocità di V<sub>p</sub> e V<sub>SH</sub> (Fig. 2).

In Fig. 2 sono riportati:

- le elaborazioni delle acquisizioni passive a stazione singola eseguite in corrispondenza dei sensori costituenti l'array120 (a1-8), indicate con il colore blu in Fig. 1;
- il grafico delle dromocrone e le sezioni bidimensionali derivate dalle elaborazioni delle acquisizioni di sismica a rifrazione in onde P (b1) e in onde SH (b2) e i relativi campi di variabilità individuati in termini di valori di V<sub>p</sub> e V<sub>SH</sub> e spessori dei vari sismostrati (b3);
- gli spettri di velocità calcolati dalle acquisizioni eseguite con sorgenti esterne allo stendimento di geofoni nelle due configurazioni utilizzate, ovvero sorgenti e geofoni verticali (c1) e sorgenti di taglio e geofoni orizzontali (c2), dai quali è stato desunto, tramite picking manuale, il tratto di curva di dispersione compreso tra 15 e 45 Hz;
- gli spettri di velocità calcolati dalle acquisizioni passive eseguite con i due array circolari con raggio rispettivamente pari a 60 m (d1) e 120 m (d2), dai quali sono stati desunti rispettivamente i tratti di curva di dispersione compresi tra 2-15 Hz e 0.7-2 Hz;
- la curva di dispersione sperimentale derivata dall'assemblaggio dei 3 tratti sopra descritti (e).

**Risultati.** I risultati dell'indagine con HVSR, nei termini di curve HV, mostrano un andamento simile in tutti i punti analizzati, definendo una buona omogeneità stratigrafica nell'area indagata. Inoltre l'assenza di picchi importanti denota una situazione di aumento graduale delle velocità



Fig. 2 – Procedura di elaborazione delle indagini eseguite.

delle onde S con la profondità.

La curva di dispersione sperimentale sopra determinata è stata invertita tramite il software Geopsy assegnando come parametri dello spazio di ricerca i campi di variabilità desunti dall'indagine di sismica a rifrazione; alle profondità superiori a quelle raggiunte dall'indagine di sismica a rifrazione è stato assegnato un campo di variabilità molto ampio in termini di spessori e velocità di V<sub>p</sub> e V<sub>su</sub>.

I risultati ottenuti dal processo di inversione sono riportati in Fig. 3.

In Fig. 3 è riportata la curva di dispersione sperimentale ottenuta dall'elaborazione delle indagini eseguite e le curve di dispersione teoriche ottenute dall'inversione per valori di misfit inferiori a 0.2 (a) e il profilo di velocità in termini di  $V_{sv}$ (b); in c) e d) sono riportati la curva di dispersione e l'andamento delle velocità  $V_{sv}$  migliori con misfit di 0.11.

Il modello così ottenuto presenta una buona affidabilità e pertanto può essere considerato una sismo-stratigrafia di riferimento per l'area investigata.

Il tratto di curva di dispersione individuato nella banda di frequenza compresa tra 15 e 45 Hz tramite acquisizioni attive eseguite con le due configurazioni sopra descritte risulta ben vincolato e permette di definire l'andamento delle  $V_p$  e  $V_{sv}$  nei primi 20-30 m di profondità.

Nel caso in esame tale profondità risulta però inferiore alla profondità del substrato rigido, considerato il substrato di riferimento per gli studi di microzonazione di livello 2 e 3.

Il tratto di curva di dispersione individuato nella banda di frequenza compresa tra 2 e 15 Hz tramite acquisizioni passiva con array60, essendo sostanzialmente orizzontale, fornisce come unica informazione quella di omogeneità in termini di valori di velocità del quarto sismostrato, individuato come ultimo strato dalle indagini di sismica attiva.

Il tratto di curva di dispersione individuato nella banda di frequenza compresa tra 0.7 e 2 Hz tramite acquisizioni passiva con array120, permette di individuare lo spessore del quarto sismostrato poggiante sul substrato rigido.

