



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione illustrativa

### Regione Emilia-Romagna Comune di Predappio




Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	<b>Antoniuzzi - Studio Associato</b> (capogruppo/mandatario) Dott. Geol. Alberto Domenico Antoniuzzi Dott. Geol. Aldo Antoniuzzi (Legale Rappresentante)  Dott. Geol. Marco Baldi (mandante) Dott. Geol. Stefano Castagnetti (mandante) Dott. Geol. Alfredo Ricci (mandante) Dott. Ing. Giuseppe Sgrò (mandante) Dott. Geol. Francesco Stragapede (mandante)	Dicembre 2017

<i>PROGETTO</i>	<i>LIVELLO</i>
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	<i>Locali approfondimenti di terzo</i>

## INDICE

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO .....	3
GRUPPO DI LAVORO .....	3
ELABORATI .....	4
1. INTRODUZIONE .....	5
2. AMBITO COMUNALE: SITUAZIONE, PERICOLOSITÀ DI BASE ED EVENTI DI RIFERIMENTO .....	7
2.1. Inquadramento geografico .....	7
2.2. Inquadramento geologico .....	8
2.3. Caratteristiche sismotettoniche .....	11
2.4. Storia sismica .....	14
2.5. Classificazione sismica .....	17
2.6. Zone ove sono richiesti gli approfondimenti di III livello .....	20
3. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI .....	22
3.1. Acquisizione ed elaborazione dati .....	22
3.2. Prove acquisite nel III livello d'approfondimento .....	22
3.2.1. Sondaggi .....	22
3.2.2. Prove di laboratorio .....	23
3.2.3. Prove geofisiche .....	23
4. MODELLO GENERALE DEL SOTTOSUOLO .....	24
5. DETERMINAZIONI ED INCERTEZZE .....	25
6. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI .....	27
6.1. Prima fase del presente lavoro .....	27
6.2. Seconda fase del presente lavoro .....	27
6.3. Terza fase del presente lavoro .....	28
7. ELABORATI CARTOGRAFICI .....	30
7.1. Carta delle indagini .....	30
7.2. Carta geologico-tecnica per microzonazione sismica .....	30
7.3. Carta delle frequenze naturali dei terreni .....	30
7.4. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica .....	31
7.5. Carta delle velocità delle onde di taglio S .....	31
7.6. Carta di microzonazione sismica di Livello 3 .....	31
8. APPROFONDIMENTI DI TERZO LIVELLO .....	32
8.1. Aree considerate .....	32
8.2. Analisi di disaggregazione .....	32
8.3. Spettro di risposta rappresentativo .....	34
8.4. Analisi della risposta sismica locale .....	36
8.5. Segnali sismici di riferimento .....	37
8.6. Modello del sottosuolo .....	39
8.7. Fattori di amplificazione determinati con modellazione numerica .....	40
8.8. Descrizione del codice di calcolo LSR 2d .....	40
8.9. Metodo lineare equivalente .....	41
8.10. Procedimento iterativo .....	42
8.11. Curve di decadimento dei materiali .....	43
8.12. Stratigrafia e caratteristiche meccaniche dei singoli strati .....	48
8.13. Spettri di risposta in superficie .....	48
8.15. Verifica della pericolosità sismica per franosità .....	52
8.15.1. Determinazioni e metodologie .....	52
8.15.2. Condizioni di stabilità del settore contraddistinto dalla Sezione 3 .....	55
8.15.2.1. Condizioni drenate nella situazione pre-sisma .....	55
8.15.2.2. Condizioni non drenate durante il sisma .....	55
8.15.2.3. Condizioni drenate nella situazione post-sisma. ....	56
8.15.2.4. Considerazioni .....	56
8.15.3. Condizioni di stabilità del settore contraddistinto dalla sezione 4 .....	56
8.15.3.1. Condizioni drenate nella situazione pre-sisma .....	56
8.15.3.2. Condizioni non drenate durante il sisma .....	57

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	1 di 59

<i>PROGETTO</i>	<i>LIVELLO</i>
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	<i>Locali approfondimenti di terzo</i>

8.15.3.3. Condizioni drenate nella situazione post-sisma. ....	57
8.15.3.4. Considerazioni.....	58
8.15.4. Condizioni di stabilità del settore contraddistinto dalla Sezione 5 .....	58
8.15.4.1. Condizioni drenate nella situazione pre-sisma .....	58
8.15.4.2. Condizioni non drenate durante il sisma .....	58
8.15.4.3. Condizioni drenate nella situazione post-sisma. ....	59
8.15.4.4. Considerazioni.....	59

<i>PROGETTO</i>	<i>LIVELLO</i>
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	<i>Locali approfondimenti di terzo</i>

## RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Arch. Francesco Zucchini  
Responsabile dell'Ufficio Urbanistica dell'Unione dei Comuni della Romagna forlivese, Unione montana

## GRUPPO DI LAVORO

### Soggetto Incaricato

ANTONIAZZI STUDIO ASSOCIATO  
di Geologia Tecnica e Ambientale



Professionisti	Professione	Principali competenze
Dott. Aldo Antoniazzi (Coordinatore)	Geologo	Pianificazione territoriale, idrogeologia, meccanica delle terre e rocce e Protezione Civile
Dott. Alberto Domenico Antoniazzi	Geologo	Pianificazione territoriale, geopedologia e geomorfologia applicata
Dott. Marco Baldi	Geologo	Pianificazione territoriale, Microzonazione Sismica, sistemi informativi territoriali (GIS) e telerilevamento
Dott. Stefano Castagnetti	Geologo	Pianificazione territoriale, Microzonazione Sismica, Protezione Civile e CLE
Dott. Alfredo Ricci	Geologo	Pianificazione territoriale, idrogeologia, esplorazione del sottosuolo e geotecnica
Dott. Giuseppe Sgrò	Ingegnere	CLE, analisi strutturali e Protezione Civile
Dott. Francesco Stragapede	Geologo	Geofisica applicata alla pianificazione territoriale e progettazione ed analisi Microzonazione Sismica

### Collaboratori e specialisti

Dott. Geol. Gian Marco Veneziani  
Dott. Geol. Giovanni Leonasi

### Esecuzione indagini

Elletipi S.r.l. (indagini geognostiche)  
Dott. Geol. Francesco Stragapede (indagini geofisiche)

### Fonte dati

Ufficio Tecnico Comunale - Comune di Predappio  
Unione dei Comuni della Romagna forlivese - Unione montana  
Provincia di Forlì-Cesena  
Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna  
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (I.N.G.V.)


	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	3 di 59



<i>PROGETTO</i>	<i>LIVELLO</i>
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	<i>Locali approfondimenti di terzo</i>

## ELABORATI

- Relazione illustrativa
  - Sezioni geologiche
  - Metodologia per le verifiche di stabilità
  - Validazione del codice di calcolo
  - Verifiche di stabilità
- Carta delle indagini in scala 1:5.000
- Carta geologico tecnica in scala 1:5.000
- Carta delle frequenze naturali dei terreni in scala 1:5.000
- Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica in scala 1:5.000
- Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA<sub>PGA</sub> in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA<sub>IS 0,1 - 0,5 s</sub> in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA<sub>IS 0,5 - 1,0 s</sub> in scala 1:5.000

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	4 di 59

<i>PROGETTO</i>	<i>LIVELLO</i>
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	<i>Locali approfondimenti di terzo</i>

## 1. INTRODUZIONE

Nella presente Relazione illustrativa sono descritte le attività svolte e i risultati ottenuti nell'ambito dello Studio di Microzonazione Sismica con locali approfondimenti di terzo livello relativo al Comune di Predappio (FC), realizzato nell'ambito del servizio concernente la "REDAZIONE DELL'ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA (CLE) E DI LOCALI APPROFONDIMENTI DI MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO SUL TERRITORIO DEI COMUNI DI BERTINORO, CASTROCARO TERME E TERRA DEL SOLE, GALEATA, MELDOLA, PREMILCUORE, CIVITELLA DI ROMAGNA, PREDAPPIO e SANTA SOFIA", su incarico dell'Unione dei Comuni della Romagna forlivese - Unione montana (Contratto Rep. n. 88 del 20 ottobre 2015). Questo studio è stato finanziato come stabilito dall'Ordinanza Presidenza Consiglio Ministri 20 febbraio 2013 n. 52 "Contributi per gli interventi di prevenzione del rischio sismico per l'annualità 2012" (G.U. n° 50 del 20.2.2013).


Gli studi di Microzonazione Sismica (MS), secondo le indicazioni della Protezione Civile, hanno l'obiettivo di razionalizzare le conoscenze in merito alle alterazioni che lo scuotimento sismico può subire in superficie e di fornire in merito informazioni utili al governo del territorio, alla progettazione, alla pianificazione per l'emergenza e alla ricostruzione post sisma. Questi studi si riferiscono essenzialmente alle aree in cui il quadro normativo consente o prevede: l'uso a scopo edificatorio o per infrastrutture, la trasformazione a tali fini, l'uso per la protezione civile.

Gli studi di Microzonazione Sismica suddividono dettagliatamente il territorio considerato in base alla presenza e alla distribuzione dei fenomeni di possibile amplificazione dello scuotimento, legati alle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche delle singole aree considerate ed ai possibili fenomeni di instabilità e deformazione permanente in esse attivati dal sisma. L'insieme di queste circostanziate conoscenze sul comportamento dei terreni durante un evento sismico e sui possibili effetti indotti dallo scuotimento, è un indispensabile strumento di prevenzione e di riduzione del rischio sismico, particolarmente efficace, se realizzato e applicato durante la pianificazione urbanistica, per indirizzare le scelte verso le aree meno pericolose.

Il Comune di Predappio è già dotato di una valutazione della pericolosità sismica locale con approfondimenti di primo e secondo livello. In particolare, quest'ultimo approfondimento, curato dalla GeoExploration S.r.l. di Forlì, è stato a suo tempo redatto secondo quanto definito nell'allegato C della Delibera della Giunta Regionale 1302/2012 recante gli indirizzi e i criteri di microzonazione sismica per i territori che hanno beneficiato dei contributi di cui all'OPCM 4007/2012.

Nell'ambito dell'attuazione del presente studio di Microzonazione Sismica, relativo agli approfondimenti di terzo livello ed, in particolare, nella predisposizione e redazione degli elaborati richiesti, sono stati seguiti gli indirizzi forniti dai seguenti documenti tecnici:

- ♦ Allegato A della Deliberazione della Giunta Regionale 21 dicembre 2015, n. 2193: "Art. 16 della L.R. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	5 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

urbanistica”, di cui alla deliberazione dell’Assemblea legislativa 2 maggio 2007, n. 112”.


- ◆ “Indicazioni per l’archiviazione informatica, rappresentazione e fornitura dei dati degli studi di microzonazione sismica e dell’analisi della condizione limite per l’emergenza, di cui all’Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 52/2013 e decreto del 15 aprile 2013 del Capo del Dipartimento della Protezione Civile” della deliberazione di Giunta Regionale n. 1919 del 16.12.2013 “Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all’Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 52/2013 a favore degli Enti Locali” (Allegato D della delibera regionale).
- ◆ “Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica” - Versione 4.0b, Roma, ottobre 2015 - Elaborato e approvato nell’ambito dei lavori della Commissione tecnica per la microzonazione sismica, nominata con DPCM 21 aprile 2011 (SRAI).
- ◆ “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica” approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (ICMS).

Nel presente studio di Microzonazione Sismica, gli approfondimenti di terzo livello, concernenti le aree individuate nel precedente livello d'approfondimento, sono stati effettuati conformemente a quanto stabilito dai riferimenti tecnici menzionati.

Gli elaborati redatti sono stati predisposti in versione cartacea e in versione digitale (Portable Document Format - PDF, con risoluzione di 300 dpi). I dati cartografici sono stati allestiti anche in formato vettoriale (*shapefile*).

Per l’archiviazione dei dati e l’editing dei documenti sono stati seguiti gli standard di riferimento forniti dall’Allegato D della DGR 1919/2013 e dagli SRAI (Standard di rappresentazione e archiviazione informatica).

Per l’inserimento dei dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei parametri è stato utilizzato l’apposito software: “MS - SoftMS”, versione 4.0.1.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	6 di 59

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI PREDAPPIO (FC) Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

## 2. AMBITO COMUNALE: SITUAZIONE, PERICOLOSITÀ DI BASE ED EVENTI DI RIFERIMENTO


### 2.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

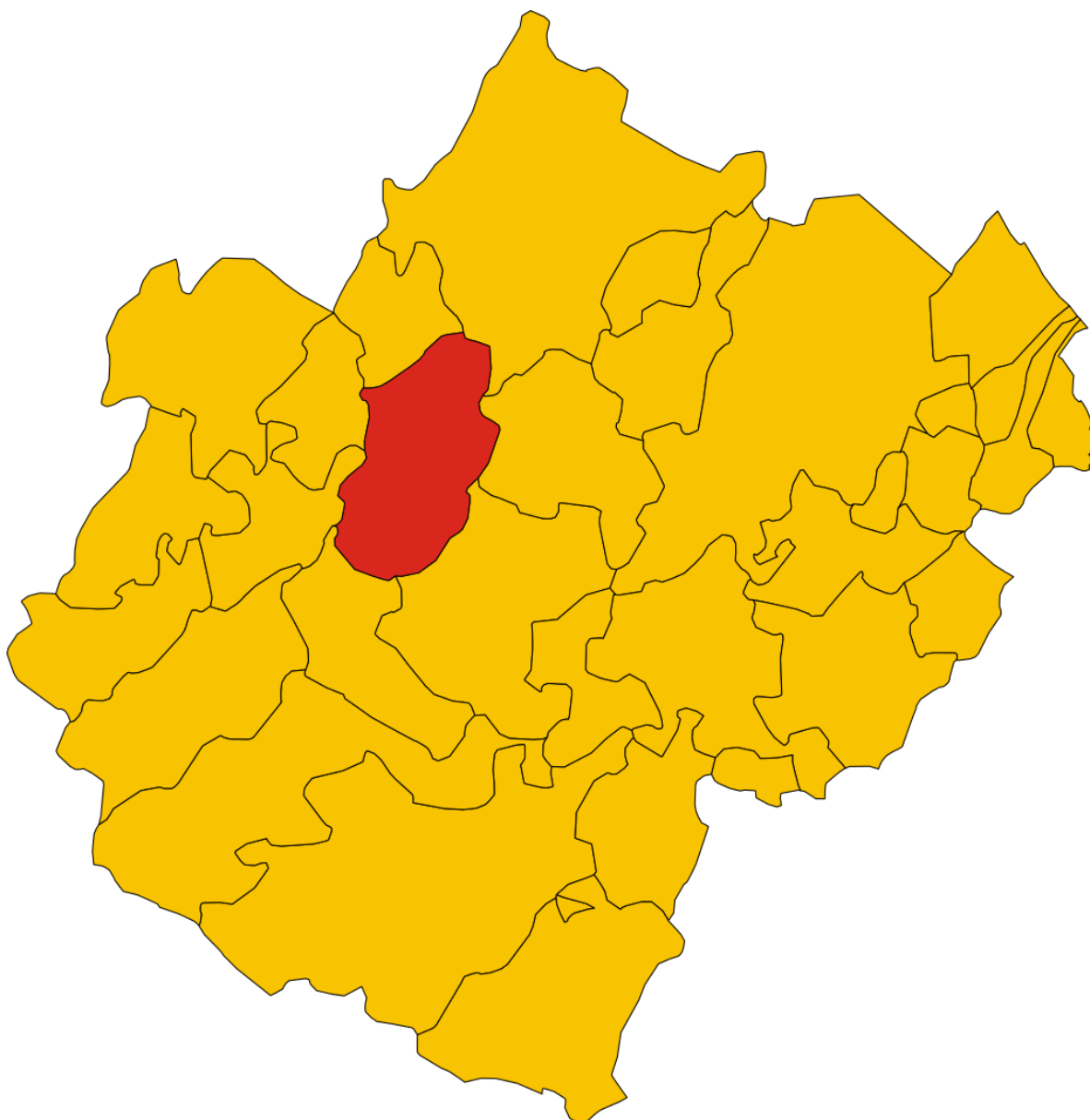
Il Comune di Predappio appartiene alla Regione Emilia-Romagna e ricade nella Provincia di Forlì-Cesena (figura 1). Il suo territorio è collinare, in quanto posto per il 95% tra i 100 e i 600 metri di altitudine, è di circa 91 km<sup>2</sup> e confina con i Comuni di Forlì, Meldola, Civitella di Romagna, Galeata, Rocca San Casciano, Castrocaro e Terra del Sole.



Figura n. 1 - Ubicazione di Predappio nell'ambito della Regione Emilia-Romagna

Nella figura n. 2 è rappresentata la posizione del Comune di Predappio nell'ambito della Provincia di Forlì-Cesena.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	7 di 59



*Figura n. 2 - Inquadramento del Comune di Predappio (area in rosso) nell'ambito della Provincia di Forlì-Cesena*

## 2.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Per quanto concerne la cartografia ufficiale, il territorio comunale di Predappio ricade nei fogli 254 (Modigliana) e 255 (Cesena) della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000, a cura del Servizio Geologico d'Italia (ISPRA), pubblicate rispettivamente nel 2001 e nel 2009, nonché nelle corrispondenti sezioni della Carta geologica dell'Appennino Emiliano-Romagnolo in scala 1:10.000, edita dalla Regione Emilia-Romagna.

Un inquadramento geologico generale del territorio ove ricade il Comune di Predappio è fornito dall'estratto, riportato nella figura n. 3, del foglio 1 della Carta Geologica d'Italia al 500.000, edita dal Servizio Geologico d'Italia nel 1983.



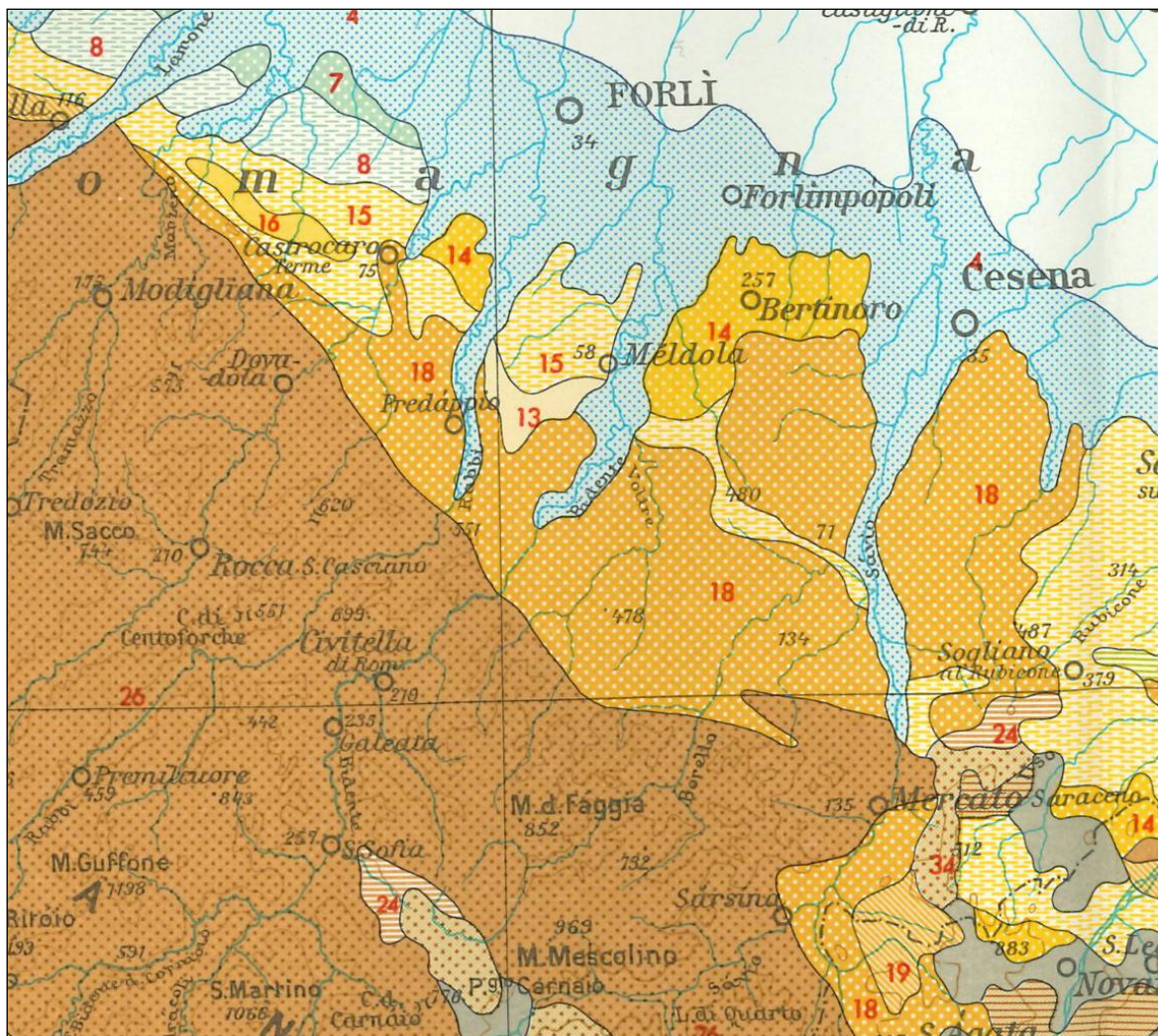


Figura n. 3 - Inquadramento geologico generale del territorio in cui ricade il Comune di Predappio

Nel territorio di Predappio affiorano rocce formatesi dal Miocene ad oggi. Nella sua parte montana è presente la Formazione Marnoso-Arenacea (26), del Burdigaliano - Messiniano superiore, costituita da torbiditi pelitico-arenacee, con subordinate intercalazioni di marne emipelagiche e talvolta con livelli torbiditici carbonatici. La sua successione presenta variabili rapporti arenaria pelite (A/P) ed è stata suddivisa in vari Membri e Litofacies, a volte in parte eteropici. Più a valle figurano depositi evaporitici, nonché pre e post evaporitici, del Miocene superiore (18), contraddistinti, a seconda dei luoghi, dalla presenza di gessi, calcari, arenarie, argille e conglomerati. A questi sedimenti succedono procedendo verso la pianura, rocce plioceniche calcaree (13) o argillose (15), nel primo caso si tratta dello Spungone, nel secondo delle Argille Azzurre, la cui sedimentazione si è protratta fino al Pleistocene inferiore. Si incontrano infine i depositi litoranei (14) ed alluvionali (4) quaternari, la cui sedimentazione si è sviluppata dal Pleistocene medio ad oggi.

Il territorio del Comune di Predappio, appartiene strutturalmente all'Appennino Settentrionale<sup>1</sup>, la cui tettonica è contraddistinta da ampi fronti di scorrimento, che individuano alcune unità tettoniche fondamentali, e da importanti accavallamenti.

<sup>1</sup> L'Appennino settentrionale è una catena a falde derivata dal corrugamento e dalla sovrapposizione di prismi sedimentari, depositatisi nel paleo oceano ligure-piemontese e sul margine continentale della microplacca dell'Adria, durante la collisione



La complessa situazione tettonica del territorio, ove è situato il Comune di Predappio, è in particolare evidente nello schema tettonico (figura n. 4), tratto dal foglio 254 (Modigliana) della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000, pubblicata nel 2001 dal Servizio Geologico d'Italia (ISPRA).

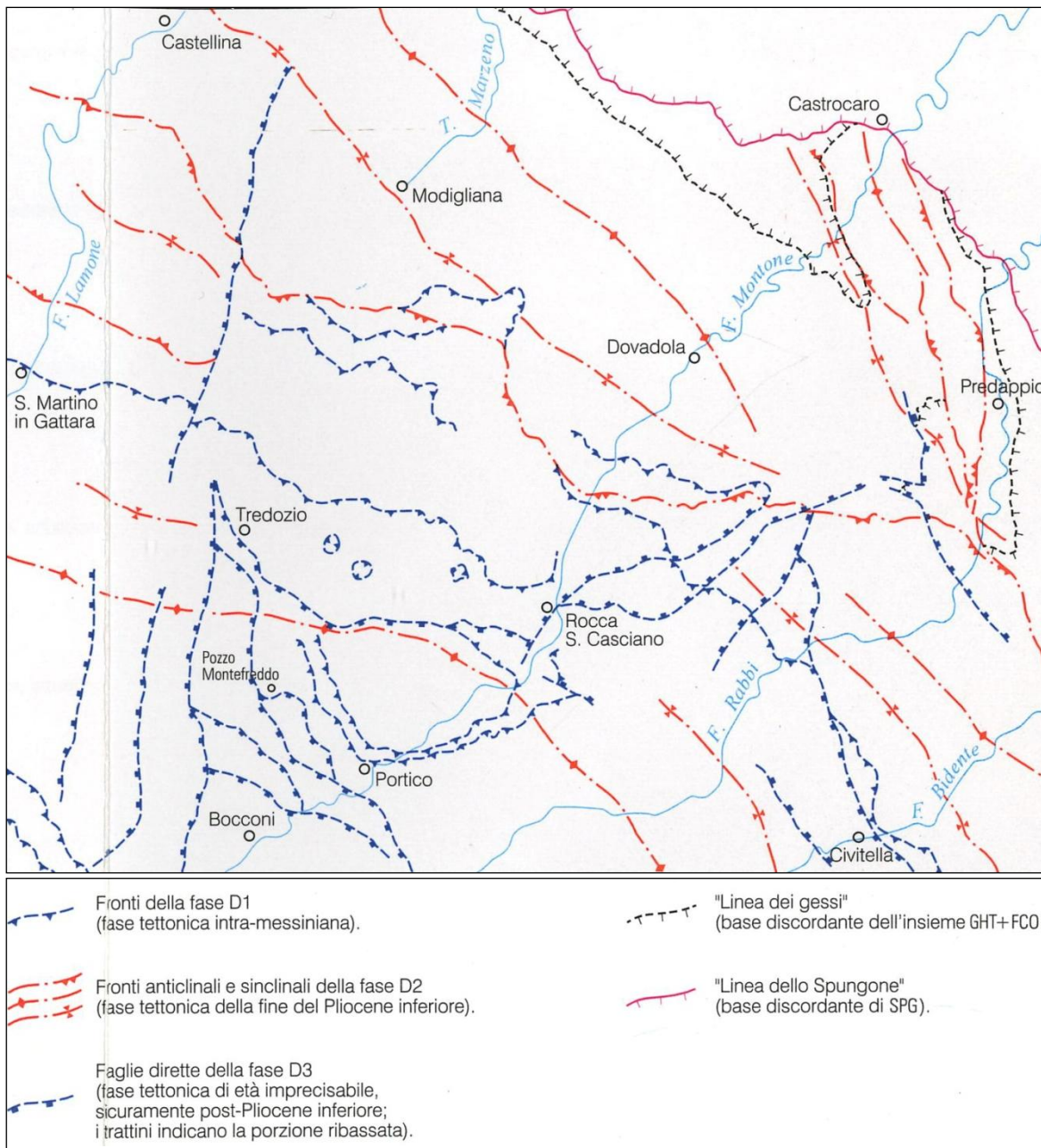


Figura n. 4 - Schema tettonico della zona ove ricade anche il territorio di Predappio

Una sintesi schematica della situazione locale della crosta terrestre, indicativamente valida anche per quanto concerne il territorio del Comune di Predappio, è fornita dalla sezione geologica schematica (figura n. 5), che taglia

tra la placca africana e quella europea. L'orogenesi, iniziata nell'Eocene medio e sviluppatasi soprattutto a partire dall'Oligocene, ha dato luogo a pieghe e a sovrascorrimenti lungo faglie inverse con spostamento generale verso nord-est.

<p><b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI</p>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	10 di 59

trasversalmente la penisola italiana dalla Toscana alla Romagna e si estende dalla superficie fino alla parte superiore del mantello terrestre<sup>2</sup>.

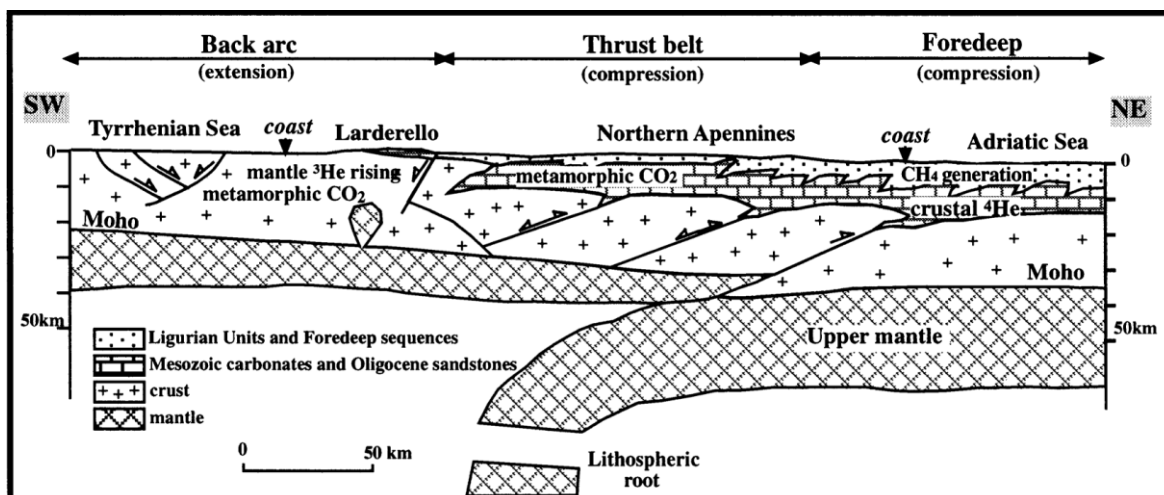


Figura n. 5 - Sezione geologica schematica attraverso l'Appennino Settentrionale, estesa dal Tirreno all'Adriatico e dalla superficie al Mantello superiore (da A. MINISSALE E ALTRI, 2.000)

### 2.3. CARATTERISTICHE SISMOTETTONICHE

Un inquadramento generale delle principali strutture attive sismogenetiche dell'Emilia-Romagna, quindi anche della zona in esame, è fornito dall'apposita carta (figura n. 6), a cura dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli dell'Emilia-Romagna.

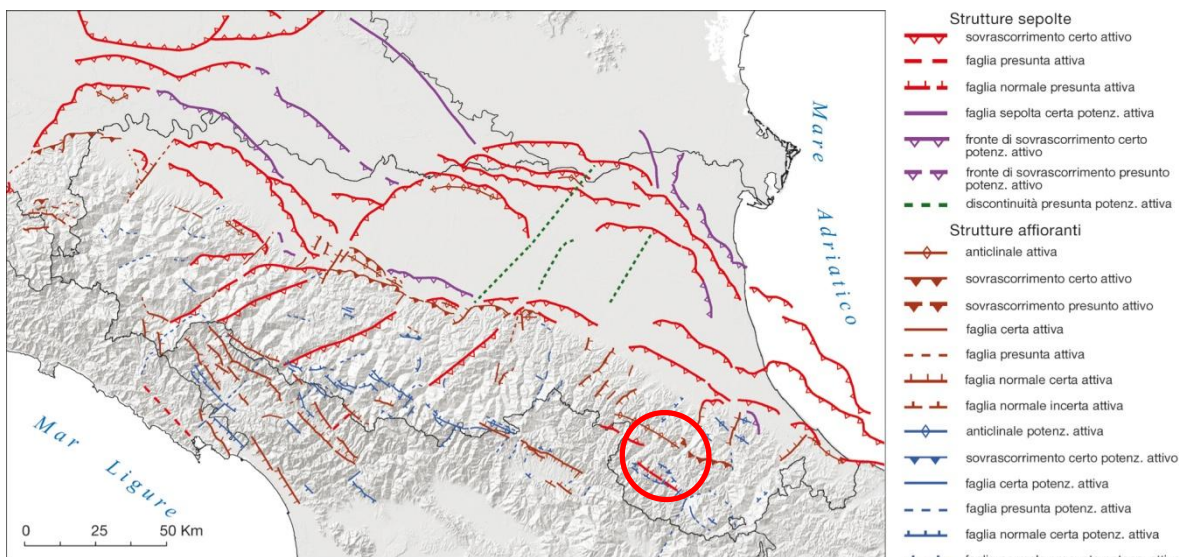


Figura n. 6 - Strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riconosciute in Emilia-Romagna

<sup>2</sup> MINISSALE A., MAGRO G., MARTINELLI G., VASELLI G., TASSI G.F., *Fluid geochemical transect in the Northern Apennines (central-northern Italy): fluid genesis and migration and tectonic implications*, «Tectonophysics», 319, (2000), p. 218.



PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

Le sorgenti sismogenetiche e le faglie potenzialmente attive e capaci, interessanti specificatamente il territorio comunale di Predappio, sono state ricavate dal *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Version 3.2.0, ossia dal database delle sorgenti sismogenetiche italiane, potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a M 5.5 nell'area Italiana<sup>3</sup>. La loro distribuzione geografica è evidente nella figura n. 7.

Nel territorio di pertinenza di Predappio figurano le seguenti sorgenti sismogenetiche composite:

- ♦ ITCS001: Castel San Pietro Terme-Meldola con Mw max (magnitudo momento massima) 5,8;
- ♦ ITCS027: Bore-Montefeltro-Fabriano-Laga con Mw max (magnitudo momento massima) 6,2.

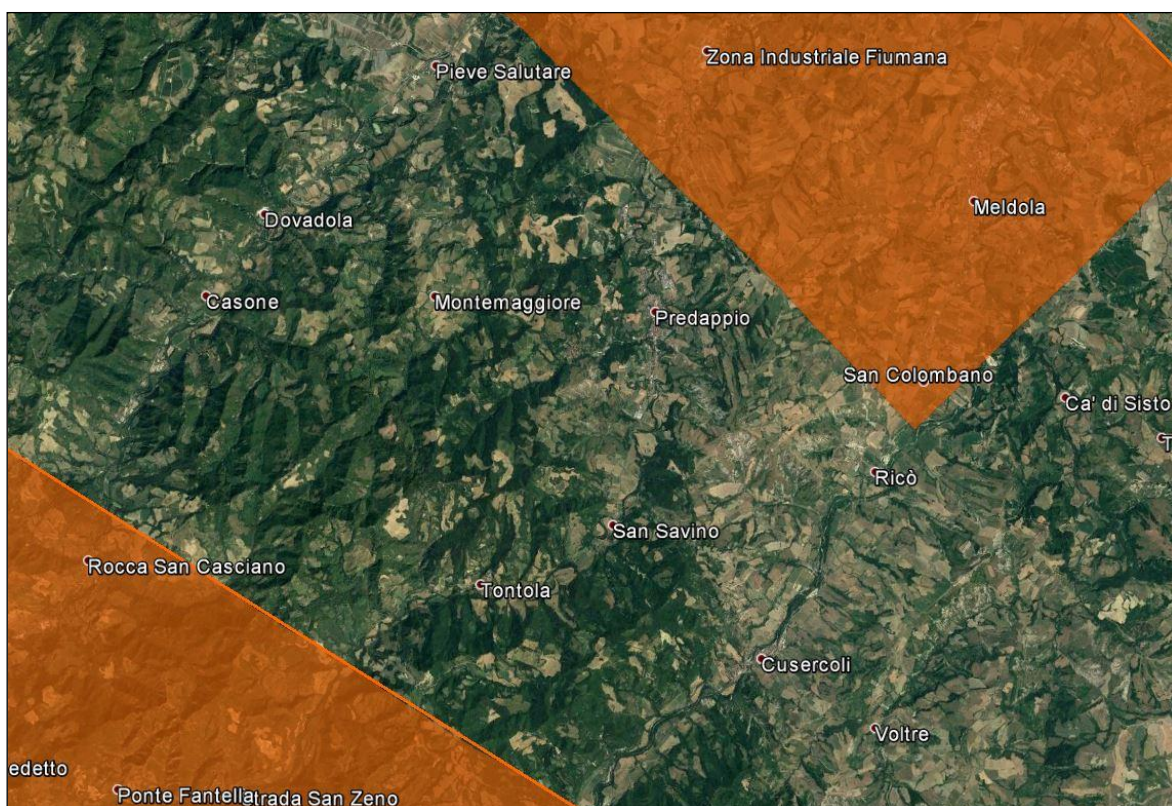


Figura n. 7 - Ubicazione delle sorgenti sismogenetiche del DISS nella zona di pertinenza del Comune di Predappio

Nella Zonazione sismogenetica ZS9 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia<sup>4</sup>, il territorio comunale di Predappio (figura n. 8) ricade nella zona "Forlì 914" con Mw max (magnitudo momento massima) di 6,14.

<sup>3</sup> BASILI R., G. VALENSISE, P. VANNOLI, P. BURRATO, U. FRACASSI, S. MARIANO, M.M. TIBERTI, E. BOSCHI (2008), The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology, *Tectonophysics*.

<sup>4</sup> MELETTI C. E VALENSISE G. (a cura) del 2004, Zonazione sismogenetica ZS9 - App. 2 al Rapporto conclusivo.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	12 di 59

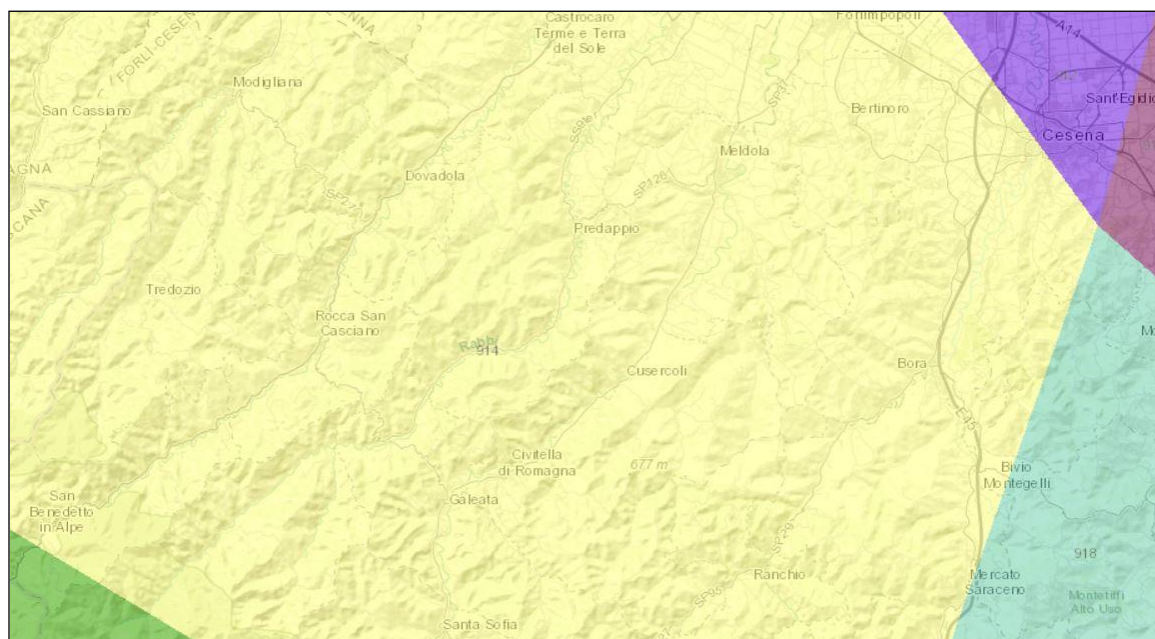


Figura n. 8 - Zonazione sismogenetica ZS9 del Comune di Predappio (zona "Forli 914")

Nella mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale, redatta a cura dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (figura n. 9) la pericolosità di ciascuna zona è espressa in termini di accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi contraddistinti da  $V_{s30} > 800$  m/s.



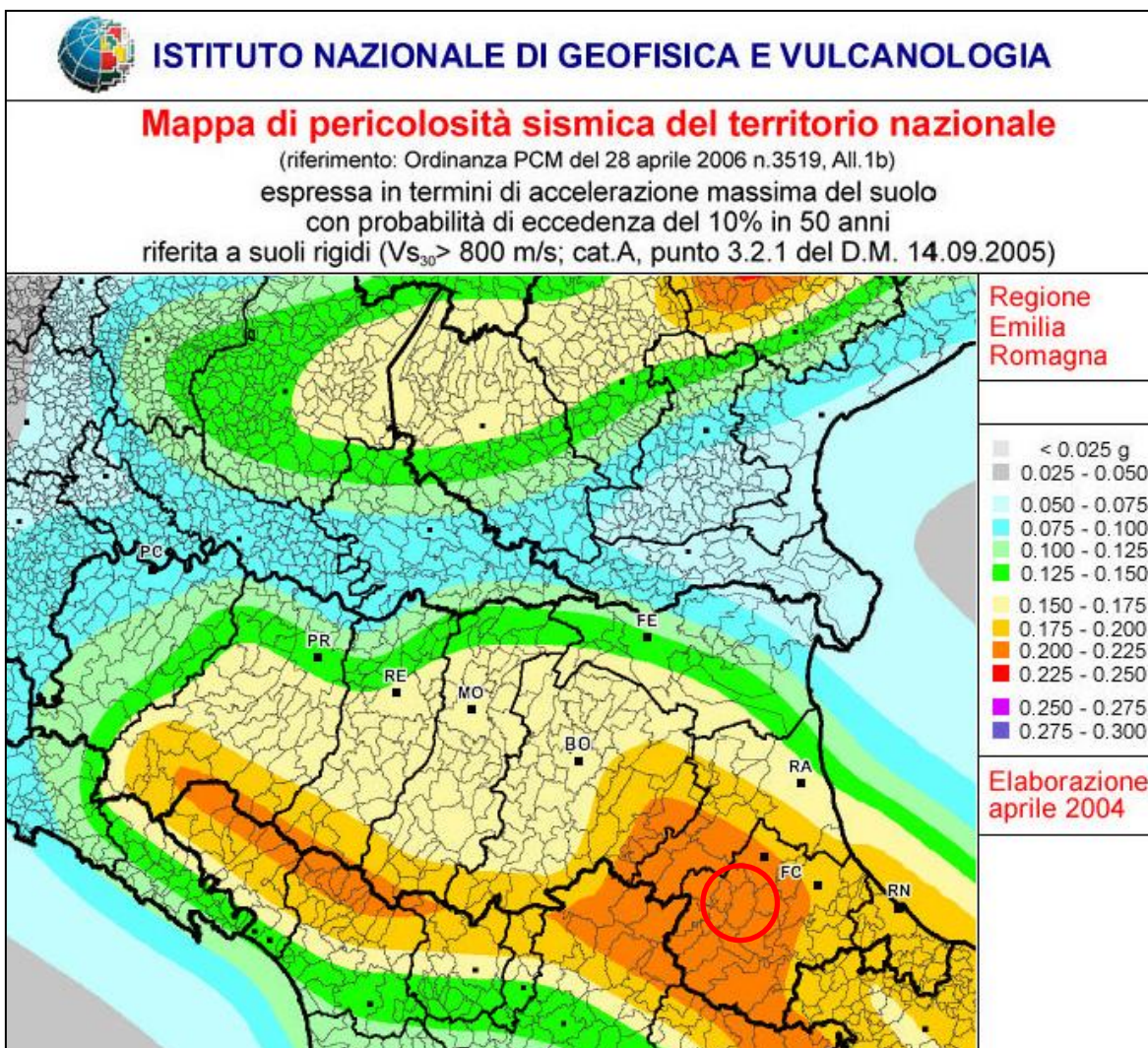


Figura n. 9 - Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale

In questa mappa il territorio in esame ricade in un'area caratterizzata da un'accelerazione sismica orizzontale massima  $a_g$  pari a 0,200-0,225 g.

