

Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della stabilità dei pendii in condizioni sismiche: il caso del versante di Spinello

C. Madiai¹
**J. Facciorusso¹, G. Vannucchi¹, L.
 Martelli²**

*1 Università di Firenze – Dip. Ingegneria Civile e Ambientale
 2 Regione Emilia-Romagna – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli*

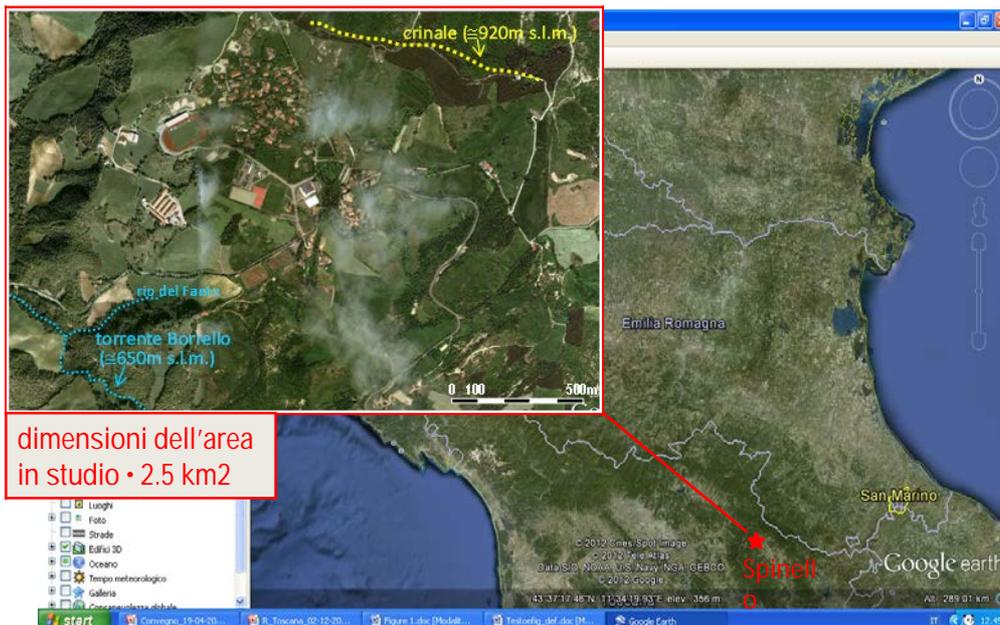


Analisi di dettaglio



Il versante di Spinello

Spinello - Comune di S. Sofia (FC) - Alto Appennino Romagnolo-Forlivese



3

Il versante di Spinello

- o situato in area ritenuta di relevante valore socio-economico
- o potenzialmente instabile e già soggetto a perimetrazione all'interno del Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli sulla base di rilievi geologici di dettaglio e sommarie informazioni geotecniche



1. esecuzione di indagini geotecniche e geofisiche integrative
2. ricostruzione di modelli geologici e geotecnici affidabili
3. analisi di risposta sismica locale e di stabilità del versante



identificazione delle zone a differente risposta sismica e perimetrazione delle aree a rischio di frana

4



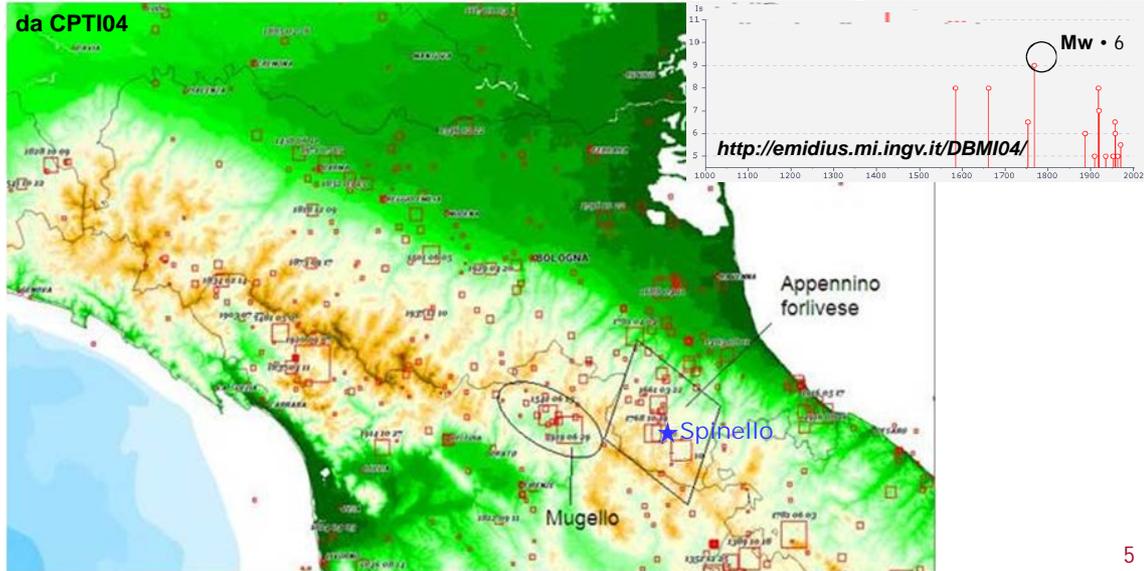
Sismicità dell'area

Sismicità medio-alta (terremoti storici con IMCS=IX) – Zona sismica 2

Zona sismogenetica (zonazione "ZS9"): 914 (Mw = 6.14)