**Conclusioni.** Il caso in esame rappresenta un esempio di applicazione di indagine sismica combinata in un'area priva di conoscenze geofisiche pregresse, importanti in quanto fondamentali per orientare preliminarmente la configurazione delle indagini geofisiche. In questo caso infatti è stato necessario eseguire 2 array 2D di dimensioni diverse, in quanto la particolare situazione stratigrafica non ha permesso il raggiungimento del substrato rigido con il solo array circolare di raggio 60 m, che, in altre situazioni, potrebbe risultare sufficiente.

Alcune tipologie delle indagini proposte sono da ritenersi sufficientemente consolidate dal punto di vista scientifico e professionale, ma, utilizzate singolarmente, non sempre sono da ritenersi esaustive e in grado di fornire risultati, in termini di sismo-stratigrafia, sufficientemente attendibili; la loro combinazione è in grado di irrobustire i singoli risultati ottenuti e fornire sismo-stratigrafie utili nell'ambito di studi di microzonazione sismica di livello 2 e 3.

La combinazione proposta può essere considerata una possibile procedura da seguire per la caratterizzazione sismica areale, nell'ambito degli studi di microzonazione sismica di livello 2 e 3; in particolare potrebbe essere impiegata per la caratterizzazione delle microzone omogenee individuate negli studi di microzonazione di livello 1 sia per valutare in modo quantitativo la loro omogeneità sia per definirne una sismo-stratigrafia di riferimento da utilizzarsi per la stima dei fattori di amplificazione tramite abachi regionalizzati di livello 2 o studi di livello 3.

I risultati derivanti dall'indagine combinata qui proposta, essendo desunti dall'utilizzo di diverse tecniche di indagine basate su tipologie di onde diverse, possono essere ritenuti sufficientemente robusti e attendibili anche per la caratterizzazione puntuale di un sito e pertanto utilizzabili anche come dati di input in modellazioni numeriche finalizzate alle analisi di risposta sismica locale.

Tale combinazione d'indagini ben si presta ad essere utilizzata per le finalità predette, in quanto i tempi e gli impegni economici richiesti sono compatibili con le risorse disponibili in ambito pianificatorio negli studi di microzonazione sismica di livello 2 e 3 e in ambito progettuale nella progettazione di opere rilevanti e/o strategiche.



Fig. 3 - Risultati delle indagini eseguite.

#### Bibliografia

ICMS; 2008: Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, Italy, 3 vol. and Dvd.

NTC; 2008: Norme Tecniche per le Costruzioni, DM 14 gennaio 2008, Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma (www.cslp.it)

SESAME; 2001-2004: Site Effects Using Ambient Excitations. http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm.

# VALUTAZIONE DELLE FRANE SISMOINDOTTE PER LA MICROZONAZIONE

### M. Compagnoni, F. Pergalani

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, Italia

**Premessa.** Nell'affrontare la valutazione del rischio associato all'attivazione di frane sismoindotte è possibile seguire due diversi tipi di approccio, a seconda che si voglia considerare un singolo evento franoso oppure un'intera area: si parla rispettivamente di analisi puntuale e di analisi areale.

Il percorso metodologico proposto parte da un approccio di tipo areale per arrivare poi ad un approccio di tipo puntuale una volta identificate le aree più pericolose. L'analisi di tipo areale è finalizzata alla predisposizione di mappe che forniscano un quadro complessivo delle condizioni di stabilità per tutto il territorio e alla identificazione delle aree più critiche. Questo consente poi di classificare i vari movimenti franosi in base al loro livello di potenziale pericolosità, informazione da impiegarsi poi per analisi successive di maggior dettaglio a livello puntuale. Tale riconoscimento passa attraverso uno studio geologico e geomorfologico a scala opportuna (1:5.000 – 1:10.000), il cui risultato può essere identificato con la predisposizione di: una carta geologica, una carta geomorfologica, una carta litotecnica ed infine di una carta delle frane e delle aree potenzialmente franose, utilizzando sia dati esistenti, sia analisi delle foto aeree, sia rilievi di campagna; una schedatura di tali aree al fine di immagazzinare i dati caratteristici; un controllo sull'evoluzione dei movimenti franosi, sia con tecniche tradizionali, sia con tecniche innovative (quali l'interferometria SAR).

A seguito della caratterizzazione ed identificazione dei movimenti franosi, l'analisi delle loro condizioni di stabilità è effettuata attraverso la valutazione dei coefficienti di sicurezza in condizioni statiche e pseudo-statiche, nonché tramite una stima speditiva degli spostamenti potenzialmente indotti dal sisma.