**2.4. STORIA SISMICA**

La storia sismica del Comune di Predappio è stata desunta dal Database Macrosismico Italiano, versione DBMI15<sup>5</sup>. Nella tabella n. 1 sono riportati gli eventi di maggiore intensità verificatisi a Predappio, indicando per ciascuna di esse, oltre agli effetti provocati al sito, espressi come I(MCS), quando si è verificato, l'area epicentrale, il numero di località coinvolte ( $N_p$ ), l'intensità massima epicentrale in scala MCS ( $I_o$ ), e la magnitudo momento ( $M_w$ ).


<sup>5</sup> Locati M., Camassi R. e al. (a cura di), 2016. DBMI15, la versione 2015 del Database Macrosismico Italiano. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPT115-DBMI15>. DOI:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	14 di 59

<b>PROGETTO</b>	<b>LIVELLO</b>
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	<i>Locali approfondimenti di terzo</i>

**TABELLA N. 1 - MAGGIORE SISMICITÀ STORICA DEL COMUNE DI PREDAPPIO**

Effetti	In occasione del terremoto del:				
Intensità	Anno Me Gi Ho Mi Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
8	1661 03 22 12 50	Appennino forlivese	79	9	<b>6,05</b>
F	1813 09 21 07 45	Romagna	12	7	5,28
7	1870 10 30 18 34	Forlivese	41	8	5,61
NF	1899 06 26 23 17 22.00	Valle del Bisenzio	138	7	5,02
7	1911 02 19 07 18 30.00	Forlivese	181	7	5,26
4	1913 07 21 22 35	Appennino romagnolo	43	5-6	4,79
5	1917 01 08 01 45 50.00	Appennino forlivese	11	6	4,74
4	1917 04 26 09 35 59.00	Alta Valtiberina	134	9-10	5,99
7	1918 11 10 15 12 28.00	Appennino forlivese	187	9	5,96
6	1919 06 29 15 06 13.00	Mugello	565	10	6,38
6-7	1952 07 04 20 35 12.00	Appennino forlivese	64	7	4,94
4-5	1952 12 02 06 13 22.00	Appennino forlivese	53	5	4,42
5	1953 12 14 07 11 06.00	Appennino forlivese	48	5-6	4,7
5	1956 05 26 18 40	Appennino forlivese	76	7	4,99
5	1961 05 08 22 45 51.00	Forlivese	40	5	4,37
4	1962 08 30 06 27 07.00	Montefeltro	23	6-7	4,76
3	1965 08 04 11 49 53.00	Alta Valtiberina	44	5	4,48
4-5	1978 12 05 15 39 04.00	Romagna	34	4-5	4,61
2	1983 11 09 16 29 52.00	Parmense	850	6-7	5,04
4-5	1985 11 24 06 54 04.08	Appennino forlivese	29	5-6	4,29
NF	1986 12 06 17 07 19.77	Ferrarese	604	6	4,43
4	1991 01 14 07 38 36.65	Casentino	62	5	4,26
4-5	1993 11 05 02 01 03.79	Cesenate	10		3,99
4-5	1993 11 07 23 21 11.72	Cesenate	36	4-5	3,95
4	1993 11 09 13 46 24.39	Cesenate	28	4-5	3,93
2-3	1995 12 27 23 44 27.69	Forlivese	37	5	3,97
4	1999 01 25 22 45 58.08	Appennino forlivese	97	5	4,36
3-4	2000 05 06 22 07 03.78	Faentino	85	5	4,08
3-4	2000 05 08 12 29 56.20	Faentino	126	5	4,67
4	2000 05 10 16 52 11.60	Faentino	151	5-6	4,82
4	2000 08 01 02 34 31.00	Montefeltro	84	5-6	4,27
3	2001 11 26 00 56 55.46	Casentino	211	5-6	4,63
3	2002 11 02 10 57 44.89	Ferrarese	79	4	4,21
4	2003 01 26 20 15 03.07	Appennino forlivese	63	5-6	4,5
4-5	2003 01 29 23 50 16.38	Appennino forlivese	71	4-5	4,06
4-5	2003 12 07 10 20 33.04	Forlivese	165	5	4,18
4-5	2005 07 15 15 17 18.00	Forlivese	173	4-5	4,29
NF	2006 10 21 07 04 10.01	Anconetano	287	5	4,21

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	15 di 59

<i>PROGETTO</i>	<i>LIVELLO</i>
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	<i>Locali approfondimenti di terzo</i>

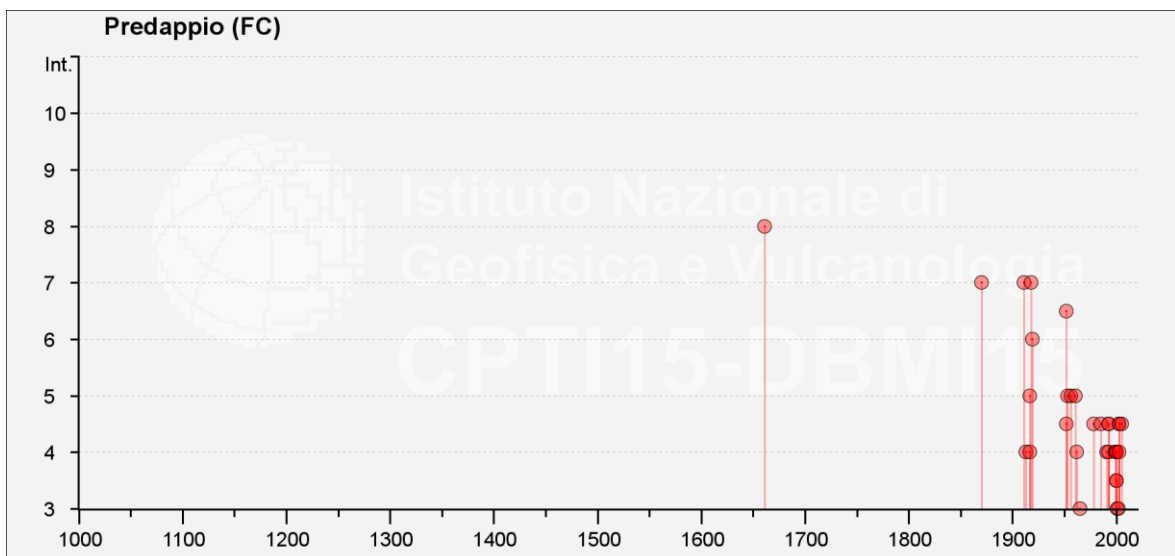
**DEFINIZIONI DELLE SIGLE UTILIZZATE NELLA TABELLA N. 1**

<b>I [MCS]</b>	Intensità macrosismica espressa in scala MCS. Alcuni effetti non sono esprimibili con la scala MCS per cui vengono utilizzati dei codici alternativi (si veda la relativa tabella)
<b>Data</b>	Data del terremoto
<b>Ax</b>	Area epicentrale, area geografica in cui sono stati riscontrati gli effetti maggiori del terremoto
<b>NMDP</b>	Numero di punti, numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto
<b>Io</b>	Intensità macrosismica epicentrale, da CPTI15, espressa in scala MCS, Mercalli-Cancani-Sieberg [dettagli]
<b>Mw</b>	Magnitudo momento, da CPTI15

**CODICI ALTERNATIVI MCS UTILIZZATI NELLA TABELLA N. 1**

<b>Codice</b>	<b>Descrizione</b>
<b>D</b>	danno (damage): danno di entità non precisabile (indicativamente $Int >= 6$ )
<b>F</b>	avvertito (felt): si ritiene di escludere che si siano verificati danni ( $3 <= Int <= 5$ )
<b>NC</b>	non classificato (not classified): indica una informazione non classificabile in termini di intensità ovvero con i codici utilizzati
<b>EE</b>	effetti sull'ambiente (environment effects): effetti sull'ambiente in prossimità della località cui vengono riferiti
<b>SW</b>	effetti marini anomali (sea waves): indica maremoto o comunque effetti anomali in mare, in prossimità della località cui vengono riferiti
<b>NR</b>	non segnalato (not reported): utilizzato a volte per segnalare che nelle fonti non vi è menzione di effetti per quella data località
<b>NF</b>	non avvertito (not felt): in presenza di segnalazione esplicita è equiparabile a $Int=1$
<b>RS</b>	registrazione strumentale: alcuni studi riportano questa informazione, non utilizzabile dal punto di vista macrosismico, che tuttavia si è preferito conservare

Il maggiore terremoto locale, com'è evidente nella figura n. 10, si è verificato nel 1661.



*Figura n. 10 - I maggiori terremoti storici che hanno colpito Predappio*

Nella figura n. 11, è riportata la magnitudo (superiore a 3) e la profondità dei terremoti verificatisi nella zona di pertinenza di Predappio dall'1 gennaio del 1900

<b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	16 di 59



ad oggi, entro il raggio di 20 chilometri<sup>6</sup>. Come si può notare dalla figura la profondità degli ipocentri è quasi sempre superficiale.

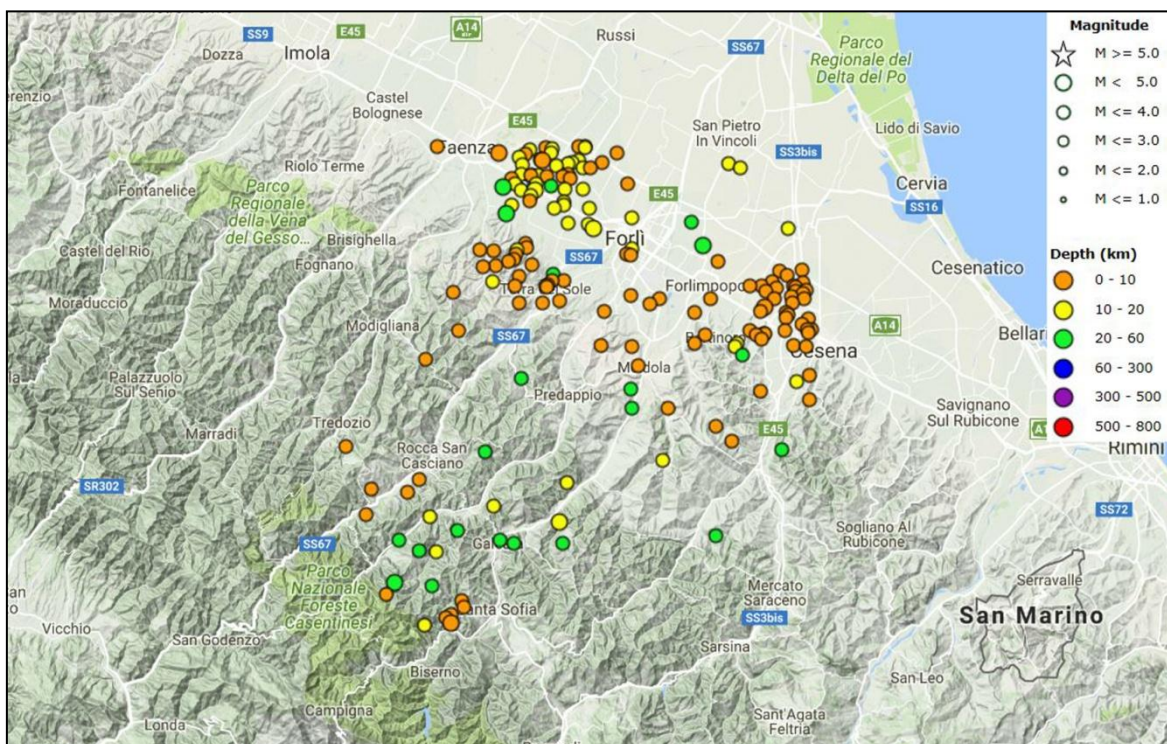


Figura n. 11 - Magnitudo e profondità dei sismi verificatisi nella zona di pertinenza di Predappio dall'inizio del 1900 ad oggi

### 2.5. CLASSIFICAZIONE SISMICA

Il territorio del Comune di Predappio è classificato sismico di seconda categoria (S=9) dal 1983, in base alla classificazione nazionale dei Comuni italiani stabilita dall'Allegato 1, punto 3 dell'Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003, che ha confermato quella precedente proposta nel 1998.

I Comuni sismici italiani sono pertanto distinti in 4 zone. Le prime con sismicità alta (S=12), media (S=9) e bassa (S=6) erano già state definite dalla Legge 64/74. Viceversa la zona 4 è di nuova introduzione. A ciascuna di queste zone è stato assegnato uno specifico valore dell'accelerazione di picco orizzontale del suolo (ag) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni. Ad ogni area del territorio nazionale è stato assegnato un proprio livello di pericolosità sismica.

TABELLA N. 2 - ZONE SISMICHE E MASSIMI VALORI DI ag

ZONA	VALORI MASSIMI DI ag
1	>0,25
2	<b>0,15 ÷ 0,25</b>
3	0,05 ÷ 0,15
4	<0,05

<sup>6</sup> ISIDe Italian Seismological Instrumental and parametric database: <http://iside.rm.ingv.it>

In base alla Classificazione sismica della Regione Emilia-Romagna, evidente nella figura n. 12, il territorio comunale di Predappio appartiene alla zona 2.

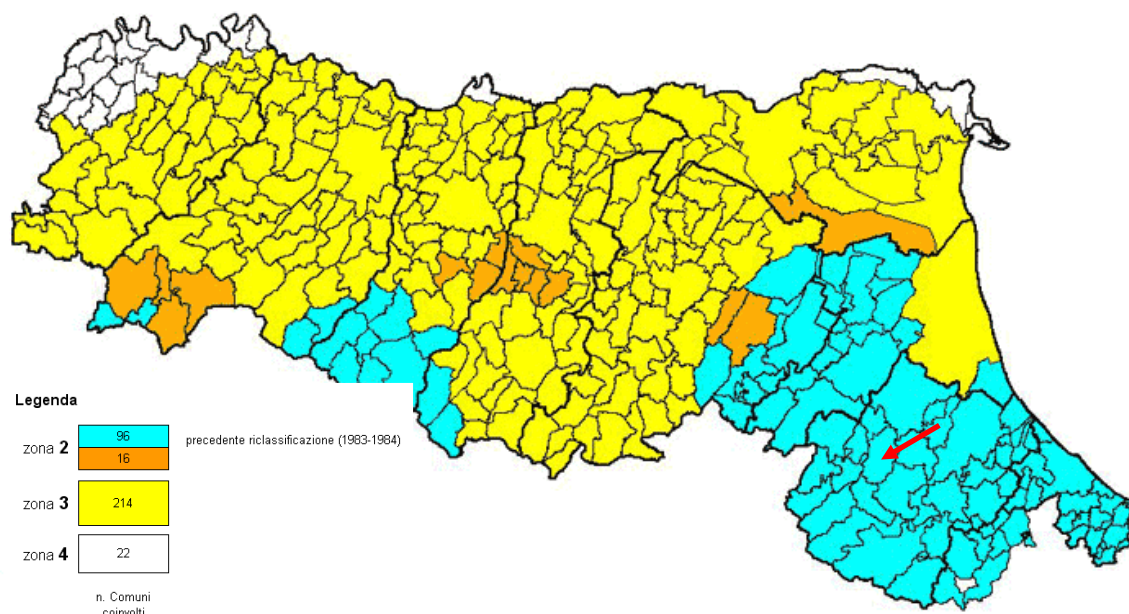


Figura n. 12 - Classificazione sismica dei Comuni della Regione Emilia-Romagna,

Con l’Ordinanza n° 3519 del 28 aprile 2006 sono stati precisati i criteri generali, la mappa di pericolosità sismica di riferimento a scala nazionale, riportata nel suo allegato 1b, e la normativa tecnica associata alla nuova classificazione sismica.

Il decreto ministeriale del 14 gennaio 2008 “Approvazione delle nuove Norme Tecniche per le costruzioni”, pubblicato sulla G. U. n. 29 del 4 febbraio 2008, ha sostituito il precedente decreto ministeriale del 14 settembre 2005.

Alle N.T.C. 2008 citate è allegato un documento sulla pericolosità sismica (Allegato A), secondo il quale l’azione sismica sulle costruzioni è da valutare in base alla pericolosità sismica di base, più semplicemente chiamata pericolosità sismica, che costituisce l’elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche. Con riferimento a quanto disposto in tale Allegato, l’accelerazione sismica massima del terreno ( $a_g$ ) viene definita in corrispondenza dei punti di un reticolo, i cui nodi non distano fra loro più di 10 km, per diverse probabilità di superamento in 50 anni e per diversi periodi di ritorno (variabili tra 30 e 2.475 anni).

Qualora il sito in esame non ricada nei nodi del reticolo di riferimento, il valore del suo parametro  $a_g$  può essere ricavato come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento in cui è situato, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici.

In adempimento agli obblighi stabiliti dalla normativa nazionale e con l’obiettivo di ridurre il rischio sismico, la Regione Emilia-Romagna, con Deliberazione dell’Assemblea legislativa n. 112 del 2 maggio 2007, ha approvato

<p><b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI</p>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	18 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

l'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio", in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica". Tale atto è ora stato aggiornato con la DGR n. 2193 del 21 dicembre 2015. Tale documento fornisce i criteri per l'individuazione delle aree soggette ad effetti locali e per la microzonazione sismica del territorio al fine di orientare le scelte della pianificazione verso le aree contraddistinte da minore pericolosità sismica. In esso viene inoltre precisato che la pericolosità del rischio sismico dipende sia dalle caratteristiche sismiche dell'area, cioè dalle sorgenti sismiche, dall'energia, dal tipo e dalla frequenza dei terremoti in essa presenti (*pericolosità sismica di base*), sia dalle caratteristiche geologiche e morfologiche del territorio, in quanto alcune formazioni litologiche e particolari forme del paesaggio, possono modificare le caratteristiche del moto sismico superficiale e possono favorire effetti locali di amplificazione o di instabilità dei terreni (*pericolosità sismica locale*).

Gli studi sulla pericolosità sismica hanno pertanto come obiettivo:


- ◆ l'individuazione delle aree dove in occasione dei terremoti attesi possono verificarsi effetti locali;
- ◆ la stima quantitativa della risposta sismica locale dei depositi e delle morfologie presenti nell'area di indagine (Analisi della Risposta Sismica Locale, RSL);
- ◆ la suddivisione del territorio in sottozone a diversa pericolosità sismica locale (Microzonazione Sismica, MZ).

Per questi studi sono previsti diversi livelli di approfondimento a seconda della sismicità locale e delle finalità delle realizzazioni previste.

La **prima fase** è volta a definire gli *scenari di pericolosità sismica locale*, cioè ad identificare le parti di territorio suscettibili di effetti locali (amplificazione del segnale sismico, cedimenti, instabilità dei versanti, fenomeni di liquefazione, rotture del terreno, ecc.). Questa individuazione si basa su rilievi, osservazioni e valutazioni di tipo geologico e geomorfologico, svolte a scala territoriale, nonché su raccolte di informazioni in merito agli effetti indotti dai terremoti che in passato hanno colpito la zona. Spesso, quanto definito in questa fase, fa ampio riferimento ed elabora i dati predisposti e resi disponibili dalle indagini eseguite in sede di redazione del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (P.T.C.P.) e dei Piani Strutturali Comunali (P.S.C.) e, a sua volta, concorre alla definizione delle scelte urbanistiche, fornendo indicazioni sui limiti e sulle condizioni di cui tenere conto nella pianificazione.

La **seconda fase** ha come obiettivo la *Microzonazione sismica del territorio indagato* ossia l'approfondimento delle condizioni di pericolosità indicate dal precedente livello di approfondimento, la suddivisione dettagliata del territorio, in aree con maggiore o minore pericolosità sismica, l'indicazione delle aree ove si ritengono necessari approfondimenti con la precisazione delle indagini e delle analisi da effettuare.

La **terza fase** concerne appunto nell'attuazione degli approfondimenti nei luoghi e con le modalità indicate di massima nella seconda fase.

 <b>ANTONIAZZI</b> <small>GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE</small> <small>GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	19 di 59




<i>PROGETTO</i>	<i>LIVELLO</i>
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	<i>Locali approfondimenti di terzo</i>

## **2.6. ZONE OVE SONO RICHIESTI GLI APPROFONDIMENTI DI III LIVELLO**

L'indagine di secondo livello, relativa al Comune di Predappio, ha individuato l'abitato di Predappio Alta come area che richiede approfondimenti di III livello, in quanto ricade in zona di attenzione per fenomeni gravitativi tanto in atto quanto potenziali.

Questo insediamento è stato dichiarato Abitato da consolidare con D.L. n.299 del 02/03/1916 e da trasferire con R.D. n.1029 del 09/06/1925. La relativa perimetrazione e normativa, ripresa dal Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico dei Bacini Regionali Romagnoli, è stata adottata con Delibera G.R. n.427 del 15/03/04 "Legge 9-07-1908 N. 445 art. 29 del P.T.P.R. e Legge 3-08-1998 n. 267 - Abitato di Predappio Alta, Comune di Predappio (FC) - Trasformazione del vincolo di trasferimento in vincolo di consolidamento e perimetrazione e zonizzazione delle aree in dissesto".

Come definito dall'approfondimento di II livello, l'ambito territoriale, demandato al III livello di approfondimento, riguarda il perimetro dell'abitato da consolidare ampliato fino a ricomprendere aree instabili o in dissesto, com'è evidente nella figura n. 13.

 <b>ANTONIAZZI</b> <small>GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE  GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	20 di 59

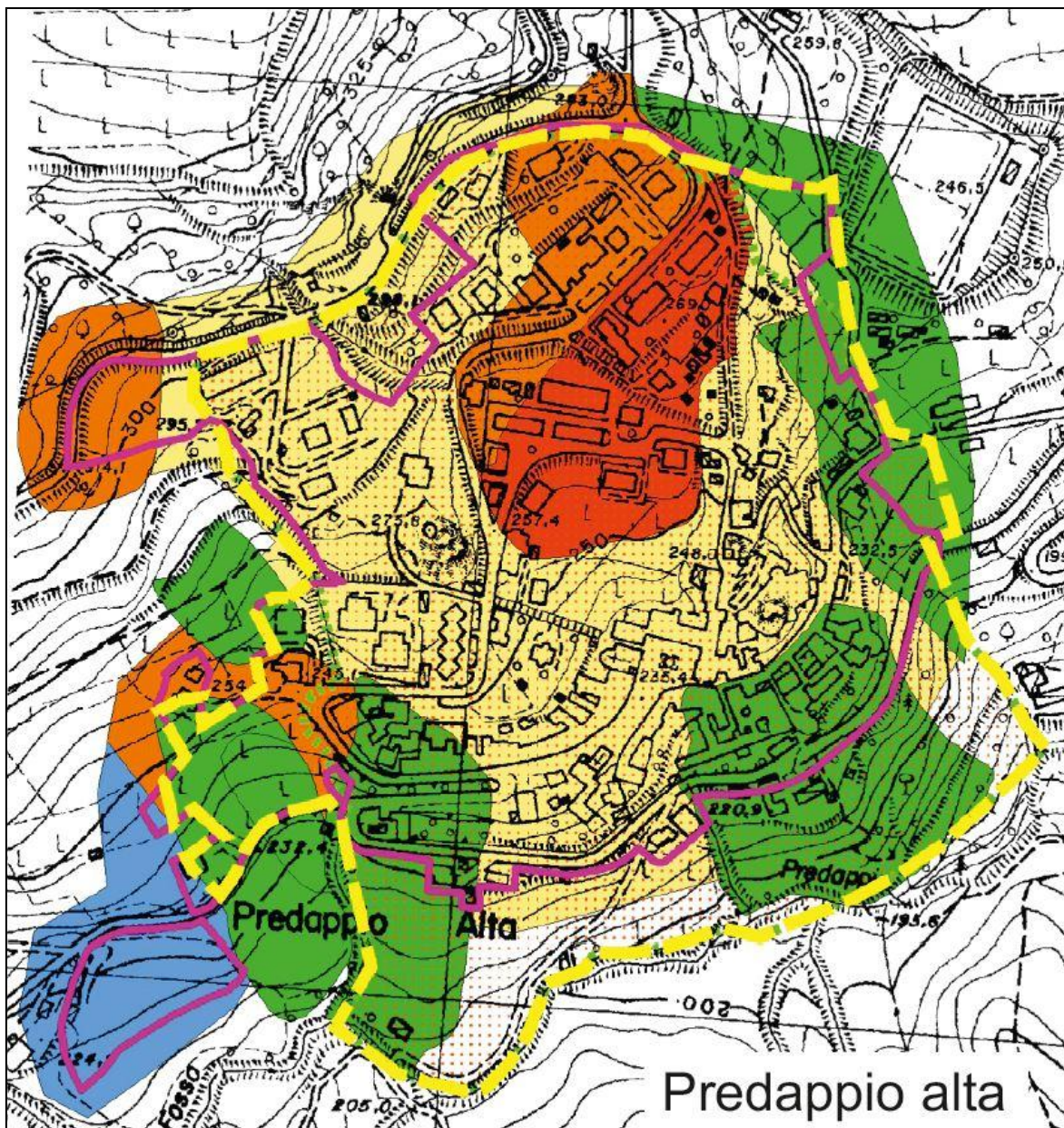


Figura n. 13 - La zona interessata dagli approfondimenti di III livello è delimitata dal tratteggio giallo. Le zone suscettibili di instabilità sono individuate dal colore verde

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI PREDAPPIO (FC) Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

### 3. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

#### 3.1. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI

I dati elaborati in questa sede, ossia nell'ambito del terzo livello d'approfondimento, riguardano l'area di Predappio Alta, precisata nella figura 13, e derivano:

- dalla raccolta ed elaborazione di quanto disponibile in merito alle aree considerate presso l'Ufficio Tecnico comunale, la Provincia di Forlì-Cesena, il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e gli archivi personali dei partecipanti a questo studio;
- da un'apposita campagna d'indagini, attuata allo scopo di acquisire un'adeguata conoscenza della specifica situazione locale.

Nella tabella n. 3 è fornito il quadro d'assieme delle prove acquisite o appositamente realizzate, concernenti l'area di Predappio Alta interessata dal terzo livello d'approfondimento.

TABELLA N. 3 - QUADRO D'ASSIEME DELLE PROVE IN SITO ACQUISITE O REALIZZATE IN QUESTA SEDE

TIPO DI PROVA IN SITO	Archivio RER	Archivio Provincia	Archivio Comune	Studio Antoniazzi	Prove realizzate in questa sede	Totale
Sondaggi a carotaggio continuo				12		12
Sondaggi a distruzione di nucleo					1	1
Microtremori (HVSR)					24	24
Prove di colonna risonante					1	1
MASW					18	18
REMI					4	4
Down Hole	1					1
Cross Hole	2					2
Totale	3	0	0	12	48	63


L'ubicazione degli elementi stratigrafici e geofisici, acquisiti in questa sede, sono riportati nella **Carta delle indagini** in scala 1.5.000 unitamente a quelli raccolti nello studio di secondo livello.

Gli elementi raccolti sono stati trasformati in formato digitale con modalità georiferita, al fine di consentirne l'elaborazione in ambiente GIS. Sia i dati di base, sia quelli elaborati sono stati inoltre organizzati in formato vettoriale (*shapefile*) nel rispetto di quanto precisato negli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica.

#### 3.2. PROVE ACQUISITE NEL III LIVELLO D'APPROFONDIMENTO

##### 3.2.1. Sondaggi

In merito all'area in esame, come evidente nella tabella n. 3, sono stati recepiti complessivamente 12 sondaggi a carotaggio continuo ed è stato eseguito un sondaggio a distruzione di nucleo. Le relative stratigrafie sono riportate nell'apposito data base.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	22 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

### **3.2.2. Prove di laboratorio**


Su un campione litologico, prelevato nella zona in esame durante l'esecuzione del sondaggio a distruzione di nucleo, sono state eseguite prove di colonna risonante. Queste prove consentono di determinare il modulo di taglio G e lo smorzamento dei terreni al variare delle deformazione di taglio imposte. Vengono largamente impiegate in tutti i casi in cui i terreni sono sottoposti a sollecitazioni dinamiche, per lo studio dei problemi di deformazione dei terreni e di propagazione delle onde.

### **3.2.3. Prove geofisiche**

L'insieme delle prove geofisiche, appositamente realizzate, nelle aree in esame, è ascrivibile ai seguenti tipi:

- Microtremori (HVSr), prove compressive n. 24.
- Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), prove compressive n. 18.
- Refractor Microtremor (REMI), prove compressive n. 4.
- Down Hole, prove compressive n. 1.
- Cross Hole, prove compressive n. 2.

I dati registrati sono stati poi elaborati e restituiti graficamente con le usuali procedure. L'ubicazione di queste prove è precisata nella **Carta delle indagini**.


 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	23 di 59



<i>PROGETTO</i>	<i>LIVELLO</i>
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	<i>Locali approfondimenti di terzo</i>

#### **4. MODELLO GENERALE DEL SOTTOSUOLO**

Per quanto concerne il modello generale del sottosuolo del Comune di Predappio, in questa sede, viene fatto riferimento a quanto già definito nello studio di Microzonazione sismica di secondo livello, al quale si rimanda per i particolari.

 <b>ANTONIAZZI</b> <small>GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE  GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	24 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

## 5. DETERMINAZIONI ED INCERTEZZE

In merito alle indagini geofisiche eseguite nell'ambito della presente indagine di terzo livello si precisa quanto segue.

Nel **rilievo dei microtremori** per analisi dei rapporti spettrali delle componenti orizzontale e verticale del moto (HVSR), direttamente rilevati in questa sede, e nelle relative analisi sono state seguite le linee guida del progetto SESAME (European research project - Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibration) con le tecniche di acquisizione e le modalità di elaborazione esplicitate negli indirizzi e criteri per la microzonazione sismica.

Questo metodo (HVSR o di Nakamura) si basa sul rapporto spettrale tra le componenti orizzontale (H) e verticale (V) del noise, assumendo che la componente verticale (V) nel passare dal *bedrock* alla superficie non subisce amplificazione, e consente di determinare la "*frequenza di risonanza*" di uno strato caratteristico del sito, per il quale assume il valore massimo il rapporto  $RHV = HS/VS$  (*Horizontal to Vertical Ratio*) tra gli spettri delle componenti orizzontale e verticale del moto del suolo.

Ciascuna prova realizzata ha fornito, in particolare, un grafico del rapporto spettrale H/V - frequenza, in cui si possono osservare il picco o i picchi caratteristici, in corrispondenza di determinate frequenze.


Per determinare la qualità delle singole misure HVSR effettuate e la loro relativa affidabilità, si è proceduto all'analisi della durata complessiva delle singole registrazioni, utilizzando quelle capaci di produrre stime "robuste" del campo medio delle vibrazioni ambientali. Tutte le misure soddisfano i primi 3 criteri del progetto SESAME (linee guida 2005), relativi alla robustezza statistica del segnale.

Per ogni singola acquisizione è stato inoltre valutato l'andamento complessivo della curva H/V, prestando particolare attenzione, durante la fase di elaborazione, alla plausibilità fisica della curva stessa, verificabile attraverso l'individuazione di massimi caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale.

In fase di elaborazione, sfruttando le possibilità di analisi direzionale e temporale del software utilizzato (Jsesame, Geopsy), è stata valutata la stazionarietà temporale dei rapporti spettrali misurati, prestando inoltre particolare attenzione alle variazioni azimuthali di ampiezza, nel rispetto della condizione di isotropia del segnale.

Con riferimento ai criteri delle linee guida SESAME 2005, relativi alla "chiarezza" del picco di possibile risonanza, si osserva che normalmente le misure soddisfano almeno 5 su 6 criteri. Solo cinque casi (040032P51HVSR51, 040032P55HVSR55, 040032P56HVSR56, 040032P83HVSR85 e 040032P84HVSR86) non soddisfano questi requisiti.

L'**indagine microsismica MASW** è stata eseguita con un sismografo "DOREMI" della SARA Electronic Instruments S.r.l. È stata utilizzata una frequenza di campionamento di 5.000 Hz e una registrazione magnetica degli eventi per un intervallo di 2000 ms. Alla strumentazione sismografica sono stati connessi sensori geofonici verticali da 4,5 Hz, posti alla distanza reciproca di 1 metro. Il rilievo è stato condotto operando energizzazioni per l'acquisizione dei dati agli estremi delle stese geofoniche della lunghezza complessiva di 26 metri, restituendo i risultati su verticali rappresentative del sito.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	25 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

La tecnica di investigazione ed elaborazione MASW dei dati consente di rilevare la situazione sismo-stratigrafica del sottosuolo in riferimento alla velocità delle onde S, basandosi sulla misura delle onde superficiali di Rayleigh (onde di superficie prodotte da un movimento circolare retrogrado delle particelle del suolo), che si presta ad una agevole elaborazione in considerazione del fatto che il contenuto energetico risulta nettamente superiore a quello che compete alle componenti delle onde di volume P ed S, il cui decadimento ed attenuazione risulta proporzionale al quadrato della distanza piuttosto che alla distanza dalla sorgente dell'impulso.


Dato che in un mezzo stratificato le onde di Rayleigh subiscono il fenomeno della dispersione, poiché le differenti lunghezze d'onda, che descrivono il movimento delle particelle, viaggiano a velocità differenti in relazione alle caratteristiche dei terreni presenti nel sottosuolo, la loro dispersione consente di analizzare le variazioni di velocità delle onde S e di discriminare in profondità le principali variazioni di rigidità dei terreni, tenendo conto che le componenti d'onda ad alta frequenza impegnano e caratterizzano gli strati più superficiali dell'area di indagine, mentre quelle a più bassa frequenza interessano spessori maggiori del sottosuolo e caratterizzano gli strati più profondi. La velocità delle onde S si determina, in particolare, considerando che è dell'ordine del 90-110% di quella delle onde di Rayleigh.

Le interpretazioni MASW, eseguite con softwares votati (WinMASW, Seisimager, Masw-Vitantonio e WinMasw-Eliosoft), hanno permesso di determinare le sismostratigrafie in onde S dei siti, accertando eventuali e locali inversioni di velocità e calcolando il valore equivalente alla profondità di 30 metri attraverso la seguente relazione:

$$V_{S_{30}} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove:  $V_{S_{30}}$  è la velocità sismica ponderata su 30 metri delle onde trasversali,  $h_i$  è lo spessore dell'orizzonte  $i$ esimo nei 30 metri di riferimento,  $V_i$  e' la velocità delle onde S dell'orizzonte  $i$ esimo di spessore  $h_i$ .

Il **rilievo REMI** (Refraction Microtremor) appartiene ai metodi di sismica passiva, basati sulla registrazione dei microtremori ossia dei rumori ambientali dovuti a sorgenti naturali e/o artificiali. L'acquisizione dei dati, come per la prova sismica a rifrazione e per il metodo MASW, avviene mediante disposizioni multi-geofoniche ed utilizzando un sismografo multicanale.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	26 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

## 6. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

### 6.1. PRIMA FASE DEL PRESENTE LAVORO


Nella prima fase della presente indagine di terzo livello, come in seguito precisato, sono stati aggiornati i seguenti elaborati, predisposti nel secondo livello d'approfondimento:

- **Carta delle indagini (scala 1:5:000)** - In questa carta è riportata l'ubicazione, di tutte le indagini in sito acquisite o realizzate in questa sede, distinte in base alla specifica tipologia (sondaggi, penetrometrie, prove geofisiche ecc.); unitamente a quelle derivanti dallo studio di secondo livello.
- **Carta geologico-tecnica (scala 1:5.000)** - Questa carta, predisposta in sede di secondo livello, è stata rivista ed integrata (con tracce di sezioni ecc.) per quanto concerne le zone interessate dall'analisi di terzo livello.
- **Carta delle frequenze naturali dei terreni (scala 1:5.000)** - La carta presenta l'ubicazione dei punti ove sono state eseguite le indagini sismiche HVSR, con l'indicazione del valore  $F_0$  del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (*frequenza principale*). A fianco di ciascuno di questi simboli è riportata la frequenza relativa al primo picco significativo (in rosso). Nel caso sia presente, è indicata anche la frequenza (in blu) di un secondo picco (*frequenza secondaria*). Le misure inoltre sono state suddivise in classi sulla base delle frequenze ( $F_0 \leq 0.6$  Hz;  $0.6 < F_0 \leq 1$ ;  $1 < F_0 \leq 2$  Hz;  $2 < F_0 \leq 8$  Hz;  $F_0 > 8$  Hz) e dell'ampiezza del picco ( $1,5 \leq HVSR < 2$ ;  $2 \leq HVSR < 3$ ;  $HVSR \geq 3$ ). Anche questa carta, predisposta in sede di secondo livello, è stata aggiornata con i dati acquisiti nel terzo livello di approfondimento.
- **Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (scala 1:5.000)** - In questa carta, realizzata in sede di secondo livello di approfondimento, alla quale non sono state apportate modifiche, sono indicate le aree in cui è stato ritenuto necessario effettuare indagini e analisi di microzonazione sismica. I livelli di approfondimento ritenuti necessari, distinguendo tra zone suscettibili di instabilità, ove sono richiesti approfondimenti di terzo livello, e zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, oggetto di approfondimenti di secondo livello, all'interno delle quali sono state operate ulteriori distinzioni, identificando delle microzone omogenee, sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche. Trattandosi di una carta non modificata nel corso di questo studio, per la consultazione della stessa si rimanda allo studio di microzonazione sismica di Livello 2.

### 6.2. SECONDA FASE DEL PRESENTE LAVORO

Nella seconda fase della presente indagine di terzo livello è stato predisposto il seguente elaborato:

- **Carta delle velocità delle onde di taglio S (scala 1:5.000)** - Questa carta è il risultato dell'aggiornamento, con gli elementi acquisiti in questa sede, di quella predisposta nel secondo livello di approfondimento. In essa è precisata l'ubicazione degli stendimenti per determinazioni MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) e/o REMI (Refraction Microtremor), concernenti il territorio in esame, con precisato il rispettivo valore di  $V_{s30}$  e/o  $V_{sh}$ .

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	27 di 59



PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI PREDAPPIO (FC) Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

### 6.3. TERZA FASE DEL PRESENTE LAVORO

Nella terza fase del presente lavoro è stata effettuata l'analisi di terzo livello relativa all'abitato di Predappio Alta, individuata nello studio di secondo livello.

L'ambito territoriale di Predappio Alta, oggetto del presente approfondimento, è precisato nella figura n. 13.

In questa fase è stata sviluppata l'analisi approfondita che ha portato alla determinazione dello spettro di risposta in superficie e dei fattori di amplificazione che hanno permesso di realizzare le verifiche di stabilità dei versanti interessati e sono stati prodotti i seguenti elaborati:

- **Carta di microzonazione sismica Livello 3 (scala 1:5.000)** - In questa carta, basata su quanto predisposto nell'indagine di secondo livello, sono stati riportati gli approfondimenti realizzati nell'ambito del presente studio. La tabella n. 4 riporta i Fattori di Amplificazione determinati secondo la Deliberazione dell'Assemblea Legislativa n. 112 del 2 maggio 2007 ai quali fu fatto riferimento per la redazione della cartografia di secondo livello.

TABELLA N. 4 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DETERMINATI NEL II LIVELLO

RIFERIMENTO ZONE MOPS	$V_{SH}/VS_{30}$	TAB	$FA_{PGA}$	$FA_{SI} (0.1s-0.5s)$	$FA_{SI} (0.5s-1.0s)$
1	VS30=450	A2.1.1<800	1,4	1,5	1,4
2	VS5=300	A2.1.1<800	1,5	1,4	1,4
3	VS10=300	A2.1.1<800	1,8	1,7	1,4
4	VS5=300	A2.1.1>800	1,2	1,0	1,0
5	VS10=300	A2.1.1>800	1,7	1,4	1,0
6	VS5=250	A2.1.1<800	1,7	1,5	1,4
7	VS10=250	A2.1.1<800	2,0	1,9	1,5
8	VS30=500	A2.1.1<800	1,3	1,4	1,4


La tabella n. 5 riporta i Fattori di Amplificazione aggiornati secondo la DGR n. 2193 del 21 dicembre 2015, ai quali si fa riferimento per la redazione della cartografia di terzo livello.

TABELLA N. 5 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DETERMINATI NEL III LIVELLO

RIFERIMENTO ZONE MOPS	$V_{SH}/VS_{30}$	TAB	$FA_{PGA}$	$FA_{SI} (0.1s-0.5s)$	$FA_{SI} (0.5s-1.0s)$
1	VS30=450	A2.1.1<800	1,6	1,6	1,4
2	VS5=300	A2.1.1<800	1,5	1,4	1,3
3	VS10=300	A2.1.1<800	1,8	1,6	1,4
4	VS5=300	A2.1.1>800	1,2	1,0	1,0
5	VS10=300	A2.1.1>800	1,7	1,3	1,0
6	VS5=250	A2.1.1<800	1,6	1,5	1,4
7	VS10=250	A2.1.1<800	2,0	1,9	1,4
8	VS30=500	A2.1.1<800	1,4	1,5	1,4


Sono stati pertanto predisposti i seguenti elaborati cartografici:

- Carta di microzonazione sismica Livello 3 -  $FA_{PGA}$  (scala 1:5.000);
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 -  $FA_{IS 0,1 - 0,5 s}$  (scala 1:5.000);
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 -  $FA_{IS 0,5 - 1,0 s}$  (scala 1:5.000).

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	28 di 59

<i>PROGETTO</i>	<i>LIVELLO</i>
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	<i>Locali approfondimenti di terzo</i>

- **Verifiche di stabilità** - In questo elaborato, allegato alla presente relazione, sono raccolte le verifiche realizzate.

 <b>ANTONIAZZI</b> <small>GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE  GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	29 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

## 7. ELABORATI CARTOGRAFICI

### 7.1. CARTA DELLE INDAGINI

Nella **Carta delle indagini** in scala 1:5.000, concernente il territorio di Predappio Alta in esame, predisposta durante l'indagine di secondo livello ed aggiornata in questa sede, è riportata l'ubicazione di tutte le indagini in sito disponibili. Nella relativa legenda figurano i seguenti elementi:

- Sondaggio a carotaggio continuo
- Sondaggio a distruzione di nucleo
- Prova sismica in foro tipo Crosshole
- Prova penetrometrica statica con punta meccanica CPT
- Stazione microtremore a stazione singola (HVSR)
- MASW
- Prova REfraction Microtremors
- Area oggetto di microzonazione.

### 7.2. CARTA GEOLOGICO-TECNICA PER MICROZONAZIONE SISMICA

La realizzazione della **Carta geologico-tecnica** in scala 1:5.000 del territorio del Comune di Predappio in esame, predisposta durante l'indagine di secondo livello ed integrata in questa sede, ha consentito di definire il modello del sottosuolo ed è stata funzionale anche alla realizzazione della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (scala 1:5.000). In essa sono stati distinti:

- Terreni di copertura
- Substrato geologico stratificato, distinto in alternanza di litotipi, in granulare cementato e in coesivo sovra consolidato
- Instabilità di versante
- Forme di superficie e sepolte
- Elementi tettonico strutturali
- Elementi geologici e idrogeologici
- Ambienti genetico-deposizionali dei terreni di copertura.

Per quanto concerne i particolari relativi a questa carta si rimanda alla descrizione fatta nella relazione di secondo livello.


### 7.3. CARTA DELLE FREQUENZE NATURALI DEI TERRENI

La **Carta delle frequenze naturali dei terreni** in scala 1:5.000, del territorio del Comune di Predappio in esame, predisposta durante l'indagine di secondo livello ed integrata in questa sede, è stata realizzata utilizzando i dati sui microtremori disponibili e ubicando i punti ove sono state effettuate le misure HVSR. Nella relativa legenda, con riferimento a ciascuna prova, sono state precisate:

- la frequenza di picco significativa;
- l'ampiezza di picco;
- lo spessore atteso.

Al lato di ciascun simbolo sono riportate le frequenze relative al primo picco significativo (in rosso) e al secondo picco (in blu) se presente.