Mw da disaggregazione: 4.5 ÷ 5.0 (50%); 5.5 ÷ 6.0 (10%) (R• 10 km)

Accelerazione massima su suolo rigido, ag: 0.209 g (Tr=475 anni)



5



Geologia dell'area

Centro abitato

Centro sportivo

Movimenti in atto (o recenti)

Maggiori spostamenti

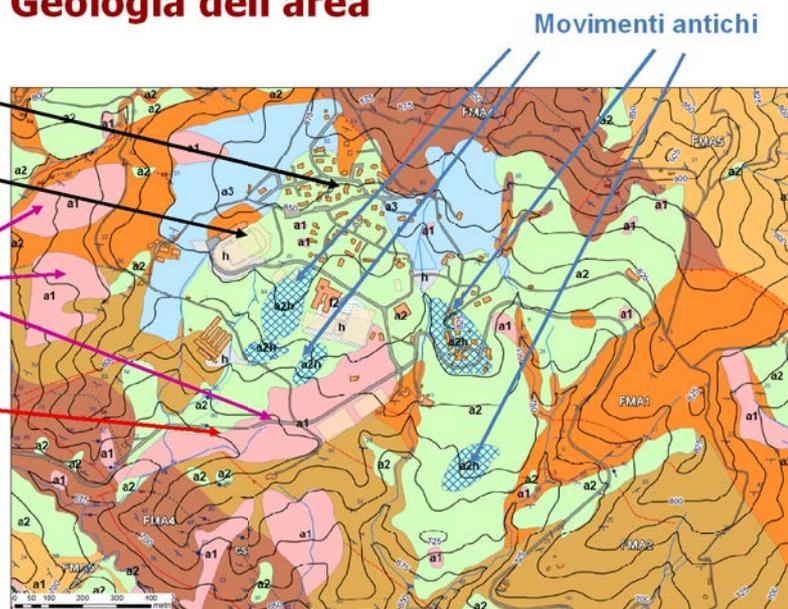
LEGENDA

FMA: formazione marnoso-arenacea (substrato)

a : coltre detritica (spessore fino a 30 m) di materiale argilloso-sabbioso eterogeneo ed

Coltre detritica di origine gravitativa
Coltre detritica di altra natura (a3)

Frane attive (a1)
Frane quiescenti (a2)



(Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli)

6



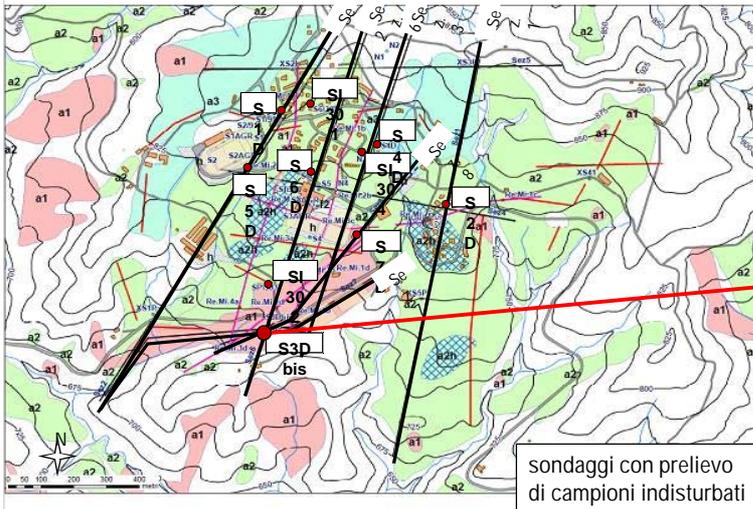
Caratterizzazione geotecnica – Indagini integrative 2004-2008

PROVE IN SITO

- 19 sondaggi geotecnici (51 campioni)
- 27 prove SPT
- 8 prove Lefranc
- 56 prove di sismica a rifrazione
- 15 prove Re.Mi.
- 2 prove down-hole

PROVE DI LAB.

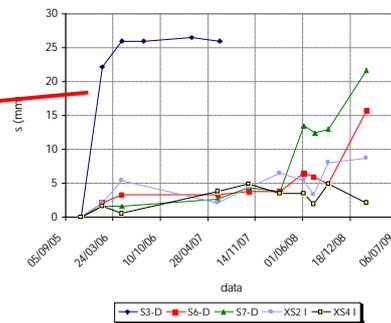
- 1 espansione laterale libera
- 2 edometriche
- 10 limiti di Atterberg
- 6 taglio diretto (TD)
- 3 triassiali (TxCIU)
- 5 colonna risonante (RC)



sondaggi con prelievo di campioni indisturbati

Monitoraggio:

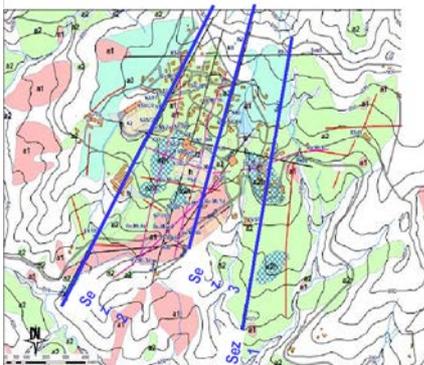
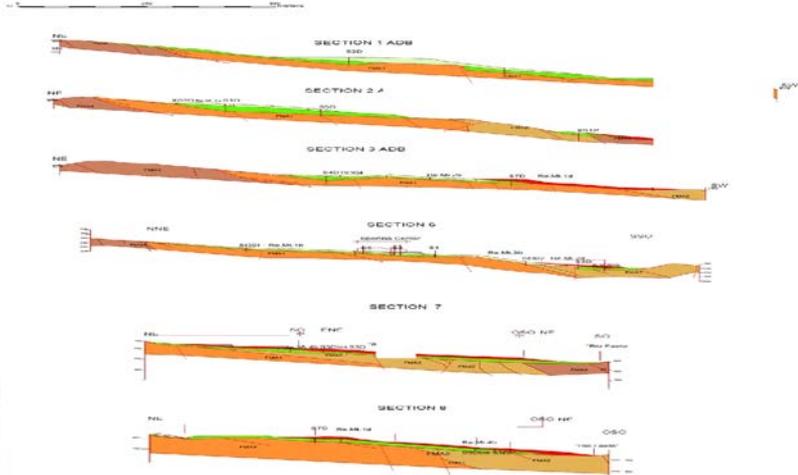
- 8 piezometri
- 12 inclinometri



Sezioni analizzate

Criteri di scelta delle sezioni:

- interessare le diverse zone dell'area, in particolare quelle con movimenti attivi
- seguire le direzioni di massima pendenza
- utilizzare al meglio le informazioni esistenti



A - deposito di versante instabile (attivo)

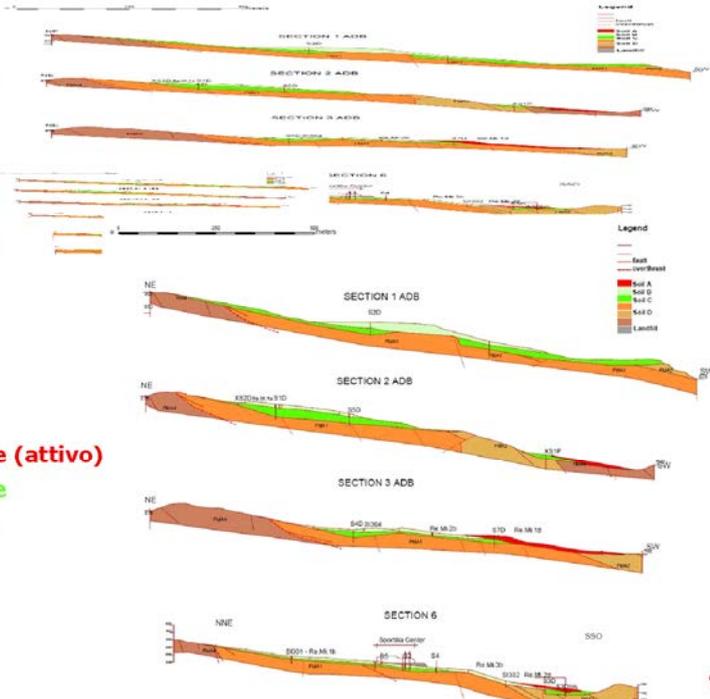
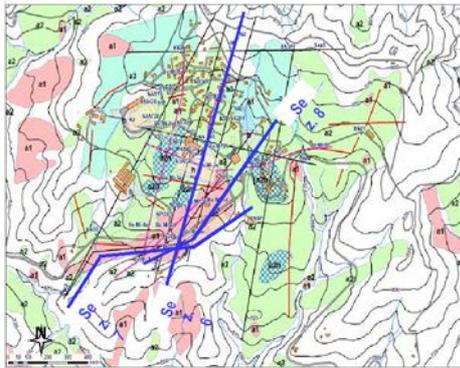
B - deposito di versante instabile

C - deposito di versante stabile

D = substrato

riporto antropico

Sezioni analizzate



A - deposito di versante instabile (attivo)