Le fasi, i dati e le metodologie necessarie all'esecuzione di analisi areali possono essere così schematizzati:

- analisi dei documenti storici, che possono fornire una prima indicazione dell'evoluzione temporale dei movimenti franosi;
- analisi statistica delle caratteristiche rilevate, al fine di effettuare una prima individuazione areale della pericolosità del territorio;
- individuazione o stima della profondità delle superficie di scivolamento delle frane in atto;
- stima speditiva dei parametri geotecnici necessari alle analisi numeriche preliminari;
- individuazione dei parametri caratteristici del moto sismico atteso nell'area in esame:
- analisi di stabilità speditive: stima del coefficiente di sicurezza (Fs) in condizioni statiche, individuazione del coefficiente di accelerazione orizzontale critica ( $K_c$ ) tramite approcci pseudo-statici, valutazione approssimata degli spostamenti sismo-indotti mediante correlazioni empiriche calibrate statisticamente.

A livello areale, l'analisi di stabilità è condotta suddividendo artificialmente l'area di riferimento in un numero finito di celle elementari, ciascuna ipotizzata indipendente dalle celle contigue. Tale operazione è di norma condotta grazie al supporto di un opportuno Sistema Informativo Geografico (GIS).

La valutazione dei fattori di sicurezza Fs è effettuata utilizzando il metodo del pendio indefinito basato sul concetto dell'equilibrio limite (Graham, 1984). L'analisi è effettuata lungo una sezione, assumendo per la stessa uno spessore unitario, per tale motivo le forze agenti sono considerate parallele alla superficie di scorrimento.

Il valore del fattore di sicurezza è calcolato attraverso la seguente equazione:

$$Fs = \frac{c' \cdot \cos \beta + (\gamma - m \cdot \gamma_w) \cdot z \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta}$$

J

dove: c'= coesione efficace;  $\gamma$  = peso di volume del solido; m = rapporto tra il livello delle falda e spessore del suolo  $z_w/z$ ;  $z_w$  = spessore del livello della falda dalla superficie di scorrimento; z = spessore del blocco analizzato;  $\gamma_w$  = peso di volume dell'acqua;  $\beta$  = angolo di inclinazione della superficie di scivolamento;  $\phi'$  = angolo di attrito efficace. In questa fase vengono evidenziate le aree caratterizzate da diverso valore di Fs; in particolare le aree con Fs minore dell'unità sono considerate critiche e pertanto dovranno essere analizzate con maggior dettaglio.

L'analisi in condizioni pseudo-statiche è effettuata, attraverso la definizione del coefficiente di accelerazione orizzontale critica  $K_c$  (Sarma, 1979; Luzi e Pergalani, 1996, 1999, 2000), definito come il valore di accelerazione orizzontale che porta il valore di Fs all'unità. Il coefficiente di accelerazione orizzontale critica  $K_c$  è calcolato attraverso la seguente equazione:

$$Kc = \frac{c'/\cos^2\beta + (\gamma - m \cdot \gamma_w) \cdot z \cdot \tan\phi' - \gamma \cdot z \cdot \tan\beta}{\gamma \cdot z + \gamma \cdot z \cdot \tan\beta \cdot \tan\phi'}$$

In questa fase vengono evidenziate le aree caratterizzate da diverso valore di  $K_c$ .

Utilizzando tali valori, è possibile definire gli spostamenti attesi D, mediante relazioni empiriche che correlano D con il valore di  $K_c$  e con un parametro correlato alla severità attesa del moto sismico.

Tra le relazioni empiriche disponibili in letteratura, si citano quelle proposte da Ambraseys e Srbulov (1995), Jibson *et al.* (2000), Crespellani *et al.* (1998), Romeo (1998) e Luzi e Pergalani (2000). In questo lavoro si suggerisce di adottare la formula di Jibson *et al.*, di impiego molto comune, con la seguente espressione:

$$log(D) = 1,521 log I_a - 1,993 log K_c - 1,546$$

ove D è lo spostamento del versante in cm,  $I_a$  è l'intensità di Arias (1970) in m/s e  $K_c$  è il coefficiente di accelerazione critica orizzontale. Utilizzando queste relazioni possono essere dunque evidenziate le aree caratterizzate da diverso valore di spostamento atteso D; in particolare le aree con D maggiore di 2 cm sono considerate critiche e pertanto dovranno essere analizzate con maggior dettaglio.