Un particolare simbolo indica anche l'assenza di picchi significativi.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	30 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

#### 7.4. CARTA DELLE MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA

La **Carta delle Microzone omogenee in prospettiva sismica** (MOPS) in scala 1:5.000 del territorio del Comune di Predappio, predisposta durante l'indagine di secondo livello, individua:

- zone stabili concernenti substrati costituiti da alternanze di litotipi stratificati;
- zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (zone S1-S8);
- zone suscettibili di instabilità, con instabilità di versante attiva o quiescente.

Trattandosi di una carta non modificata nel corso di questo studio, per la consultazione della stessa si rimanda allo studio di microzonazione sismica di Livello 2.

#### 7.5. CARTA DELLE VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO S

Nella **Carta delle velocità delle onde di taglio S** ( $V_s$ ) in scala 1:5.000 del territorio del Comune di Predappio in esame sono indicate:

- l'ubicazione degli stendimenti per determinazioni REMI o MASW, con indicato il valore di  $V_{s30}$  o  $V_{sh}$  in m/s,
- la stazione singola di misure dei microtremori, con indicato il valore di  $V_{s30}$  o  $V_{sh}$  in m/s.

#### 7.6. CARTA DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

Le Carte di microzonazione sismica di Livello 3 in scala 1:5.000 del Comune di Predappio allegate fanno parte degli elaborati grafici conclusivi del presente studio. In esse sono evidenti i locali approfondimenti di terzo livello, realizzati nelle Zone suscettibili d'instabilità, individuate dall'analisi di secondo livello.


Le amplificazioni sono state calcolate sia in termini di rapporto di accelerazione massima orizzontale ( $PGA/PGA_0$ ), sia di rapporto di Intensità di Housner ( $SI/SI_0$ ), per prefissati intervalli di periodi. Mediante l'analisi approfondita, descritta nel capitolo 8 (Approfondimenti di terzo livello) della presente relazione.

Nella cartografia sono riportate le:

- zone stabili;
- zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (i valori dei fattori di amplificazione sono stati ricavati dalle tabelle allegate alla DGR n. 2193/2015 della Regione Emilia-Romagna);
- zone di attenzione per instabilità (livello 2);
- zone suscettibili di instabilità (livello 3);
- tracce delle sezioni utilizzate per le analisi di stabilità del pendio.

La cartografia realizzata in merito alla Microzonazione sismica di livello 3 del Comune di Predappio, è costituita dai seguenti elaborati:

- Carta di microzonazione sismica Livello 3 -  $FA_{PGA}$  (scala 1:5.000);
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 -  $FA_{IS\ 0,1 - 0,5\ s}$  (scala 1:5.000);
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 -  $FA_{IS\ 0,5 - 1,0\ s}$  (scala 1:5.000).

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	31 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

## 8. APPROFONDIMENTI DI TERZO LIVELLO

### 8.1. AREE CONSIDERATE


Gli approfondimenti di terzo livello sono stati eseguiti in aree di pertinenza dell'abitato di Predappio Alta (settori contraddistinti dalle sezioni 3, 4 e 5). Si tratta, com'è già stato fatto rilevare, di zone suscettibili d'instabilità per franosità. Per ciascuna di queste aree, che nel seguito della presente relazione saranno indicate col nome della sezione da cui sono attraversate, è stata definita una successione sismostratigrafica tipo, coerente con i risultati delle indagini specificatamente condotte su tale area, risultata globalmente omogenea dal punto di vista della risposta sismostratigrafica. Queste definizioni hanno consentito d'interpretare l'intero sottosuolo considerato, ai fini delle specifiche verifiche, secondo un modello 1D.

### 8.2. ANALISI DI DISAGGREGAZIONE

Lo studio di disaggregazione di  $a_g$ , con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, permette di individuare per l'area in esame, il *range* della coppia magnitudo-distanza che incide maggiormente sulla sismicità dell'area.

La sintesi dello studio è accessibile dal portale dell'*Istituto di Geofisica e Vulcanologia* all'indirizzo <http://esse1-gis.mi.ingv.it>, dove è possibile selezionare, per il tempo di ritorno desiderato, la soglia di accelerazione al suolo, nelle condizioni di bedrock geofisico affiorante, in corrispondenza dei nodi di una griglia, restituita per l'intero territorio nazionale.

Nella figura 14 è riportato lo stralcio della Mappa di pericolosità sismica sotteso al territorio di Predappio, e nella figura 15 sono riportati i risultati della distribuzione percentuale degli eventi che hanno interessato l'area di studio, espressi dalla coppia magnitudo-distanza nella percentuale di rappresentatività della sismicità del sito. Gli eventi che contribuiscono alla sismicità dell'area sono contraddistinti da una magnitudo compresa tra 4,0 e 6,0, con valori medi di circa 4.94 e distanze epicentrali inferiori a 20 chilometri, con valori medi di 6,69 km.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	32 di 59

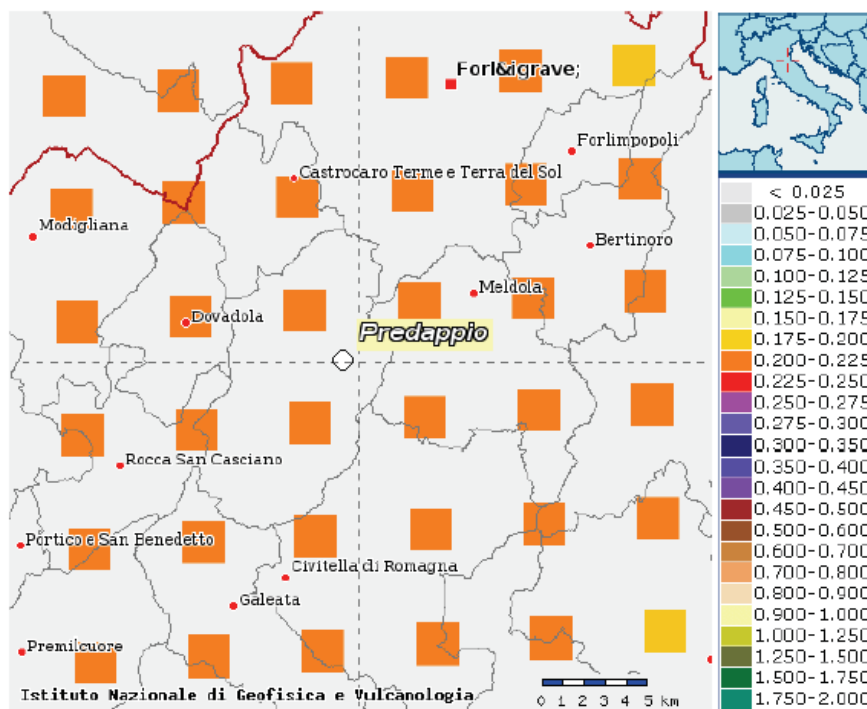
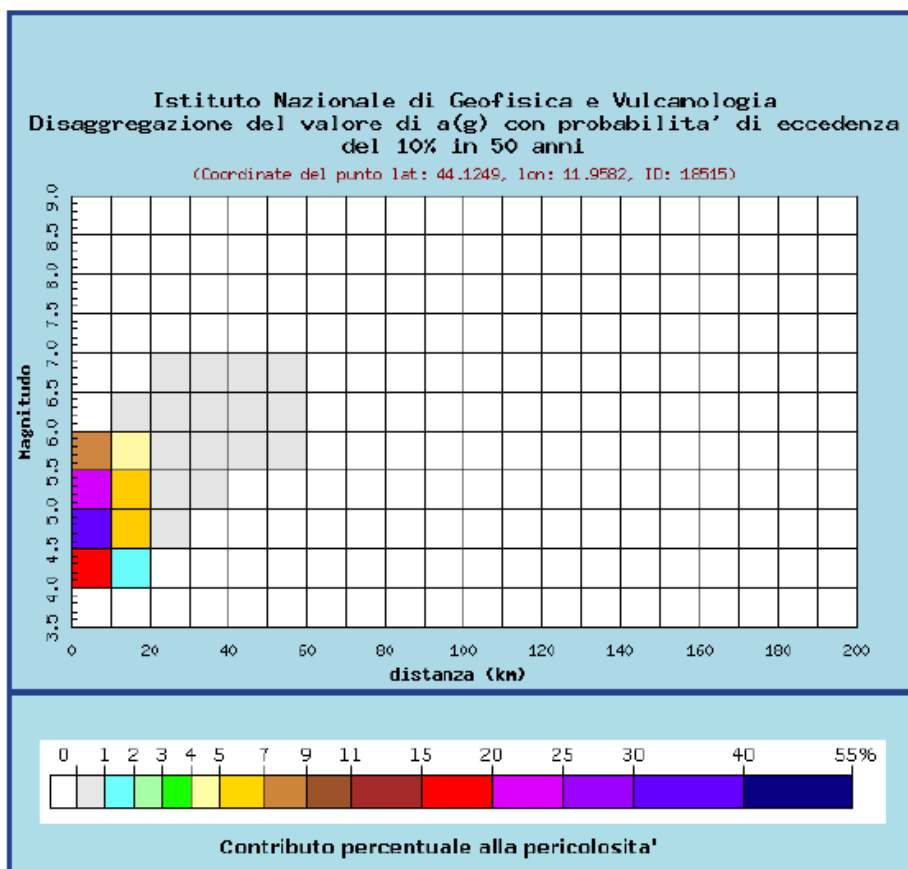


Figura n. 14 - Stralcio della Mappa di pericolosità sismica espressa in termini di a(g) per un Tempo di ritorno di 475 anni.



PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
4.940	6.690	1.060

Figura n. 15 - Valori delle coppie magnitudo distanza e relativa probabilità.

Il valore di magnitudo ottenuto dalla disaggregazione è stato confrontato con quello attribuito dalla zonazione sismogenetica ZS9 all'areale oggetto di microzonazione sismica ricadente nella zona 917 (tabella n. 6), che risulta essere pari a 6,14.

Tabella n. 6 - Valori di magnitudo per le zone sismogenetiche ZS9


Nome ZS	Numero ZS	Mwmax
Colli Albani, Etna	922, 936	5.45
Ischia-Vesuvio	928	5.91
Altre zone	901, 902, 903, 904, 907, 908, 909, 911, 912, 913, 914, 916, 917, 920, 921, 926, 932, 933, 934	6.14
Medio-Marchigiana/Abruzzese, Appennino Umbro, Nizza Sanremo	918, 919, 910	6.37
Friuli-Veneto Orientale, Garda-Veronese, Garfagnana-Mugello, Calabria Jonica	905, 906, 915, 930	6.60
Molise-Gargano, Ofanto, Canale d'Otranto	924, 925, 931	6.83
Appennino Abruzzese, Sannio – Irpinia-Basilicata	923, 927	7.06
Calabria tirrenica, Iblei	929, 935	7.29

Adottando un approccio di tipo cautelativo, per gli approfondimenti di terzo livello si è assunto come valore di riferimento della magnitudo quello massimo previsto dalla zonazione sismogenetica ZS9.

### 8.3. SPETTRO DI RISPOSTA RAPPRESENTATIVO

La valutazione della pericolosità sismica di base è stata definita attraverso i valori di  $a_{refg}$  pubblicati dalla Regione Emilia-Romagna (Cfr. *Allegato A4 - DGR 2193/2015*), ovvero dell'accelerazione massima orizzontale, espressa in frazione dell'accelerazione di gravità  $g$ , con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni corrispondente al periodo di ritorno di 475 anni. I valori sono relativi ai punti di una griglia con passo 0.05 gradi che è fornita nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, tema "Sismica – Microzonazione Sismica". I valori di  $a_{refg}$  sono stati elaborati da INGV.

Il valore di  $a_{refg}$  relativo ai siti analizzati è stato ottenuto interpolando i valori di  $a_{refg}$  definiti nei punti della griglia più prossimi ai siti oppure utilizzando il valore del punto della griglia più vicino. Tale valore per i siti in esame è risultato pari a **0,210 g**.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	34 di 59

Lo spettro di risposta a probabilità uniforme, che descrive le caratteristiche del moto sismico nei siti in esame, è anche determinato dallo spettro normalizzato fornito dalla DGR 2193/2015 rapportato al valore di  $a_{refg}$  del sito.

Lo spettro di risposta a probabilità uniforme, riportato nella figura n. 16 risulta del tutto congruente con quello determinato secondo le analisi del D.M. 14/01/2008 per un suolo di tipo A, attraverso l'impiego dell'applicativo Spettri-NTCver.1.0.3 predisposto dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (figura n. 17).

Il grafico mostra un buon grado di correlazione tra i due spettri.

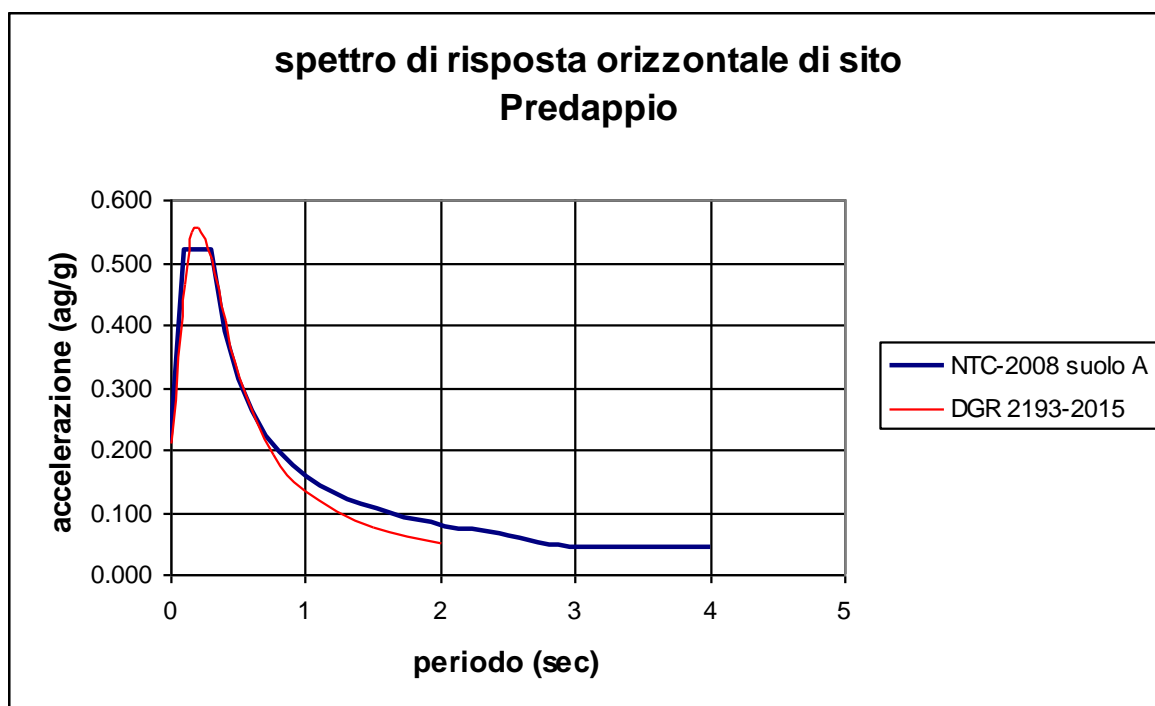


Figura n. 16 - Confronto tra spettro a probabilità uniforme e spettro di risposta elastico da NTC2008

Con riferimento all'applicativo del Ministero dei LLPP, i parametri caratteristici dello scuotimento atteso al sito di studio sono sintetizzati, per i diversi tempi di ritorno, dalla seguente tabella n. 7.



Tabella n. 7 - Parametri caratteristici dello scuotimento atteso

**Valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_o$ ,  $T_C^*$  per i periodi di ritorno  $T_R$  di riferimento**

$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T_C^*$ [s]
30	0.071	2.387	0.262
50	0.090	2.384	0.271
72	0.105	2.386	0.276
101	0.121	2.397	0.282
140	0.137	2.419	0.284
201	0.157	2.445	0.288
475	0.210	2.481	0.305
975	0.261	2.543	0.316
2475	0.339	2.606	0.328

Per il tempo di ritorno di anni 475, di riferimento per le analisi di Microzonazione Sismica, lo spettro è stato calcolato con i parametri riportati nella figura 17.

componente orizzontale

componente verticale

**Parametri indipendenti**

STATO LIMITE	SLV
$a_g$	0.210 g
$F_o$	2.481
$T_C^*$	0.305 s
$S_S$	1.000
$C_C$	1.000
$S_T$	1.000
$q$	1.000

**Parametri indipendenti**

STATO LIMITE	SLV
$a_{qv}$	0.129 g
$S_S$	1.000
$S_T$	1.000
$q$	1.000
$T_B$	0.050 s
$T_C$	0.150 s
$T_D$	1.000 s

**Parametri dipendenti**

$S$	1.000
$\eta$	1.000
$T_B$	0.102 s
$T_C$	0.305 s
$T_D$	2.438 s

**Parametri dipendenti**

$F_v$	1.533
$S$	1.000
$\eta$	1.000

Figura n. 17 - Dati dello spettro di risposta elastico delle NTC2008

**8.4. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE**

Un aspetto fondamentale da affrontare nell'ambito della Microzonazione Sismica di Livello 3, è rappresentato dall'analisi di risposta sismica locale, descrivibile come "quell'insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza, che un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

subisce attraversando gli strati di terreno sovrastanti (coperture) fino alla superficie”.

Tali studi sono circoscritti alle sole aree urbanizzate e suscettibili di trasformazioni urbanistiche, in cui è stata individuata la necessità di ulteriori approfondimenti nel corso della redazione del secondo livello di microzonazione sismica.

Considerando un’analisi della risposta sismica locale in modalità free-field, in cui viene considerato il sito privo di ogni tipo di struttura, i dati in ingresso e in uscita dal modello risultano i seguenti:

- Dati di input:
  - Moto sismico atteso alla base del deposito o su roccia affiorante (roccia o terreno duro di riferimento) con assegnato tempo di ritorno
  - Geometria del deposito (spessori ed estensione)
  - Stratigrafia (natura, alternanza e spessore degli strati)
  - Caratteristiche fisiche e geotecniche (densità, velocità delle onde di taglio S, rapporto di smorzamento, leggi di variazione della deformazione, ecc.)
- Dati di output:
  - Andamento del moto sismico sulla superficie espresso sotto forma di parametri sismici di ampiezza, frequenza e durata (spettro di risposta in accelerazione al suolo).


#### 8.5. SEGNALI SISMICI DI RIFERIMENTO

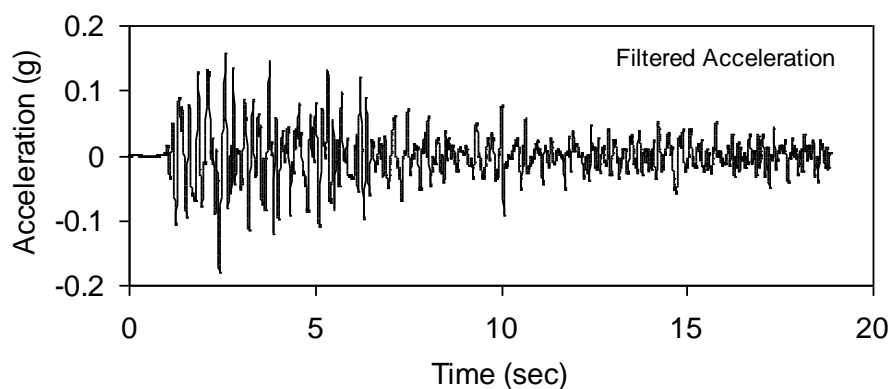
La valutazione della Risposta Sismica Locale necessita dell’impiego di un’azione dinamica di input, da applicare alla base delle “coperture”, con contenuto in accelerazione e frequenza coerente con l’evento atteso al sito con il tempo di ritorno prefissato, che interpreti le condizioni di sismicità dell’area.

In relazione della funzione pianificatoria assunta dal presente studio e, in ragione delle raccomandazioni contenute all’interno dell’Allegato A4 della DGR 2193/2015, sono stati impiegati quali segnali di input i 3 accelerogrammi forniti dalla Regione Emilia Romagna, ancorati al *bedrock* e opportunamente scalati all’accelerazione massima orizzontale attesa per i siti considerati, pari ad  $a_{refg} = 0,210 g$ .

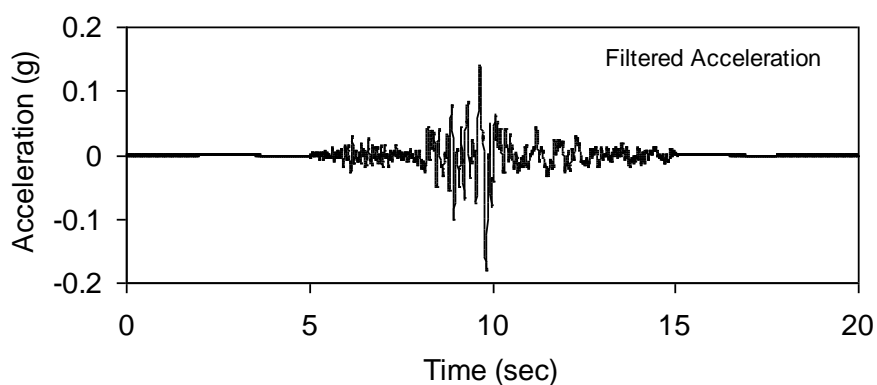
Gli accelerogrammi di riferimento impiegati nell’analisi sono denominati **000046xa**, **000126xa** e **000354xa**, corrispondenti rispettivamente ad un sisma di tipo impulsivo, di tipo ad ampio contenuto in frequenze e di tipo con componente predominante alle alte frequenze (figure 18a, 18b e 18c).

Nella figura n. 19, riferita ai siti in esame, sono riportati gli spettri di risposta elastici con periodo di ritorno 475 anni e smorzamento pari a 5%, relativamente ai 3 segnali di riferimento.

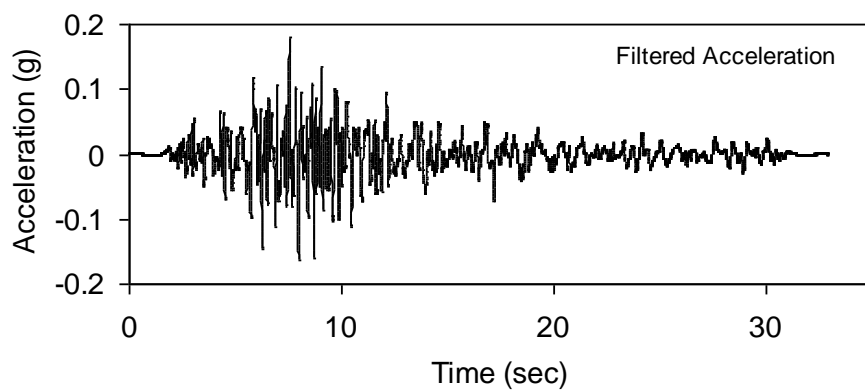
 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	37 di 59



*Figura n. 18a - Segnali di riferimento. Accelerogramma segnale 000046xa*



*Figura n. 18b - Segnali di riferimento. Accelerogramma segnale 000126xa*



*Figura n. 18c - Segnali di riferimento. Accelerogramma segnale 000354xa*

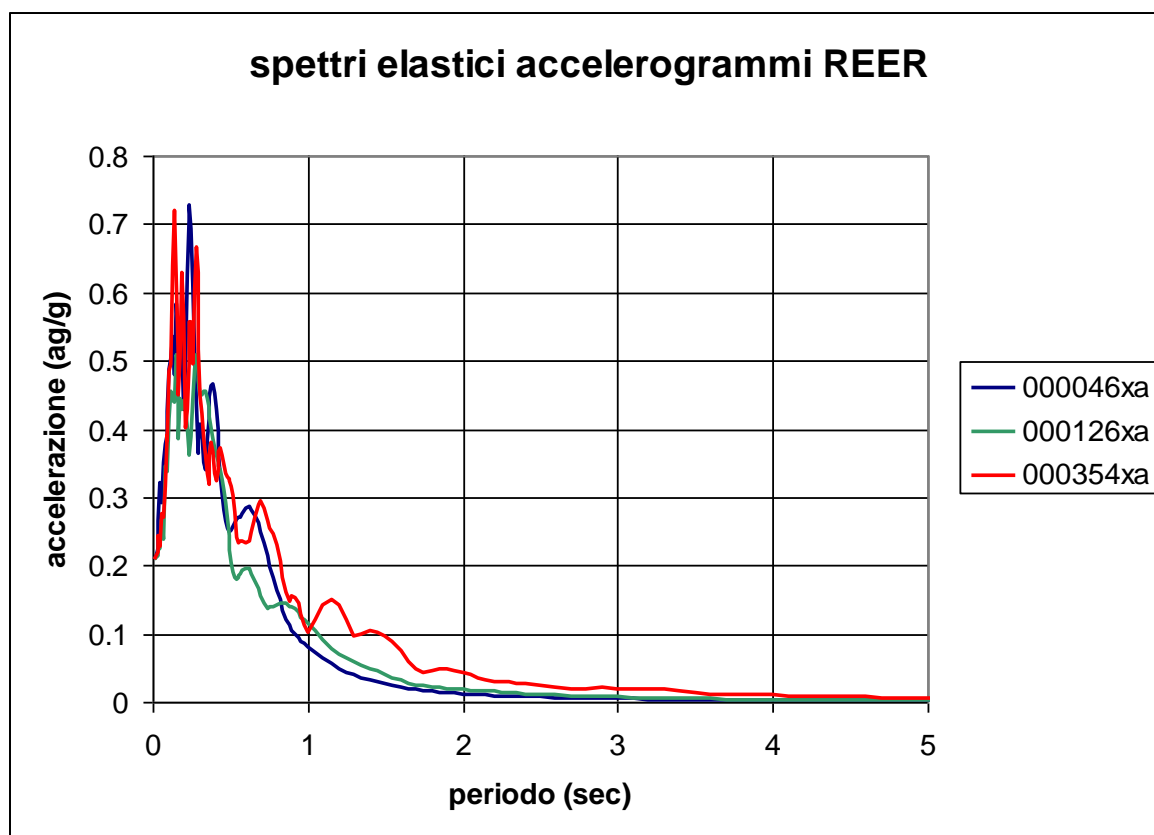


Figura n. 19 - Spettri dei segnali di input di riferimento

### 8.6. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Il modello del sottosuolo è stato definito attraverso i dati disponibili relativi alle indagini geognostiche del geodatabase appositamente predisposto, misure di rumore sismico effettuate a supporto dello studio di terzo livello e delle prospezioni MASW condotte specificatamente alla caratterizzazione sismo-stratigrafica del sottosuolo delle aree di analisi di dettaglio.

In particolare le indagini utilizzate sono state:

- Sondaggi a carotaggio continuo
- Sondaggi a distruzione di nucleo
- Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)
- Prove penetrometriche dinamiche leggere (DL)
- Microtremori a stazione singola (HVSr)
- Indagini MASW
- Indagini REfraction Microtremors

Le indagini di approfondimento considerate evidenziano, ai fini della microzonazione, condizioni sismo-stratigrafiche arealmente disomogenee, condizione ricorrente nelle aree collinari e montane dove lo spessore delle coltri di copertura, dei terreni detritici, della porzione di alterazione del substrato risultano estremamente variabili in relazione ai processi geomorfologici e di trasformazione antropica che interessano diversamente porzioni del territorio anche contigue.

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

### 8.7. FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DETERMINATI CON MODELLAZIONE NUMERICA

Per l'elaborazione dei dati di input e per l'ottenimento degli spettri in superficie, si è utilizzato per ciascuna verticale sismo-stratigrafica interpretata il *software LSR<sub>2D</sub> - Stacec* operando calcolo monodimensionale (1D), e sviluppando una verifica 2D sulla sezione tipologica del sito.

Per tenere in conto il comportamento non lineare dei terreni, che varia al variare della deformazione, il codice utilizza curve di degradazione del modulo di taglio G/G<sub>0</sub> e curve del rapporto di smorzamento D in funzione della deformazione di taglio.

Le curve di degrado dei terreni, per cui ci si è riferiti inizialmente a quelle bibliografiche di terreni con caratteristiche analoghe, sono state implementate attraverso le analisi in colonna risonante di campioni specificatamente prelevati nelle aree di studio.

I passi seguiti nello studio del problema della risposta sismica locale sono:

- definizione input sismico:
  - stima dell'accelerazione di base;
  - dati di disaggregazione;
  - estrazione, conversione e normalizzazione accelerogrammi di input;
- analisi di Risposta Sismica Locale;
  - inserimento sismostratigrafia di input (derivata da indagine sismica MASW);
  - esecuzione dell'analisi e restituzione grafica.

Le analisi numeriche che consentono di valutare gli effetti del sito nell'amplificazione delle onde sismiche possono essere distinte in:

- analisi numeriche monodimensionali;
- analisi numeriche bidimensionali;
- analisi numeriche tridimensionali.

Il primo approccio consente di definire una realistica risposta sismica stratigrafica di terreni non affetti da problematiche bidimensionali.


Il secondo approccio è da preferire in quelle situazioni in cui il sottosuolo presenta una geometria variabile in cui, oltre alla profondità, è importante considerare un'altra delle due restanti dimensioni spaziali.

Il terzo approccio necessita di modelli complessi che richiedono capacità computazionali notevoli; solo recentemente iniziano ad avere una certa diffusione grazie al rapido sviluppo degli strumenti informatici.

### 8.8. DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO LSR 2D

Il codice di calcolo LSR 2d consente di effettuare una modellazione bidimensionale del problema mediante il metodo degli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando il metodo lineare equivalente e tenendo conto della deformabilità del substrato.

Qualora la stratigrafia in esame non presenti problematiche di carattere bidimensionale è comunque possibile studiare il problema monodimensionale grazie ad una discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	40 di 59

### 8.9. METODO LINEARE EQUIVALENTE

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso e caratterizzato da marcata non linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e degradazione progressiva delle caratteristiche meccaniche per effetto del numero di cicli di carico applicati. In presenza di fluido interstiziale, alle suddette problematiche si aggiunge l'accumulo di sovrappressioni interstiziali in condizioni di drenaggio impedito o parziale, che sono comunque le più frequenti, in considerazione della velocità di applicazione del carico.

La modellazione di tali fenomeni richiede l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che oltretutto difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione spesso si preferisce fare riferimento a modelli costitutivi semplificati che, pur non essendo rigorosi, riescono a riprodurre il comportamento in modo adeguato in riferimento alla specifica applicazione.

In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato nella figura 20. La tensione  $\tau$  dipende dalla deformazione  $\gamma$  e dalla sua derivata  $\dot{\gamma}$ , secondo la relazione:

$$\tau = G \gamma + \eta \dot{\gamma}$$

dove:  $G$  = Modulo di taglio;  $\eta$  = viscosità del mezzo.

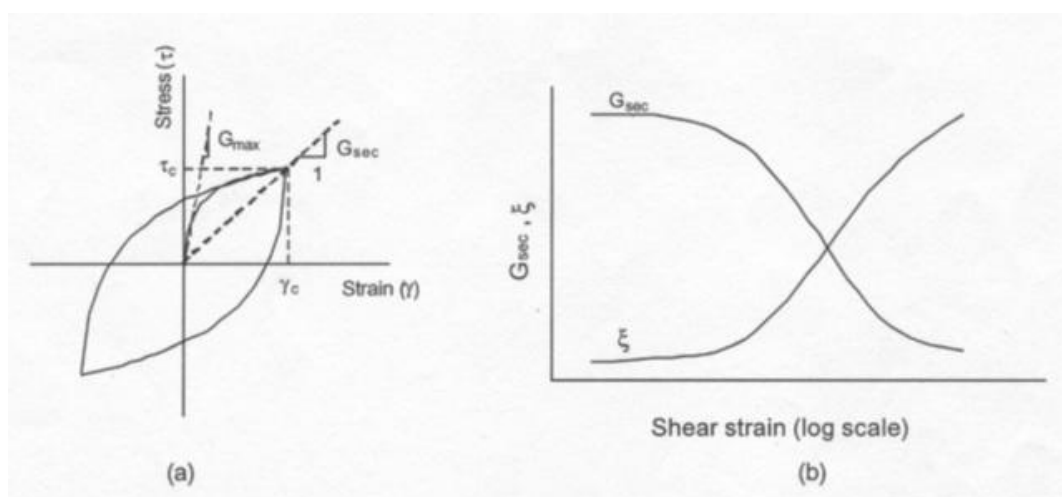


Figura n. 20 - Modello lineare equivalente:  
(a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in figura 20. Il modulo di taglio equivalente,  $G$ , è preso considerando il modulo di taglio secante  $G_s$ .

È possibile notare come alla fine di un ciclo controllato e simmetrico di tensioni si ha:

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

La curva  $G_s$ -  $\gamma$  non può avere una forma arbitraria ma deriva dalla curva  $\tau$  -  $\gamma$  e sussiste la seguente relazione:

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = G_s(\gamma) + \frac{dG_s}{d\gamma} \gamma \geq 0$$

La descrizione del comportamento meccanico dei terreni nei confronti dei carichi ciclici non può peraltro prescindere dalla dissipazione intrinseca di energia che si verifica durante i cicli di carico-scarico. Il parametro di riferimento a tal riguardo è costituito dal coefficiente di smorzamento  $D$ , definito come:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W^{dissp}}{W^{max}}$$


dove:  $\Delta W, diss$  = quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;  $W, max$  = massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico.

In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento.

### 8.10. PROCEDIMENTO ITERATIVO

La procedura iterativa che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema consiste nell'esecuzione di una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidità e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico:

- definizione di curve  $G=G(\gamma)$  e  $D=D(\gamma)$  per i diversi strati;
- inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni ( $G_0$  e  $D_0$ );
- calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato;
- aggiornamento dei valori  $G_1=G(\gamma_1)$  e  $D_1=D(\gamma_1)$ ;
- iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ( $\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$ ).

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	42 di 59



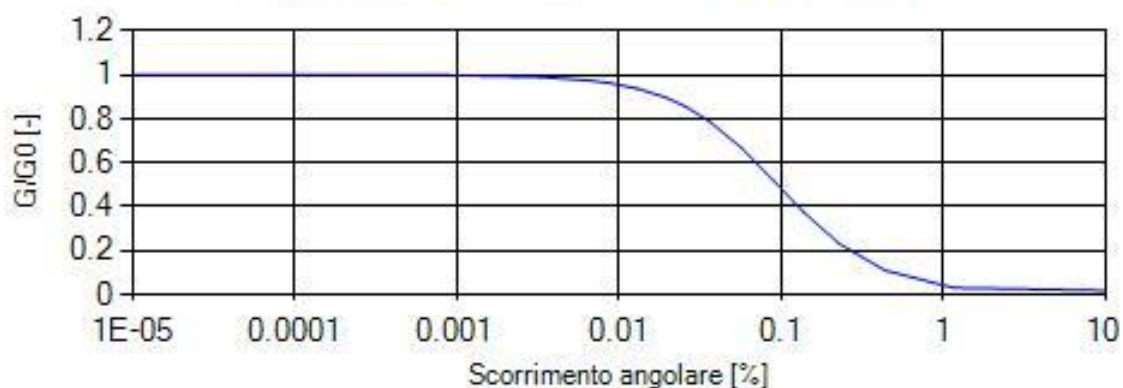
### 8.11. CURVE DI DECADIMENTO DEI MATERIALI

Le curve di decadimento dei materiali sottoposti alla verifica della risposta sismica locale sono state determinate sulla base delle prove in colonna risonante, specificatamente sviluppate nell'ambito dell'acquisizione dei dati e delle indagini di supporto allo studio, ed in riferimento alle analisi e studi condotti sui medesimi litotipi, nell'ambito di studi finalizzati dei quali sono disponibili e pubblici i reports e le relative elaborazioni.

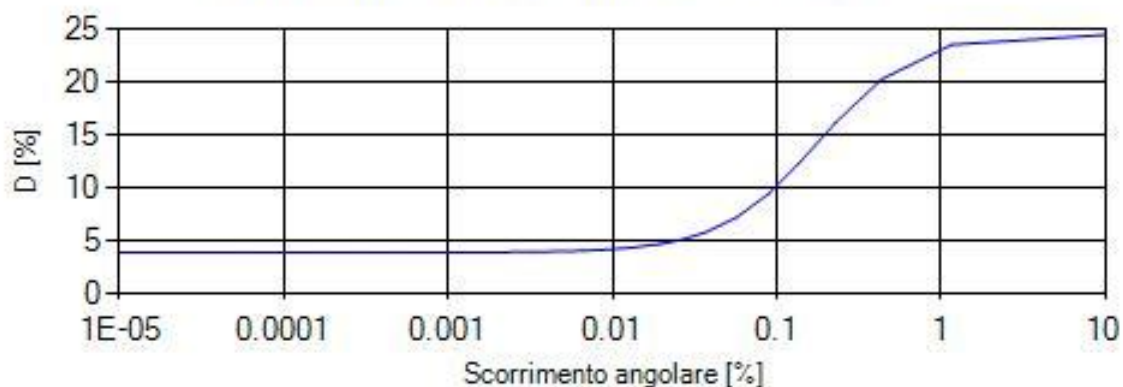
Le curve descrivono la diminuzione del modulo di taglio  $G$  ed un aumento del rapporto di smorzamento  $D$ , in relazione al livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno soggetto alla sollecitazione dinamica di input. Tale comportamento è descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento una relativa a  $G$  ed una a  $D$ .