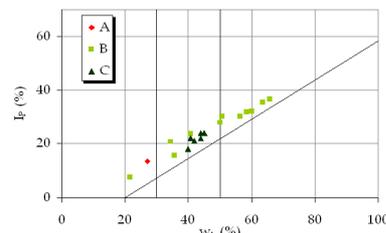
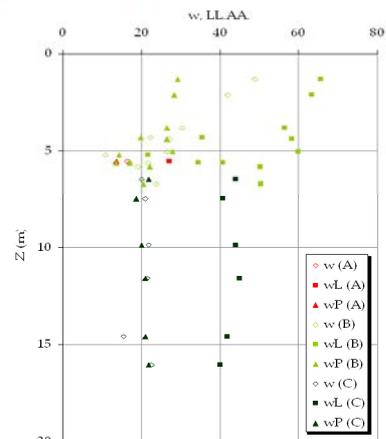
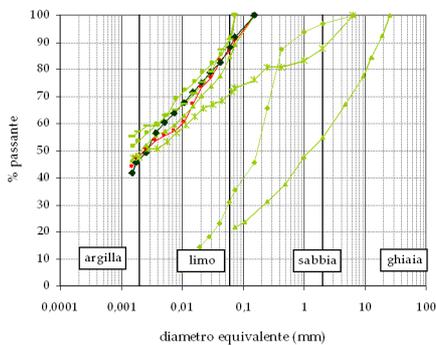
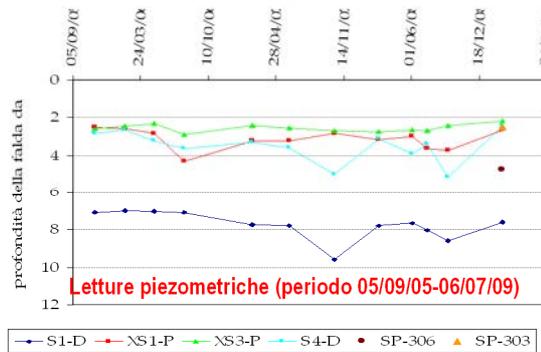
B - deposito di versante instabile

C - deposito di versante stabile

D = substrato

riporto antropico

Caratterizzazione geotecnica - Indagini integrative 2004-2008



Caratterizzazione geotecnica – Indagini integrative 2004-2008

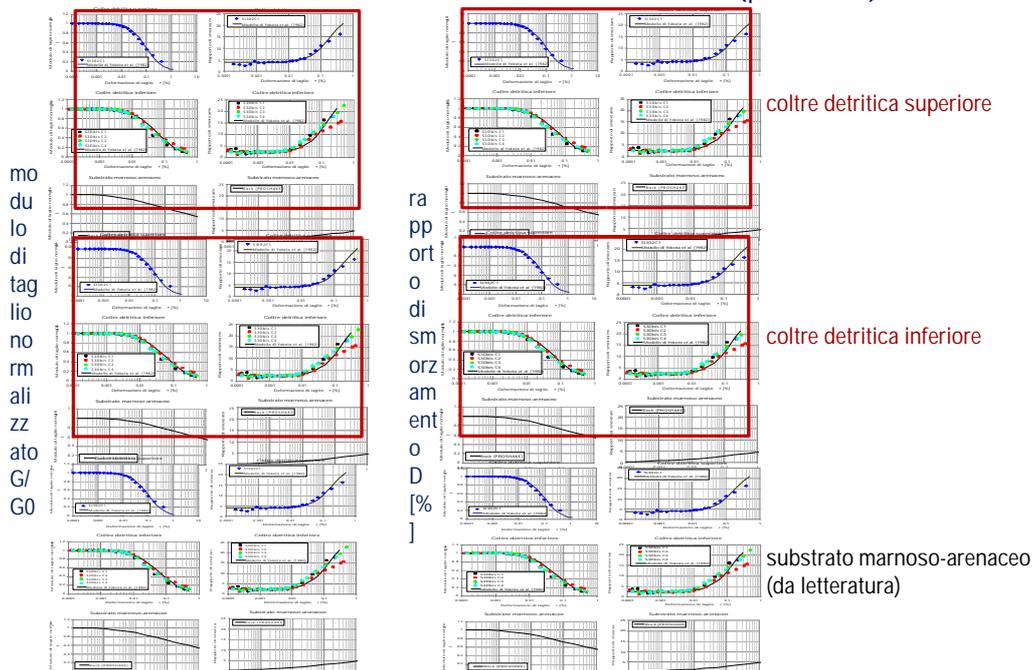
Parametri meccanici in condizioni statiche (prove TD e TxCIU)

Sond. Camp.	prof. (m)	descrizione	prova	Resistenza di picco			Resistenza residua		
				C'P (kPa)	tan ϕ P	ϕ P (°)	C'R (kPa)	tan ϕ R	ϕ R (°)
S3 D CI1	5.5	Argilla marnosa (A)	TD	35	0.433	23.4	3	0.240	13.5
S1 D CI1	5.6	Argilla marnosa (B)	TD	32	0.452	24.3	7	0.221	12.5
S4 D CI1	5.6	Argilla marnosa (B)	TD	12	0.548	28.7	1	0.260	14.6
S6 D CR1	4.3	Argilla sabbiosa (B)	TD	20	0.394	21.5	1	0.217	12.2
S7 D CI1	6.7	Argilla limosa (B)	TD	44	0.433	23.4	4	0.238	13.4
S2 D CI1	5.2	Sabbia fine limosa (B)	TD	6	0.589	30.5	0	0.338	18.7
S5 D CI1	7.5	Argilla marnosa (B/C)	TD	24	0.481	25.7	0	0.239	13.5
S3 Dbis CI2	11.6	Limo argilloso (C)	Tx CIU	13	0.577	30.0	-	-	-
S3 Dbis CI3	14.6	Limo argilloso (C)	Tx CIU	2	0.650	33.0	-	-	-
SI 302 CI1	5.05	Argilla limosa (B)	Tx CIU	20	0.498	26.5	-	-	-