**Un caso di applicazione di analisi areale.** L'analisi areale è stata eseguita lungo il tratto di lunghezza circa 10 km e larghezza circa 1 km, posto tra gli abitati di Pontechiusita (vicino Preci - PG) e Villa di Serravalle (Vicino Norcia - PG). L'indagine è stata condotta a scala di dettaglio (1:5.000) e sono stati acquisiti i dati di base e le relative mappe: carta geologica, carta geomorfologica, carta litotecnica, carta delle frane, modello digitale del terreno con passo 5 m X 5 m e carta dell'acclività.

A ciascuna unità litotecnica di copertura individuata nella carta litotecnica sono stati associati i seguenti parametri geotecnici, dedotti da indagini effettuate (Tab. 1):

Unità litotecnica	Descrizione	Parametri geotecnici			
		γ <b>(kN/m³)</b>	φ <b>(°)</b>	c' (kPa)	
L5a	Materiali granulari sciolti o poco addensati a prevalenza ciottolosa	19.0	38	0	
L5b	Materiali granulari sciolti o poco addensati potenzialmente franosi	18.5	30	0	
L5c	Materiali granulari sciolti o poco addensati a prevalenza limo-argillosa o argillo-limosa	19.5	26	5	
L5d	Aree potenzialmente franose	24.0	40	100	
L5f	Materiali granulari sciolti o poco addensati franosi	17.6	25	0	

Tab. 1 - Parametri geotecnici.



Fig. 1 – Carta degli Fs in condizioni asciutte (a); carta degli Fs in condizioni bagnate (b); carta dei Kc in condizioni asciutte (c); carta dei Kc in condizioni bagnate (d).

Alle unità litotecniche del substrato non sono stati associati parametri geotecnici, in quanto tali unità sono state considerate stabili e quindi non oggetto di analisi.

Dai dati di base rasterizzati sono state eseguite le analisi di stabilità dei versanti tramite i metodi speditivi (1D) precedentemente citati, che conducono alla stima del fattore di sicurezza *Fs* in condizioni statiche asciutte (Fig. 1a) e bagnate (Fig. 1b) e del coefficiente di accelerazione critico  $K_c$ , mediante analisi pseudo-statiche in condizioni asciutte (Fig. 1c) e bagnate (Fig.1d).

Le analisi sono state condotte considerando uno spessore medio delle coperture potenzialmente instabili pari a 10 m, coerentemente con quanto desumibile da dati geomorfologici; le condizioni bagnate si riferiscono, cautelativamente, ad un livello della falda posto a 5 m dal piano campagna.

Per il calcolo dell'intensità di Arias nella relazione di Jibson el al. sopra riportata, si è fatto uso della relazione di Sabetta e Pugliese (1996), sotto riportata:

$$log(I) = 0.729 + 0.911 M - 1.818 log(R^2 + 5.3^2)^{\frac{1}{2}} + 0.244 S_1 + 0.139 S_2 \pm 0.397$$

dove *M* è la magnitudo, *R* è la distanza epicentrale (km),  $S_{1,2}$  le variabili booleane che denotano le condizioni di sito, in particolare  $S_1=1$  e  $S_2=0$  per suoli (*Vs* tra 400-800 m/s) con profondità < 20 m,  $S_1=0$  e  $S_2=1$  per suoli con profondità > 20 m,  $S_1=S_2=0$  per le rocce (*Vs*>800 m/s). *I* è un parametro di intensità del moto sismico (in cm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>) espresso come  $I = fa^2(t)dt$ , essendo a(t)l'accelerazione. Per passare da *I* all'intensità di Arias *Ia* da introdurre nella relazione di Jibson et al., si usa la relazione  $Ia=(\pi/2g)\cdot I$ , dove *g* è l'accelerazione di gravità.