Di seguito si riportano le curve di riferimento utilizzate nelle analisi:

Modulo di taglio Coltre detritica superiore

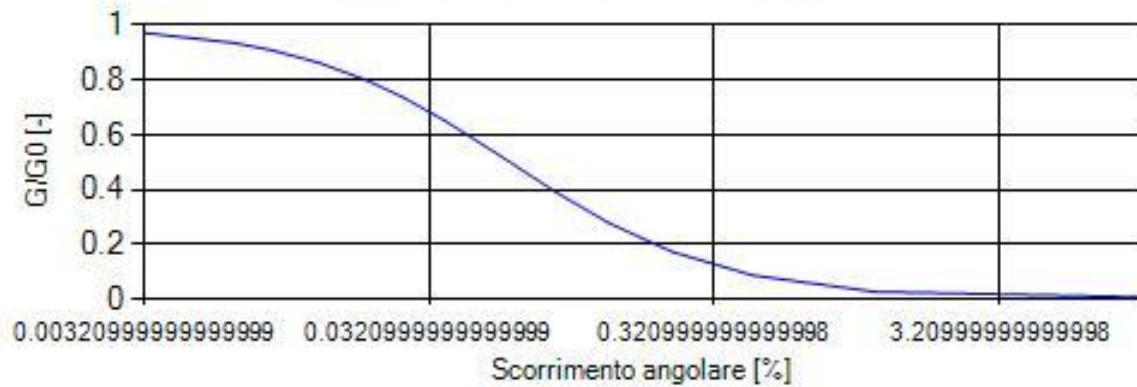


Smorzamento Coltre detritica superiore





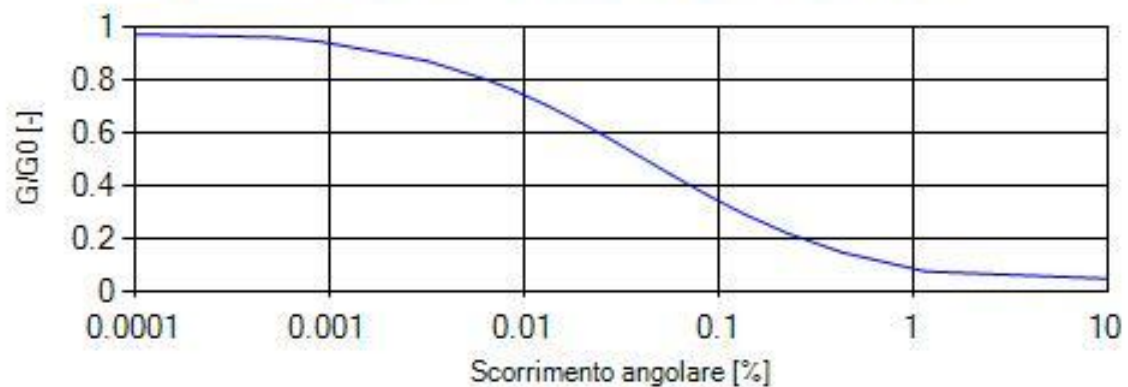
### Modulo di taglio Coltre detritica inferiore



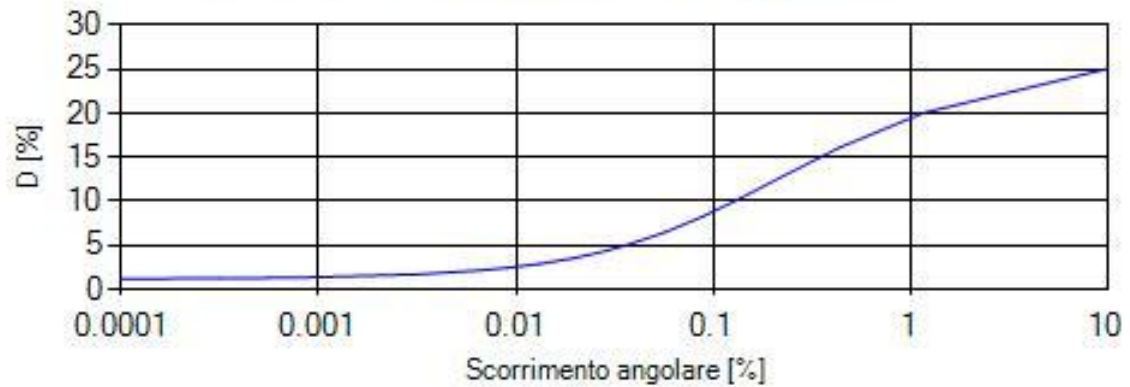
### Smorzamento Coltre detritica inferiore



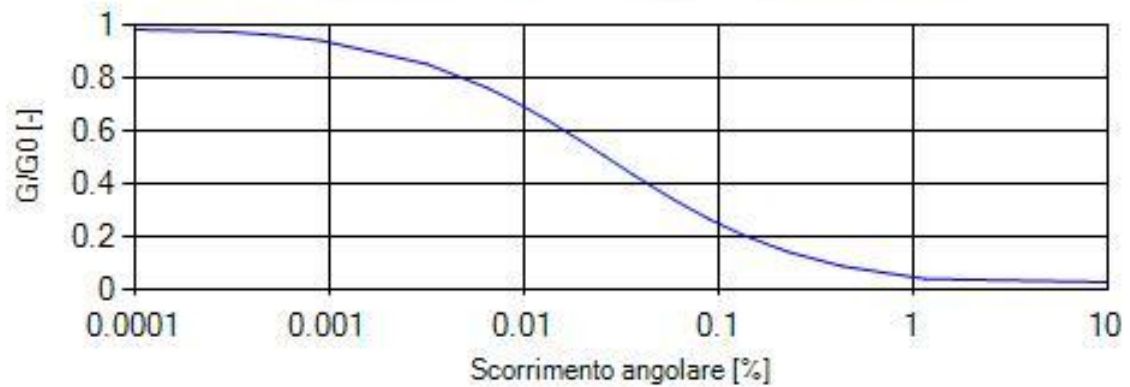
### Modulo di taglio alluvioni attuali ciott.sabbiose



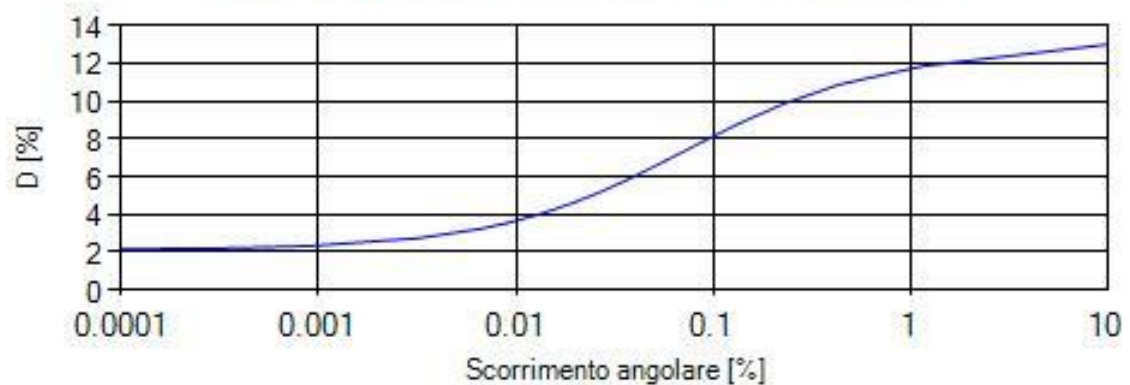
### Smorzamento alluvioni attuali ciott.sabbiose



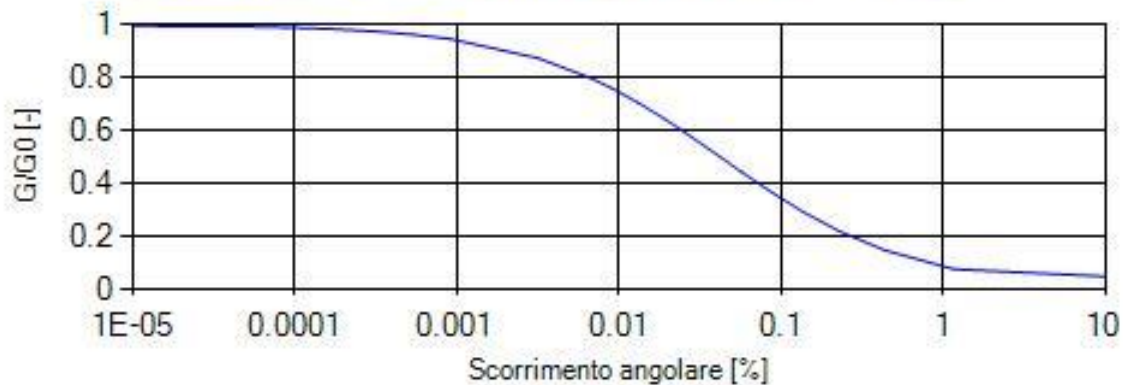
### Modulo di taglio alluvioni attuali sabb.argillose



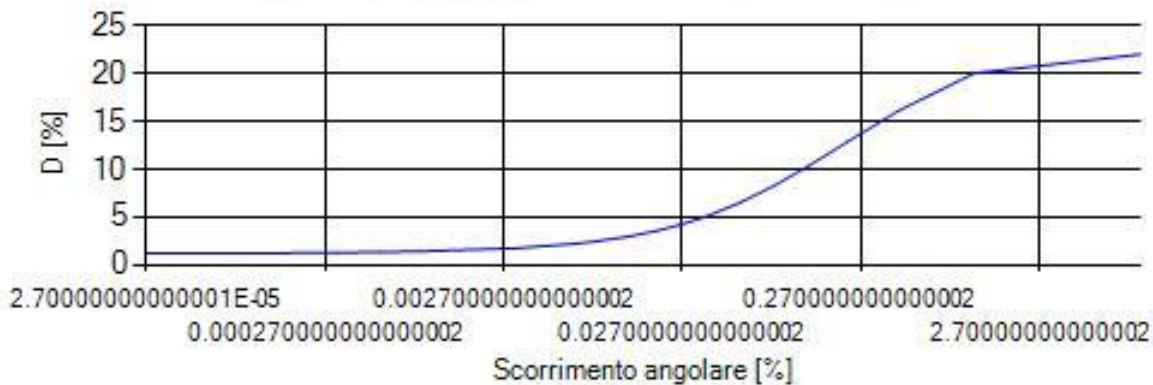
### Smorzamento alluvioni attuali sabb.argillose



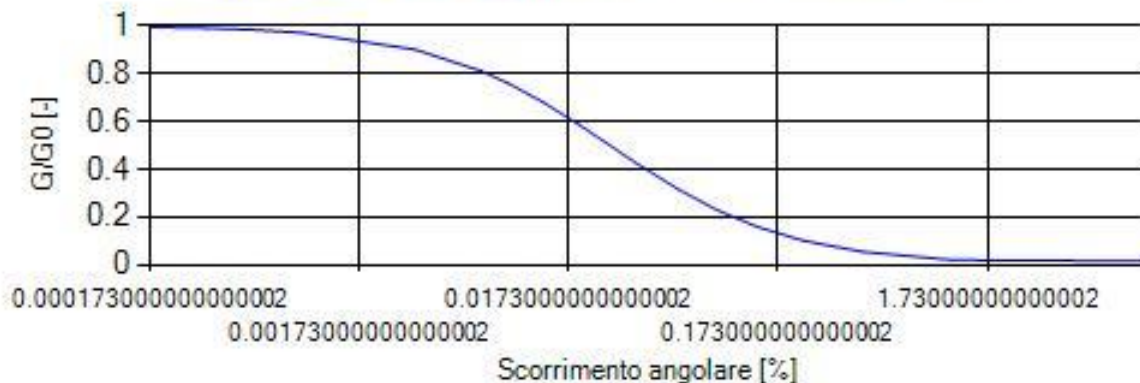
### Modulo di taglio alluvioni terrazzate ciott.sabbiose



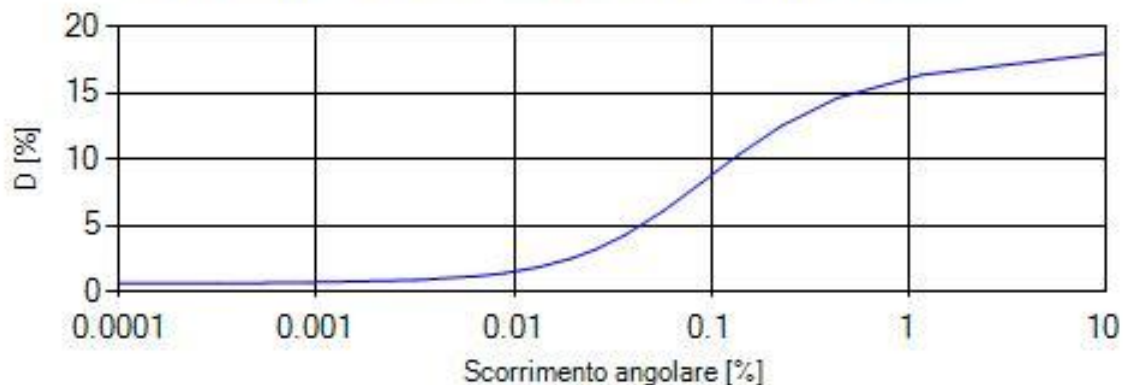
### Smorzamento alluvioni terrazzate ciott.sabbiose



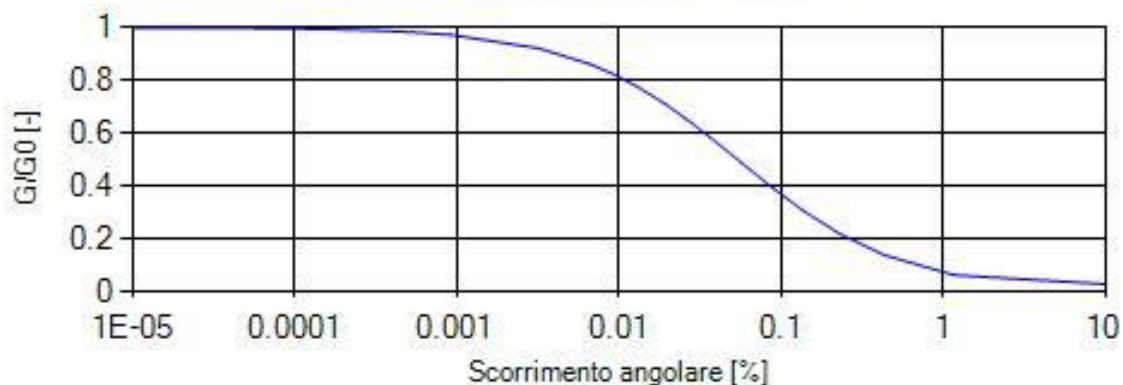
### Modulo di taglio alluvioni terrazzate sabb.argillose



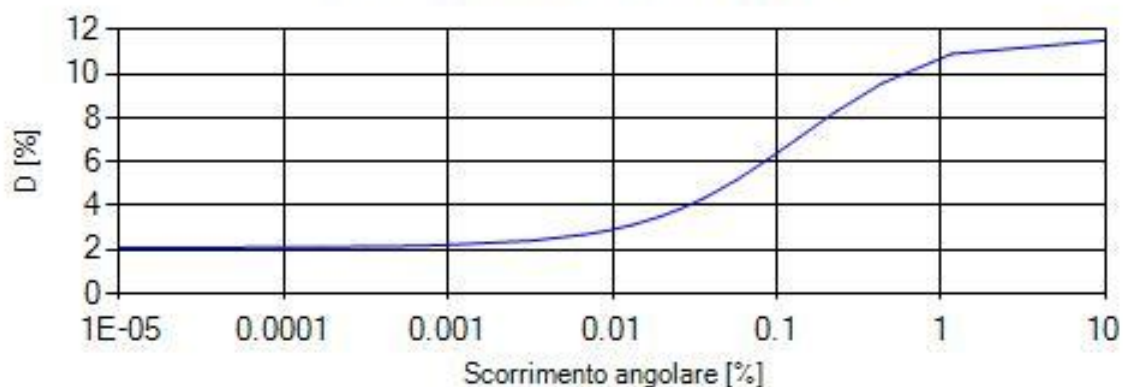
### Smorzamento alluvioni terrazzate sabb. argillose



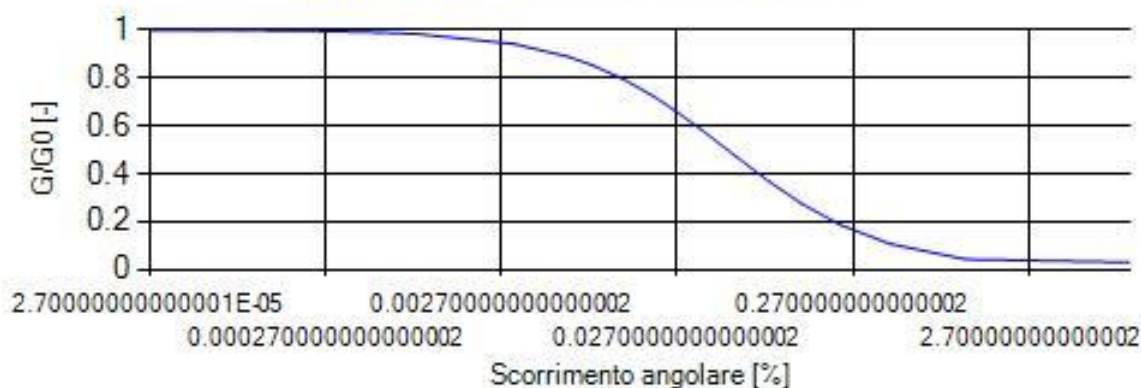
### Modulo di taglio arenarie e marne



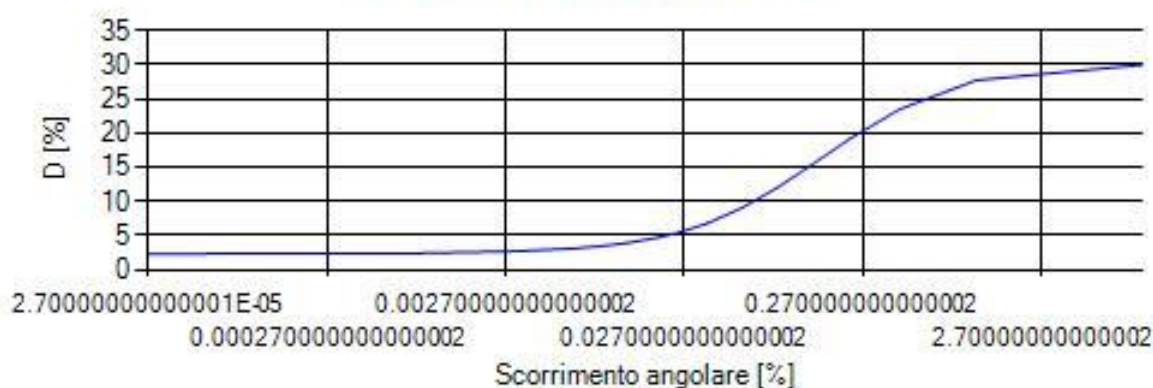
### Smorzamento arenarie e marne



### Modulo di taglio argilliti e marne



### Smorzamento argilliti e marne



## 8.12. STRATIGRAFIA E CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI SINGOLI STRATI

La stratigrafia impiegata per le analisi di risposta sismica locale è determinata, in primo luogo, dai dati geofisici, acquisiti nella campagna di supporto allo studio, ed è stata implementata dalle informazioni geognostiche esaminate e dai rilievi e sezioni geologiche sviluppate a supporto delle analisi di merito.

## 8.13. SPETTRI DI RISPOSTA IN SUPERFICIE

Entrando nel dettaglio dei risultati ottenuti attraverso le elaborazioni con il codice di calcolo, occorre precisare che, l'amplificazione sismica è stata quantificata, in termini di rapporto di accelerazione massima orizzontale ( $PGA/PGA_0$ ) e di rapporto di *Intensità di Housner* ( $SI/SI_0$ ), per prefissati intervalli di periodo ( $0,10 \div 0,50$  s e  $0,50 \div 1,00$  s), considerando tempi di ritorno di 475 anni e uno smorzamento del 5%.  $PGA_0$  e  $SI_0$  sono rispettivamente l'accelerazione massima orizzontale e l'*Intensità di Housner* al suolo di riferimento, e  $PGA$  e  $SI$  sono le corrispondenti grandezze di accelerazione massima orizzontale e *Intensità di Housner*, calcolate alla superficie dei siti esaminati.

Nella figura n. 21 sono rappresentati gli spettri di risposta in superficie per i segnali sismici relativi alla località Predappio Alta, oggetto di approfondimento di



livello 3 nell'ambito del Comune di Predappio, determinati quale effetto al suolo dell'input sismico applicato al substrato di riferimento rigido.

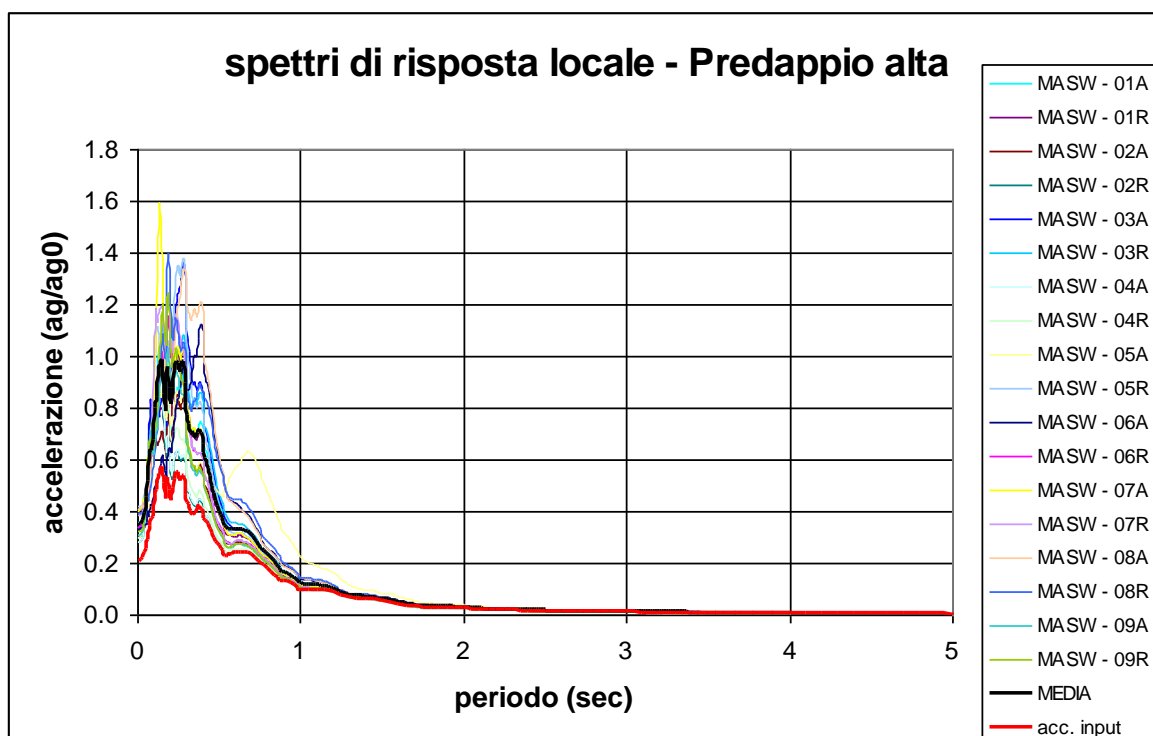


Figura n. 21 - Spettri di risposta locale a Predappio Alta

Il fattore di amplificazione della PGA è ottenuto dal rapporto tra l'ordinata dello spettro elastico in accelerazione a periodo  $T=0$ , che rappresenta l'accelerazione orizzontale massima in superficie (PGA), e il corrispondente valore dello spettro di input al bedrock ( $PGA_0$ ). L'Intensità di Housner è stata ottenuta dalla risoluzione dell'integrale tra lo spettro di risposta in pseudo-velocità determinato in superficie e quello al suolo rigido di riferimento, negli intervalli caratteristici di  $0,1 \div 0,5s$  e di  $0,5 \div 1,0s$ .

Nella tabella n. 8 sono stati riportati i fattori di amplificazione della PGA e dell'Intensità di Housner (IS) relativi alle verticali dei profili di rigidità di analisi riferiti a Predappio Alta.

Tabella n. 8 - Fattori di amplificazione di Predappio Alta

		$FA_{PGA}$	$FA_{IS}$ ( $0,1s < T_0 < 0,5$ )	$FA_{IS}$ ( $0,5s < T_0 < 1,0$ )
040032L7MASW7	MASW-01A	1.62	1.72	1.41
040032L7MASW8	MASW-01R	1.57	1.70	1.35
040032L8MASW9	MASW-02A	1.43	1.43	1.20
040032L8MASW10	MASW-02R	1.33	1.19	1.05
040032L9MASW12	MASW-03A	1.93	2.07	1.52
040032L9MASW13	MASW-03R	1.70	1.95	1.52
040032L10MASW14	MASW-04A	1.33	1.20	1.06

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI PREDAPPIO (FC) Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

040032L10MASW15	MASW-04R	1.43	1.33	1.11
040032L11MASW17	MASW-05A	1.68	1.49	2.29
040032L11MASW18	MASW-05R	1.99	2.11	1.52
040032L12MASW20	MASW-06A	1.58	1.96	1.70
040032L12MASW21	MASW-06R	1.62	1.77	1.31
040032L13MASW22	MASW-07A	1.92	1.87	1.42
040032L13MASW23	MASW-07R	1.84	1.84	1.34
040032L14MASW25	MASW-08A	1.95	2.43	1.78
040032L14MASW26	MASW-08R	1.86	2.12	1.79
040032L15MASW27	MASW-09A	1.48	1.54	1.20
040032L15MASW28	MASW-09R	1.53	1.66	1.23
	MEDIA	1.65	1.74	1.43

Ai fini della verifica del fattore di sicurezza della stabilità dei versanti in condizioni dinamiche, lungo le sezioni di verifica, l'accelerazione di riferimento è determinata come la media di quelle derivanti dall'analisi delle verticali di rigidità esaminate e sottese alle pertinenze delle rispettive direttrici di verifica.

Nel caso della **sezione 3**, lo spettro di risposta locale (figura n. 22) corrisponde alla media di quelli determinati dai rilievi MASW prossimi alla direttrice, relativi agli stendimenti n. 2 (040032L8MASW9, 040032L8MASW10), n. 8 (040032L14MASW25, 040032L14MASW26) e n. 9 (040032L15MASW27, 040032L15MASW28). I relativi fattori di amplificazione sono evidenti nella tabella n. 9.

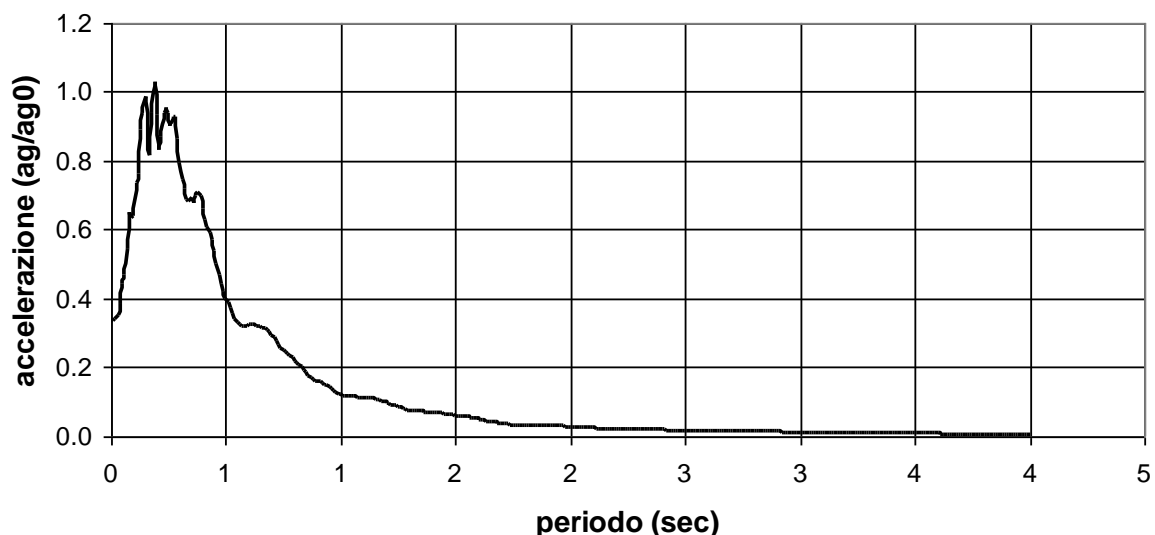



Figura n. 22 - Spettro di risposta locale concernente la sezione 3

Tabella n. 9 - Fattori di amplificazione relativi alla sezione 3

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	50 di 59

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI PREDAPPIO (FC) Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

	$FA_{PGA}$	$FA_{IS(0,1s < T_0 < 0,5)}$	$FA_{IS(0,5s < T_0 < 1,0)}$
MEDIA sezione 3	1.60	1.73	1.37

Nel caso della **sezione 4**, lo spettro di risposta locale (figura n. 23) corrisponde alla media di quelli determinati dai rilievi MASW prossimi alla direttrice, relativi agli stendimenti n. 5 (040032L11MASW17, 040032L11MASW18), n. 6 (040032L12MASW20, 040032L12MASW21) e n. 7 (040032L13MASW22, 040032L13MASW23). I relativi fattori di amplificazione sono evidenti nella tabella n. 10.

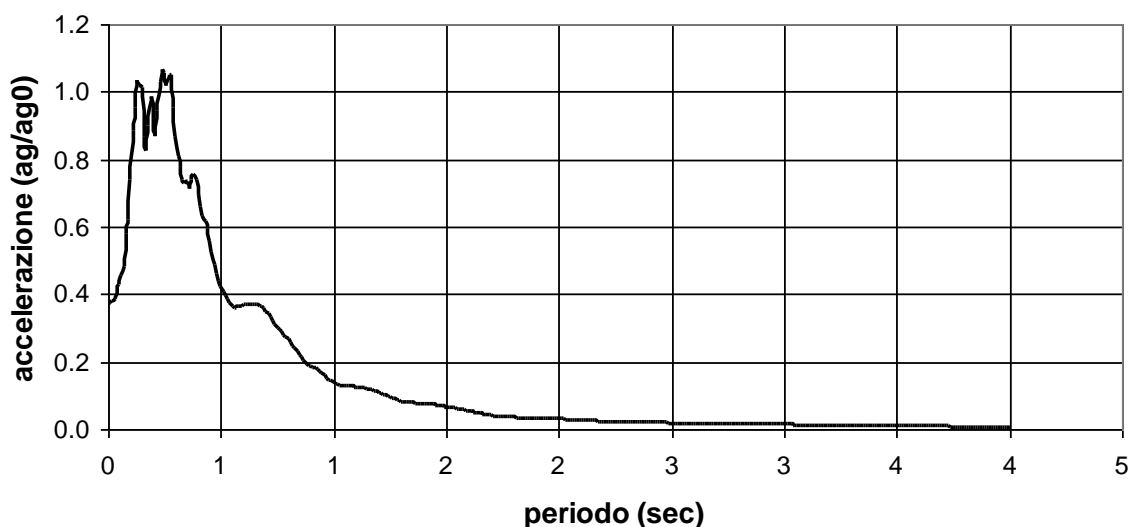


Figura n. 23 - Spettro di risposta locale concernente la sezione 4

Tabella n. 10 - Fattori di amplificazione relativi alla sezione 4

	$FA_{PGA}$	$FA_{IS(0,1s < T_0 < 0,5)}$	$FA_{IS(0,5s < T_0 < 1,0)}$
MEDIA sezione 4	1.77	1.84	1.60

Nel caso della **sezione 5** spettro di risposta locale (figura n. 24) corrisponde alla media di quelli determinati dai rilievi MASW prossimi alla direttrice, relativi agli stendimenti n. 1 (040032L7MASW7, 040032L7MASW8), n. 3 (040032L9MASW12, 040032L9MASW13), n. 6 (040032L12MASW20, 040032L12MASW21) e n. 7 (040032L13MASW22, 040032L13MASW23). I relativi fattori di amplificazione sono evidenti nella tabella n. 11.

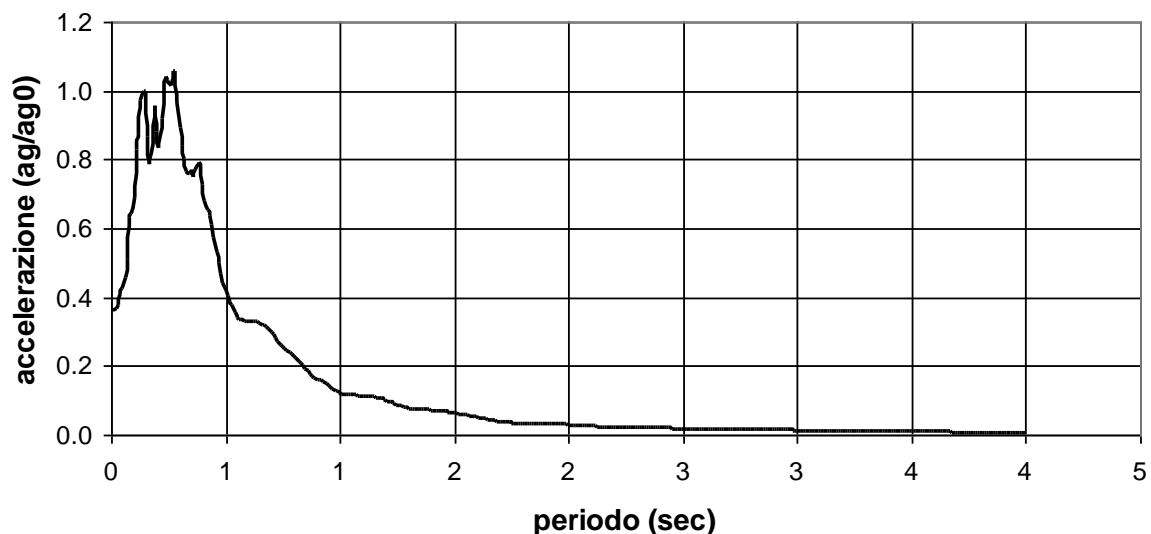


Figura n. 24 - Spettro di risposta locale concernente la sezione 5

Tabella n. 11 - Fattori di amplificazione relativi alla sezione 5

	$FA_{PGA}$	$FA_{IS(0,1s < T_0 < 0,5)}$	$FA_{IS(0,5s < T_0 < 1,0)}$
	MEDIA sezione 5	1.72	1.86

## 8.15. VERIFICA DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA PER FRANOSITÀ

### 8.15.1. Determinazioni e metodologie

Il controllo di stabilità, nei casi considerati dal presente studio, è stato effettuato come previsto dalla deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna 21 dicembre 2015 (Cod. documento GPG/2015/2381) con oggetto: Art. 16 della L.R. n. 20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla deliberazione dell'Assemblea legislativa 2 maggio 2007, n. 112.

Le verifiche di stabilità hanno preso in considerazione le situazioni particolarmente onerose espresse dalle sezioni considerate, considerando in ciascun caso le specifiche condizioni geomorfologiche, stratigrafiche, geotecniche e idrogeologiche.

I parametri geotecnici, utilizzati nelle singole verifiche, sono stati definiti prudenzialmente tenendo conto dei dati forniti da prove in sito, eseguite nei pressi delle aree considerate, nonché degli elementi forniti dalla letteratura geotecnica sui terreni in esame.

Le analisi dei pendii considerati sono state effettuate in condizioni statiche, sismiche e post-sismiche, con particolare attenzione alla determinazione della resistenza di picco e residua, in condizioni drenate e non drenate, assumendo, in particolare:

- condizioni drenate nella situazione pre-sisma,
- condizioni non drenate durante il sisma,
- condizioni drenate nella situazione post-sisma.

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI PREDAPPIO (FC) Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

Le analisi sono state condotte con metodi pseudostatici globali o per conci, che prevedono di applicare alla massa potenzialmente in frana o ad ogni concio un'azione sismica proporzionale al relativo peso  $W$ , pari a  $F_h = K_h \cdot W$  e  $F_v = K_v \cdot W$ , ove con  $K_h$  e  $K_v$  sono indicati rispettivamente i coefficienti sismici orizzontale e verticale. Sono stati, in particolare, assunti i seguenti valori:  $K_h = \beta_s \cdot a_{max s}/g$ , in direzione orizzontale, e  $K_v = \pm 0,5 \cdot K_h$ , in direzione verticale, essendo  $a_{max s}$  l'accelerazione massima (in g) al piano di campagna attesa al sito,  $\beta_s$  un coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima e  $g$  l'accelerazione di gravità. I valori di  $\beta_s$  sono riportati nella tabella n. 12 in funzione dell'accelerazione orizzontale massima attesa al sito in condizioni di campo libero nell'ipotesi di sottosuolo rigido e superficie topografica orizzontale ( $a_g$ ) e delle categorie di sottosuolo di riferimento come definite nella Nuove Norme Tecniche per le costruzioni (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2008).

Tabella n. 12 - Valori del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima

	A	B, C, D, E
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0,2 < a_g/g < 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g/g < 0,2$	0,27	0,24
$a_g/g \leq 0,1$	0,20	0,20

I fattori di sicurezza, nei casi in esame, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per superfici circolari, impiegando il programma SLOPE, versione 2017.25.6.1262 di GeoStru S.a.s. di Bianco (RC). Nel valutare i risultati è stato considerato che un valore del fattore di sicurezza pari a  $F_s = 1$  corrisponde ad una condizione di equilibrio limite o di collasso incipiente. Valori di  $F_s > 1$  individuano condizioni caratterizzate da un certo margine di sicurezza rispetto al collasso. Un valore di  $F_s > 1,2$  può essere ritenuto indicativo di una condizione di stabilità.


Nella tabella n. 13 sono indicate le classi di pericolosità di frana in condizioni statiche, mentre nella tabella n. 14 sono indicate quelle in condizioni dinamiche.

Tabella n. 13 - Classi di pericolosità di frana in condizioni statiche

FATTORE DI SICUREZZA $F_s$	RISCHIO DI FRANA
$F_s \leq 1,05$	Molto alto
$1,05 \leq F_s \leq 1,25$	Alto
$1,25 \leq F_s \leq 1,45$	Medio - alto
$1,45 \leq F_s \leq 1,75$	Medio - basso
$1,75 \leq F_s \leq 2,05$	Basso
$2,05 \leq F_s \leq 3,00$	Molto basso
$3,00 < F_s$	Praticamente nullo

Tabella n. 14 - Classi di pericolosità di frana in condizioni dinamiche

FATTORE DI SICUREZZA $F_s$	RISCHIO DI FRANA
$F_s \leq 1,05$	Molto alto
$1,05 \leq F_s \leq 1,15$	Alto
$1,15 \leq F_s \leq 1,25$	Medio - alto
$1,25 \leq F_s \leq 1,35$	Medio - basso

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	53 di 59



PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

$1,35 \leq F_s \leq 1,50$	Basso
$1,50 \leq F_s \leq 1,70$	Molto basso
$1,70 < F_s$	Praticamente nullo

Nelle verifiche di stabilità effettuate, ove necessario, è stata tenuta presente l'amplificazione topografica. In ogni caso è stata inoltre considerata la presenza della falda.

La metodologia di calcolo è allegata alla presente relazione unitamente alla validazione dei codici di calcolo.

Nell'ambito delle analisi di stabilità di versante in condizioni sismiche sono stati calcolati, con metodi dinamici semplificati, anche gli spostamenti permanenti attesi in corrispondenza dei tratti di sezione significativi. Poiché nei casi in esame i fattori di sicurezza sono tutti maggiori di 1, è stato adottato un coefficiente sismico critico orizzontale  $K_c$  (coefficiente sismico pseudostatico che corrisponde alla condizione  $F_s = 1$ ). Tenuto conto delle specifiche caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo e delle condizioni geometriche del pendio, è stata inoltre utilizzata la metodologia di calcolo proposta da *Newmark*, che considera lo spostamento sismico del versante riferito alla superficie d'analisi  $S_\alpha$ , approssimata ad un blocco rigido su piano inclinato vibrante di pendenza  $\alpha$  e con angolo di attrito  $\varphi$ .

Lo spostamento atteso è espresso dalla seguente relazione:

$$S_\alpha = S_0 \cdot A$$

dove:  $A = \cos(\varphi - \alpha) / \cos \varphi$ ;  $S_0$  = spostamento del blocco sul piano orizzontale determinato dalla formula:

$$S_0 = \frac{37v_{\max}^2}{a_{\max}} \cdot e^{-9,4 \frac{a_c}{a_{\max}}}$$


dove:  $a_{\max}$  = accelerazione massima del moto alla base del pendio (g);  $v_{\max}$  = velocità massima del moto alla base;  $a_c$  = accelerazione critica =  $K_c \cdot g$ .

In base al valore di  $S_\alpha$  il livello di danno atteso può essere valutato con la tabella n. 15.

Tabella n. 15 - Livelli di danno atteso per le strutture (indicazioni tratte dalla letteratura)

GRADO DI DANNO	LEGG & SLOSSON (1984) (in cm)	IDRISS (1985) (in cm)
Irrilevante	< 0,5	< 3
Modesto	0,5 - 5	15
Forte/moderato	5 - 50	30
Severo/elevato	50 - 500	90
Catastrofico	> 500	300

Nelle analisi di stabilità in condizioni post-sismiche, è stata valutata la possibilità che durante l'azione sismica possano manifestarsi all'interno del pendio fenomeni di incremento delle pressioni interstiziali e/o di

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	54 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

degradazione dei parametri di resistenza per effetto della ciclicità del carico. Tali fenomeni sono significativi solo quando l'ampiezza della *deformazione di taglio ciclica equivalente* indotta dal terremoto ( $\gamma_c$ ) è superiore alla *deformazione di soglia volumetrica* ( $\gamma_v$ ), il cui valore può essere determinato, ad esempio, a partire dai risultati di prove di colonna risonante. Il valore della deformazione di taglio ciclica equivalente è stato stimato mediante la seguente relazione:

$$\gamma_c = \tau_{eq}/G = 0,65 \cdot (a_{max}/g) \cdot \sigma_v \cdot r_d/G$$

dove:  $a_{max}$  = accelerazione massima attesa al sito;  $\sigma_v$  = tensione litostatica verticale;  $r_d$  = fattore di riduzione di  $a_{max}$  con la profondità (a scopo cautelativo si è considerata la profondità massima del piano di scorrimento);  $G$  = valore del modulo di taglio alla profondità del piano di scorrimento.

Per determinare la deformazione di soglia volumetrica ( $\gamma_v$ ), poiché tale parametro dipende dalle variazioni del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento, sono stati analizzati gli andamenti delle curve di degrado caratteristiche dei materiali attraversati dall'analisi.

### 8.15.2. Condizioni di stabilità del settore contraddistinto dalla Sezione 3

#### 8.15.2.1. Condizioni drenate nella situazione pre-sisma

Nel caso in esame (sezione 3) i fattori di sicurezza in condizioni drenate pre-sisma, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per superfici circolari, facendo riferimento alla sezione caratterizzante la più onerosa situazione geomorfologica locale.

Nella tabella n. 16 sono indicati i parametri geotecnici medi caratteristici utilizzati in queste verifiche.

Tabella n. 16 - Parametri geotecnici medi caratteristici utilizzati


Strato	Litologia	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (Kg/m <sup>3</sup> )
1	a1	0,1	0,3	22	1800	2000
2	FCO	0,5	3	28	2200	2400

Il fattore di sicurezza minimo, nelle condizioni statiche considerate, è risultato  $F_s = 1,46$  (tra 221 superfici circolari verificate), quindi il rischio di frana è medio-basso.

Per i particolari relativi a questa determinazione si rimanda alla documentazione di calcolo allegata.

#### 8.15.2.2. Condizioni non drenate durante il sisma

Nel caso in esame (Sezione 3) i fattori di sicurezza in condizioni non drenate durante il sisma, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per superfici circolari, facendo riferimento alla sezione caratterizzante la più onerosa situazione geomorfologica locale.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	55 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

Il fattore di sicurezza minimo, nelle condizioni dinamiche considerate, è risultato  $F_s = 0,89$  (tra 221 superfici verificate), quindi il rischio di frana è molto alto.

Nella tabella n. 16 sono indicati i parametri geotecnici utilizzati in queste verifiche e nella tabella 17 i coefficienti sismici inseriti.

Tabella n. 17 - Determinazione dei coefficienti sismici ( $K_h$  e  $K_v$ )

$A_{REFG}$	$F_{APGA}$	$A_{MAX S/G}$	$\beta_s$	$K_H$	$\pm K_V$
0,210	1,60	0,34	0,28	0,10	0,05

Per i particolari relativi a questa determinazione si rimanda alla documentazione di calcolo allegata.

Lo spostamento atteso ( $S_d$ ), calcolato come precedentemente indicato, è risultato di 43,4 centimetri, quindi con un grado di danno da forte/moderato a severo/elevato.

#### 8.15.2.3. Condizioni drenate nella situazione post-sisma.

Lo studio degli andamenti delle curve di degrado caratteristiche dei terreni in esame ha permesso di determinare la deformazione di soglia volumetrica ( $\gamma_v$ ) che, nella situazione considerata è pari allo 0,05%.

L'ampiezza della deformazione di taglio ciclica equivalente indotta dal terremoto ( $\gamma_c$ ), calcolata, come indicato nel paragrafo precedente, quale media delle verticali considerate, è pari a **0,046%** e pertanto risulta inferiore a quella della soglia volumetrica ( $\gamma_v$ ) della curva di degrado utilizzata nelle analisi.

In base ai risultati conseguiti, si può ritenere che le "coperture" soggette a fenomeni degradativi per effetto della sollecitazione dinamica ciclica durante eventi estremi, con la ricorrenza considerata, non sono soggette a deformazioni superiori alla soglia elastica e pertanto i parametri di resistenza al taglio non subiscono riduzioni significative post evento. In conclusione i parametri di resistenza al taglio caratteristici delle condizioni statiche pre-sismiche, possono ritenersi attendibili anche post-evento e quindi non si effettuano ulteriori verifiche.

#### 8.15.2.4. Considerazioni


Il livello freatico considerato nelle verifiche, desunto da osservazioni effettuate in questa sede e dai dati disponibili, condiziona i fattori di sicurezza ottenuti. Va pertanto tenuto presente che un suo innalzamento ne riduce i valori.

### 8.15.3. Condizioni di stabilità del settore contraddistinto dalla sezione 4

#### 8.15.3.1. Condizioni drenate nella situazione pre-sisma

Nel caso in esame (sezione 4) i fattori di sicurezza in condizioni drenate pre-sisma, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per superfici circolari, facendo riferimento alla sezione caratterizzante la più onerosa situazione geomorfologica locale. Nelle determinazioni è stata fatta distinzione tra il settore a monte e quello a valle.

Nella tabella n. 18 sono indicati i parametri geotecnici medi utilizzati in queste verifiche.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	56 di 59

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI PREDAPPIO (FC) Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

Tabella n. 18 - Parametri geotecnici medi utilizzati

STRATO	LITOLOGIA	COESIONE (kg/cm <sup>2</sup> )	COESIONE NON DRENATA (kg/cm <sup>2</sup> )	ANGOLO RESISTENZA AL TAGLIO (°)	PESO UNITÀ DI VOLUME (Kg/m <sup>3</sup> )	PESO SATURO (Kg/m <sup>3</sup> )
1	a1	0,1	0,5	22	1800	2000
2	FCO	0,5	3	28	2200	2400

**Condizioni drenate settore a monte** - Il fattore di sicurezza minimo, nelle condizioni statiche considerate, è risultato  $F_s = 2,14$  (tra 145 superfici circolari verificate), quindi il rischio di frana è molto basso.

**Condizioni drenate settore a valle** - Il fattore di sicurezza minimo, nelle condizioni statiche considerate, è risultato  $F_s = 1,18$  (tra 203 superfici circolari verificate), quindi il rischio di frana è alto.

Per i particolari relativi a queste determinazioni si rimanda alla documentazione di calcolo allegata.

#### 8.15.3.2. Condizioni non drenate durante il sisma

Nel caso in esame (Sezione 4) i fattori di sicurezza in condizioni non drenate durante il sisma, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per superfici circolari, facendo riferimento alla sezione caratterizzante la più onerosa situazione geomorfologica locale.

**Condizioni non drenate settore a monte** - Il fattore di sicurezza 1,24 (tra 145 superfici verificate), quindi il rischio di frana è medio-alto.

**Condizioni non drenate settore a valle** - Il fattore di sicurezza 0,83 (tra 203 superfici verificate), quindi il rischio di frana è molto alto.

Nella tabella n. 18 sono indicati i parametri geotecnici utilizzati in queste verifiche e nella tabella n. 19 i coefficienti sismici inseriti.

Tabella n. 19 - Determinazione dei coefficienti sismici ( $K_h$  e  $K_v$ )

$A_{REFG}$	$F_{APGA}$	$A_{MAX S/G}$	$\beta_s$	$K_H$	$\pm K_V$
0,210	1,77	0,37	0,28	0,11	0,055


Per i particolari relativi a questa determinazione si rimanda alla documentazione di calcolo allegata.

Lo spostamento atteso ( $S\alpha$ ), calcolato come precedentemente indicato, è risultato:

- **nel settore a monte** di 1,09 centimetri, quindi con un grado di danno da modesto a irrilevante;
- **nel settore a valle** di 71,6 centimetri, quindi con un grado di danno severo/elevato.

#### 8.15.3.3. Condizioni drenate nella situazione post-sisma.

Lo studio degli andamenti delle curve di degrado caratteristiche dei terreni in esame ha permesso di determinare la deformazione di soglia volumetrica ( $\gamma_v$ ) che, nella situazione considerata è pari allo 0,05%.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	57 di 59



PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

L'ampiezza della deformazione di taglio ciclica equivalente indotta dal terremoto ( $\gamma_c$ ), calcolata, come indicato nel paragrafo precedente, quale media delle verticali considerate, è pari a **0,048%** e pertanto risulta inferiore a quella della soglia volumetrica ( $\gamma_v$ ) della curva di degrado utilizzata nelle analisi.