11

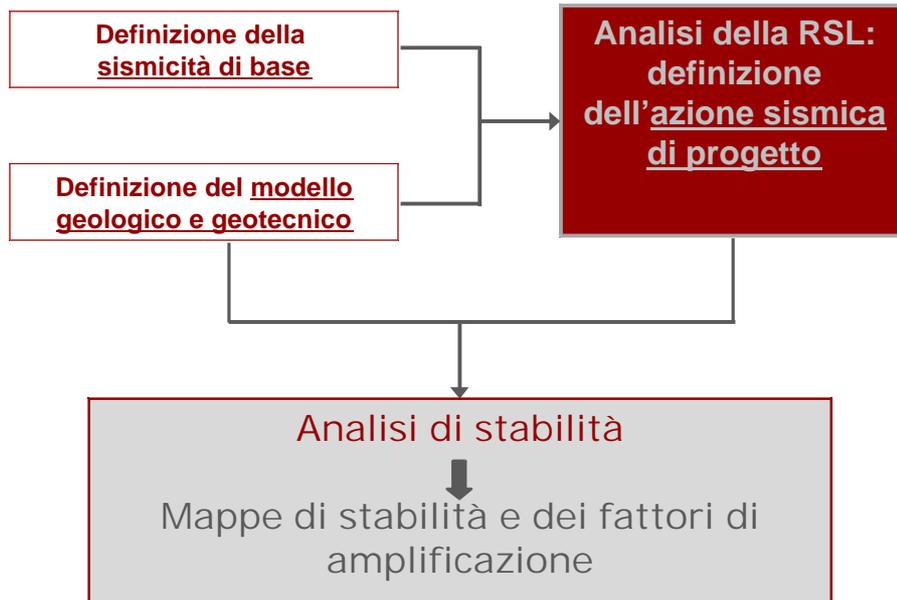
Caratterizzazione geotecnica – Indagini integrative 2004-2008

Parametri meccanici in condizioni dinamiche e cicliche (prove RC)



12

Procedura di analisi



13

Analisi di stabilità

- ü **Condizioni statiche (pre-sismiche):**
 - § metodi all'equilibrio limite

- ü **Condizioni dinamiche (sismiche):**
 - § metodi pseudostatici (equilibrio limite)
 - § metodo dinamico degli spostamenti (Newmark, 1965)

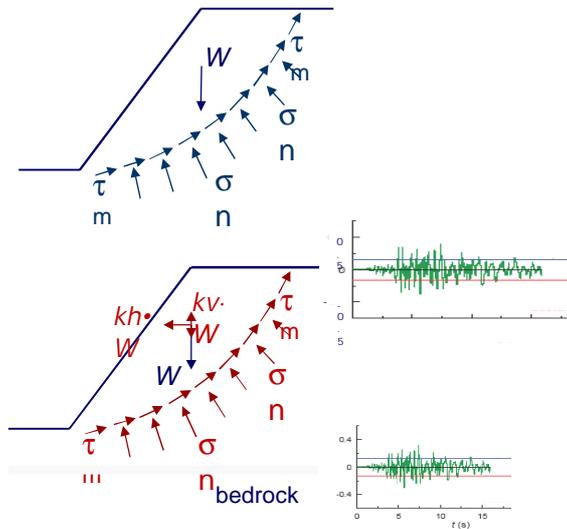
- o **Condizioni post-sismiche • pre-sismiche (statiche) essendo $\gamma_c \cdot \gamma_v$**

parametri di resistenza assunti nella modellazione

<i>Terreno</i>	<i>c' [kPa]</i>	<i>φ' [°]</i>
A	2	13.3
B	14	19
C	8	31.5

14

Metodi all'equilibrio limite



CONDIZIONI STATICHE

CONDIZIONI SISMICHE
(metodo pseudostatico)

azione sismica schematizzata
come forza statica con:

- componente orizzontale khW
- componente verticale kvW

Le condizioni di stabilità sono valutate in termini di **FATTORE DI SICUREZZA**:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad \begin{array}{l} \tau_f : \text{resistenza al taglio } (=c' + \sigma_n' \tan\phi') \\ \tau_m : \text{sforzo di taglio mobilitato} \end{array}$$

15

Verifiche di stabilità in condizioni sismiche Metodo pseudostatico

Per le analisi pseudostatiche il coefficiente sismico orizzontale **kh** e verticale **kv** sono stati assunti (NTC08) rispettivamente pari:

$$Kh = \beta_s \square a_{max} / g \quad \text{e} \quad Kv = \square 0.5 \square Kh$$