Per scegliere valori idonei da inserire nella relazione di Sabetta e Pugliese, si può fare riferimento alle analisi di disaggregazione delle analisi di pericolosità sismica. Con riferimento al periodo di ritorno Tr=2475 anni (scelto come rappresentativo, per il caso in esame) e periodo di vibrazione T = 1s, i valori di M e R riportati nelle mappe di disaggregazione per il comune di Preci e per il comune di Norcia sono i seguenti: Preci: magnitudo 6.4 – distanza epicentrale 6.5 km; Norcia: magnitudo 6.7 – distanza epicentrale 7.5 km. Considerando inoltre nella relazione di Sabetta e Pugliese  $S_i=1, S_2=0$ , si ottengono i seguenti valori: Ia = 2.13 m/s (Preci) e Ia = 3.39 m/s (Norcia). I valori attesi dello spostamento di versante D (cm) indotto, sono illustrati in Fig. 2, in condizioni asciutte (a) e bagnate (b).

Dalle figure si possono evincere le zone che possono essere soggette con maggiore probabilità a fenomeni di instabilità dei versanti. Nel caso in esame, la zona a maggior criticità risulta quella nei pressi dell'abitato di Montaglioni. Per tale motivo quest'area è stata scelta come esempio per l'esecuzione di analisi puntuali di dettaglio.

Analisi puntuale: il caso della frana di Montaglioni. L'area è caratterizzata da alternanze di sabbie ghiaiose e argille limose, al di sotto dei quali sono presenti marne compatte.

Per quel che riguarda i parametri di resistenza (coesione ed angolo d'attrito), sono stati impiegati i risultati delle prove di taglio di laboratorio effettuate (prove triassiali standard e di taglio diretto), selezionando – nei casi di inevitabili discrepanze – valori sempre a favore di sicurezza.

L'elaborazione dei dati geofisici di sito effettuati (sismica a rifrazione) ha condotto a definire due diversi corpi di frana (Frana 1 e Frana 2), caratterizzati dalle geometrie e dalle successioni

Parametro	Valori primo strato (0-12.5m)	Valori secondo strato (12.5-18.5m)	Valori terzo strato (18.5-27m)	
Peso di volume (kN/m³)	19.6	17.6	19.6	
Angolo di attrito efficace (°)	30	25	40	
Coesione drenata (kPa)	0.0	0.0	0.0	

Tab. 2 - Parametri geotecnici utilizzati nelle analisi statiche e pseudo-statiche.



Fig. 2 – Valori di D in condizioni asciutte (a); valori di D in condizioni bagnate (b).

stratigrafiche schematizzate in Fig. 3a. La Frana 1 è caratterizzata da una profondità della superficie di scivolamento massima di circa 20 m, la Frana 2 è caratterizzata da una profondità massima della superficie di scivolamento pari a circa 10 m.

Analisi statiche e pseudo-statiche. In conformità al percorso metodologico precedentemente delineato, i due corpi di frana sono stati analizzati applicando il metodo di Bishop (1955) nelle sue versioni statica e pseudo-statica. I parametri geotecnici impiegati per il materiale nelle analisi sono riportati in Tab. 2. Le analisi all'equilibrio limite in condizioni statiche hanno fornito i risultati, in termini di Fs, riportati in Tab. 3. Sono state prese in considerazione non solo condizioni di terreno asciutto, ma anche in presenza d'acqua. In questo secondo caso si è resa necessaria l'introduzione di un coefficiente di pressione neutra  $r_u$ , che quantifica forfettariamente (ossia come frazione dello sforzo verticale totale), al variare del livello di falda, le pressioni neutre che si sviluppano lungo la superficie di scorrimento in condizioni di collasso.

Successivamente, si è passati all'esecuzione delle analisi pseudo-statiche, introducendo i valori di  $K_{\mu}=0.169$  e  $K_{\nu}=0.085$  conformi con la normativa italiana per un periodo di ritorno

Condizione	Frana 1	Frana 2	
Statica in assenza di falda	1.47	1.86	
Statica con risalita di falda (r <sub>u</sub> =0.20)	1.14	1.45	
Statica con risalita di falda (r <sub>u</sub> =0.40)	0.82	1.04	

Tab. 3 - Metodo statico: valori di Fs ottenuti dalle analisi effettuate.