In base ai risultati conseguiti, si può ritenere che le "coperture" soggette a fenomeni degradativi per effetto della sollecitazione dinamica ciclica durante eventi estremi, con la ricorrenza considerata, non sono soggette a deformazioni superiori alla soglia elastica e pertanto i parametri di resistenza al taglio non subiscono riduzioni significative post evento. In conclusione i parametri di resistenza al taglio caratteristici delle condizioni statiche pre-sismiche, possono ritenersi attendibili anche post-evento e quindi non si effettuano ulteriori verifiche.

#### 8.15.3.4. Considerazioni

Il livello freatico considerato nelle verifiche, desunto da osservazioni effettuate in questa sede e dai dati disponibili, condiziona i fattori di sicurezza ottenuti. Va pertanto tenuto presente che un suo innalzamento ne riduce i valori.

#### 8.15.4. Condizioni di stabilità del settore contraddistinto dalla Sezione 5

##### 8.15.4.1. Condizioni drenate nella situazione pre-sisma

Nel caso in esame (sezione 5) i fattori di sicurezza in condizioni drenate pre-sisma, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per superfici circolari, facendo riferimento alla sezione caratterizzante la più onerosa situazione geomorfologica locale. Nelle determinazioni, anche in questo caso, è stata fatta distinzione tra il settore a monte e quello a valle.

Nella tabella n. 20 sono indicati i parametri geotecnici medi utilizzati in queste verifiche.

Tabella n. 20 - Parametri geotecnici medi utilizzati

STRATO	LITOLOGIA	COESIONE (kg/cm <sup>2</sup> )	COESIONE NON DRENATA (kg/cm <sup>2</sup> )	ANGOLO RESISTENZA AL TAGLIO (°)	PESO UNITÀ DI VOLUME (Kg/m <sup>3</sup> )	PESO SATURO (Kg/m <sup>3</sup> )
1	a1	0,1	0,5	22	1800	2000
2	FCO	0,5	3	28	2200	2400


**Condizioni drenate settore a monte** - Il fattore di sicurezza minimo, nelle condizioni statiche considerate, è risultato  $F_s = 3,73$  (tra 173 superfici circolari verificate), quindi il rischio di frana è praticamente nullo.

**Condizioni drenate settore a valle** - Il fattore di sicurezza minimo, nelle condizioni statiche considerate, è risultato  $F_s = 1,66$  (tra 189 superfici circolari verificate), quindi il rischio di frana è medio basso.

Per i particolari relativi a questa determinazione si rimanda alla documentazione di calcolo allegata.

##### 8.15.4.2. Condizioni non drenate durante il sisma

Nel caso in esame (sezione 5) i fattori di sicurezza in condizioni non drenate durante il sisma, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	58 di 59

PROGETTO	LIVELLO
<b>COMUNE DI PREDAPPIO (FC)</b> Studio di microzonazione sismica	Locali approfondimenti di terzo

superfici circolari, facendo riferimento alla sezione caratterizzante la più onerosa situazione geomorfologica locale.

**Condizioni non drenate settore a monte** - Il fattore di sicurezza 2,17 (tra 173 superfici verificate), quindi il rischio di frana è praticamente nullo.

**Condizioni non drenate settore a valle** - Il fattore di sicurezza 0,92 (tra 189 superfici verificate), quindi il rischio di frana è molto alto.

Nella tabella n. 20 sono indicati i parametri geotecnici utilizzati in queste verifiche e nella tabella n. 21 i coefficienti sismici inseriti.

Tabella n. 21 - Determinazione dei coefficienti sismici ( $K_H$  e  $K_V$ )

$A_{REFG}$	$F_{APGA}$	$A_{MAX S/G}$	$\beta_s$	$K_H$	$\pm K_V$
0,210	1,72	0,36	0,28	0,10	0,05

Per i particolari relativi a questa determinazione si rimanda alla documentazione di calcolo allegata.

Lo spostamento atteso ( $S\alpha$ ), calcolato come precedentemente indicato, è risultato:

- **nel settore a monte** di 0,006 centimetri, quindi con un grado di danno irrilevante;
- **nel settore a valle** di 21,51 centimetri, quindi con un grado di danno forte/moderato.

#### 8.15.4.3. Condizioni drenate nella situazione post-sisma.


Lo studio degli andamenti delle curve di degrado caratteristiche dei terreni in esame ha permesso di determinare la deformazione di soglia volumetrica ( $\gamma_v$ ) che, nella situazione considerata è pari allo 0,05%.

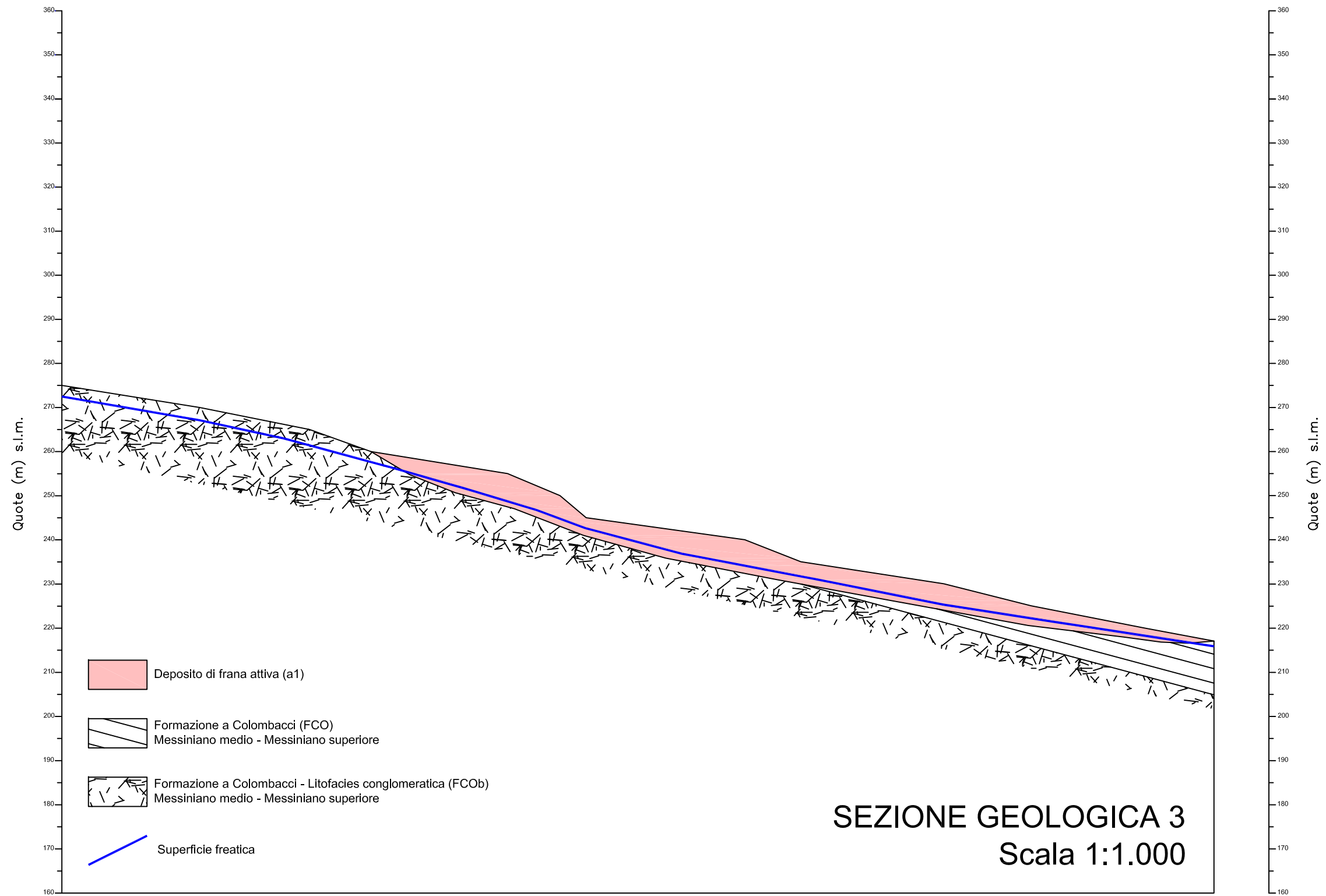
L'ampiezza della deformazione di taglio ciclica equivalente indotta dal terremoto ( $\gamma_c$ ), calcolata, come indicato nel paragrafo precedente, quale media delle verticali considerate, è pari a **0,048%** e pertanto risulta inferiore a quella della soglia volumetrica ( $\gamma_v$ ) della curva di degrado utilizzata nelle analisi.

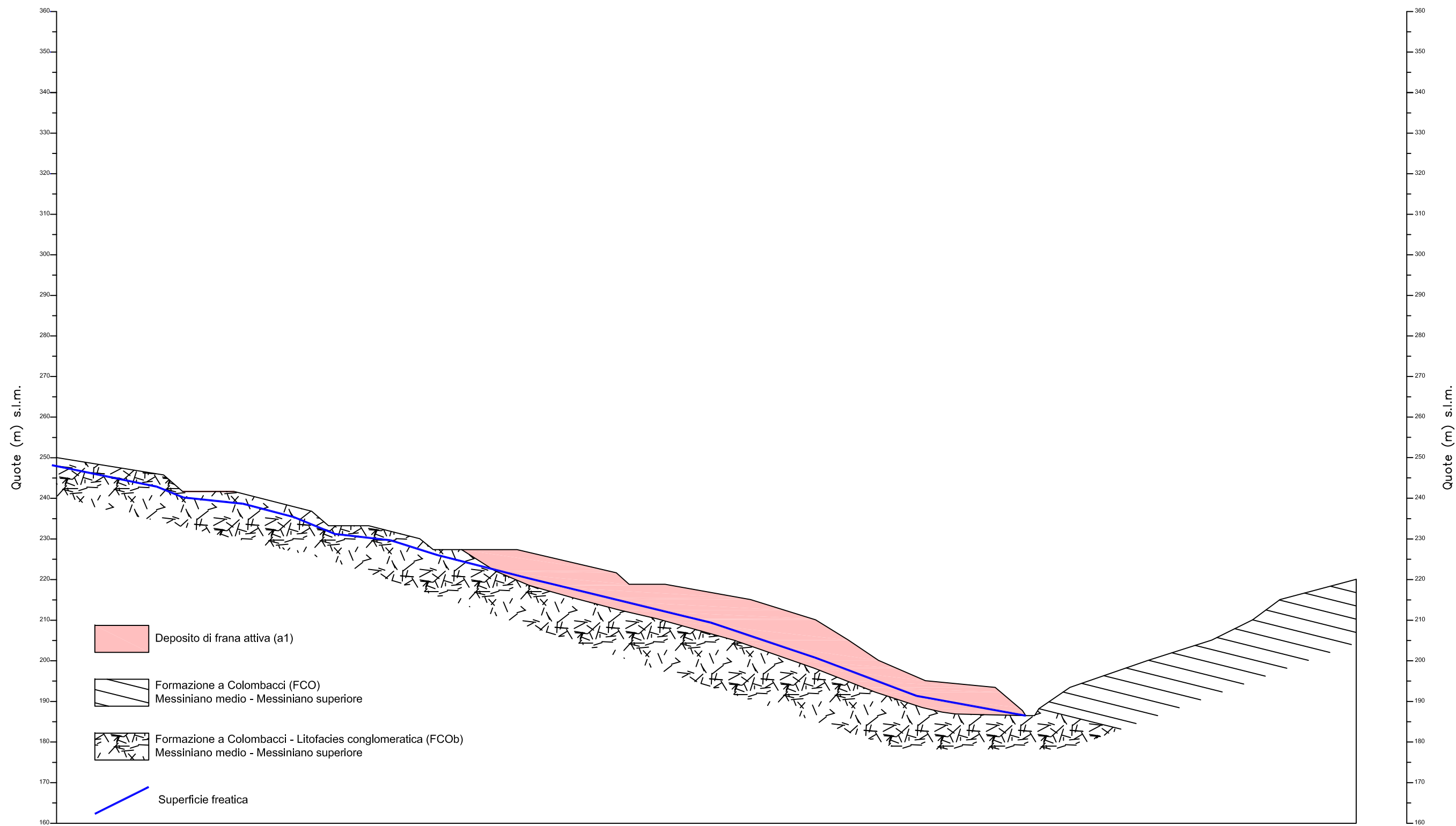
In base ai risultati conseguiti, si può ritenere che le "coperture" soggette a fenomeni degradativi per effetto della sollecitazione dinamica ciclica durante eventi estremi, con la ricorrenza considerata, non sono soggette a deformazioni superiori alla soglia elastica e pertanto i parametri di resistenza al taglio non subiscono riduzioni significative post evento. In conclusione i parametri di resistenza al taglio caratteristici delle condizioni statiche pre-sismiche, possono ritenersi attendibili anche post-evento e quindi non si effettuano ulteriori verifiche.

#### 8.15.4.4. Considerazioni

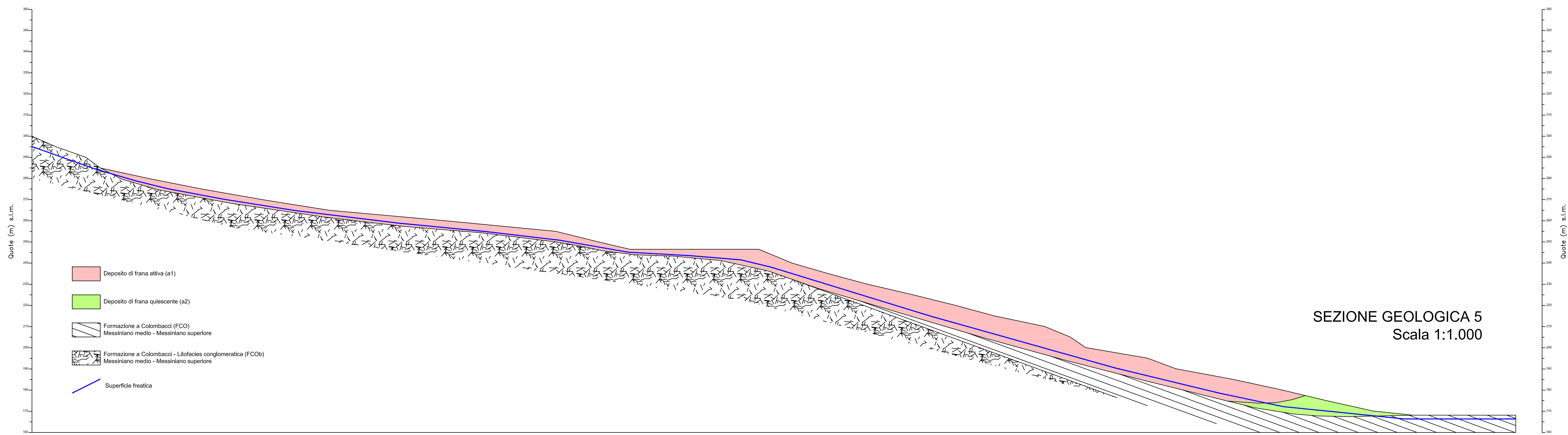
Il livello freatico considerato nelle verifiche, desunto da osservazioni effettuate in questa sede e dai dati disponibili, condiziona i fattori di sicurezza ottenuti. Va pertanto tenuto presente che un suo innalzamento ne riduce i valori.

 <b>ANTONIAZZI</b> GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE GEOLOGI ALBERTO E ALDO ANTONIAZZI	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2017	0	59 di 59





SEZIONE GEOLOGICA 4  
Scala 1:1.000





## **METODOLOGIA DI CALCOLO**

### **Definizione**

Per pendio s'intende una porzione di versante naturale il cui profilo originario è stato modificato da interventi artificiali rilevanti rispetto alla stabilità. Per frana s'intende una situazione di instabilità che interessa versanti naturali e coinvolgono volumi considerevoli di terreno.

### **Introduzione all'analisi di stabilità**

La risoluzione di un problema di stabilità richiede la presa in conto delle equazioni di campo e dei legami costitutivi. Le prime sono di equilibrio, le seconde descrivono il comportamento del terreno. Tali equazioni risultano particolarmente complesse in quanto i terreni sono dei sistemi multifase, che possono essere ricondotti a sistemi monofase solo in condizioni di terreno secco, o di analisi in condizioni drenate.

Nella maggior parte dei casi ci si trova a dover trattare un materiale che se saturo è per lo meno bifase, ciò rende la trattazione delle equazioni di equilibrio notevolmente complicata. Inoltre è praticamente impossibile definire una legge costitutiva di validità generale, in quanto i terreni presentano un comportamento non-lineare già a piccole deformazioni, sono anisotropi ed inoltre il loro comportamento dipende non solo dallo sforzo deviatorico ma anche da quello normale. A causa delle suddette difficoltà vengono introdotte delle ipotesi semplificative:

1. Si usano leggi costitutive semplificate: modello rigido perfettamente plastico. Si assume che la resistenza del materiale sia espressa unicamente dai parametri coesione ( $c$ ) e angolo di resistenza al taglio ( $\phi$ ), costanti per il terreno e caratteristici dello stato plastico; quindi si suppone valido il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.
2. In alcuni casi vengono soddisfatte solo in parte le equazioni di equilibrio.

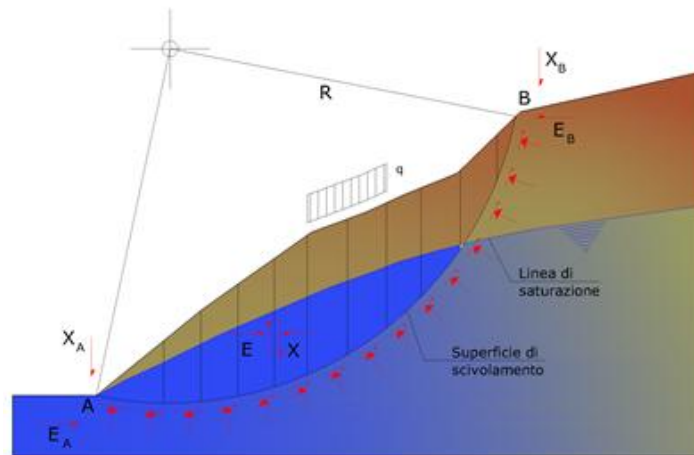
### **Metodo equilibrio limite (LEM)**

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, costituito dal pendio e da una superficie di scorrimento di forma qualsiasi (linea retta, arco di cerchio, spirale logaritmica); da tale equilibrio vengono calcolate le tensioni da taglio ( $\tau$ ) e confrontate con la resistenza disponibile ( $\tau_f$ ), valutata secondo il criterio di rottura di Coulomb, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza:

$$F = \tau_f / \tau$$

Tra i metodi dell'equilibrio limite alcuni considerano l'equilibrio globale del corpo rigido (Culman), altri a causa della non omogeneità dividono il corpo in conci considerando l'equilibrio di ciascuno (Fellenius, Bishop, Janbu ecc.).

Di seguito vengono discussi i metodi dell'equilibrio limite dei concii.



### Metodo dei concii

La massa interessata dallo scivolamento viene suddivisa in un numero conveniente di concii. Se il numero dei concii è pari a  $n$ , il problema presenta le seguenti incognite:

- $n$  valori delle forze normali  $N_i$  agenti sulla base di ciascun concio;
- $n$  valori delle forze di taglio alla base del concio  $T_i$ ;
- $(n-1)$  forze normali  $E_i$  agenti sull'interfaccia dei concii;
- $(n-1)$  forze tangenziali  $X_i$  agenti sull'interfaccia dei concii;
- $n$  valori della coordinata  $a$  che individua il punto di applicazione delle  $E_i$ ;
- $(n-1)$  valori della coordinata che individua il punto di applicazione delle  $X_i$ ;
- una incognita costituita dal fattore di sicurezza  $F$ .

Complessivamente le incognite sono  $(6n-2)$ .

Mentre le equazioni a disposizione sono:

- equazioni di equilibrio dei momenti  $n$ ;
- equazioni di equilibrio alla traslazione verticale  $n$ ;

- equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale n;
- equazioni relative al criterio di rottura n.

Totale numero di equazioni 4n.

Il problema è staticamente indeterminato ed il grado di indeterminazione è pari a :

$$i = (6n - 2) - (4n) = 2n - 2$$

Il grado di indeterminazione si riduce ulteriormente a (n-2) in quanto si fa l'assunzione che  $N_i$  sia applicato nel punto medio della striscia. Ciò equivale ad ipotizzare che le tensioni normali totali siano uniformemente distribuite.

I diversi metodi che si basano sulla teoria dell'equilibrio limite si differenziano per il modo in cui vengono eliminate le (n-2) indeterminazioni.

### Metodo di Fellenius (1927)

Con questo metodo (valido solo per superfici di scorrimento di forma circolare) vengono trascurate le forze di interstriscia pertanto le incognite si riducono a:

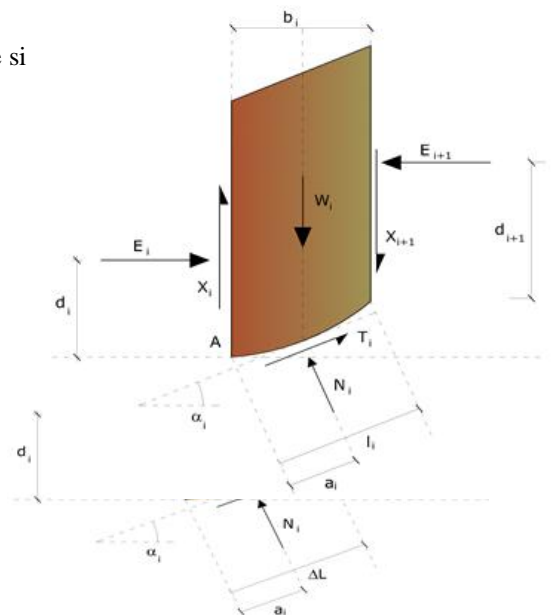
- n valori delle forze normali  $N_i$ ;
- n valori delle forze da taglio  $T_i$ ;
- 1 fattore di sicurezza.

Incognite (2n+1).

Le equazioni a disposizione sono:

- n equazioni di equilibrio alla traslazione verticale;
- n equazioni relative al criterio di rottura;
- equazione di equilibrio dei momenti globale.

$$F = \frac{\sum \{ c_i \times l_i + (W_i \times \cos \alpha_i - u_i \times l_i) \times \tan \phi_i \}}{\sum W_i \times \sin \alpha_i}$$



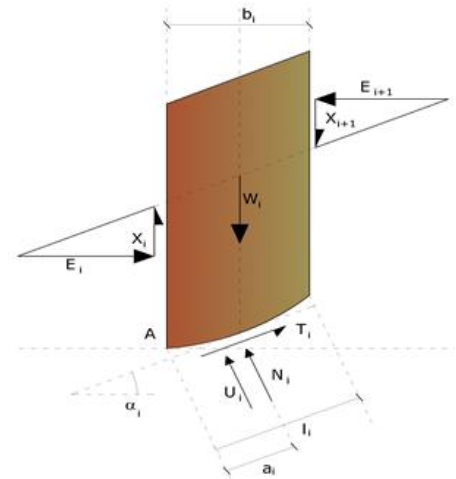
Questa equazione è semplice da risolvere ma si è trovato che fornisce risultati conservativi (fattori di sicurezza bassi) soprattutto per superfici profonde.

**Metodo di Bishop (1955)**

Con tale metodo non viene trascurato nessun contributo di forze agenti sui blocchi e fu il primo a descrivere i problemi legati ai metodi convenzionali. Le equazioni usate per risolvere il problema sono:

$$\sum F_y = 0, \quad \sum M_0 = 0 \quad \text{Criterio di rottura}$$

$$F = \frac{\sum \{c_i \times b_i + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan \varphi_i\} \times \frac{\sec \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \times \tan \varphi_i / F}}{\sum W_i \times \sin \alpha_i}$$



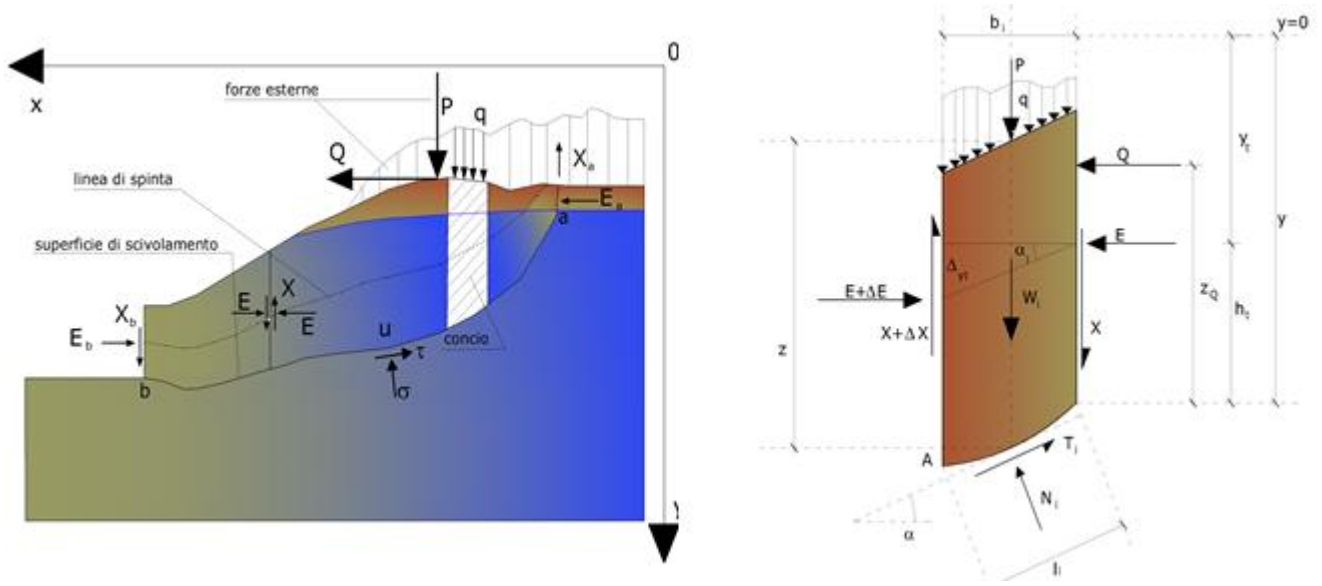
I valori di F e di  $\Delta X$  per ogni elemento che soddisfano questa equazione danno una soluzione rigorosa al problema. Come prima approssimazione conviene porre  $\Delta X = 0$  ed iterare per il calcolo del fattore di sicurezza, tale procedimento è noto come metodo di **Bishop ordinario**, gli errori commessi rispetto al metodo completo sono di circa 1 %.

**Metodo di Janbu (1967)**

Janbu estese il metodo di Bishop a superfici di scorrimento di forma qualsiasi.

Quando vengono trattate superfici di scorrimento di forma qualsiasi il braccio delle forze cambia (nel caso delle superfici circolari resta costante e pari al raggio). A tal motivo risulta più conveniente valutare l'equazione del momento rispetto allo spigolo di ogni blocco.

$$F = \frac{\sum \{c_i \times b + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan \varphi_i\} \times \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \times \tan \varphi_i / F}}{\sum W_i \times \tan \alpha_i}$$

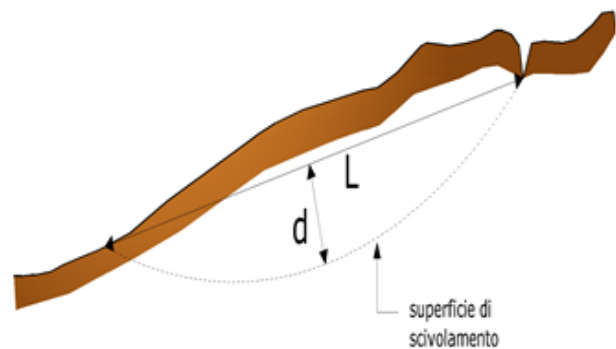
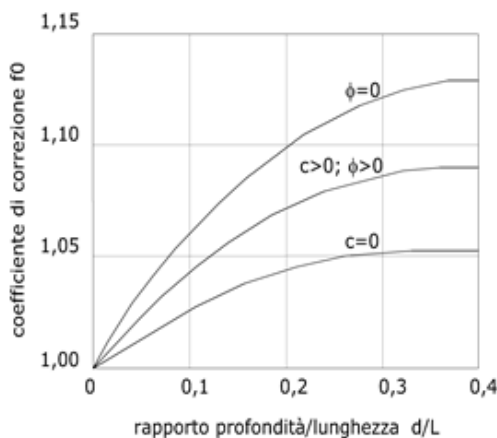


Azioni sul concio  $i$ -esimo secondo le ipotesi di Janbu e rappresentazione d'insieme dell'ammasso

Assumendo  $\Delta X_i = 0$  si ottiene il metodo ordinario. Janbu propose inoltre un metodo per la correzione del fattore di sicurezza ottenuto con il metodo ordinario secondo la seguente:

$$F_{\text{corretto}} = f_0 \cdot F$$

dove  $f_0$  è riportato in grafici funzione di geometria e parametri geotecnici. Tale correzione è molto attendibile per pendii poco inclinati.



### Metodo di Bell (1968)



Le forze agenti sul corpo che scivola includono il peso effettivo del terreno,  $W$ , le forze sismiche pseudostatiche orizzontali e verticali  $K_x W$  e  $K_z W$ , le forze orizzontali e verticali  $X$  e  $Z$  applicate esternamente al profilo del pendio, infine, la risultante degli sforzi totali normali e di taglio  $\sigma$  e  $\tau$  agenti sulla superficie potenziale di scivolamento.

Lo sforzo totale normale può includere un eccesso di pressione dei pori  $u$  che deve essere specificata con l'introduzione dei parametri di forza efficace.

In pratica questo metodo può essere considerato come un'estensione del metodo del cerchio di attrito per sezioni omogenee precedentemente descritto da Taylor.

In accordo con la legge della resistenza di Mohr-Coulomb in termini di tensione efficace, la forza di taglio agente sulla base dell' $i$ -esimo concio è data da:

$$T_i = \frac{c_i L_i + (N_i - u_{ci} L_i) \tan \Phi_i}{F}$$

in cui:

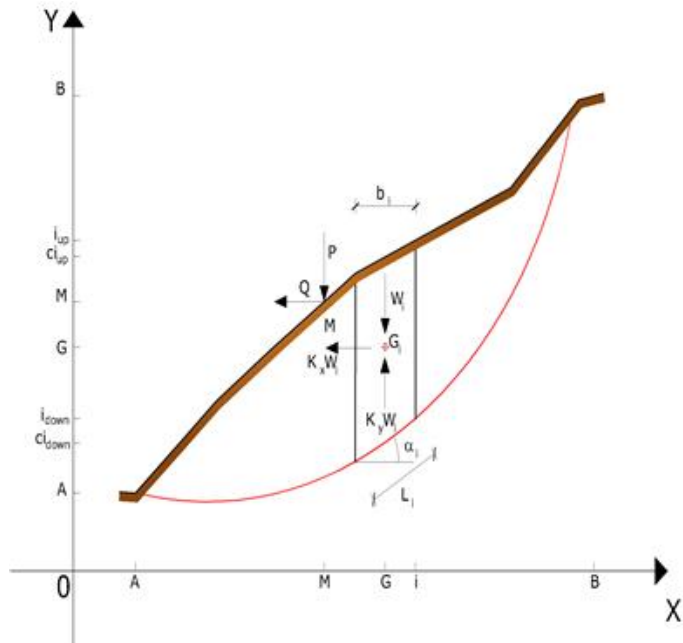
$F$  = il fattore di sicurezza;

$c_i$  = la coesione efficace (o totale) alla base dell' $i$ -esimo concio;

$\phi_i$  = l'angolo di attrito efficace (= 0 con la coesione totale) alla base dell' $i$ -esimo concio;

$L_i$  = la lunghezza della base dell' $i$ -esimo concio;

$u_{ci}$  = la pressione dei pori al centro della base dell' $i$ -esimo concio.



L'equilibrio risulta uguagliando a zero la somma delle forze orizzontali, la somma delle forze verticali e la somma dei momenti rispetto all'origine.

Viene adottata la seguente assunzione sulla variazione della tensione normale agente sulla potenziale superficie di scorrimento:

$$\sigma_{ci} = \left[ C_1 (1 - K_z) \frac{W_i \cos \alpha_i}{L_i} \right] + C_2 f(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$$

in cui il primo termine dell'equazione include l'espressione:

$W_i \cos \alpha_i / L_i$  = valore dello sforzo normale totale associato con il metodo ordinario dei concii

Il secondo termine dell'equazione include la funzione:

$$f = \sin 2\pi \left( \frac{x_n - x_{ci}}{x_n - x_0} \right)$$

dove  $x_0$  ed  $x_n$  sono rispettivamente le ascisse del primo e dell'ultimo punto della superficie di scorrimento, mentre  $x_{ci}$  rappresenta l'ascissa del punto medio della base del concio  $i$ -esimo.

Una parte sensibile di riduzione del peso associata con una accelerazione verticale del terreno  $K_z$  g può essere trasmessa direttamente alla base e ciò è incluso nel fattore  $(1 - K_z)$ .

Lo sforzo normale totale alla base di un concio è dato da:

$$N_i = \sigma_{ci} L_i$$

La soluzione delle equazioni di equilibrio si ricava risolvendo un sistema lineare di tre equazioni ottenute moltiplicando le equazioni di equilibrio per il fattore di sicurezza  $F$ , sostituendo l'espressione di  $N_i$  e moltiplicando ciascun termine della coesione per un coefficiente arbitrario  $C_3$ . Qualsiasi coppia di valori del fattore di sicurezza nell'intorno di una stima fisicamente ragionevole può essere usata per iniziare una soluzione iterativa.

Il numero necessario di iterazioni dipende sia dalla stima iniziale sia dalla desiderata precisione della soluzione; normalmente, il processo converge rapidamente.

### **Metodo di Sarma (1973)**

Il metodo di Sarma è un semplice, ma accurato metodo per l'analisi di stabilità dei pendii, che permette di determinare l'accelerazione sismica orizzontale richiesta affinché l'ammasso di terreno, delimitato dalla superficie di scivolamento e dal profilo topografico, raggiunga lo stato di equilibrio limite (accelerazione critica  $K_c$ ) e, nello stesso tempo, consente di ricavare l'usuale fattore di sicurezza ottenuto come per gli altri metodi più comuni della geotecnica.

Si tratta di un metodo basato sul principio dell'equilibrio limite e delle strisce, pertanto viene considerato l'equilibrio di una potenziale massa di terreno in scivolamento suddivisa in  $n$  strisce verticali di spessore sufficientemente piccolo da ritenere ammissibile l'assunzione che lo sforzo normale  $N_i$  agisce nel punto medio della base della striscia.

Le equazioni da prendere in considerazione sono:

- L'equazione di equilibrio alla traslazione orizzontale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio alla traslazione verticale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio dei momenti.

Condizioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale:

$$N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i = W_i - \Delta X_i$$

$$T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i = KW_i + \Delta E_i$$

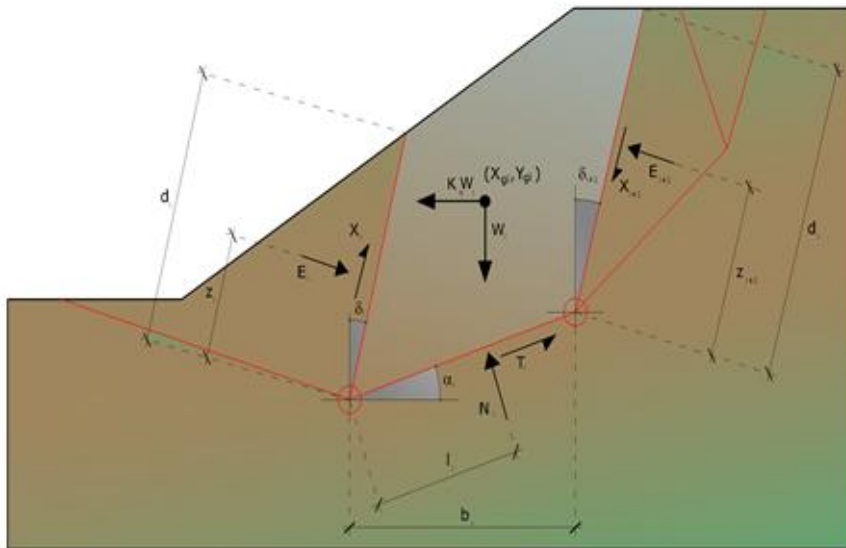
Viene, inoltre, assunto che in assenza di forze esterne sulla superficie libera dell'ammasso si ha:

$$\sum \Delta E_i = 0$$

$$\sum \Delta X_i = 0$$

dove  $E_i$  e  $X_i$  rappresentano, rispettivamente, le forze orizzontale e verticale sulla faccia  $i$ -esima del concio generico  $i$ .

L'equazione di equilibrio dei momenti viene scritta scegliendo come punto di riferimento il baricentro dell'intero ammasso; sicché, dopo aver eseguito una serie di posizioni e trasformazioni trigonometriche ed algebriche, nel **metodo di Sarma** la soluzione del problema passa attraverso la risoluzione di due equazioni:



*Azioni sull'iesimo concio, metodo di Sarma*

$$\sum \Delta X_i \cdot \operatorname{tg}(\psi_i' - \alpha_i) + \sum \Delta E_i = \sum \Delta_i - K \cdot \sum W_i$$

$$\sum \Delta X_i \cdot \left[ (y_{mi} - y_G) \cdot \operatorname{tg}(\psi_i' - \alpha') + (x_i' - x_G) \right] = \sum W_i \cdot (x_{mi} - x_G) + \sum \Delta_i \cdot (y_{mi} - y_G)$$

Ma l'approccio risolutivo, in questo caso, è completamente capovolto: il problema infatti impone di trovare un valore di **K** (accelerazione sismica) corrispondente ad un determinato fattore di sicurezza; ed in particolare, trovare il valore dell'accelerazione **K** corrispondente al fattore di sicurezza **F = 1**, ossia l'accelerazione critica.

Si ha pertanto:

$$K=K_c \quad \text{Accelerazione critica se } F=1$$

$$F=F_s \quad \text{Fattore di sicurezza in condizioni statiche se } K=0$$

La seconda parte del problema del Metodo di Sarma è quella di trovare una distribuzione di forze interne  $X_i$  ed  $E_i$  tale da verificare l'equilibrio del concio e quello globale dell'intero ammasso, senza violazione del criterio di rottura.

E' stato trovato che una soluzione accettabile del problema si può ottenere assumendo la seguente distribuzione per le forze  $X_i$ :

$$\Delta X_i = \lambda \cdot \Delta Q_i = \lambda \cdot (Q_{i+1} - Q_i)$$

dove  $Q_i$  è una funzione nota, in cui vengono presi in considerazione i parametri geotecnici medi sulla  $i$ -esima faccia del concio  $i$ , e  $\lambda$  rappresenta un'incognita.

La soluzione completa del problema si ottiene pertanto, dopo alcune iterazioni, con i valori di  $K_c$ ,  $\lambda$  e  $F$ , che permettono di ottenere anche la distribuzione delle forze di interstriscia.

### **Metodo di Spencer (1967)**

Il metodo è basato sull'assunzione:

1. le forze d'interfaccia lungo le superfici di divisione dei singoli conci sono orientate parallelamente fra loro ed inclinate rispetto all'orizzontale di un angolo  $\theta$ ;
2. tutti i momenti sono nulli  $M_i = 0$  con  $i=1, \dots, n$ .

Sostanzialmente il metodo soddisfa tutte le equazioni della statica ed equivale al metodo di Morgenstern e Price quando la funzione  $f(x) = 1$ . Imponendo l'equilibrio dei momenti rispetto al centro dell'arco descritto dalla superficie di scivolamento si ha:

$$1) \quad \sum Q_i R \cos(\alpha - \theta) = 0$$

dove:

$$Q_i = \frac{\frac{c}{F_s} (W \cos \alpha - \gamma_w h l \sec \alpha) \frac{\text{tg} \alpha}{F_s} - W \text{sen} \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left[ \frac{F_s + \text{tg} \phi \text{tg}(\alpha - \theta)}{F_s} \right]}$$

forza d'interazione fra i conci;

**R** = raggio dell'arco di cerchio;

**θ** = angolo d'inclinazione della forza  $Q_i$  rispetto all'orizzontale.

Imponendo l'equilibrio delle forze orizzontali e verticali si ha rispettivamente:

$$\sum (Q_i \cos \theta) = 0$$

$$\sum (Q_i \text{sen} \theta) = 0$$

Con l'assunzione delle forze  $Q_i$  parallele fra loro, si può anche scrivere:

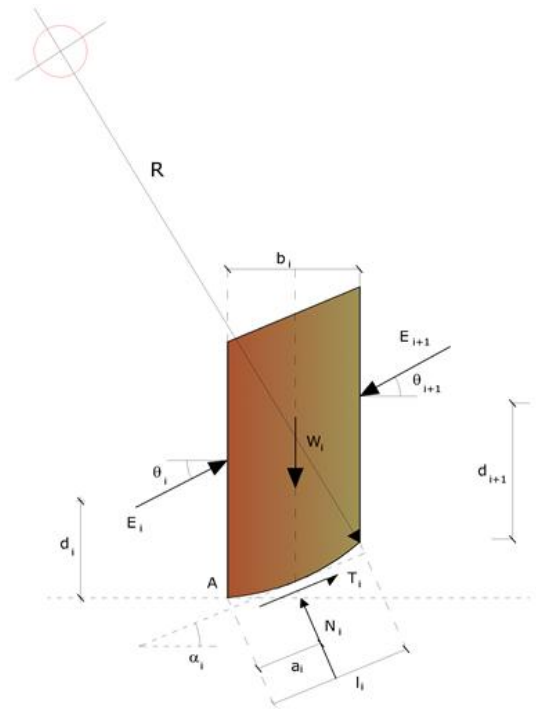
$$2) \quad \sum Q_i = 0$$

Il metodo propone di calcolare due coefficienti di sicurezza: il primo ( $F_{sm}$ ) ottenibile dalla 1), legato all'equilibrio dei momenti; il secondo ( $F_{sf}$ ) dalla 2) legato all'equilibrio delle forze. In pratica si procede risolvendo la 1) e la 2) per un dato intervallo di valori dell'angolo  $\theta$ , considerando come valore unico del coefficiente di sicurezza quello per cui si abbia:

$$F_{sm} = F_{sf}$$

### Metodo di Morgenstern e Price (1965)

Si stabilisce una relazione tra le componenti delle forze di interfaccia del tipo  $X = \lambda f(x)E$ , dove  $\lambda$  è un fattore di scala e  $f(x)$ , funzione della posizione di E e di X, definisce una relazione tra la variazione della forza X e della forza E all'interno della massa scivolante. La funzione  $f(x)$  è scelta arbitrariamente (costante, sinusoidale, semisinusoidale,



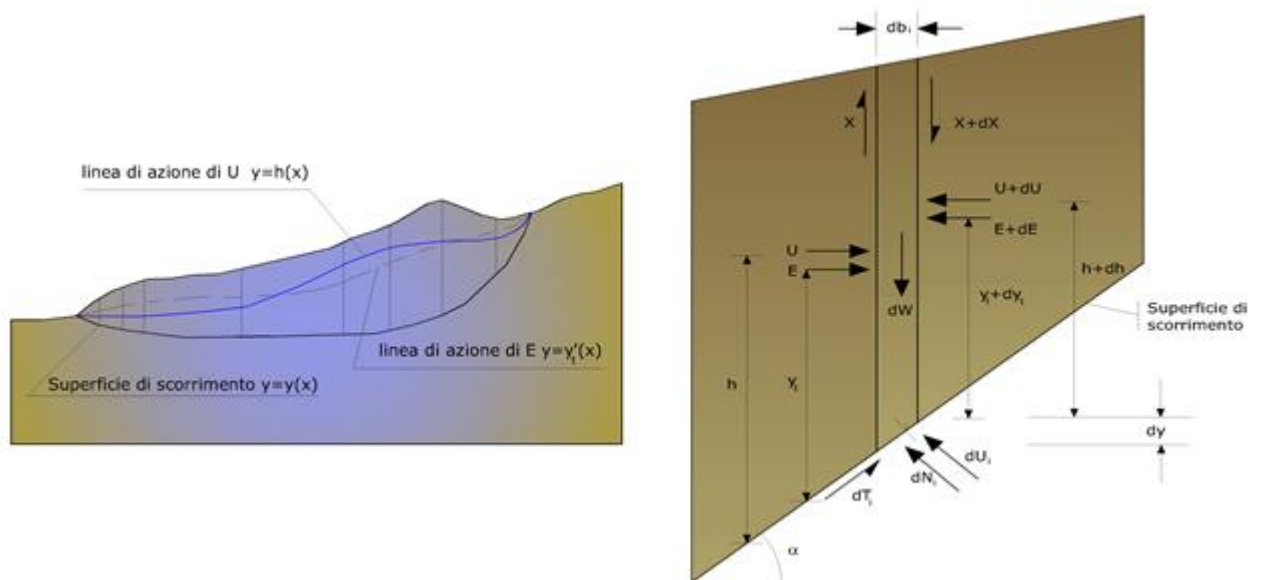


trapezia, spezzata...) e influenza poco il risultato, ma va verificato che i valori ricavati per le incognite siano fisicamente accettabili.