**a_{max} : accelerazione massima (in g)
ricavata dalle analisi della
risposta sismica locale**

β_s : coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima

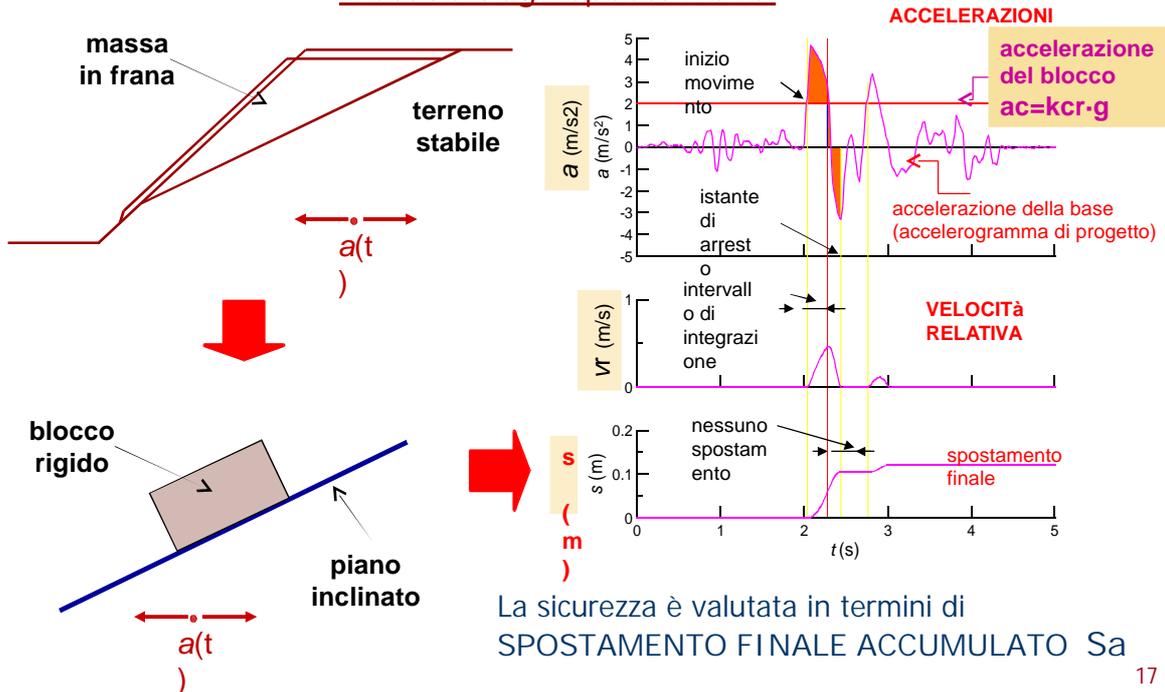
a_g : accelerazione massima su terreno rigido di riferimento (**0.209 g**)

	Categoria di sottosuolo	
	A	B,C,D, E
	β_s	β_s
$0.2 < a_g(g) < 0.4$	0.30	0.28
$0.1 < a_g(g) < 0.2$	0.27	0.24

16

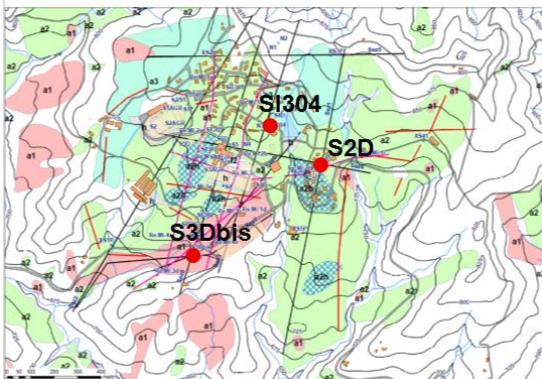
Verifiche di stabilità in condizioni sismiche

Metodo degli spostamenti



17

Analisi di RSL: risultati



Sono state effettuate **analisi di RSL 1D** considerando:

§ **3 verticali** rappresentative di differenti situazioni stratigrafiche

§ **5 accelerogrammi** di progetto spettrocompatibili

	Accelerogramma					Media	D.A.L. 112/2007	NTC 08
	M1	M2	M3	M4	M5			
S2D								
FAPGA = PGAS/ag	1.45	1.43	1.32	1.26	1.32	1.36	1.5	Cat B
FARSI = RSIS/RSig [0.1-0.5 s]	1.48	1.38	1.43	1.45	1.42	1.43	1.5	-
S3Dbis								
FAPGA = PGAS/ag	1.86	1.71	1.68	1.26	1.50	1.60	2.0	Cat. E
FARSI = RSIS/RSig [0.1-0.5 s]	1.81	1.62	1.72	1.73	1.70	1.72	1.9	-
S1304								
FAPGA = PGAS/ag	1.86	1.71	1.68	1.26	1.50	1.60	2.0	Cat. E
FARSI = RSIS/RSig [0.1-0.5 s]	1.81	1.62	1.72	1.73	1.70	1.72	1.9	-

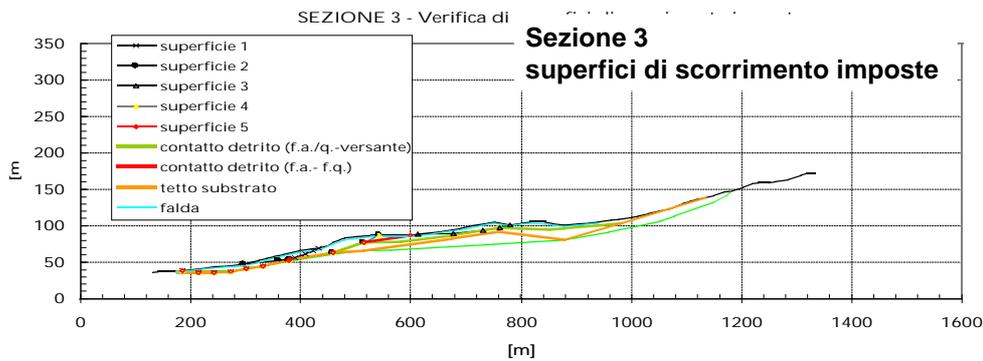
$$RSI = \int_a^b PSV(T, \xi) dT$$

RSIS : sommità del deposito

RSI_g : terreno di riferimento
PSV(T, ξ): spettro di risposta elastico in (pseudo)velocità