Condizione	Frana 1	Frana 2	
Statica in assenza di falda	0.98	1.20	
Statica con risalita di falda (r <sub>u</sub> =0.40)	-	0.95	
Statica con risalita di falda (r <sub>u</sub> =0.80)	-	-	

Tab. 4 - Metodo pseudo-statico: valori di Kc ottenuti dalle analisi effettuate.

di 2475 anni (Tab. 4). Come visibile in Tab. 4, si è proceduto ad effettuare le analisi pseudostatiche solo per quei casi caratterizzati da valori di Fs in condizioni statiche > 1.3; per quei casi con Fs in condizioni statiche < 1.3 sono state eseguite direttamente le analisi pseudo-dinamiche (metodo di Newmark, 1965).

Analisi pseudo-dinamiche con metodo di Newmark. Una volta individuati i fattori di sicurezza con le analisi statiche e pseudo-statiche, si è poi proceduto all'esecuzione di analisi pseudo-dinamiche mediante il metodo di Newmark. Tutte le analisi pseudo-dinamiche sono state effettuate in condizioni asciutte, applicando 7 accelerogrammi registrati e caratteristici della zona, scelti seguendo le indicazioni presenti nelle NTC (2008), per le due le frane in

Tab. 5 - Valori dello spostamento atteso all'applicazione dei 7 accelerogrammi e relativa media.

Frana 1	102x	112y	121y	304x	440x	440y	456x	MEDIA
Spostamento (m)	0.72	0.17	0.11	0.26	0.24	0.23	0.02	0.25
Frana 2	102x	112y	121y	304x	440x	440y	456x	MEDIA
Spostamento (m)	0.24	0.02	0.002	0.02	0.03	0.04	0.0	0.05



Fig. 3 – Geometria dei corpi di frana analizzati (a); spostamento relativo della Frana 1(b); spostamento relativo della Frana 2 (c).

esame, considerando inclinazioni del piano di scivolamento pari rispettivamente a  $18^{\circ}$  e  $16^{\circ}$  (valori calcolati come media ponderata sulle superfici di scivolamento imposte nelle analisi precedenti) e valori dell'angolo di attrito pari rispettivamente a  $25^{\circ}$  e  $30^{\circ}$ . I risultati ottenuti sono rappresentati nella Fig. 3, per la frana 1 (b), per la frana 2 (c) e riassunti in Tab. 5.

#### Bibliografia

- Ambraseys N., Srbulov M.; 1995: Earthquake induced displacement of slopes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 14: 59-71.
- Arias A.; 1970: A measure of earthquake intensity. Seismic design for nuclear power plants. R. J. Hansen ed., Massachusetts Institute of Technology.
- Bishop AW; 1955: The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, 5: 7-17.
- Crespellani T., Madiai C., Vannucchi G.; 1998: Earthquake destructiveness potential factor and slope stability. Géotechnique, 48 (3): 411-9.
- Graham J.; 1984: *Methods of stability analysis. Slope Instability*, ed. D. Brunsen & D.B. Prior. Wiley and Sons, New York, 523-602.
- Jibson RW., Harp EL., Michael JA.; 2000: A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. Eng. Geol. 58, 271-289.
- Luzi L., Pergalani F.; 1996: Application of statistical and GIS techniques to slope instability zonation (1:50.000 Fabriano geological map sheet), Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier Science, vol. 15: 83-94.
- Luzi L., Pergalani F.; 1999: Slope instability in static and dynamic conditions for urban planning: the "Oltre Po Pavese" case history (Regione Lombardia-Italy), Natural Hazard, 20: 57-82
- Luzi L., Pergalani F.; 2000: A correlation between slope failures and accelerometric parameters: the 26 September 1997 earthquake (Umbria-Marche, Italy), Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier Science, vol. 20: 301-313.
- Newmark NM.; 1965: Effects of earthquake on dams and embankments. Géotechnique, 23.
- NTC, Norme Tecniche per le Costruzioni; 2008: *DM 14 gennaio 2008*, Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma (www.cslp.it).
- Romeo R.; 1998: Seismically-induced landslide displacements: a predictive model. Proc. XXIII General Assembly of European Geophysical Society, Nice
- Sabetta F., Pugliese A.; 1996: Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motion. Bull. Seism. Soc. Am., vol. 86, 2: 337-352.
- Sarma SK.; 1979: *Stability analysis of embankments and slopes*. Journal of the geotecnical engineering division. ASCE, vol. 105, No. GT 12.