La particolarità del metodo è che la massa viene suddivisa in strisce infinitesime alle quali vengono imposte le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale e di rottura sulla base delle strisce stesse. Si perviene ad una prima equazione differenziale che lega le forze d'interfaccia incognite  $E$ ,  $X$ , il coefficiente di sicurezza  $F_s$ , il peso della striscia infinitesima  $dW$  e la risultante delle pressioni neutra alla base  $dU$ .

Si ottiene la cosiddetta “**equazione delle forze**”:

$$c' \sec^2 \frac{\alpha}{F_s} + \operatorname{tg} \varphi' \left( \frac{dW}{dx} - \frac{dX}{dx} - \operatorname{tg} \alpha \frac{dE}{dx} - \sec \alpha \frac{dU}{dx} \right) = \frac{dE}{dx} - \operatorname{tg} \alpha \left( \frac{dX}{dx} - \frac{dW}{dx} \right)$$



*Azioni sul conico i-esimo secondo le ipotesi di Morgenster e Price e rappresentazione d'insieme dell'ammasso*

Una seconda equazione, detta “**equazione dei momenti**”, viene scritta imponendo la condizione di equilibrio alla rotazione rispetto alla mezzeria della base:

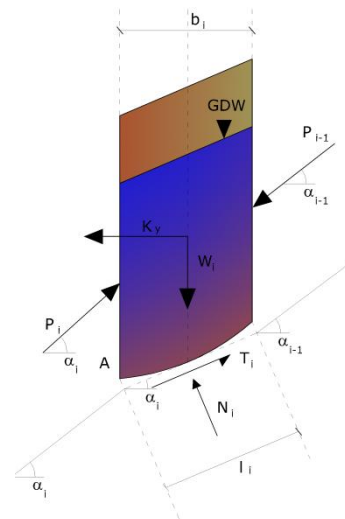
$$X = \frac{d(E \cdot \gamma)}{dx} - \gamma \frac{dE}{dx}$$

queste due equazioni vengono estese per integrazione a tutta la massa interessata dallo scivolamento.

Il metodo di calcolo soddisfa tutte le equazioni di equilibrio ed è applicabile a superfici di qualsiasi forma, ma implica necessariamente l'uso di un calcolatore.

### Metodo di Zeng e Liang (2002)

Zeng e Liang hanno effettuato una serie di analisi parametriche su un modello bidimensionale sviluppato con codice agli elementi finiti, che riproduce il caso di pali immersi in un terreno in movimento (drilled shafts). Il modello bidimensionale riproduce una striscia di terreno di spessore unitario e ipotizza che il fenomeno avvenga in condizioni di deformazione piana nella direzione parallela all'asse dei pali. Il modello è stato utilizzato per indagare l'influenza sulla formazione dell'effetto arco di alcuni parametri come l'interasse fra i pali, il diametro e la forma dei pali, e le proprietà meccaniche del terreno. Gli autori individuano nel rapporto tra l'interasse e il diametro dei  $i$  pali ( $s/d$ ) il parametro adimensionale determinante per la formazione dell'effetto arco. Il problema risulta essere staticamente indeterminato, con grado di indeterminatezza pari a  $(8n-4)$ , ma nonostante ciò è possibile ottenere una soluzione riducendo il numero delle incognite e assumendo quindi delle ipotesi semplificative, in modo da rendere determinato il problema.



Le assunzioni che rendono il problema determinato sono:

- $K_y$  sono assunte orizzontali per ridurre il numero totale delle incognite da  $(n-1)$  a  $(7n-3)$ ;
- Le forze normali alla base della striscia agiscono nel punto medio, riducendo le incognite da  $n$  a  $(6n-3)$ ;
- La posizione delle spinte laterali è ad un terzo dell'altezza media dell'inter-striscia e riduce le incognite da  $(n-1)$  a  $(5n-2)$ ;
- Le forze  $(P_{i-1})$  e  $P_i$  si assumono parallele all'inclinazione della base della striscia ( $\alpha_i$ ), riducendo il numero di incognite da  $(n-1)$  a  $(4n-1)$ ;
- Si assume un'unica costante di snervamento per tutte le strisce, riducendo le incognite da  $(n)$  a  $(3n-1)$ ;

Il numero totale di incognite quindi è ridotto a  $(3n)$ , da calcolare utilizzando il fattore di trasferimento di carico. Inoltre si deve tener presente che la forza di stabilizzazione trasmessa sul terreno a valle dei pali risulta ridotta di una quantità  $R$ , chiamato fattore di riduzione, calcolabile come:

$$R = \frac{1}{s/d} + \left(1 - \frac{1}{s/d}\right) \cdot R_p$$

Il fattore  $R$  dipende quindi dal rapporto fra l'interasse presente fra i pali e il diametro dei pali stessi e dal fattore  $R_p$  che tiene conto dell'effetto arco.

### Valutazione dell'azione sismica

La stabilità dei pendii nei confronti dell'azione sismica viene verificata con il metodo pseudo-statico. Per i terreni che sotto l'azione di un carico ciclico possono sviluppare pressioni interstiziali elevate viene considerato un aumento in percento delle pressioni neutre che tiene conto di questo fattore di perdita di resistenza.

Ai fini della valutazione dell'azione sismica vengono considerate le seguenti forze:

$$F_H = K_x W$$

$$F_V = K_y W$$

Essendo:

- **F<sub>H</sub>** e **F<sub>V</sub>** rispettivamente la componente orizzontale e verticale della forza d'inerzia applicata al baricentro del concio;
- **W** peso concio;
- **K<sub>x</sub>** coefficiente sismico orizzontale;
- **K<sub>y</sub>** coefficiente sismico verticale.

### Ricerca della superficie di scorrimento critica

In presenza di mezzi omogenei non si hanno a disposizione metodi per individuare la superficie di scorrimento critica ed occorre esaminarne un numero elevato di potenziali superfici.

Nel caso vengano ipotizzate superfici di forma circolare, la ricerca diventa più semplice, in quanto dopo aver posizionato una maglia dei centri costituita da m righe e n colonne saranno esaminate tutte le superfici aventi per centro il generico nodo della maglia m×n e raggio variabile in un determinato range di valori tale da esaminare superfici cinematicamente ammissibili.

### Stabilizzazione di pendii con l'utilizzo di pali

La realizzazione di una cortina di pali, su pendio, serve a fare aumentare la resistenza al taglio su determinate superfici di scorrimento. L'intervento può essere conseguente ad una stabilità già accertata, per la quale si conosce la superficie di scorrimento oppure, agendo preventivamente, viene progettato in relazione alle ipotetiche superfici di rottura che responsabilmente possono essere assunte come quelle più probabili. In ogni caso si opera considerando una massa di terreno in movimento su un ammasso stabile sul quale attestare, per una certa lunghezza, l'allineamento di pali.

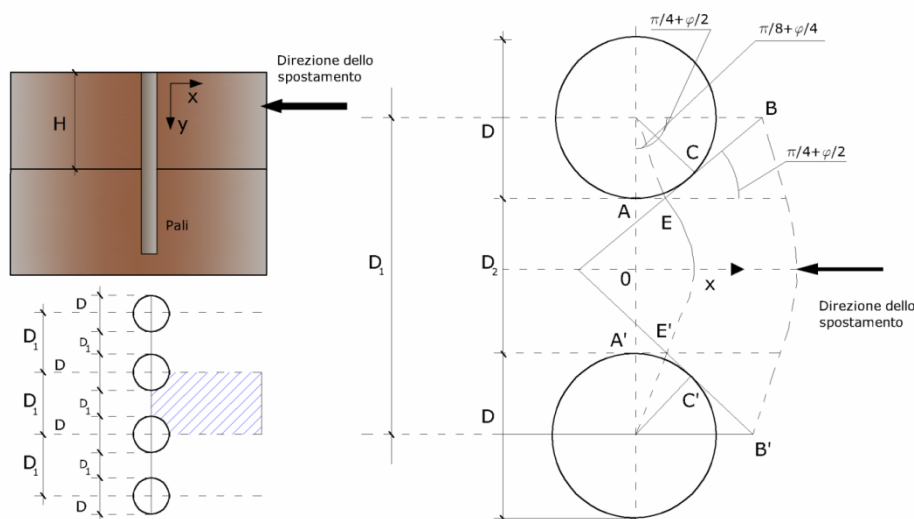
Il terreno, nelle due zone, ha una influenza diversa sull'elemento monoassiale (palo): di tipo sollecitativi nella parte superiore (palo passivo – terreno attivo) e di tipo resistivo nella zona sottostante (palo attivo – terreno passivo). Da questa interferenza, fra "sbarramento" e massa in movimento, scaturiscono le azioni stabilizzanti che devono perseguire le seguenti finalità:

1. conferire al pendio un coefficiente di sicurezza maggiore di quello posseduto;
2. essere assorbite dal manufatto garantendone l'integrità (le tensioni interne, derivanti dalle sollecitazioni massime trasmesse sulle varie sezioni del singolo palo, devono risultare inferiori a

quelle ammissibili del materiale) e risultare inferiori al carico limite sopportabile dal terreno, calcolato, lateralmente considerando l'interazione (palo-terreno).

### Carico limite relativo all'interazione fra i pali ed il terreno laterale

Nei vari tipi di terreno che non hanno un comportamento omogeneo, le deformazioni in corrispondenza della zona di contatto non sono legate fra di loro. Quindi, non potendo associare al materiale un modello di comportamento perfettamente elastico (ipotesi che potrebbe essere assunta per i materiali lapidei poco fratturati), generalmente si procede imponendo che il movimento di massa sia nello stato iniziale e che il terreno in adiacenza ai pali sia nella fase massima consentita di plasticizzazione, oltre la quale si potrebbe verificare l'effetto indesiderato che il materiale possa defluire, attraverso la cortina di pali, nello spazio intercorrente fra un elemento e l'altro.



Imponendo inoltre che il carico assorbito dal terreno sia uguale a quello associato alla condizione limite ipotizzata e che fra due pali consecutivi, a seguito della spinta attiva, si instauri una sorta di effetto arco, gli autori T. Ito e T. Matsui (1975) hanno ricavato la relazione che permette di determinare il carico limite. A questa si è pervenuto facendo riferimento allo schema statico, disegnato nella figura precedente e alle ipotesi anzidette, che schematicamente si ribadiscono.

- Sotto l'azione della spinta attiva del terreno si formano due superfici di scorrimento localizzate in corrispondenza delle linee AEB ed A'E'B';
- Le direzioni EB ed E'B' formano con l'asse x rispettivamente angoli  $+(45 + \varphi/2)$  e  $-(45 + \varphi/2)$ ;
- Il volume di terreno, compreso nella zona delimitata dai vertici AEBB'E'A' ha un comportamento plastico, e quindi è consentita l'applicazione del criterio di rottura di Mohr-coulomb;
- La pressione attiva del terreno agisce sul piano A-A';
- I pali sono dotati di elevata rigidezza a flessione e taglio.

Detta espressione, riferita alla generica profondità  $Z$ , relativamente ad un spessore di terreno unitario, è la seguente:

$$P(Z) = C \cdot D_1 (D_1/D_2)^{K_1} \left[ 1 / \left( N_\phi \text{tag} \phi \left( e^{K_2} - 2(N_\phi)^{1/2} \text{tag} \phi - 1 \right) + K_3 \right) - C \left[ D_1 \cdot K_3 - D_2 / (N_\phi)^{1/2} \right] + \gamma Z / N_\phi \left[ D_1 (D_1/D_2)^{K_1} \cdot e^{K_2} - D_2 \right] \right]$$

dove i simboli utilizzati assumono il significato che segue:

$C$  = coesione terreno;

$\phi$  = angolo di attrito terreno;

$\gamma$  = peso specifico terreno;

$D_1$  = interasse tra i pali;

$D_2$  = spazio libero fra due pali consecutivi;

$$N_\phi = \text{tag}^2(\pi/4 + \phi/2)$$

$$K_1 = (N_\phi)^{1/2} \text{tag} \phi + N_\phi - 1$$

$$K_2 = (D_1 - D_2) / D_2 \cdot N_\phi \text{tag}(\pi/8 + \phi/4)$$

$$K_3 = \left[ 2 \text{tag} \phi + 2(N_\phi)^{1/2} + 1 / (N_\phi)^{1/2} \right] / \left[ (N_\phi)^{1/2} \text{tag} \phi + N_\phi - 1 \right]$$

La forza totale, relativamente ad uno strato di terreno in movimento di spessore  $H$ , è stata ottenuta integrando l'espressione precedente.

In presenza di terreni granulari (condizione drenata), nei quali si può assumere  $c = 0$ , l'espressione diventa:

$$P = 1/2 \gamma \cdot H^2 / N_\phi \left[ D_1 (D_1/D_2)^{K_1} \cdot e^{K_2} - D_2 \right]$$

Per terreni coesivi (condizioni non drenate), con  $\phi = 0$  e  $C \neq 0$ , si ha:

$$P(Z) = C \left[ D_1 (3 \ln(D_1/D_2) + (D_1 - D_2) / D_2 \text{tag} \pi/8) - 2(D_1 - D_2) \right] + \gamma \cdot Z (D_1 - D_2)$$

$$P = \int_0^H P(Z) dZ$$



$$P = C \cdot H \left[ D_1 \left( 3 \ln \left( \frac{D_1}{D_2} \right) + \left( \frac{D_1 - D_2}{D_2} \right) \tan \frac{\pi}{8} \right) - 2(D_1 - D_2) \right] + \frac{1}{2} \gamma H^2 (D_1 - D_2)$$

Il dimensionamento della cortina di pali, che come già detto deve conferire al pendio un incremento del coefficiente di sicurezza e garantire l'integrità del meccanismo palo-terreno, è abbastanza problematica. Infatti tenuto conto della complessità dell'espressione del carico P, influenzata da diversi fattori legati sia alle caratteristiche meccaniche del terreno sia alla geometria del manufatto, non è facile con una sola elaborazione pervenire alla soluzione ottimale. Per raggiungere lo scopo è necessario pertanto eseguire diversi tentativi finalizzati:

- A trovare, sul profilo topografico del pendio, la posizione che garantisca, a parità di altre condizioni, una distribuzione dei coefficienti di sicurezza più confortante;
- A determinare la disposizione planimetrica dei pali, caratterizzata dal rapporto fra interasse e distanza fra i pali ( $D_2/D_1$ ), che consenta di sfruttare al meglio la resistenza del complesso palo-terreno; sperimentalmente è stato riscontrato che, escludendo i casi limiti ( $D_2 = 0 \rightarrow P \rightarrow \infty$  e  $D_2 = D_1 \rightarrow P \rightarrow$  valore minimo), i valori più idonei allo scopo sono quelli per i quali tale rapporto risulta compreso fra 0,60 e 0,80;
- A valutare la possibilità di inserire più file di pali ed eventualmente, in caso affermativo, valutare, per le file successive, la posizione che dia più garanzie in termini di sicurezza e di spreco di materiali;
- Ad adottare il tipo di vincolo più idoneo che consente di ottenere una distribuzione più regolare delle sollecitazioni; sperimentalmente è stato constatato che quello che assolve, in maniera più soddisfacente, allo scopo è il vincolo che impedisce le rotazioni alla testa del palo.

### **Metodo del carico limite di Broms**

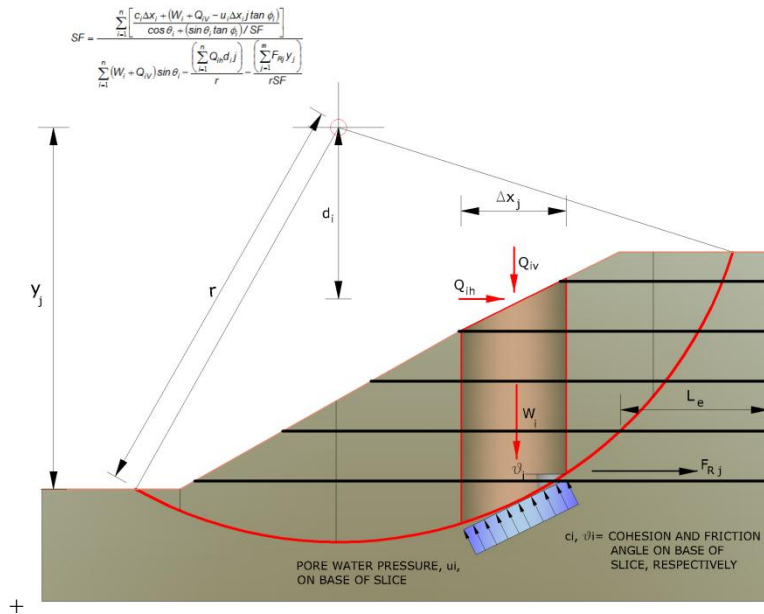
Nel caso in cui il palo sia caricato ortogonalmente all'asse, configurazione di carico presente se un palo inibisce il movimento di una massa in frana, la resistenza può essere affidata al suo carico limite orizzontale.

Il problema di calcolo del carico limite orizzontale è stato affrontato da Broms sia per il mezzo puramente coesivo che per il mezzo incoerente, il metodo di calcolo seguito è basato su alcune ipotesi semplificative per quanto attiene alla reazione esercitata dal terreno per unità di lunghezza di palo in condizioni limite e porta in conto anche la resistenza a rottura del palo (*Momento di plasticizzazione*).

### **Elemento Rinforzo**

I Rinforzi sono degli elementi orizzontali, la loro messa in opera conferisce al terreno un incremento della resistenza allo scorrimento.

Se l'elemento di rinforzo interseca la superficie di scorrimento, la forza resistente sviluppata dall'elemento entra nell'equazione di equilibrio del singolo concio, in caso contrario l'elemento di rinforzo non ne influenza la stabilità.



Le verifiche di natura interna hanno lo scopo di valutare il livello di stabilità dell'ammasso rinforzato, quelle calcolate sono la verifica a rottura dell'elemento di rinforzo per trazione e la verifica a sfilamento (*Pullout*). Il parametro che fornisce la resistenza a trazione del rinforzo,  $T_{Allow}$ , si calcola dalla resistenza nominale del materiale con cui è realizzato il rinforzo ridotto da opportuni coefficienti che tengono conto dell'aggressività del terreno, danneggiamento per effetto creep e danneggiamento per installazione.

L'altro parametro è la resistenza a sfilamento (*Pullout*) che viene calcolata attraverso la seguente relazione:

$$T_{Pullout} = 2 \cdot L_e \cdot \sigma'_v \cdot f_b \cdot \tan(\delta)$$

Per geosintetico a maglie chiuse:

$$f_b = \frac{\tan(\delta)}{\tan(\phi)}$$

dove:

$\delta$  Rappresenta l'angolo di attrito tra terreno e rinforzo;

$T_{Pullout}$  Resistenza mobilitata da un rinforzo ancorato per una lunghezza  $L_e$  all'interno della parte stabile del terreno;

$L_e$  Lunghezza di ancoraggio del rinforzo all'interno della parte stabile;

$f_b$  Coefficiente di *Pullout*;

$\sigma'_v$  Tensione verticale, calcolata alla profondità media del tratto di rinforzo ancorato al terreno.

Ai fini della verifica si sceglie il valore minimo tra  $T_{Allow}$  e  $T_{Pullout}$ , la verifica interna verrà soddisfatta se la forza trasmessa dal rinforzo generata a tergo del tratto rinforzato non supera il valore della  $T'$ .

### Ancoraggi

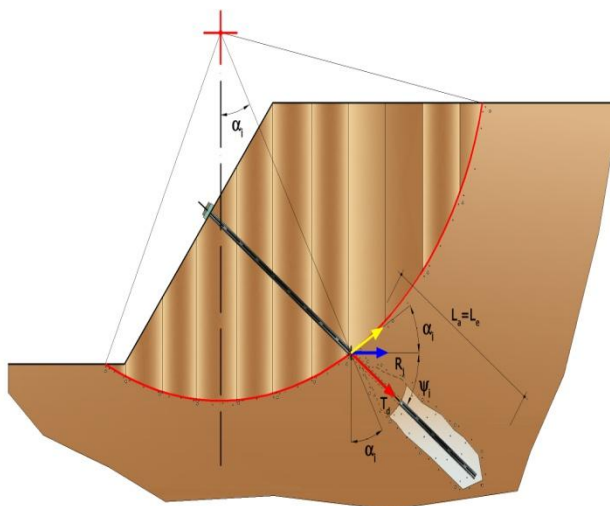
Gli ancoraggi, tiranti o chiodi, sono degli elementi strutturali in grado di sostenere forze di trazione in virtù di un'adeguata connessione al terreno.

Gli elementi caratterizzanti un tirante sono:

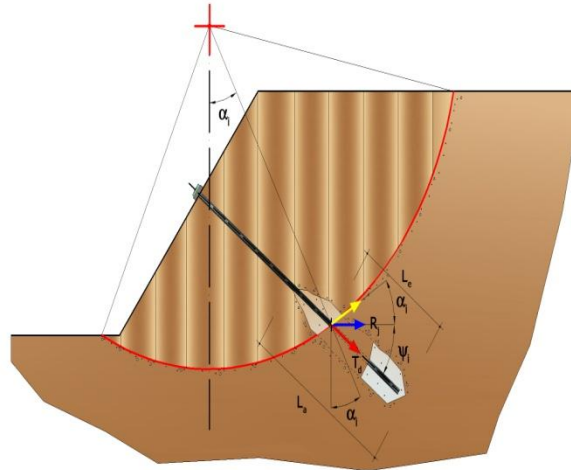
- **testata:** indica l'insieme degli elementi che hanno la funzione di trasmettere alla struttura ancorata la forza di trazione del tirante;
- **fondazione:** indica la parte del tirante che realizza la connessione con il terreno, trasmettendo al terreno stesso la forza di trazione del tirante.

Il tratto compreso tra la testata e la fondazione prende il nome di parte libera, mentre la fondazione (o bulbo) viene realizzata iniettando nel terreno, per un tratto terminale, tramite valvole a perdere, la malta, in genere cementizia. L'anima dell'ancoraggio è costituita da un'armatura, realizzata con barre, fili o trefoli.

Il tirante interviene nella stabilità in misura maggiore o minore efficacia a seconda se sarà totalmente o parzialmente (caso in cui è intercettato dalla superficie di scorrimento) ancorato alla parte stabile del terreno.



*Bulbo completamente ancorato*



*Bulbo parzialmente ancorato*

Le relazioni che esprimono la misura di sicurezza lungo una ipotetica superficie di scorrimento si modificheranno in presenza di ancoraggi (tirante attivo, passivo e chiodi) nel modo seguente:

- per i tiranti di *tipo attivo*, la loro resistenza si detrae dalle azioni (denominatore);

$$F_s = \frac{R_d}{E_d - \sum_{i,j} R_{i,j} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_i}}$$

- per tiranti di *tipo passivo* e per i *chiodi*, il loro contributo si somma alle resistenze (numeratore)

$$F_s = \frac{R_d + \sum_{i,j} R_{i,j} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_i}}{E_d}$$

Con  $R_j$  si indica la resistenza dell'ancoraggio e viene calcolata dalla seguente espressione:

$$R_j = T_d \cdot \cos \psi_i \cdot \left( \frac{1}{i} \right) \cdot \left( \frac{L_e}{L_a} \right)$$

dove:

$T_d$  tiro esercizio;

$\Psi_i$  inclinazione del tirante rispetto all'orizzontale;

$i$  interasse;

$L_e$  lunghezza efficace;

$L_a$  lunghezza d'ancoraggio.

I due indici ( $i, j$ ) riportati in sommatoria rappresentano rispettivamente l' $i$ -esimo concio e il  $j$ -esimo ancoraggio intercettato dalla superficie di scorrimento dell' $i$ -esimo concio.



## Validazione del codice di calcolo

Informativa sull'affidabilità dei codici di calcolo D.M. 14-01-2008 paragrafo 10.2.

Sono stati forniti degli esempi di calcolo, in allegato a questo documento, al fine di verificare la validità delle procedure di calcolo ed effettuare le procedure di controllo con altri strumenti di calcolo. I software **GeoStru** sono dotati di sistemi di controllo dei dati di input e di output molto sofisticati i quali sono in grado di rilevare errori gravi tali da non consentire le corrette elaborazioni.

# SLOPE

Versione: 2015

<b>1 - NORMATIVE DI RIFERIMENTO</b> .....	<b>3</b>
<b>2-Definizione</b> .....	<b>3</b>
<b>3-Introduzione all'analisi di stabilità</b> .....	<b>3</b>
3.1 - Metodo equilibrio limite (LEM).....	4
3.1.1 - Metodo dei conci.....	4
3.1.2 - Metodo di FELLENIUS (1927).....	5
3.1.3 - Metodo di BISHOP (1955).....	5
3.1.4 - Metodo di JANBU (1967).....	6
3.1.5 - Metodo di BELL (1968).....	6
3.1.6 - Metodo di SARMA (1973).....	8
3.1.7 - Metodo di SPENCER.....	10
3.1.8 - Metodo di Morgenstern e Price.....	11
<b>4 - Valutazione dell'azione sismica</b> .....	<b>12</b>
<b>5 - Ricerca della superficie di scorrimento critica</b> .....	<b>12</b>
<b>Esempio 11.5 – Colleselli-Soranzo [FILE: EX11.5 Colleselli-Soranzo]</b> .....	<b>13</b>
<b>Esempio 15.A.2 – Cestelli - Guidi [FILE: EX15.A.2 - Cestelli Guidi]</b> .....	<b>13</b>
<b>Conclusioni</b> .....	<b>13</b>

## 1 - NORMATIVE DI RIFERIMENTO

### Norme tecniche per le Costruzioni (NTC 2008)

#### Eurocodice 7

Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.

#### Eurocodice 8

Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

## 2-Definizione

Per pendio s'intende una porzione di versante naturale il cui profilo originario è stato modificato da interventi artificiali rilevanti rispetto alla stabilità. Per frana s'intende una situazione di instabilità che interessa versanti naturali e coinvolgono volumi considerevoli di terreno.

## 3-Introduzione all'analisi di stabilità

La risoluzione di un problema di stabilità richiede la presa in conto delle equazioni di campo e dei legami costitutivi. Le prime sono di equilibrio, le seconde descrivono il comportamento del terreno. Tali equazioni risultano particolarmente complesse in quanto i terreni sono dei sistemi multifase, che possono essere ricondotti a sistemi monofase solo in condizioni di terreno secco, o di analisi in condizioni drenate.

Nella maggior parte dei casi ci si trova a dover trattare un materiale che se saturo è per lo meno bifase, ciò rende la trattazione delle equazioni di equilibrio notevolmente complicata. Inoltre è praticamente impossibile definire una legge costitutiva di validità generale, in quanto i terreni presentano un comportamento non-lineare già a piccole deformazioni, sono anisotropi ed inoltre il loro comportamento dipende non solo dallo sforzo deviatorico ma anche da quello normale. A causa delle suddette difficoltà vengono introdotte delle ipotesi semplificative:

- (a) Si usano leggi costitutive semplificate: modello rigido perfettamente plastico. Si assume che la resistenza del materiale sia espressa unicamente dai parametri coesione ( $c$ ) e angolo di resistenza al taglio ( $\phi$ ), costanti per il terreno e caratteristici dello stato plastico; quindi si suppone valido il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

(b) In alcuni casi vengono soddisfatte solo in parte le equazioni di equilibrio.

### 3.1 - Metodo equilibrio limite (LEM)

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, costituito dal pendio e da una superficie di scorrimento di forma qualsiasi (linea retta, arco di cerchio, spirale logaritmica); da tale equilibrio vengono calcolate le tensioni da taglio ( $\tau$ ) e confrontate con la resistenza disponibile ( $\tau_f$ ), valutata secondo il criterio di rottura di Coulomb, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza  $F = \tau_f / \tau$ .

Tra i metodi dell'equilibrio limite alcuni considerano l'equilibrio globale del corpo rigido (Culman), altri a causa della non omogeneità dividono il corpo in conci considerando l'equilibrio di ciascuno (Fellenius, Bishop, Janbu ecc.).

Di seguito vengono discussi i metodi dell'equilibrio limite dei conci.

#### 3.1.1 - Metodo dei conci

La massa interessata dallo scivolamento viene suddivisa in un numero conveniente di conci. Se il numero dei conci è pari a  $n$ , il problema presenta le seguenti incognite:

- $n$  valori delle forze normali  $N_i$  agenti sulla base di ciascun concio;
- $n$  valori delle forze di taglio alla base del concio  $T_i$
- $(n-1)$  forze normali  $E_i$  agenti sull'interfaccia dei conci;
- $(n-1)$  forze tangenziali  $X_i$  agenti sull'interfaccia dei conci;
- $n$  valori della coordinata  $a$  che individua il punto di applicazione delle  $E_i$ ;
- $(n-1)$  valori della coordinata che individua il punto di applicazione delle  $X_i$ ;
- una incognita costituita dal fattore di sicurezza  $F$ .

Complessivamente le incognite sono  $(6n-2)$ .

*mentre le equazioni a disposizione sono:*

- Equazioni di equilibrio dei momenti  $n$
- Equazioni di equilibrio alla traslazione verticale  $n$
- Equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale  $n$
- Equazioni relative al criterio di rottura  $n$
- Totale numero di equazioni  $4n$

Il problema è staticamente indeterminato ed il grado di indeterminazione è pari a

$$i = (6n-2)-(4n) = 2n-2.$$

Il grado di indeterminazione si riduce ulteriormente a  $(n-2)$  in quando si fa l'assunzione che  $N_i$  sia applicato nel punto medio della striscia, ciò equivale ad ipotizzare che le tensioni normali totali siano uniformemente distribuite.

I diversi metodi che si basano sulla teoria dell'equilibrio limite si differenziano per il modo in cui vengono eliminate le  $(n-2)$  indeterminazioni.

### 3.1.2 - Metodo di FELLENIUS (1927)

Con questo metodo (valido solo per superfici di scorrimento di forma circolare) vengono trascurate le forze di interstriscia pertanto le incognite si riducono a:

$n$  valori delle forze normali  $N_i$ ;

$n$  valori delle forze da taglio  $T_i$ ;

1 fattore di sicurezza.

Incognite  $(2n+1)$

Le equazioni a disposizione sono:

$n$  equazioni di equilibrio alla traslazione verticale;

$n$  equazioni relative al criterio di rottura;

1 equazione di equilibrio dei momenti globale.

$$F = \frac{\sum \{ c_i \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - u_i \cdot l_i) \cdot \tan \varphi_i \}}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i}$$

Questa equazione è semplice da risolvere ma si è trovato che fornisce risultati conservativi (fattori di sicurezza bassi) soprattutto per superfici profonde.

### 3.1.3 - Metodo di BISHOP (1955)

Con tale metodo non viene trascurato nessun contributo di forze agenti sui blocchi e fu il primo a descrivere i problemi legati ai metodi convenzionali.

Le equazioni usate per risolvere il problema sono:

$$\sum F_v = 0, \sum M_0 = 0, \text{ Criterio di rottura.}$$

$$F = \frac{\sum \{ c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i + \Delta X_i) \cdot \tan \varphi_i \} \cdot \frac{\sec \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \cdot \tan \varphi_i / F}}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i}$$



I valori di  $F$  e di  $\Delta X$  per ogni elemento che soddisfano questa equazione danno una soluzione rigorosa al problema. Come prima approssimazione conviene porre  $\Delta X = 0$  ed iterare per il calcolo del fattore di sicurezza, tale procedimento è noto come metodo di **Bishop ordinario**, gli errori commessi rispetto al metodo completo sono di circa 1 %.

### 3.1.4 - Metodo di JANBU (1967)

Janbu estese il metodo di Bishop a superfici di scorrimento di forma qualsiasi. Quando vengono trattate superfici di scorrimento di forma qualsiasi il braccio delle forze cambia (nel caso delle superfici circolari resta costante e pari al raggio) a tal motivo risulta più conveniente valutare l'equazione del momento rispetto allo spigolo di ogni blocco.

$$F = \frac{\sum \{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i + \Delta X_i) \cdot \tan \varphi_i\} \cdot \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \cdot \tan \varphi_i / F}}{\sum W_i \cdot \tan \alpha_i}$$

Assumendo  $\Delta X_i = 0$  si ottiene il metodo ordinario.

Janbu propose inoltre un metodo per la correzione del fattore di sicurezza ottenuto con il metodo ordinario secondo la seguente:

$$F_{\text{corretto}} = f_o F$$

dove  $f_o$  è riportato in grafici funzione di geometria e parametri geotecnici.

Tale correzione è molto attendibile per pendii poco inclinati.

### 3.1.5 - Metodo di BELL (1968)

Le forze agenti sul corpo che scivola includono il peso effettivo del terreno,  $W$ , le forze sismiche pseudostatiche orizzontali e verticali  $K_x W$  e  $K_z W$ , le forze orizzontali e verticali  $X$  e  $Z$  applicate esternamente al profilo del pendio, infine, la risultante degli sforzi totali normali e di taglio  $s$  e  $t \cdot$  agenti sulla superficie potenziale di scivolamento.

Lo sforzo totale normale può includere un eccesso di pressione dei pori  $u$  che deve essere specificata con l'introduzione dei parametri di forza efficace.

In pratica questo metodo può essere considerato come un'estensione del metodo del cerchio di attrito per sezioni omogenee precedentemente descritto da *Taylor*.

In accordo con la legge della resistenza di *Mohr-Coulomb* in termini di tensione efficace, la forza di taglio agente sulla base dell'*i*-esimo concio è data da:

$$T_i = \frac{c_i L_i + (N_i - u_{ci} L_i) \tan \phi_i}{F}$$

in cui:

- F = il fattore di sicurezza;
- $c_i$  = la coesione efficace (o totale) alla base dell'*i*-esimo concio;
- $\phi_i$  = l'angolo di attrito efficace (= 0 con la coesione totale) alla base dell'*i*-esimo concio;
- $L_i$  = la lunghezza della base dell'*i*-esimo concio;
- $u_{ci}$  = la pressione dei pori al centro della base dell'*i*-esimo concio.

L'equilibrio risulta uguagliando a zero la somma delle forze orizzontali, la somma delle forze verticali e la somma dei momenti rispetto all'origine.

Viene adottata la seguente assunzione sulla variazione della tensione normale agente sulla potenziale superficie di scorrimento:

$$\sigma_{ci} = \left[ C_1 (1 - K_z) \frac{W_i \cos \alpha_i}{L_i} \right] + C_2 f(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$$

in cui il primo termine dell'equazione include l'espressione:

$W_i \cos \alpha_i / L_i$  = valore dello sforzo normale totale associato con il metodo ordinario dei conci.

Il secondo termine dell'equazione include la funzione:

$$f = \sin 2\pi \left( \frac{x_n - x_{ci}}{x_n - x_0} \right)$$

Dove  $x_0$  ed  $x_n$  sono rispettivamente le ascisse del primo e dell'ultimo punto della superficie di scorrimento, mentre  $x_{ci}$  rappresenta l'ascissa del punto medio della base del concio *i*-esimo.

Una parte sensibile di riduzione del peso associata con una accelerazione verticale del terreno  $K_z$  g può essere trasmessa direttamente alla base e ciò è incluso nel fattore  $(1 - K_z)$ .

Lo sforzo normale totale alla base di un concio è dato da:

$$N_i = \sigma_{ci} L_i$$

La soluzione delle equazioni di equilibrio si ricava risolvendo un sistema lineare di tre equazioni ottenute moltiplicando le equazioni di equilibrio per il fattore di sicurezza  $F$ , sostituendo l'espressione di  $N_i$  e moltiplicando ciascun termine della coesione per un coefficiente arbitrario  $C_3$ .

Si assume una relazione di linearità tra detto coefficiente, determinabile tramite la regola di Cramer, ed il fattore di sicurezza

$$F = F(2) + \left( \frac{1 - C_3(2)}{C_3(2) - C_3(1)} \right) (F(2) - F(1))$$

Il corretto valore di  $F$  può essere ottenuto dalla formula di interpolazione lineare:

dove i numeri in parentesi (1) e (2) indicano i valori iniziale e successivo dei parametri  $F$  e  $C_3$ .

Qualsiasi coppia di valori del fattore di sicurezza nell'intorno di una stima fisicamente ragionevole può essere usata per iniziare una soluzione iterativa.

Il numero necessario di iterazioni dipende sia dalla stima iniziale sia dalla desiderata precisione della soluzione; normalmente, il processo converge rapidamente.

### 3.1.6 - Metodo di SARMA (1973)

Il metodo di **Sarma** è un semplice, ma accurato metodo per l'analisi di stabilità dei pendii, che permette di determinare l'accelerazione sismica orizzontale richiesta affinché l'ammasso di terreno, delimitato dalla superficie di scivolamento e dal profilo topografico, raggiunga lo stato di equilibrio limite (accelerazione critica  $K_c$ ) e, nello stesso tempo, consente di ricavare l'usuale fattore di sicurezza ottenuto come per gli altri metodi più comuni della geotecnica.

Si tratta di un metodo basato sul principio dell'equilibrio limite e delle strisce, pertanto viene considerato l'equilibrio di una potenziale massa di terreno in scivolamento suddivisa in  $n$  strisce verticali di spessore sufficientemente piccolo da ritenere ammissibile l'assunzione che lo sforzo normale  $N_i$  agisce nel punto medio della base della striscia.

Le equazioni da prendere in considerazione sono:

- ❖ L'equazione di equilibrio alla traslazione orizzontale del singolo concio;
- ❖ L'equazione di equilibrio alla traslazione verticale del singolo concio;
- ❖ L'equazione di equilibrio dei momenti.

Condizioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale:

$$N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i = W_i - \Delta X_i$$

$$T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i = K W_i + \Delta E_i$$

Viene, inoltre, assunto che in assenza di forze esterne sulla superficie libera dell'ammasso si ha:

$$\Delta E_i = 0$$

$$\Delta X_i = 0$$

dove  $E_i$  e  $X_i$  rappresentano, rispettivamente, le forze orizzontale e verticale sulla faccia  $i$ -esima del concio generico  $i$ .

L'equazione di equilibrio dei momenti viene scritta scegliendo come punto di riferimento il baricentro dell'intero ammasso; sicché, dopo aver eseguito una serie di posizioni e trasformazioni trigonometriche ed algebriche, nel metodo di **Sarma** la soluzione del problema passa attraverso la risoluzione di due equazioni:

$$*\sum \Delta X_i \cdot \operatorname{tg}(\psi'_i - \alpha_i) + \sum \Delta E_i = \sum \Delta_i - K \cdot \sum W_i$$

$$**\sum \Delta X_i \cdot [(y_{mi} - y_G) \cdot \operatorname{tg}(\psi'_i - \alpha'_i) + (x'_i - x_G)] = \sum W_i \cdot (x_{mi} - x_G) + \sum \Delta_i \cdot (y_{mi} - y_G)$$

Ma l'approccio risolutivo, in questo caso, è completamente capovolto: il problema infatti impone di trovare un valore di  $K$  (accelerazione sismica) corrispondente ad un determinato fattore di sicurezza; ed in particolare, trovare il valore dell'accelerazione  $K$  corrispondente al fattore di sicurezza  $F = 1$ , ossia *l'accelerazione critica*.

Si ha pertanto:

$$K = K_c \text{ accelerazione critica se } F = 1$$

$$F = F_s \text{ fattore di sicurezza in condizioni statiche se } K = 0$$

La seconda parte del problema del Metodo di **Sarma** è quella di trovare una distribuzione di forze interne  $X_i$  ed  $E_i$  tale da verificare l'equilibrio del concio e quello globale dell'intero ammasso, senza violazione del criterio di rottura.

E' stato trovato che una soluzione accettabile del problema si può ottenere assumendo la seguente distribuzione per le forze  $X_i$ :

$$\Delta X_i = \lambda \cdot \Delta Q_i = \lambda \cdot (Q_{i+1} - Q_i)$$

dove  $Q_i$  è una funzione nota, in cui vengono presi in considerazione i parametri geotecnici medi sulla  $i$ -esima faccia del concio  $i$ , e  $\lambda$  rappresenta un'incognita.

La soluzione completa del problema si ottiene pertanto, dopo alcune iterazioni, con i valori di  $K_c$ ,  $\lambda$  e  $F$ , che permettono di ottenere anche la distribuzione delle forze di interstriscia.

### 3.1.7 - Metodo di SPENCER

Il metodo è basato sull'assunzione:

- a) le forze d'interfaccia lungo le superfici di divisione dei singoli conci sono orientate parallelamente fra loro ed inclinate rispetto all'orizzontale di un angolo  $\theta$ .
- b) tutti i momenti sono nulli  $M_i = 0 \quad i=1.....n$

Sostanzialmente il metodo soddisfa tutte le equazioni della statica ed equivale al metodo di Morgenstern e Price quando la funzione  $f(x) = 1$ .

Imponendo l'equilibrio dei momenti rispetto al centro dell'arco descritto dalla superficie di scivolamento si ha:

$$1) \quad \sum Q_i R \cos(\alpha - \theta) = 0$$

dove:

$$Q_i = \frac{\frac{c}{F_s} (W \cos \alpha - \gamma_w h \sec \alpha) \frac{\tan \alpha}{F_s} - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left[ \frac{F_s + \tan \alpha \tan(\alpha - \theta)}{F_s} \right]}$$

forza d'interazione fra i conci;

R = raggio dell'arco di cerchio;

$\theta$  = angolo d'inclinazione della forza  $Q_i$  rispetto all'orizzontale.

Imponendo l'equilibrio delle forze orizzontali e verticali si ha rispettivamente:

$$\sum (Q_i \cos \theta) = 0$$

$$\sum (Q_i \sin \theta) = 0$$

Con l'assunzione delle forze  $Q_i$  parallele fra loro, si può anche scrivere:

$$2) \quad \sum Q_i = 0$$

Il metodo propone di calcolare due coefficienti di sicurezza: il primo ( $F_{sm}$ ) ottenibile dalla 1), legato all'equilibrio dei momenti; il secondo ( $F_{sf}$ ) dalla 2) legato all'equilibrio delle forze. In pratica si procede risolvendo la 1) e la 2) per un dato intervallo di valori dell'angolo  $\theta$ , considerando come valore unico del coefficiente di sicurezza quello per cui si abbia  $F_{sm} = F_{sf}$ .