18

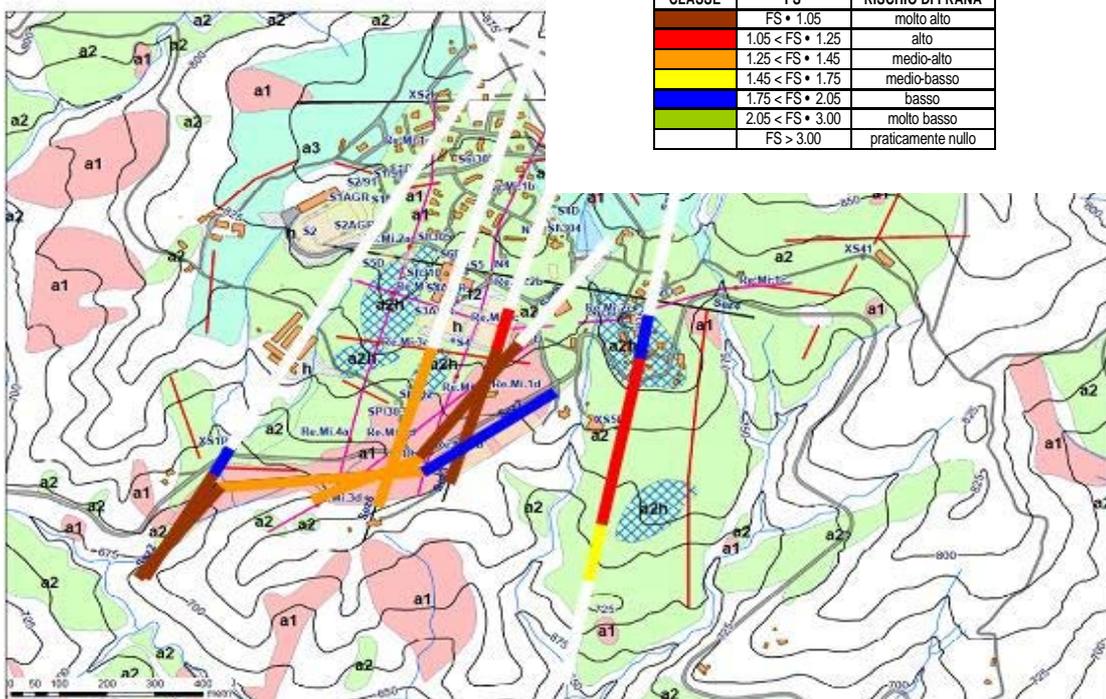
Verifiche di stabilità in condizioni statiche



SEZIONE	SUPERFICIE						
	1	2	3	4	5	6	ric. min.
1	1.21	1.89	1.68	1.53	-	-	-
2 (falda misurata)	0.94	3.28	5.32	3.86	3.33	2.01	3.00•3.05
2 (falda a -2m)	-	2.41	-	-	-	-	2.06•2.09
3	1.30	0.92	3.98	1.05	1.15	-	-
6	1.82	1.46	1.43	4.07	5.45	4.33	-
7	0.89	1.42	1.34	1.31	1.28	2.01	1.33•1.55
8 (no falda)	1.70	1.47	2.05	-	-	-	1.51•1.54
8 (falda a -2m)	1.08	0.98	1.30	-	-	-	0.95•1.00

(sup. imposte)
(FSmin., sup. circolari)

Mappa di pericolosità di frana in condizioni statiche





Verifiche di stabilità in condizioni sismiche

Sezione	kh	kv
1	0.08	± 0.04
2, 3, 6, 7, 8	0.11	± 0.055

Fattore di sicurezza FS

SEZIONE	SUPERFICIE						
	1	2	3	4	5	6	ric. min.
1	<1	1.09	1.16	1.06	-	-	-
2 (falda misurata) 2 (falda a -2m)	<1	1.78	2.22	1.90	1.75	1.13	1.82•1.86 1.20•1.21
3	<1	<1	1.77	<1	<1	-	-
6	<1	<1	<1	1.75	2.09	2.01	-
7	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
8 (no falda) 8 (falda a -2m)	<1	<1	1.28	-	-	-	<1 <1

Kh,cr
(Kh per FS=1)

sez. 1 sup. 1	sez. 7 sup. 3
0.0463	0.0419

Spostamento Sa (in cm)