### 3.1.8 - Metodo di Morgenstern e Price

Si stabilisce una relazione tra le componenti delle forze di interfaccia del tipo  $X = \lambda f(x)E$ , dove  $\lambda$  è un fattore di scala e  $f(x)$ , funzione della posizione di  $E$  e di  $X$ , definisce una relazione tra la variazione della forza  $X$  e della forza  $E$  all'interno della massa scivolante. La funzione  $f(x)$  è scelta arbitrariamente (costante, sinusoidale, semisinusoidale, trapezia, spezzata...) e influenza poco il risultato, ma va verificato che i valori ricavati per le incognite siano fisicamente accettabili.

La particolarità del metodo è che la massa viene suddivisa in strisce infinitesime alle quali vengono imposte le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale e di rottura sulla base delle strisce stesse. Si perviene ad una prima equazione differenziale che lega le forze d'interfaccia incognite  $E$ ,  $X$ , il coefficiente di sicurezza  $F_s$ , il peso della striscia infinitesima  $dW$  e la risultante delle pressioni neutra alla base  $dU$ .

Si ottiene la cosiddetta "equazione delle forze":

$$c' \sec^2 \frac{\alpha}{F_s} + \operatorname{tg} \rho' \left( \frac{dW}{dx} - \frac{dX}{dx} - \operatorname{tg} \alpha \frac{dE}{dx} - \sec \alpha \frac{dU}{dx} \right) =$$

$$= \frac{dE}{dx} - \operatorname{tg} \alpha \left( \frac{dX}{dx} - \frac{dW}{dx} \right)$$

Una seconda equazione, detta "equazione dei momenti", viene scritta imponendo la condizione di equilibrio alla rotazione rispetto alla mezzzeria della base:

$$X = \frac{d(E_\gamma)}{dx} - \gamma \frac{dE}{dx}$$

queste due equazioni vengono estese per integrazione a tutta la massa interessata dallo scivolamento.

Il metodo di calcolo soddisfa tutte le equazioni di equilibrio ed è applicabile a superfici di qualsiasi forma, ma implica necessariamente l'uso di un calcolatore.



#### 4 - Valutazione dell'azione sismica

La stabilità dei pendii nei confronti dell'azione sismica viene verificata con il metodo pseudo-statico. Per i terreni che sotto l'azione di un carico ciclico possono sviluppare pressioni interstiziali elevate viene considerato un aumento in percento delle pressioni neutre che tiene conto di questo fattore di perdita di resistenza.

Ai fini della valutazione dell'azione sismica vengono considerate le seguenti forze:

$$F_H = K_x W$$

$$F_V = K_y W$$

Essendo:

- $F_H$  e  $F_V$  rispettivamente la componente orizzontale e verticale della forza d'inerzia applicata al baricentro del concio;
- $W$ : peso concio
- $K_x$ : Coefficiente sismico orizzontale
- $K_y$ : Coefficiente sismico verticale

#### 5 - Ricerca della superficie di scorrimento critica

In presenza di mezzi omogenei non si hanno a disposizione metodi per individuare la superficie di scorrimento critica ed occorre esaminarne un numero elevato di potenziali superfici.

Nel caso vengano ipotizzate superfici di forma circolare, la ricerca diventa più semplice, in quanto dopo aver posizionato una maglia dei centri costituita da  $m$  righe e  $n$  colonne saranno esaminate tutte le superfici aventi per centro il generico nodo della maglia  $m \times n$  e raggio variabile in un determinato range di valori tale da esaminare superfici cinematicamente ammissibili.

**Esempio 11.5 – Colleselli-Soranzo [FILE: EX11.5 Colleselli-Soranzo]**

Il caso si riferisce ad uno scavo in terreno costituito da argilla con una resistenza di taglio senza drenaggio  $c_u=3\text{t/m}^2$ , con angolo di attrito interno  $\phi=0$  e con un peso di volume  $\gamma=1.8\text{ t/m}^3$ . Si esamini il problema della verifica di stabilità con il metodo dei conci o svedese.

Il risultato, presentato in termini di fattore di sicurezza, è il seguente:

$$\begin{aligned}FS_{\text{-SLOPE}} &= 1.63 \\FS_{\text{-Testo}} &= 1.66 \\ \frac{FS_{\text{-SLOPE}} - FS_{\text{-Testo}}}{FS_{\text{-Testo}}} \% &= -1.84\%\end{aligned}$$

**Esempio 15.A.2 – Cestelli - Guidi [FILE: EX15.A.2 - Cestelli Guidi]**

Si verifica, con riferimento alle condizioni di rottura (equilibrio limite ultimo), la stabilità di una scarpata, a lungo termine od in condizioni drenate (condizioni più svantaggiose), in una argilla sovraconsolidata non fessurata microscopicamente avente  $c' = 1\text{ bar}$ ,  $\phi'=18^\circ$  e  $\gamma=1.7\text{ t/m}^3$

Il risultato, presentato in termini di fattore di sicurezza, è il seguente:

$$\begin{aligned}FS_{\text{-SLOPE}} &= 1.77 \\FS_{\text{-Testo}} &= 1.82 \\ \frac{FS_{\text{-SLOPE}} - FS_{\text{-Testo}}}{FS_{\text{-Testo}}} \% &= -2.47\%\end{aligned}$$

**Conclusioni**

Si evidenzia dai test effettuati l'affidabilità del software in oggetto. Si riscontrano scarti minimi nella valutazione del fattore di sicurezza dovuti ad approssimazioni di tipo numerico.

**ANALISI DI STABILITÀ  
 COMUNE DI PREDAPPIO  
 SEZIONE 3 - CONDIZIONE DRENATA - PRE SISMA  
 221 SUPERFICI VERIFICATE**

**Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)**

Normativa	Utente
Numero di strati	2,0
Numero dei conci	30,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,0
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	40,47 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	49,33 m
Ascissa vertice destro superiore xs	157,09 m
Ordinata vertice destro superiore ys	142,12 m
Passo di ricerca	10,0
Numero di celle lungo x	10,0
Numero di celle lungo y	10,0

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	15,95	3,0
3	41,5	8,0
4	61,33	13,0
5	93,78	18,0
6	106,5	23,0
7	142,5	28,0
8	148,45	33,0
9	160,34	38,0
10	191,35	43,0
11	205,26	48,0
12	230,2	53,0
13	261,5	58,0

**Falda**

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,0	-1,17
2	34,37	4,07
3	61,25	8,24
4	90,32	14,03
5	120,72	19,82
6	142,58	25,59
7	153,93	29,79
8	170,84	34,85
9	187,05	39,48
10	211,26	46,0
11	230,55	50,15
12	261,5	55,47

**Piezometrica Nr.1**

**Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	5,8	-0,47
3	12,02	-0,21
4	20,47	0,91
5	42,19	3,55
6	73,16	9,18
7	99,06	13,9
8	124,44	18,35
9	143,07	23,96
10	158,76	30,02
11	172,21	33,67
12	182,5	37,72
13	191,35	43,0
14	205,26	48,0
15	230,2	53,0
16	261,5	58,0

**Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

Tangente angolo di resistenza al taglio	1,25
Coesione efficace	1,25
Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

**Stratigrafia**

Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (Kg/m <sup>3</sup> )	Litologia	
1	0.1	0	22	1800	2000	a1	
2	0.5	0	28	2200	2400	FCO	

**Risultati analisi pendio [Utente]**

Fs minimo individuato	1,46
Ascissa centro superficie	145,43 m
Ordinata centro superficie	49,33 m
Raggio superficie	22,82 m

B: Larghezza del concio; Alfa: Angolo di inclinazione della base del concio; Li: Lunghezza della base del concio; Wi: Peso del concio; Ui: Forze derivanti dalle pressioni neutre; Ni: forze agenti normalmente alla direzione di scivolamento; Ti: forze agenti parallelamente alla superficie di scivolamento; Ei, Ei-1: Forze agenti normalmente alle facce del concio; Xi, Xi-1: Forze di tipo tagliante applicate sulle facce laterali.

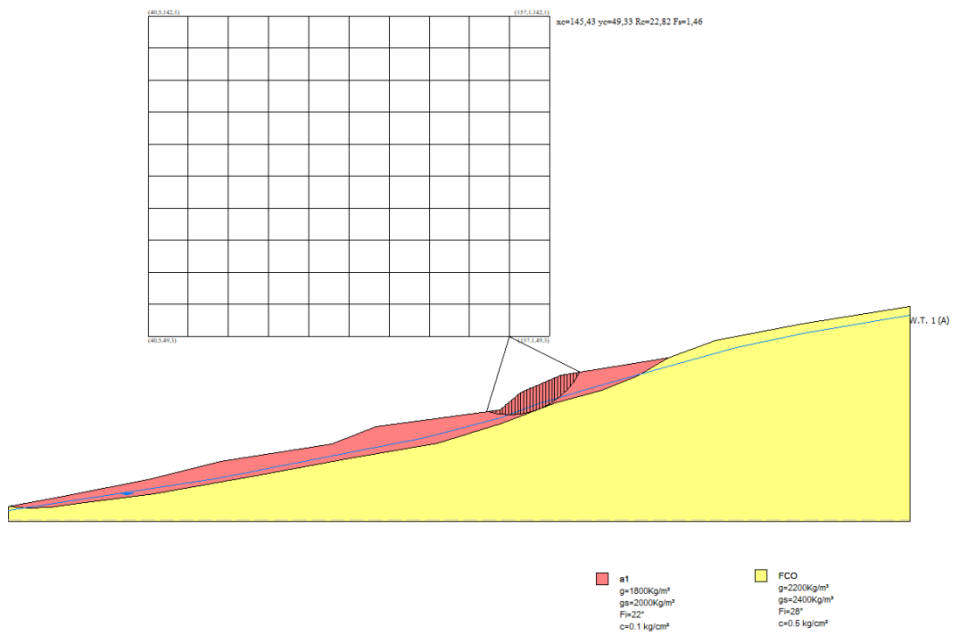
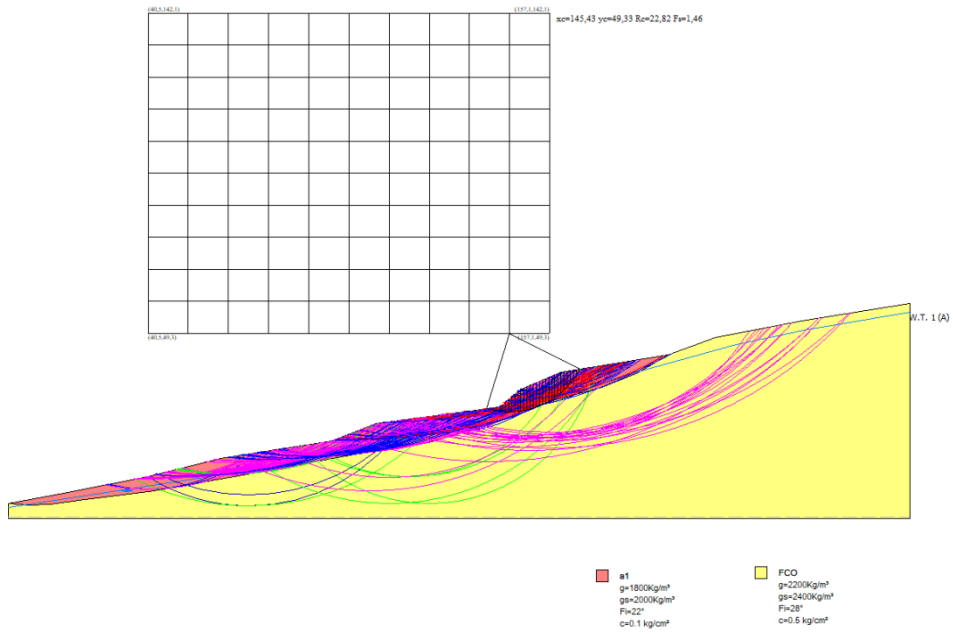
**xc = 145,427 yc = 49,328 Rc = 22,821 Fs=1,456**  
 Lambda = 0,35

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	0,9	-15,69	0,93	311,57
2	0,9	-13,36	0,92	887,3
3	0,9	-11,06	0,91	1401,32
4	1,0	-8,64	1,01	2096,91
5	0,79	-6,37	0,8	2405,59
6	0,9	-4,24	0,9	3992,3

7	0,9	-1,98	0,9	5286,87
8	0,9	0,27	0,9	6555,2
9	0,9	2,52	0,9	7791,72
10	0,9	4,77	0,9	8965,3
11	0,67	6,77	0,68	7470,82
12	1,12	9,03	1,13	13248,85
13	0,9	11,61	0,92	11036,39
14	0,9	13,91	0,92	11338,73
15	0,9	16,25	0,93	11573,69
16	0,9	18,61	0,95	11737,56
17	0,9	21,0	0,96	11829,29
18	0,9	23,43	0,98	11830,28
19	0,9	25,92	1,0	11749,3
20	0,9	28,44	1,02	11579,79
21	0,9	31,04	1,05	11319,08
22	0,9	33,7	1,08	10955,76
23	0,9	36,46	1,11	10484,82
24	0,91	39,33	1,17	10029,26
25	0,89	42,31	1,2	8964,31
26	0,9	45,41	1,28	7929,67
27	0,9	48,72	1,36	6608,97
28	0,9	52,27	1,47	5089,05
29	0,9	56,13	1,61	3319,2
30	0,9	60,43	1,82	1217,64

**Sforzi sui conci**

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	404,32	1154,2	0,0	0,0	-401,34	528,37	0,0
2	919,2	2624,03	404,32	1154,2	22,67	639,35	0,0
3	1503,94	4293,29	919,2	2624,03	481,33	761,17	0,0
4	2168,08	6189,21	1503,94	4293,29	1131,75	1009,13	0,0
5	2824,32	8062,57	2168,08	6189,21	1530,66	972,94	0,0
6	3651,92	10425,13	2824,32	8062,57	2981,59	1445,15	0,0
7	4553,21	12998,02	3651,92	10425,13	4294,04	1808,09	0,0
8	5466,63	15605,55	4553,21	12998,02	5500,55	2142,59	153,49
9	6338,57	18094,68	5466,63	15605,55	6589,06	2445,29	433,15
10	7134,23	20366,05	6338,57	18094,68	7646,71	2740,39	681,21
11	7696,27	21970,5	7134,23	20366,05	6393,73	2240,76	651,38
12	8360,82	23867,59	7696,27	21970,5	11393,24	3940,7	1316,29
13	8728,1	24916,06	8360,82	23867,59	9404,31	3238,92	1231,84
14	8925,92	25480,76	8728,1	24916,06	9570,89	3290,91	1338,49
15	8951,61	25554,1	8925,92	25480,76	9627,05	3313,49	1421,13
16	8806,21	25139,02	8951,61	25554,1	9580,14	3308,84	1468,08
17	9818,19	28027,91	8806,21	25139,02	11134,06	7365,63	0,0
18	9348,59	26687,37	9818,19	28027,91	9220,98	3230,52	1405,45
19	8731,87	24926,83	9348,59	26687,37	8927,74	3162,64	1282,03
20	7982,6	22787,87	8731,87	24926,83	8565,82	3077,9	1104,58
21	7115,99	20313,97	7982,6	22787,87	8125,13	2973,96	891,21
22	6155,44	17571,89	7115,99	20313,97	7650,53	2863,72	617,01
23	5126,89	14635,71	6155,44	17571,89	7143,96	2748,6	298,45
24	4038,21	11527,85	5126,89	14635,71	6630,15	2646,48	0,0
25	2958,18	8444,71	4038,21	11527,85	5352,54	2307,96	0,0
26	1913,1	5461,31	2958,18	8444,71	4175,77	2036,34	0,0
27	986,59	2816,42	1913,1	5461,31	2983,28	1761,68	0,0
28	267,25	762,91	986,59	2816,42	1930,07	1542,25	0,0
29	-121,66	-347,29	267,25	762,91	1144,76	1422,9	0,0
30	4,05	11,56	-121,66	-347,29	850,97	1484,28	0,0





**ANALISI DI STABILITÀ  
 COMUNE DI PREDAPPIO  
 SEZIONE 3 - CONDIZIONE NON DRENATA – DURANTE IL SISMA  
 221 SUPERFICI VERIFICATE**

**Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)**

Normativa	Utente
Numero di strati	2,0
Numero dei conci	30,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,0
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	
Analisi	Condizione non drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	40,47 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	49,33 m
Ascissa vertice destro superiore xs	157,09 m
Ordinata vertice destro superiore ys	142,12 m
Passo di ricerca	10,0
Numero di celle lungo x	10,0
Numero di celle lungo y	10,0

**Sisma**

Coefficiente azione sismica orizzontale	0,1
Coefficiente azione sismica verticale	0,05

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	15,95	3,0
3	41,5	8,0
4	61,33	13,0
5	93,78	18,0
6	106,5	23,0
7	142,5	28,0
8	148,45	33,0
9	160,34	38,0
10	191,35	43,0
11	205,26	48,0
12	230,2	53,0
13	261,5	58,0

**Falda**

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,0	-1,17
2	34,37	4,07
3	61,25	8,24
4	90,32	14,03
5	120,72	19,82
6	142,58	25,59
7	153,93	29,79
8	170,84	34,85
9	187,05	39,48
10	211,26	46,0
11	230,55	50,15
12	261,5	55,47

**Piezometrica Nr..1**

**Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	5,8	-0,47
3	12,02	-0,21
4	20,47	0,91
5	42,19	3,55
6	73,16	9,18
7	99,06	13,9
8	124,44	18,35
9	143,07	23,96
10	158,76	30,02
11	172,21	33,67
12	182,5	37,72
13	191,35	43,0
14	205,26	48,0
15	230,2	53,0
16	261,5	58,0

**Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

Tangente angolo di resistenza al taglio	1,25
Coesione efficace	1,25
Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

**Stratigrafia**

Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (Kg/m <sup>3</sup> )	Litologia	
1	0.1	0.3	22	1800	2000	a1	
2	0.5	3	28	2200	2400	FCO	

**Risultati analisi pendio [Utente]**

Fs minimo individuato	0,89
Ascissa centro superficie	139,6 m
Ordinata centro superficie	72,53 m
Raggio superficie	46,46 m

B: Larghezza del concio; Alfa: Angolo di inclinazione della base del concio; Li: Lunghezza della base del concio; Wi: Peso del concio; Ui: Forze derivanti dalle pressioni neutre; Ni: forze agenti normalmente alla direzione di scivolamento; Ti: forze agenti parallelamente alla superficie di scivolamento; Ei, Ei-1: Forze agenti normalmente alle facce del concio; Xi, Xi-1: Forze di tipo tagliante applicate sulle facce laterali.

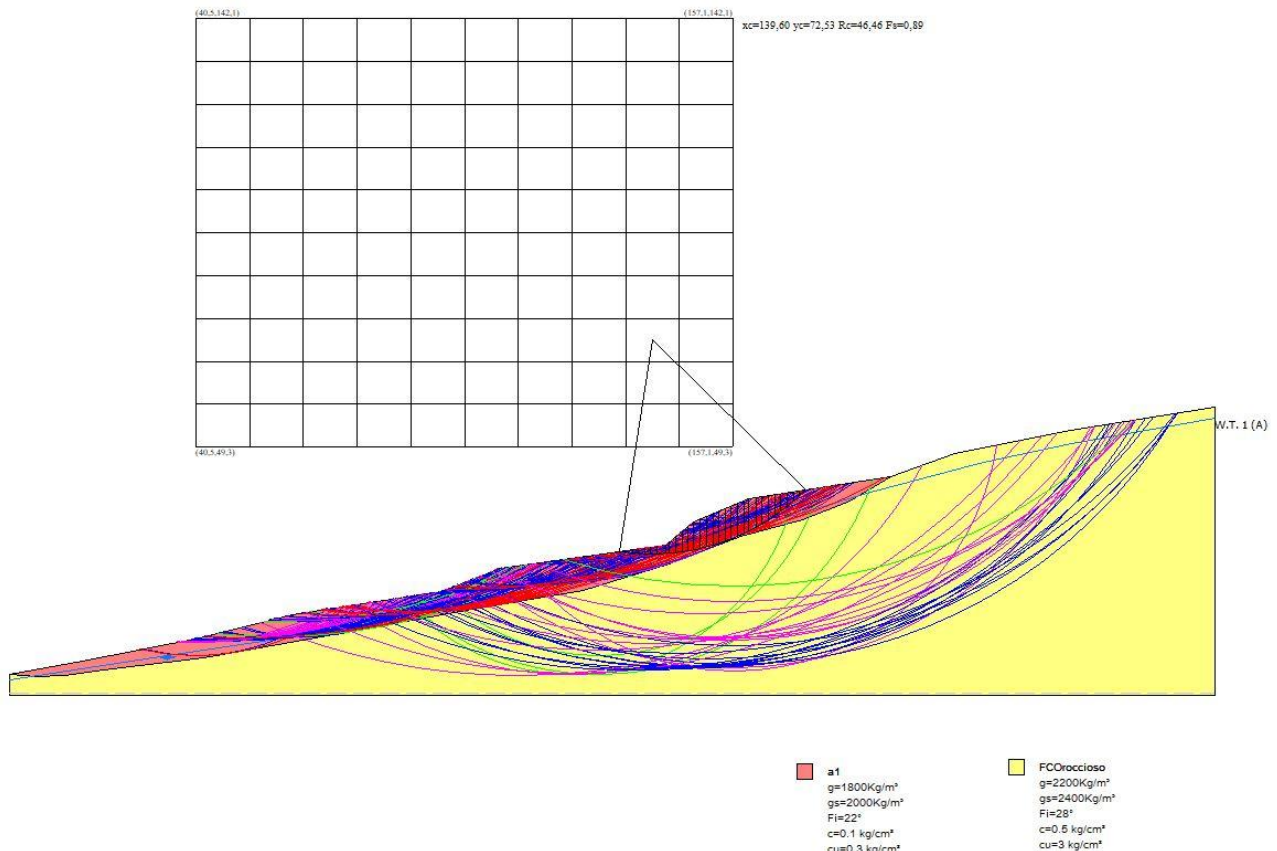
**xc = 139,597 yc = 72,525 Rc = 46,459 Fs=0,894**  
 Lambda = 0,284

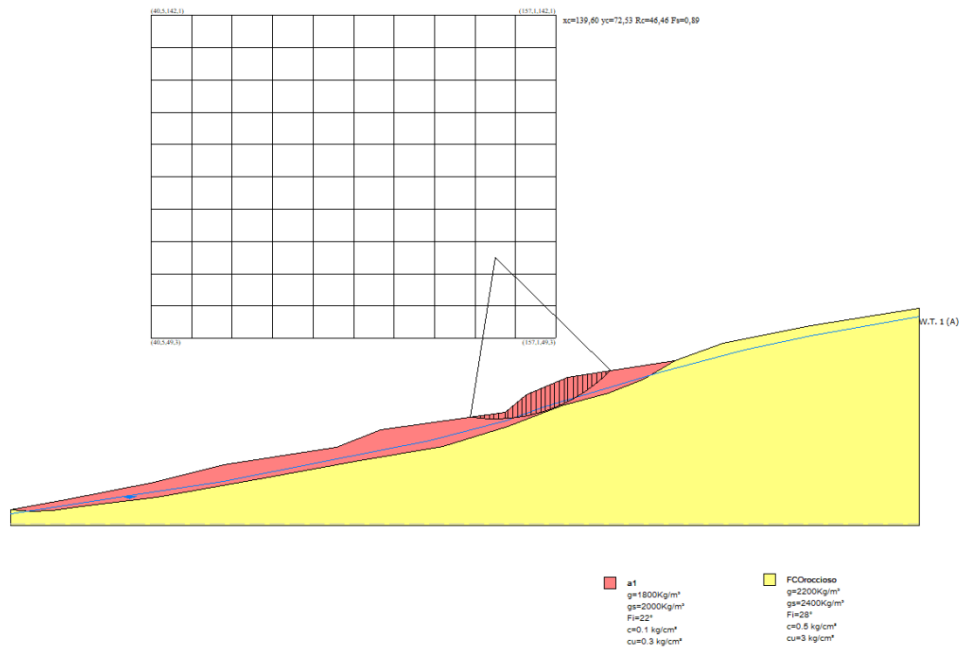
Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	1,34	-7,95	1,36	515,2
2	1,34	-6,28	1,35	1465,61
3	1,34	-4,62	1,35	2309,78
4	1,34	-2,96	1,34	3048,96
5	1,34	-1,3	1,34	3683,43
6	1,34	0,36	1,34	4213,71
7	1,94	2,38	1,94	6833,38
8	0,74	4,04	0,74	3158,77
9	1,34	5,33	1,35	7839,31
10	1,34	7,0	1,35	10478,87
11	1,34	8,67	1,36	13011,98
12	1,18	10,25	1,2	13454,8
13	1,5	11,93	1,54	18786,15
14	1,34	13,73	1,38	17505,63
15	1,34	15,44	1,39	18083,35
16	1,34	17,17	1,41	18544,82
17	1,34	18,91	1,42	18886,5
18	1,34	20,67	1,43	19105,47
19	1,34	22,45	1,45	19196,94
20	1,34	24,26	1,47	19156,86
21	0,99	25,84	1,1	14004,94
22	1,7	27,7	1,92	22887,89
23	1,34	29,84	1,55	16536,5
24	1,34	31,76	1,58	14969,38
25	1,34	33,73	1,61	13232,98
26	1,34	35,75	1,65	11314,99
27	1,34	37,82	1,7	9202,34
28	1,34	39,94	1,75	6877,88
29	1,34	42,14	1,81	4322,31
30	1,34	44,41	1,88	1510,98

**Sforzi sui concii**

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	1366,5	4807,07	0,0	0,0	-1475,04	4548,22	0,0
2	2711,06	9536,93	1366,5	4807,07	-308,15	4531,79	0,0
3	4019,97	14141,4	2711,06	9536,93	760,78	4519,21	0,0
4	5282,73	18583,54	4019,97	14141,4	1722,78	4510,6	0,0

5	6491,96	22837,34	5282,73	18583,54	2569,53	4505,71	0,0
6	7642,84	26885,91	6491,96	22837,34	3296,11	4504,69	0,0
7	8634,71	30375,11	7642,84	26885,91	6294,5	6526,08	0,0
8	9742,98	34273,77	8634,71	30375,11	2455,4	2494,87	0,0
9	10571,42	37188,03	9742,98	34273,77	7568,79	4524,18	0,0
10	11168,68	39289,09	10571,42	37188,03	10456,35	4538,34	0,0
11	11502,52	40463,46	11168,68	39289,09	13157,4	4556,65	0,0
12	11705,88	41178,83	11502,52	40463,46	13589,94	4027,04	0,0
13	11346,17	39913,45	11705,88	41178,83	19001,09	5157,81	0,0
14	10955,62	38539,57	11346,17	39913,45	17492,93	4637,14	0,0
15	10374,21	36494,3	10955,62	38539,57	17835,99	4673,32	0,0
16	9606,99	33795,37	10374,21	36494,3	17993,27	4714,7	0,0
17	8661,55	30469,51	9606,99	33795,37	17964,48	4761,61	0,0
18	7548,97	26555,71	8661,55	30469,51	17754,19	4814,56	0,0
19	6283,21	22103,0	7548,97	26555,71	17364,75	4874,04	0,0
20	4882,13	17174,31	6283,21	22103,0	16804,68	4940,76	0,0
21	4142,25	14571,57	4882,13	17174,31	12155,83	3687,22	0,0
22	1876,47	6601,01	4142,25	14571,57	18514,99	6427,19	0,0
23	501,42	1763,9	1876,47	6601,01	13025,56	5192,87	0,0
24	-706,61	-2485,7	501,42	1763,9	11365,5	5298,12	0,0
25	-1683,37	-5921,74	-706,61	-2485,7	9724,7	5416,53	0,0
26	-2354,73	-8283,44	-1683,37	-5921,74	8146,54	5550,2	0,0
27	-2634,56	-9267,84	-2354,73	-8283,44	6686,28	5702,25	0,0
28	-2421,46	-8518,17	-2634,56	-9267,84	5413,15	5875,38	0,0
29	-1595,23	-5611,69	-2421,46	-8518,17	4412,7	6074,95	0,0
30	-11,37	-39,98	-1595,23	-5611,69	3795,5	6306,39	0,0





**ANALISI DI STABILITÀ – SETTORE MONTE  
 COMUNE DI PREDAPPIO  
 SEZIONE 4 - CONDIZIONE DRENATA - PRE SISMA  
 145 SUPERFICI VERIFICATE**

**Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)**

Normativa	Utente
Numero di strati	2,0
Numero dei conci	30,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,0
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	61,45 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	50,33 m
Ascissa vertice destro superiore xs	178,06 m
Ordinata vertice destro superiore ys	143,12 m
Passo di ricerca	10,0
Numero di celle lungo x	10,0
Numero di celle lungo y	10,0

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	2,99	1,25
4	9,73	6,97
5	26,94	8,63
6	38,51	13,63
7	54,0	23,63
8	70,04	28,63
9	91,11	32,38
10	100,0	32,38
11	103,15	35,21
12	127,65	40,94
13	148,29	40,94
14	151,62	43,63
15	164,19	46,81
16	174,12	46,81

**Falda**

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	29,06	4,85
4	54,19	14,33
5	79,9	22,96
6	123,13	33,45
7	158,9	43,26
8	172,47	44,77
9	174,12	45,45

**Piezometrica Nr.1**

**Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	19,45	0,41
4	22,81	0,86
5	27,75	2,01
6	39,32	5,79
7	54,42	11,72
8	74,08	18,58
9	93,08	23,88
10	102,47	26,07
11	113,73	29,02
12	124,58	32,08
13	133,02	35,67
14	141,32	40,94
15	148,29	40,94
16	151,62	43,63
17	164,19	46,81
18	174,12	46,81

**Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

Tangente angolo di resistenza al taglio	1,25
Coesione efficace	1,25
Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

**Stratigrafia**

Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (Kg/m <sup>3</sup> )	Litologia	
1	0.1	0	22	1800	2000	a1	
2	0.5	0	28	2200	2400	FCO	

**Risultati analisi pendio [Utente]**

Fs minimo individuato	2,14
Ascissa centro superficie	61,45 m
Ordinata centro superficie	143,12 m
Raggio superficie	123,14 m

B: Larghezza del concio; Alfa: Angolo di inclinazione della base del concio; Li: Lunghezza della base del concio; Wi: Peso del concio; Ui: Forze derivanti dalle pressioni neutre; Ni: forze agenti normalmente alla direzione di scivolamento; Ti: forze agenti parallelamente alla superficie di scivolamento; Ei, Ei-1: Forze agenti normalmente alle facce del concio; Xi, Xi-1: Forze di tipo tagliante applicate sulle facce laterali.

**xc = 61,449 yc = 143,117 Rc = 123,141 Fs=2,14**  
 Lambda = 0,219

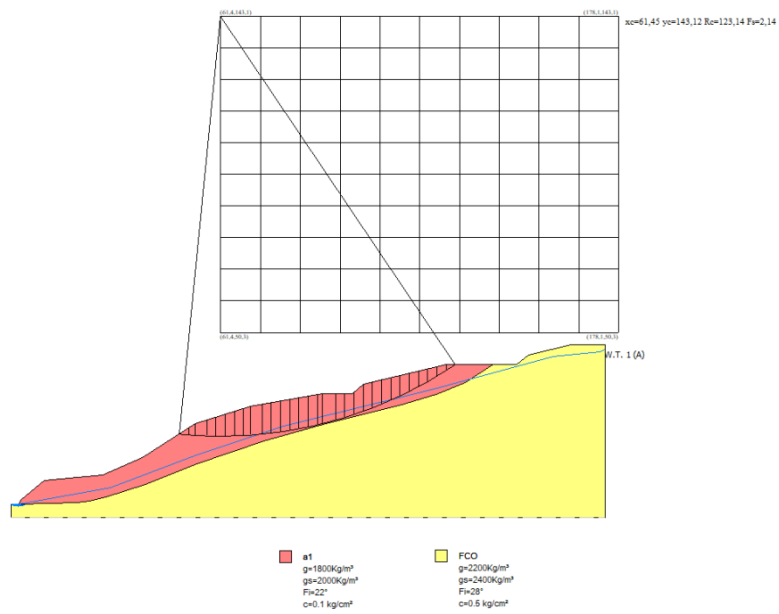
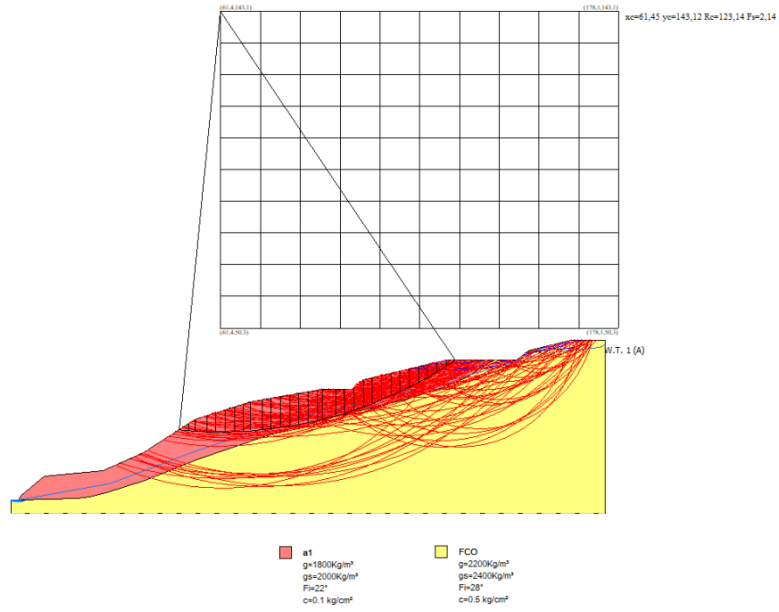
Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	2,7	-5,04	2,71	4839,3
2	2,03	-3,94	2,03	9885,86
3	3,37	-2,68	3,37	24489,85
4	2,7	-1,27	2,7	24719,87



5	2,7	-0,02	2,7	28947,82
6	2,7	1,24	2,7	32889,15
7	2,7	2,49	2,7	36543,56
8	1,89	3,56	1,89	27599,82
9	3,51	4,82	3,52	53826,58
10	2,7	6,27	2,71	42930,86
11	2,7	7,53	2,72	43989,05
12	2,7	8,8	2,73	44702,34
13	2,7	10,07	2,74	44968,56
14	2,7	11,35	2,75	44901,04
15	2,7	12,63	2,76	44488,95
16	1,38	13,61	1,42	22560,95
17	4,01	14,9	4,15	61274,61
18	2,7	16,52	2,81	36563,7
19	2,7	17,84	2,83	32421,11
20	2,64	19,14	2,79	35151,41
21	2,76	20,48	2,94	39221,84
22	2,7	21,84	2,91	36138,43
23	2,7	23,2	2,93	33524,07
24	2,7	24,57	2,97	30613,89
25	2,7	25,96	3,0	27498,28
26	2,7	27,36	3,04	23988,27
27	2,7	28,78	3,08	20068,86
28	2,7	30,23	3,12	15723,5
29	2,7	31,69	3,17	10933,55
30	2,7	33,18	3,22	4340,29

**Sforzi sui concii**

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	620,7	2829,78	0,0	0,0	3953,47	2011,41	0,0
2	1519,68	6928,28	620,7	2829,78	8683,93	2589,49	0,0
3	3162,11	14416,2	1519,68	6928,28	22471,66	5816,67	0,0
4	4658,33	21237,51	3162,11	14416,2	23066,37	5615,19	0,0
5	6199,47	28263,68	4658,33	21237,51	27404,47	6433,88	0,0
6	7732,17	35251,32	6199,47	28263,68	31499,96	7207,38	0,0
7	9208,4	41981,5	7732,17	35251,32	35326,82	7930,76	0,0
8	10269,1	46817,27	9208,4	41981,5	26788,21	5941,31	0,0
9	11791,79	53759,29	10269,1	46817,27	52702,18	11593,65	0,0
10	12747,74	58117,52	11791,79	53759,29	40665,58	8945,06	1525,06
11	13435,96	61255,14	12747,74	58117,52	40223,39	8864,97	3088,21
12	13856,59	63172,8	13435,96	61255,14	39604,43	8752,16	4397,0
13	14034,56	63984,17	13856,59	63172,8	39208,05	8682,04	4956,52
14	13976,58	63719,86	14034,56	63984,17	38571,99	8567,36	5349,18
15	13695,26	62437,29	13976,58	63719,86	37727,95	8414,14	5540,66
16	13490,23	61502,55	13695,26	62437,29	18945,45	4242,19	2878,56
17	12563,76	57278,77	13490,23	61502,55	50515,82	11475,71	8220,52
18	11825,3	53912,06	12563,76	57278,77	29409,95	6866,78	5171,62
19	11040,85	50335,73	11825,3	53912,06	25585,67	6154,13	4691,59
20	10042,94	45786,23	11040,85	50335,73	28493,87	6683,87	3933,79
21	8761,77	39945,29	10042,94	45786,23	32440,08	7499,29	3241,08
22	7459,25	34007,07	8761,77	39945,29	30254,81	7069,43	2125,69
23	6154,49	28058,59	7459,25	34007,07	28713,54	6791,87	879,02
24	4872,42	22213,6	6154,49	28058,59	26577,51	6403,22	0,0
25	3614,58	16479,05	4872,42	22213,6	23345,09	5808,89	0,0
26	2435,6	11104,01	3614,58	16479,05	19881,17	5172,28	0,0
27	1397,78	6372,53	2435,6	11104,01	16220,45	4500,08	0,0
28	571,91	2607,37	1397,78	6372,53	12403,99	3800,18	0,0
29	38,22	174,26	571,91	2607,37	8479,39	3081,76	0,0
30	-1,06	-4,85	38,22	174,26	3567,64	2179,09	0,0



**ANALISI DI STABILITÀ – SETTORE VALLE  
 COMUNE DI PREDAPPIO  
 SEZIONE 4 - CONDIZIONE DRENATA - PRE SISMA  
 203 SUPERFICI VERIFICATE**

**Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)**

Normativa	Utente
Numero di strati	2,0
Numero dei conci	30,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,0
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	2,68 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	50,86 m
Ascissa vertice destro superiore xs	119,29 m
Ordinata vertice destro superiore ys	143,65 m
Passo di ricerca	10,0
Numero di celle lungo x	10,0
Numero di celle lungo y	10,0

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	2,99	1,25
4	9,73	6,97
5	26,94	8,63
6	38,51	13,63
7	54,0	23,63
8	70,04	28,63
9	91,11	32,38
10	100,0	32,38
11	103,15	35,21
12	127,65	40,94
13	148,29	40,94
14	151,62	43,63
15	164,19	46,81
16	174,12	46,81

**Falda**

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	29,06	4,85
4	54,19	14,33
5	79,9	22,96
6	123,13	33,45
7	158,9	43,26
8	172,47	44,77
9	174,12	45,45

**Piezometrica Nr..1**

**Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	19,45	0,41
4	22,81	0,86
5	27,75	2,01
6	39,32	5,79
7	54,42	11,72
8	74,08	18,58
9	93,08	23,88
10	102,47	26,07
11	113,73	29,02
12	124,58	32,08
13	133,02	35,67
14	141,32	40,94
15	148,29	40,94
16	151,62	43,63
17	164,19	46,81
18	174,12	46,81

**Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

Tangente angolo di resistenza al taglio	1,25
Coesione efficace	1,25
Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

**Stratigrafia**

Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (Kg/m <sup>3</sup> )	Litologia	
1	0.1	0	22	1800	2000	a1	
2	0.5	0	28	2200	2400	FCO	

**Risultati analisi pendio [Utente]**

Fs minimo individuato	1,18
Ascissa centro superficie	31,83 m
Ordinata centro superficie	55,5 m
Raggio superficie	48,59 m

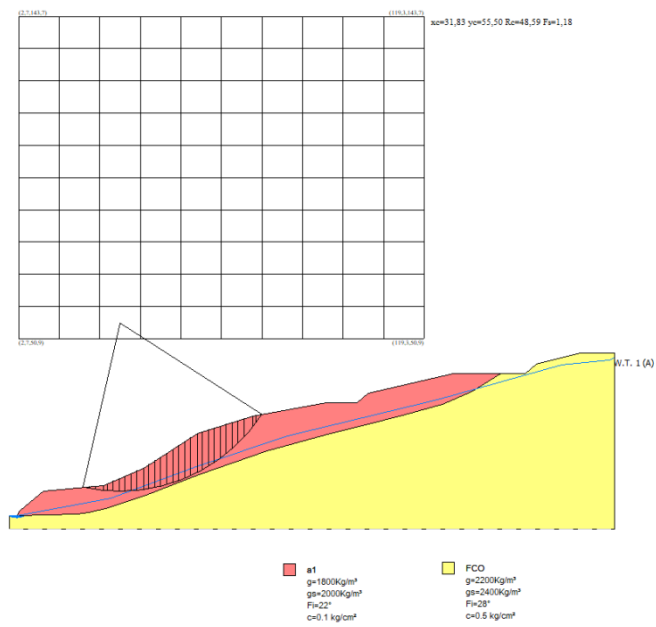
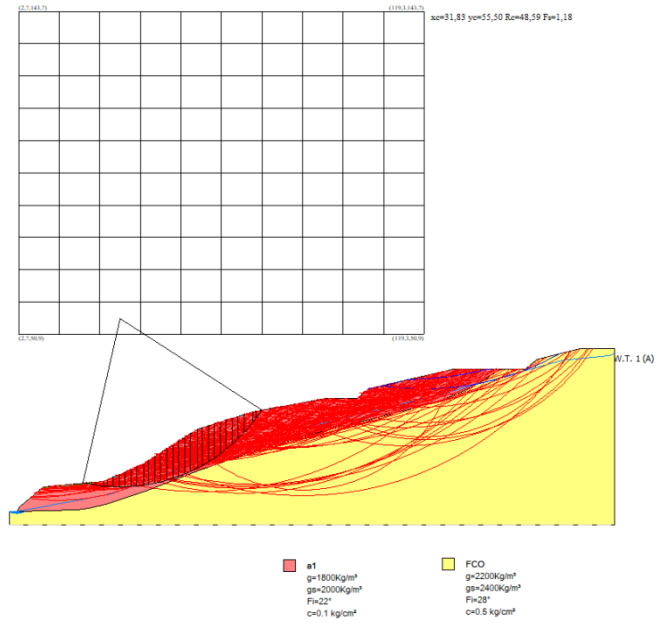
**xc = 31,83 yc = 55,504 Rc = 48,594 Fs=1,182**  
 Lambda = 0,351

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	1,71	-11,57	1,75	819,78
2	1,71	-9,51	1,74	2311,38
3	2,28	-7,13	2,3	5070,47
4	1,14	-5,1	1,15	3654,29
5	1,71	-3,41	1,72	7703,23
6	1,71	-1,39	1,71	10206,54
7	1,71	0,63	1,71	12523,51
8	1,71	2,65	1,71	14654,25

9	1,71	4,68	1,72	16707,47
10	1,86	6,8	1,88	20333,08
11	1,56	8,83	1,58	19095,26
12	1,71	10,8	1,74	23416,94
13	1,71	12,86	1,76	25822,2
14	1,71	14,94	1,77	28000,2
15	1,71	17,04	1,79	29948,68
16	1,71	19,17	1,81	31660,56
17	1,71	21,32	1,84	33130,91
18	1,71	23,5	1,87	34341,13
19	1,94	25,88	2,15	39949,88
20	1,49	28,14	1,69	30602,04
21	1,71	30,3	1,98	33857,28
22	1,71	32,67	2,03	32106,22
23	1,71	35,11	2,09	30008,16
24	1,71	37,62	2,16	27612,21
25	1,71	40,22	2,24	24996,59
26	1,71	42,92	2,34	21962,1
27	1,71	45,74	2,45	18452,62
28	2,56	49,52	3,94	19876,76
29	0,86	52,68	1,43	4150,65
30	1,71	55,3	3,01	3469,04

**Sforzi sui conci**

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	931,84	2653,12	0,0	0,0	-641,71	1260,07	0,0
2	2158,54	6145,76	931,84	2653,12	492,65	1638,07	0,0
3	3858,9	10987,01	2158,54	6145,76	2743,04	2883,92	0,0
4	5162,51	14698,64	3858,9	10987,01	2011,54	1659,4	0,0
5	7066,96	20120,97	5162,51	14698,64	5466,01	3320,8	0,0
6	9177,75	26130,76	7066,96	20120,97	7947,8	4167,16	0,0
7	11391,07	32432,52	9177,75	26130,76	10379,06	4998,06	0,0
8	13618,43	38774,22	11391,07	32432,52	12707,07	5795,46	0,0
9	15724,51	44770,64	13618,43	38774,22	14493,23	6409,42	546,65
10	17738,54	50504,94	15724,51	44770,64	17355,14	7520,54	1503,11
11	19270,84	54867,7	17738,54	50504,94	16081,87	6837,27	1919,7
12	20694,08	58919,92	19270,84	54867,7	19656,52	8195,99	2659,03
13	21817,07	62117,3	20694,08	58919,92	21542,06	8851,82	3167,81
14	22594,32	64330,27	21817,07	62117,3	23204,71	9433,7	3544,53
15	22987,0	65448,29	22594,32	64330,27	24604,6	9928,16	3806,55
16	22965,28	65386,46	22987,0	65448,29	25723,73	10329,28	3950,21
17	22505,69	64077,92	22965,28	65386,46	26531,3	10626,8	3991,51
18	21598,89	61496,1	22505,69	64077,92	27057,69	10831,44	3884,4
19	20023,85	57011,67	21598,89	61496,1	30866,12	12374,38	4083,7
20	18494,21	52656,49	20023,85	57011,67	23126,95	9335,9	2780,09
21	16457,08	46856,41	18494,21	52656,49	25070,63	10250,35	2583,26
22	14223,84	40497,94	16457,08	46856,41	23373,68	9713,24	1766,77
23	11894,32	33865,35	14223,84	40497,94	21690,24	9187,55	776,72
24	9527,88	27127,65	11894,32	33865,35	19633,42	8542,41	0,0
25	7107,27	20235,73	9527,88	27127,65	16486,56	7534,75	0,0
26	4755,05	13538,53	7107,27	20235,73	13246,1	6507,92	0,0
27	2624,55	7472,59	4755,05	13538,53	10020,08	5502,7	0,0
28	-84,78	-241,39	2624,55	7472,59	8796,47	6345,72	0,0
29	-100,91	-287,3	-84,78	-241,39	2489,48	2057,88	0,0
30	20,19	57,49	-100,91	-287,3	2189,47	3294,51	0,0



**ANALISI DI STABILITÀ – SETTORE MONTE  
 COMUNE DI PREDAPPIO  
 SEZIONE 4 - CONDIZIONE NON DRENATA – DURANTE IL SISMA  
 145 SUPERFICI VERIFICATE**

**Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)**

Normativa	Utente
Numero di strati	2,0
Numero dei conci	30,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,0
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	
Analisi	Condizione non drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	61,45 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	50,33 m
Ascissa vertice destro superiore xs	178,06 m
Ordinata vertice destro superiore ys	143,12 m
Passo di ricerca	10,0
Numero di celle lungo x	10,0
Numero di celle lungo y	10,0

**Sisma**

Coefficiente azione sismica orizzontale	0,11
Coefficiente azione sismica verticale	0,055

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	2,99	1,25
4	9,73	6,97
5	26,94	8,63
6	38,51	13,63
7	54,0	23,63
8	70,04	28,63
9	91,11	32,38
10	100,0	32,38
11	103,15	35,21
12	127,65	40,94
13	148,29	40,94
14	151,62	43,63
15	164,19	46,81
16	174,12	46,81



**Falda**

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	29,06	4,85
4	54,19	14,33
5	79,9	22,96
6	123,13	33,45
7	158,9	43,26
8	172,47	44,77
9	174,12	45,45

**Piezometrica Nr..1**

**Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	19,45	0,41
4	22,81	0,86
5	27,75	2,01
6	39,32	5,79
7	54,42	11,72
8	74,08	18,58
9	93,08	23,88
10	102,47	26,07
11	113,73	29,02
12	124,58	32,08
13	133,02	35,67
14	141,32	40,94
15	148,29	40,94
16	151,62	43,63
17	164,19	46,81
18	174,12	46,81

**Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

=====	
Tangente angolo di resistenza al taglio	1,25
Coesione efficace	1,25
Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No
=====	

**Stratigrafia**

Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (Kg/m <sup>3</sup> )	Litologia	
1	0.1	0.5	22	1800	2000	a1	
2	0.5	3	28	2200	2400	FCO	

**Risultati analisi pendio [Utente]**

Fs minimo individuato	1,24
Ascissa centro superficie	61,45 m
Ordinata centro superficie	143,12 m
Raggio superficie	123,14 m

B: Larghezza del concio; Alfa: Angolo di inclinazione della base del concio; Li: Lunghezza della base del concio; Wi: Peso del concio; Ui: Forze derivanti dalle pressioni neutre; Ni: forze agenti normalmente alla direzione di scivolamento; Ti: forze agenti parallelamente alla superficie di scivolamento; Ei, Ei-1: Forze agenti normalmente alle facce del concio; Xi, Xi-1: Forze di tipo tagliante applicate sulle facce laterali.