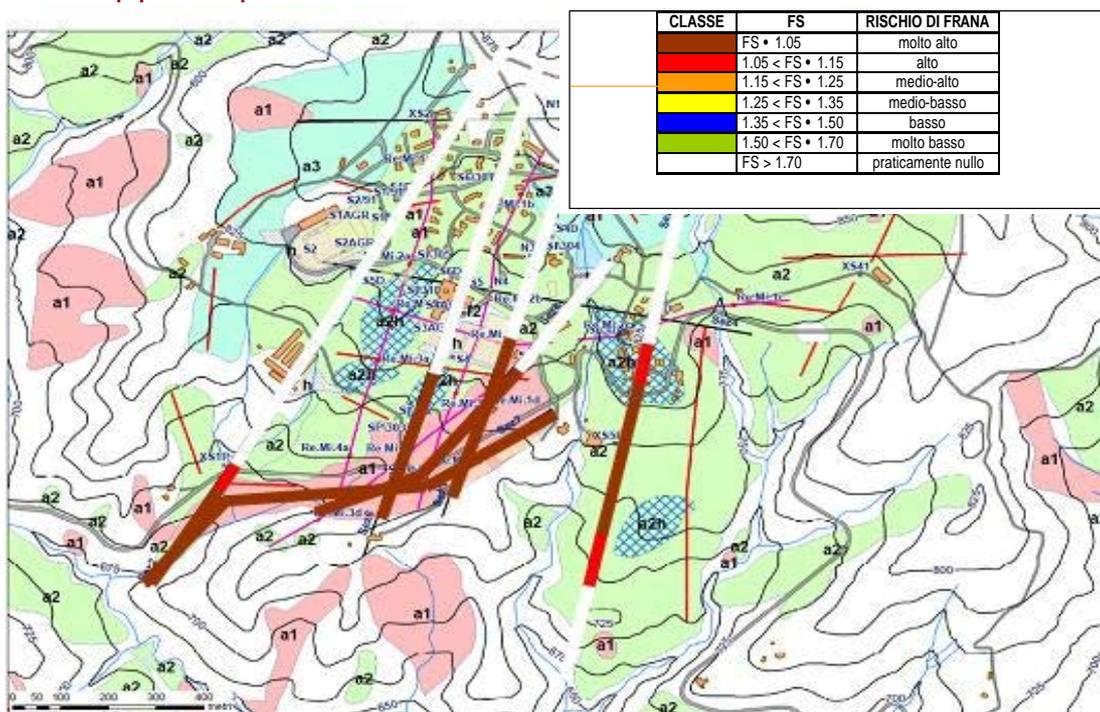
Sez.	ACCELEROGRAMMA				
	M1	M2	M3	M4	M5
1	4.6	2.9	2.2	4.5	3.1
7	5.4	3.4	2.5	5.5	3.7

Sa = $S_0 \cdot A$
 S₀ = spostamento su piano orizzontale (da integrazione numerica)
 A = $\cos(\varphi' - \alpha) / \cos \varphi' \cdot 1$ (fattore di forma)

21

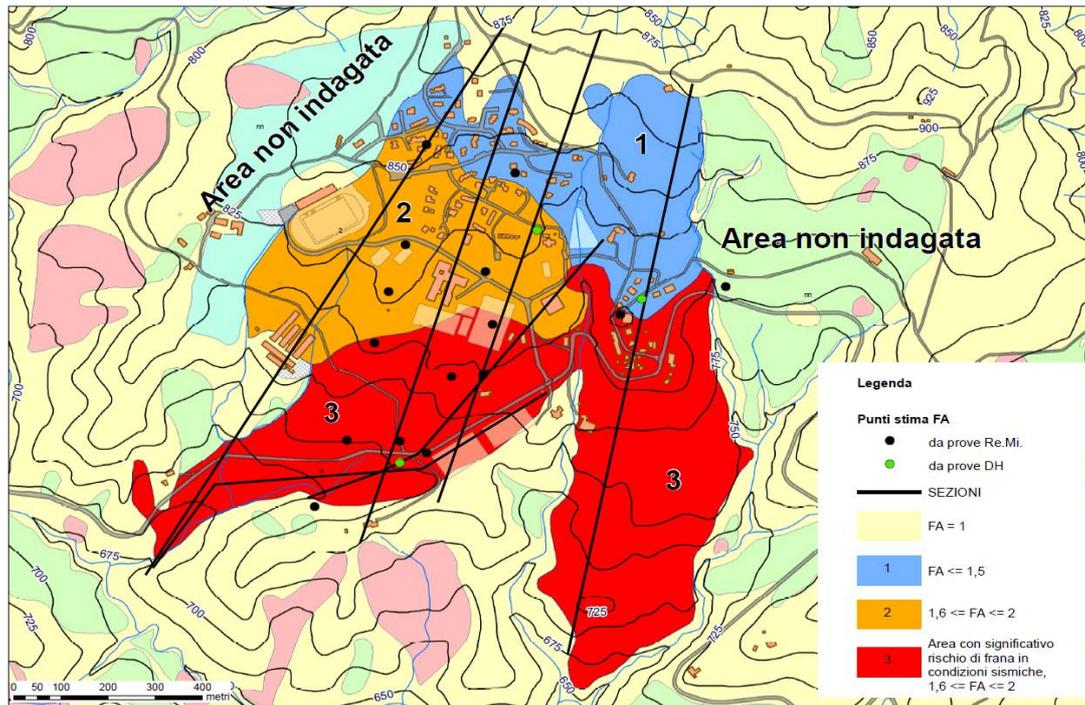


Mappa di pericolosità di frana in condizioni sismiche



22

Carta di MS per il versante di Spinello



23

Grazie per l'attenzione!