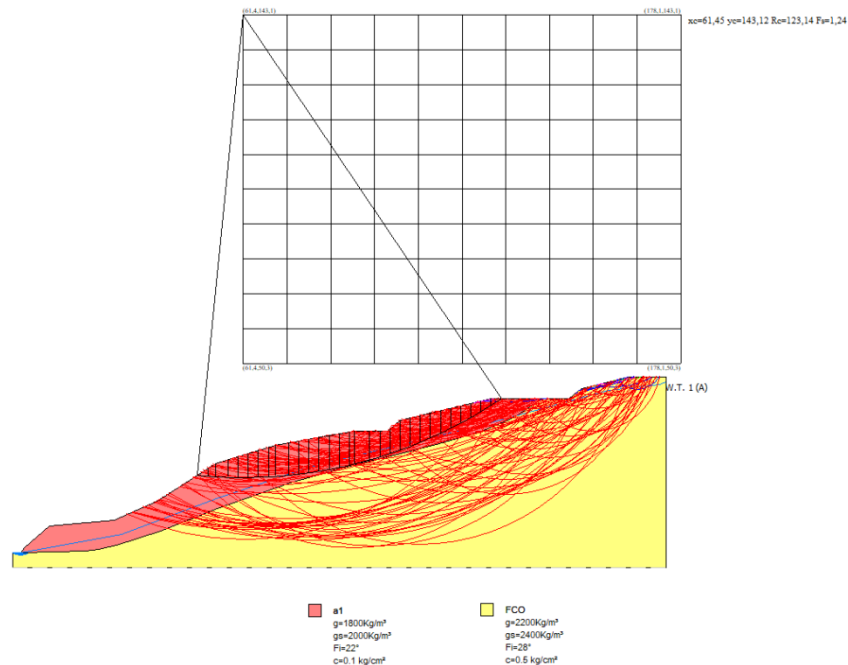
**xc = 61,449 yc = 143,117 Rc = 123,141 Fs=1,244**  
 Lambda = 0,288

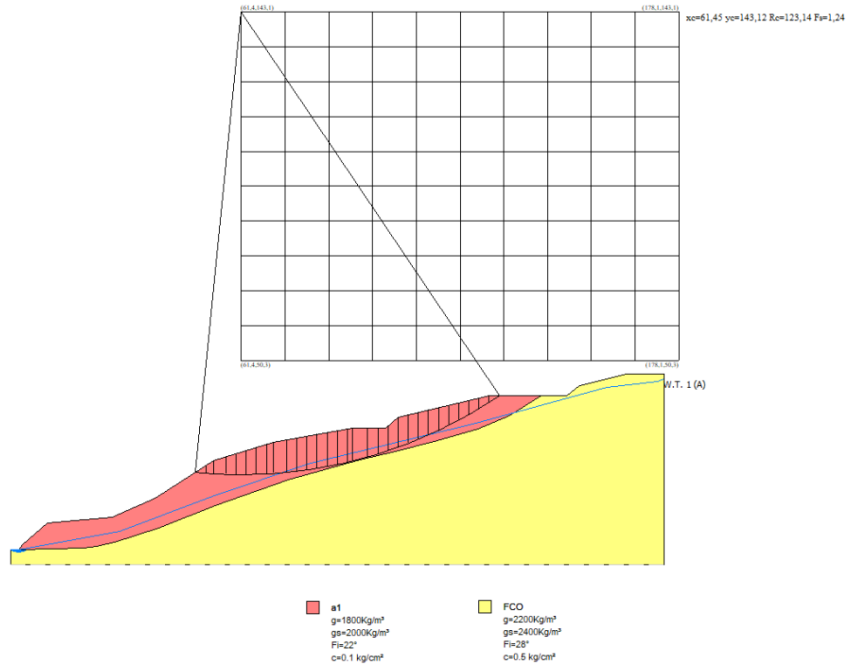
Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	2,7	-5,04	2,71	5377,0
2	2,03	-3,94	2,03	10984,29
3	3,37	-2,68	3,37	27210,94
4	2,7	-1,27	2,7	27466,52
5	2,7	-0,02	2,7	32164,24
6	2,7	1,24	2,7	36543,5
7	2,7	2,49	2,7	40603,95
8	1,89	3,56	1,89	30666,47
9	3,51	4,82	3,52	59807,31
10	2,7	6,27	2,71	47362,05
11	2,7	7,53	2,72	48190,45
12	2,7	8,8	2,73	48692,15
13	2,7	10,07	2,74	48863,61
14	2,7	11,35	2,75	48701,34
15	2,7	12,63	2,76	48200,9
16	1,38	13,61	1,42	24428,04
17	4,01	14,9	4,15	66256,11
18	2,7	16,52	2,81	39477,08
19	2,7	17,84	2,83	34980,88
20	2,64	19,14	2,79	38182,95
21	2,76	20,48	2,94	42859,58
22	2,7	21,84	2,91	39681,44
23	2,7	23,2	2,93	37053,63
24	2,7	24,57	2,97	34015,43
25	2,7	25,96	3,0	30553,64
26	2,7	27,36	3,04	26653,64
27	2,7	28,78	3,08	22298,73
28	2,7	30,23	3,12	17470,55
29	2,7	31,69	3,17	12148,38
30	2,7	33,18	3,22	4822,54

**Sforzi sui concii**

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	3200,25	11118,05	0,0	0,0	1537,41	10884,25	0,0
2	6278,92	21813,69	3200,25	11118,05	7837,55	8174,06	0,0
3	8968,74	31158,41	6278,92	21813,69	25691,71	13544,34	0,0
4	11422,48	39683,0	8968,74	31158,41	26394,62	10844,79	0,0
5	13528,16	46998,37	11422,48	39683,0	31826,41	10842,1	0,0

6	15243,14	52956,42	13528,16	46998,37	36871,66	10844,64	0,0
7	16531,43	57432,07	15243,14	52956,42	41509,98	10852,38	0,0
8	18086,08	62833,12	16531,43	57432,07	30864,95	7605,01	0,0
9	17811,0	61877,45	18086,08	62833,12	62514,87	14143,86	0,0
10	17887,57	62143,46	17811,0	61877,45	49052,29	10907,33	0,0
11	17612,49	61187,8	17887,57	62143,46	49854,72	10936,46	0,0
12	17004,36	59075,09	17612,49	61187,8	50223,83	10971,27	0,0
13	16087,56	55890,03	17004,36	59075,09	50162,16	11011,83	0,0
14	14892,64	51738,73	16087,56	55890,03	49675,6	11058,35	0,0
15	13456,15	46748,19	14892,64	51738,73	48771,8	11111,04	0,0
16	14143,0	49134,38	13456,15	46748,19	24309,92	5725,39	0,0
17	10324,58	35868,75	14143,0	49134,38	65952,78	16680,62	0,0
18	9024,72	31352,9	10324,58	35868,75	38655,38	11309,08	0,0
19	8034,67	27913,36	9024,72	31352,9	33841,38	11389,54	0,0
20	6455,03	22425,51	8034,67	27913,36	36370,12	11223,41	0,0
21	4051,53	14075,49	6455,03	22425,51	40040,1	11829,13	0,0
22	1842,52	6401,13	4051,53	14075,49	36431,25	11680,36	0,0
23	-206,31	-716,76	1842,52	6401,13	33405,03	11795,78	0,0
24	-1997,35	-6939,02	-206,31	-716,76	30122,7	11921,57	0,0
25	-3421,74	-11887,52	-1997,35	-6939,02	26625,87	12058,58	0,0
26	-4358,34	-15141,37	-3421,74	-11887,52	22962,4	12207,92	0,0
27	-4672,24	-16231,88	-4358,34	-15141,37	19187,3	12370,64	0,0
28	-4213,17	-14637,02	-4672,24	-16231,88	15364,39	12548,07	0,0
29	-2813,6	-9774,78	-4213,17	-14637,02	11567,01	12741,81	0,0
30	1,63	5,66	-2813,6	-9774,78	6963,86	12953,71	0,0





**ANALISI DI STABILITÀ – SETTORE VALLE  
 COMUNE DI PREDAPPIO  
 SEZIONE 4 - CONDIZIONE NON DRENATA – DURANTE IL SISMA  
 203 SUPERFICI VERIFICATE**

**Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)**

Normativa	Utente
Numero di strati	2,0
Numero dei conci	30,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,0
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	
Analisi	Condizione non drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	2,68 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	50,86 m
Ascissa vertice destro superiore xs	119,29 m
Ordinata vertice destro superiore ys	143,65 m
Passo di ricerca	10,0
Numero di celle lungo x	10,0
Numero di celle lungo y	10,0

**Sisma**

Coefficiente azione sismica orizzontale	0,11
Coefficiente azione sismica verticale	0,055

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	2,99	1,25
4	9,73	6,97
5	26,94	8,63
6	38,51	13,63
7	54,0	23,63
8	70,04	28,63
9	91,11	32,38
10	100,0	32,38
11	103,15	35,21
12	127,65	40,94
13	148,29	40,94
14	151,62	43,63
15	164,19	46,81
16	174,12	46,81

**Falda**

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	29,06	4,85
4	54,19	14,33
5	79,9	22,96
6	123,13	33,45
7	158,9	43,26
8	172,47	44,77
9	174,12	45,45

**Piezometrica Nr..1**

**Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	2,19	0,0
3	19,45	0,41
4	22,81	0,86
5	27,75	2,01
6	39,32	5,79
7	54,42	11,72
8	74,08	18,58
9	93,08	23,88
10	102,47	26,07
11	113,73	29,02
12	124,58	32,08
13	133,02	35,67
14	141,32	40,94
15	148,29	40,94
16	151,62	43,63
17	164,19	46,81
18	174,12	46,81

**Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

=====	
Tangente angolo di resistenza al taglio	1,25
Coesione efficace	1,25
Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No
=====	

**Stratigrafia**

Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (Kg/m <sup>3</sup> )	Litologia	
1	0.1	0.5	22	1800	2000	a1	
2	0.5	3	28	2200	2400	FCO	

**Risultati analisi pendio [Utente]**

Fs minimo individuato	0,83
Ascissa centro superficie	37,66 m
Ordinata centro superficie	78,7 m
Raggio superficie	68,67 m

B: Larghezza del concio; Alfa: Angolo di inclinazione della base del concio; Li: Lunghezza della base del concio; Wi: Peso del concio; Ui: Forze derivanti dalle pressioni neutre; Ni: forze agenti normalmente alla direzione di scivolamento; Ti: forze agenti parallelamente alla superficie di scivolamento; Ei, Ei-1: Forze agenti normalmente alle facce del concio; Xi, Xi-1: Forze di tipo tagliante applicate sulle facce laterali.

**xc = 37,661 yc = 78,701 Rc = 68,671 Fs=0,826**

Lambda = 0,36

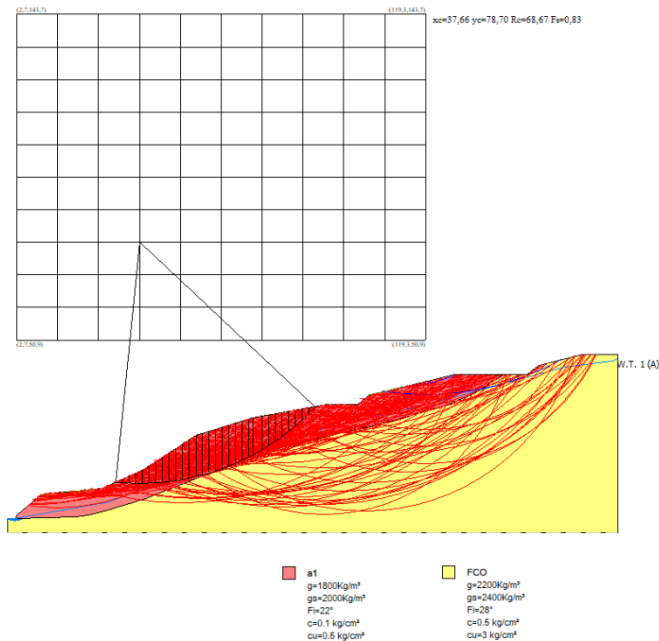
Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	1,9	-4,82	1,9	1881,08
2	1,9	-3,23	1,9	5492,99
3	1,9	-1,65	1,9	8905,51
4	1,88	-0,08	1,88	12005,68
5	1,91	1,51	1,91	16028,19
6	1,9	3,1	1,9	20265,12
7	1,9	4,68	1,9	24416,47
8	1,9	6,27	1,91	28367,37
9	1,9	7,86	1,91	32116,23
10	1,9	9,46	1,92	35660,92
11	1,9	11,07	1,93	38998,86
12	2,2	12,82	2,26	49275,17
13	1,59	14,45	1,64	37053,41
14	1,9	15,95	1,97	44528,8
15	1,9	17,61	1,99	44602,14
16	1,9	19,27	2,01	44446,34
17	1,9	20,96	2,03	44054,42
18	1,9	22,66	2,05	43418,89
19	1,9	24,39	2,08	42530,76
20	1,9	26,14	2,11	41379,89
21	1,18	27,58	1,34	25123,19
22	2,61	29,38	2,99	52174,5
23	1,9	31,56	2,22	34422,85
24	1,9	33,43	2,27	31124,8
25	1,9	35,35	2,32	27485,13
26	1,9	37,32	2,38	23479,48
27	1,9	39,33	2,45	19079,06
28	1,9	41,41	2,53	14249,46
29	1,9	43,56	2,62	8948,97
30	1,9	45,78	2,72	3126,41

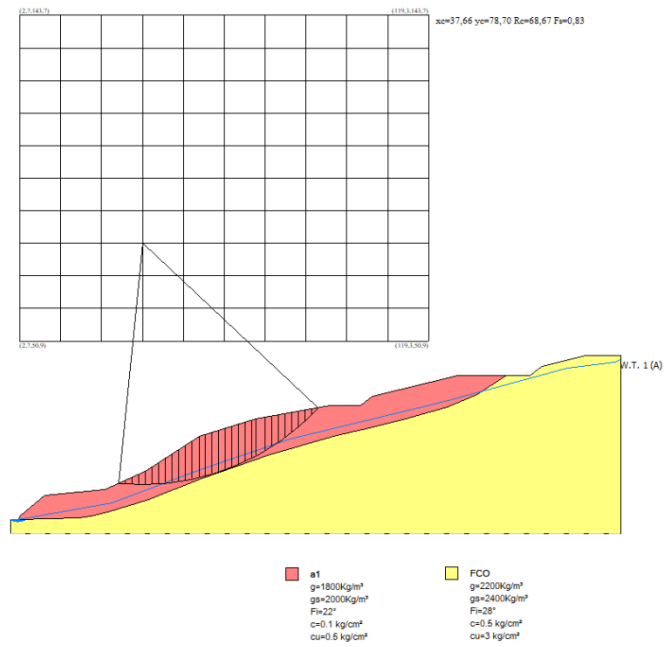
**Sforzi sui concii**

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	4274,07	11872,95	0,0	0,0	-3261,68	11511,58	0,0
2	8400,84	23336,75	4274,07	11872,95	1052,94	11489,16	0,0
3	12319,04	34221,13	8400,84	23336,75	5189,5	11475,62	0,0
4	15980,74	44392,98	12319,04	34221,13	8992,57	11375,44	0,0
5	19286,86	53577,07	15980,74	44392,98	13794,02	11570,28	0,0



6	22153,71	61540,93	19286,86	53577,07	18795,56	11487,62	0,0
7	24514,93	68100,18	22153,71	61540,93	23636,24	11509,25	0,0
8	26315,76	73102,71	24514,93	68100,18	28164,04	11539,91	0,0
9	27508,05	76414,77	26315,76	73102,71	32352,65	11579,77	0,0
10	28049,7	77919,41	27508,05	76414,77	36178,2	11629,17	0,0
11	27904,59	77516,33	28049,7	77919,41	39618,97	11688,44	0,0
12	26178,72	72722,02	27904,59	77516,33	50105,08	13680,71	0,0
13	25547,63	70968,91	26178,72	72722,02	37011,78	9915,73	0,0
14	23615,1	65600,52	25547,63	70968,91	44204,23	11930,43	0,0
15	21284,47	59126,26	23615,1	65600,52	43629,87	12034,64	0,0
16	18594,29	51653,19	21284,47	59126,26	42721,27	12152,02	0,0
17	15590,06	43307,72	18594,29	51653,19	41488,95	12283,62	0,0
18	12325,02	34237,75	15590,06	43307,72	39947,82	12430,68	0,0
19	8860,73	24614,29	12325,02	34237,75	38115,59	12594,74	0,0
20	5268,17	14634,47	8860,73	24614,29	36014,93	12777,53	0,0
21	4660,14	12945,43	5268,17	14634,47	21971,71	8078,69	0,0
22	-1813,23	-5036,98	4660,14	12945,43	41966,24	18110,26	0,0
23	-4848,32	-13468,18	-1813,23	-5036,98	27137,06	13461,76	0,0
24	-7359,54	-20444,1	-4848,32	-13468,18	23768,47	13745,47	0,0
25	-9180,75	-25503,27	-7359,54	-20444,1	20459,23	14064,02	0,0
26	-10121,12	-28115,52	-9180,75	-25503,27	17299,14	14423,14	0,0
27	-9959,69	-27667,09	-10121,12	-28115,52	14398,1	14830,18	0,0
28	-8438,23	-23440,62	-9959,69	-27667,09	11892,58	15294,46	0,0
29	-5251,54	-14588,3	-8438,23	-23440,62	9954,11	15828,23	0,0
30	-34,05	-94,58	-5251,54	-14588,3	8802,41	16447,88	0,0





**ANALISI DI STABILITÀ – SETTORE MONTE  
 COMUNE DI PREDAPPIO  
 SEZIONE 5 - CONDIZIONE DRENATA - PRE SISMA  
 173 SUPERFICI VERIFICATE**

**Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)**

Normativa	Utente
Numero di strati	2,0
Numero dei conci	30,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,0
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	397,36 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	170,47 m
Ascissa vertice destro superiore xs	619,08 m
Ordinata vertice destro superiore ys	364,41 m
Passo di ricerca	10,0
Numero di celle lungo x	10,0
Numero di celle lungo y	10,0

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	48,73	0,0
3	67,64	2,0
4	90,09	7,0
5	110,93	12,0
6	134,11	17,0
7	160,96	22,0
8	174,43	27,0
9	203,63	32,0
10	210,98	37,0
11	223,1	42,0
12	246,93	47,0
13	265,43	52,0
14	285,52	57,0
15	307,03	62,0
16	325,51	67,0
17	342,74	72,0
18	358,45	78,5
19	419,5	78,5
20	434,35	82,0
21	454,59	87,0
22	506,65	92,0
23	561,99	97,0
24	593,49	102,0
25	622,09	107,0
26	647,32	112,0
27	670,23	117,0
28	677,06	122,0

29	691,22	127,0
30	702,6	132,0

**Falda**

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,0	-1,77
2	53,68	-1,77
3	88,67	1,89
4	109,95	4,03
5	139,81	10,31
6	189,33	22,26
7	276,38	46,66
8	352,69	70,07
9	366,97	73,51
10	391,47	75,53
11	420,16	77,12
12	452,89	82,82
13	488,68	86,99
14	528,36	90,8
15	577,46	96,76
16	611,14	102,07
17	638,23	107,16
18	653,12	110,82
19	671,83	116,21
20	702,6	127,11

**Piezometrica Nr..1****Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	48,73	0,0
3	79,08	-0,68
4	93,75	-0,36
5	105,2	0,6
6	123,75	3,56
7	173,82	15,91
8	213,19	25,98
9	252,1	36,67
10	273,75	43,07
11	330,9	60,14
12	353,9	68,21
13	376,51	73,18
14	399,09	75,26
15	416,82	75,88
16	432,2	77,79
17	443,11	80,07
18	454,59	82,0
19	490,02	86,33
20	526,55	89,35
21	563,83	93,7
22	608,14	100,25
23	642,81	106,66
24	660,58	111,9
25	670,23	117,0
26	677,06	122,0
27	691,22	127,0
28	702,6	132,0

**Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

Tangente angolo di resistenza al taglio	1,25
Coesione efficace	1,25
Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

**Stratigrafia**

Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (Kg/m <sup>3</sup> )	Litologia	
1	0.1	0	22	1800	2000	a1	
2	0.5	0	28	2200	2400	FCO	

**Risultati analisi pendio [Utente]**

Fs minimo individuato	3,73
Ascissa centro superficie	408,44 m
Ordinata centro superficie	354,71 m
Raggio superficie	275,88 m

B: Larghezza del concio; Alfa: Angolo di inclinazione della base del concio; Li: Lunghezza della base del concio; Wi: Peso del concio; Ui: Forze derivanti dalle pressioni neutre; Ni: forze agenti normalmente alla direzione di scivolamento; Ti: forze agenti parallelamente alla superficie di scivolamento; Ei, Ei-1: Forze agenti normalmente alle facce del concio; Xi, Xi-1: Forze di tipo tagliante applicate sulle facce laterali.

**xc = 408,443 yc = 354,711 Rc = 275,877 Fs=3,727**

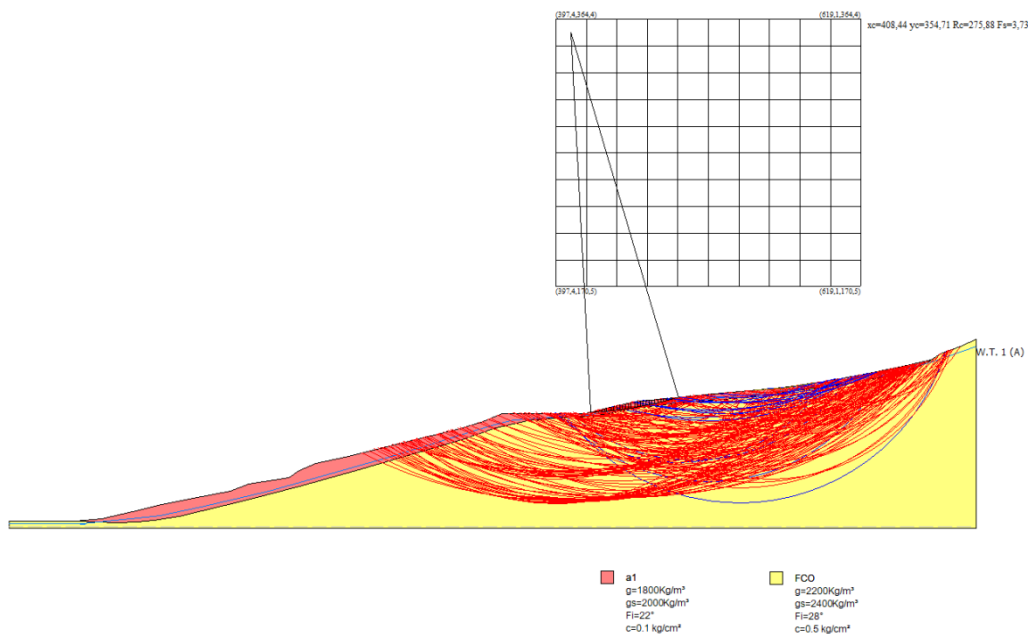
Lambda = 0,143

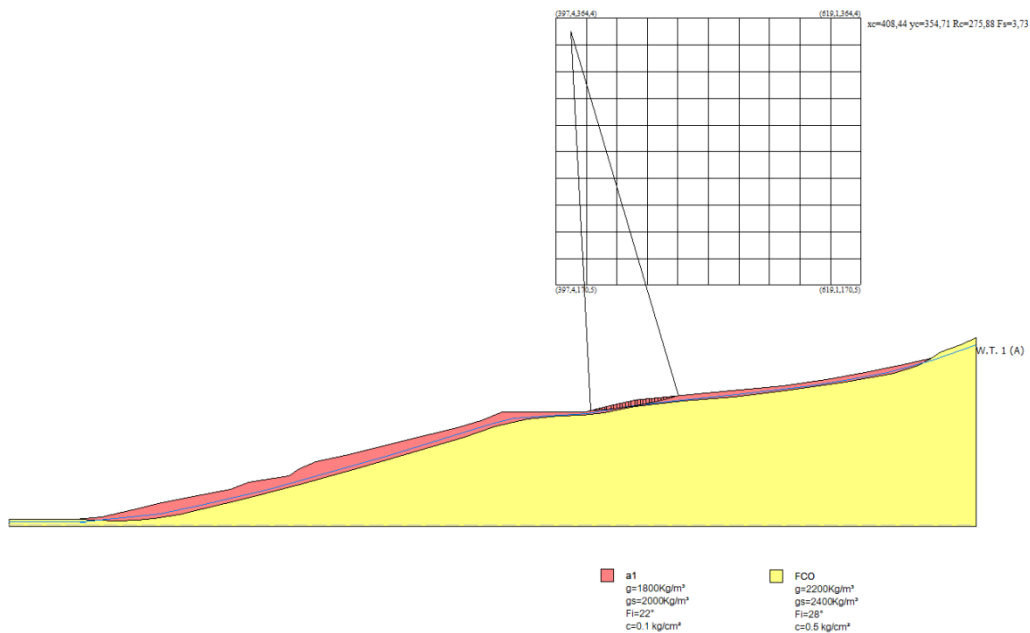
Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	2,13	3,13	2,13	746,18
2	2,13	3,57	2,13	2191,46
3	2,13	4,01	2,13	3573,3
4	2,13	4,45	2,14	4891,72
5	2,13	4,9	2,14	6146,94
6	1,28	5,25	1,29	4282,02
7	2,97	5,7	2,99	11614,85
8	2,13	6,23	2,14	9705,04
9	2,13	6,68	2,14	10797,15
10	2,13	7,12	2,15	11857,49
11	2,13	7,57	2,15	12861,57
12	2,13	8,01	2,15	13793,73
13	2,13	8,46	2,15	14654,05
14	2,13	8,91	2,15	15441,85
15	2,37	9,38	2,4	17980,67
16	1,89	9,83	1,92	14422,24
17	2,13	10,25	2,16	15544,68
18	2,13	10,7	2,17	14770,03
19	2,13	11,15	2,17	13978,72
20	2,13	11,6	2,17	13120,83
21	2,13	12,06	2,18	12195,92
22	2,13	12,51	2,18	11203,56
23	2,13	12,96	2,18	10143,96
24	2,13	13,41	2,19	9015,99
25	2,13	13,87	2,19	7819,91
26	2,13	14,32	2,2	6555,11

27	2,13	14,78	2,2	5220,85
28	2,13	15,24	2,21	3817,13
29	2,13	15,7	2,21	2343,11
30	2,13	16,16	2,22	798,92

Sforzi sui concii

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	87,68	614,0	0,0	0,0	690,99	646,82	0,0
2	183,93	1288,0	87,68	614,0	2133,1	803,39	0,0
3	285,19	1997,02	183,93	1288,0	3513,15	953,28	0,0
4	388,11	2717,74	285,19	1997,02	4830,31	1096,37	0,0
5	489,54	3427,99	388,11	2717,74	6084,09	1232,64	0,0
6	581,13	4069,36	489,54	3427,99	7231,56	804,22	0,0
7	676,83	4739,47	581,13	4069,36	8287,76	2051,64	0,0
8	757,31	5303,03	676,83	4739,47	9287,87	1618,17	0,0
9	825,64	5781,52	757,31	5303,03	10711,68	1736,03	0,0
10	877,08	6141,71	825,64	5781,52	11596,63	1832,5	161,74
11	908,82	6364,03	877,08	6141,71	12379,79	1917,97	364,35
12	919,64	6439,74	908,82	6364,03	13122,58	1999,09	531,11
13	908,3	6360,36	919,64	6439,74	13825,05	2075,89	661,75
14	874,05	6120,54	908,3	6360,36	14486,73	2148,29	756,31
15	801,83	5614,83	874,05	6120,54	16875,25	2472,24	842,46
16	745,49	5220,27	801,83	5614,83	13725,67	2002,98	466,12
17	667,11	4671,46	745,49	5220,27	15022,96	2208,71	248,83
18	584,21	4090,93	667,11	4671,46	14486,74	2151,44	0,0
19	494,83	3465,03	584,21	4090,93	13681,41	2065,02	0,0
20	401,55	2811,85	494,83	3465,03	12812,69	1971,79	0,0
21	307,23	2151,4	401,55	2811,85	11881,23	1871,79	0,0
22	215,05	1505,9	307,23	2151,4	10887,95	1765,12	0,0
23	128,19	897,62	215,05	1505,9	9833,68	1651,9	0,0
24	50,31	352,28	128,19	897,62	8719,23	1532,18	0,0
25	-14,85	-103,97	50,31	352,28	7545,74	1406,13	0,0
26	-63,19	-442,52	-14,85	-103,97	6314,4	1273,83	0,0
27	-90,51	-633,77	-63,19	-442,52	5025,65	1135,36	0,0
28	-92,24	-645,91	-90,51	-633,77	3681,36	990,92	0,0
29	-63,6	-445,36	-92,24	-645,91	2282,4	840,59	0,0
30	0,44	3,06	-63,6	-445,36	830,65	684,6	0,0







**ANALISI DI STABILITÀ – SETTORE VALLE  
 COMUNE DI PREDAPPIO  
 SEZIONE 5 - CONDIZIONE DRENATA - PRE SISMA  
 189 SUPERFICI VERIFICATE**

**Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)**

Normativa	Utente
Numero di strati	2,0
Numero dei conci	30,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,0
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	3,84 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	117,24 m
Ascissa vertice destro superiore xs	406,74 m
Ordinata vertice destro superiore ys	333,51 m
Passo di ricerca	10,0
Numero di celle lungo x	10,0
Numero di celle lungo y	10,0

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	48,73	0,0
3	67,64	2,0
4	90,09	7,0
5	110,93	12,0
6	134,11	17,0
7	160,96	22,0
8	174,43	27,0
9	203,63	32,0
10	210,98	37,0
11	223,1	42,0
12	246,93	47,0
13	265,43	52,0
14	285,52	57,0
15	307,03	62,0
16	325,51	67,0
17	342,74	72,0
18	358,45	78,5
19	419,5	78,5
20	434,35	82,0
21	454,59	87,0
22	506,65	92,0
23	561,99	97,0
24	593,49	102,0
25	622,09	107,0
26	647,32	112,0
27	670,23	117,0
28	677,06	122,0

29	691,22	127,0
30	702,6	132,0

**Falda**

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,0	-1,77
2	53,68	-1,77
3	88,67	1,89
4	109,95	4,03
5	139,81	10,31
6	189,33	22,26
7	276,38	46,66
8	352,69	70,07
9	366,97	73,51
10	391,47	75,53
11	420,16	77,12
12	452,89	82,82
13	488,68	86,99
14	528,36	90,8
15	577,46	96,76
16	611,14	102,07
17	638,23	107,16
18	653,12	110,82
19	671,83	116,21
20	702,6	127,11

**Piezometrica Nr..1****Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	48,73	0,0
3	79,08	-0,68
4	93,75	-0,36
5	105,2	0,6
6	123,75	3,56
7	173,82	15,91
8	213,19	25,98
9	252,1	36,67
10	273,75	43,07
11	330,9	60,14
12	353,9	68,21
13	376,51	73,18
14	399,09	75,26
15	416,82	75,88
16	432,2	77,79
17	443,11	80,07
18	454,59	82,0
19	490,02	86,33
20	526,55	89,35
21	563,83	93,7
22	608,14	100,25
23	642,81	106,66
24	660,58	111,9
25	670,23	117,0
26	677,06	122,0
27	691,22	127,0
28	702,6	132,0

**Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

Tangente angolo di resistenza al taglio	1,25
Coesione efficace	1,25
Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

**Stratigrafia**

Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (Kg/m <sup>3</sup> )	Litologia	
1	0.1	0	22	1800	2000	a1	
2	0.5	0	28	2200	2400	FCO	

**Risultati analisi pendio [Utente]**

Fs minimo individuato	1,66
Ascissa centro superficie	165,0 m
Ordinata centro superficie	225,38 m
Raggio superficie	204,63 m

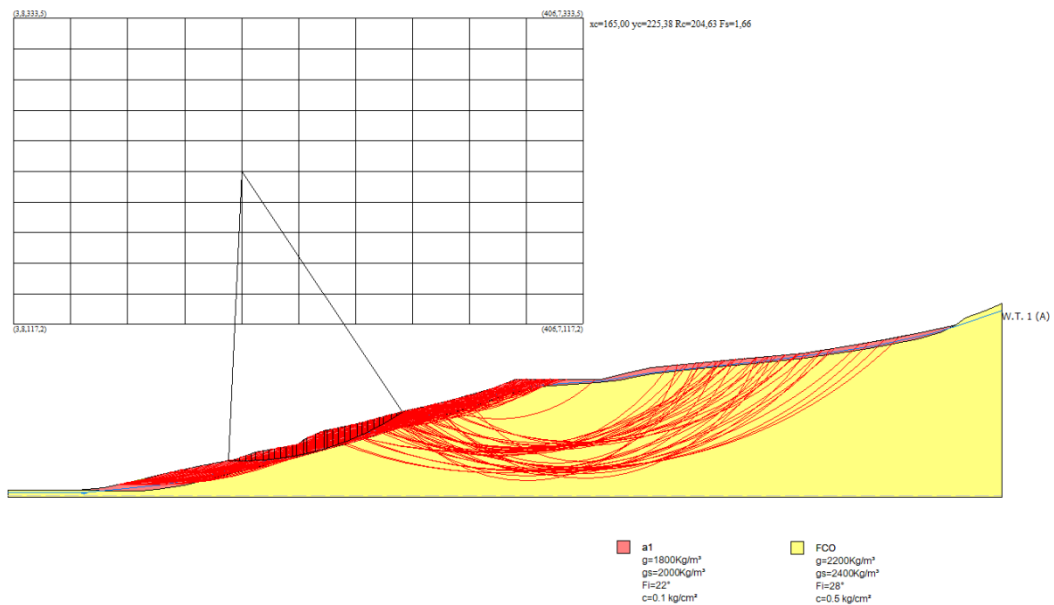
**xc = 165,001 yc = 225,376 Rc = 204,626 Fs=1,658**

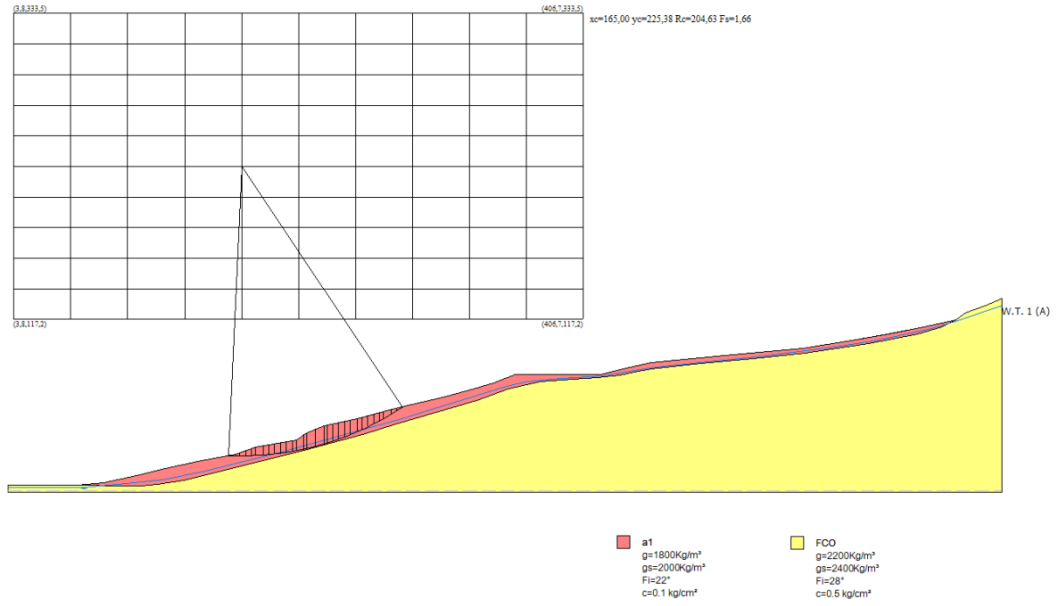
Lambda = 0,25

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	5,51	-1,9	5,52	6189,67
2	2,71	-0,75	2,71	8473,69
3	4,11	0,2	4,11	22349,5
4	4,11	1,36	4,11	33237,99
5	2,53	2,29	2,53	25599,43
6	5,69	3,44	5,7	65278,49
7	4,11	4,82	4,13	50748,46
8	4,11	5,97	4,14	53087,2
9	4,11	7,13	4,15	54986,66
10	4,11	8,29	4,16	56569,79
11	4,11	9,46	4,17	57450,61
12	2,94	10,46	2,99	41213,69
13	5,29	11,64	5,4	86296,57
14	2,06	12,69	2,12	40159,56
15	6,16	13,87	6,35	131174,8
16	5,96	15,63	6,19	136687,0
17	2,27	16,83	2,37	53088,32
18	4,11	17,76	4,32	93831,69
19	4,11	18,98	4,35	89938,21
20	4,11	20,2	4,38	85229,81
21	4,11	21,43	4,42	79709,11
22	5,11	22,83	5,55	90097,31
23	3,12	24,08	3,41	49887,32
24	4,11	25,19	4,55	60594,68
25	4,11	26,47	4,59	54083,34
26	4,11	27,77	4,65	46718,59
27	3,05	28,91	3,48	29318,58
28	5,18	30,23	6,0	37955,0
29	4,11	31,75	4,84	18038,25
30	4,11	33,11	4,91	6271,03

Sforzi sui conci

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	1136,71	4548,57	0,0	0,0	4899,04	4520,68	0,0
2	2384,49	9541,57	1136,71	4548,57	7159,76	3380,21	0,0
3	4468,58	17881,07	2384,49	9541,57	20294,95	7425,3	0,0
4	7042,77	28181,72	4468,58	17881,07	30898,88	10009,64	0,0
5	9049,62	36212,15	7042,77	28181,72	23894,13	7349,92	0,0
6	12782,52	51149,39	9049,62	36212,15	62330,92	18627,14	0,0
7	15480,31	61944,67	12782,52	51149,39	48787,39	14376,3	0,0
8	17974,45	71924,98	15480,31	61944,67	51356,93	15007,13	0,0
9	20174,12	80726,98	17974,45	71924,98	52548,68	15303,29	915,58
10	21960,69	87875,98	20174,12	80726,98	51825,34	15133,94	3380,4
11	23330,5	93357,27	21960,69	87875,98	50649,03	14855,3	5494,24
12	24113,55	96490,69	23330,5	93357,27	35225,98	10386,37	5016,62
13	24999,3	100035,0	24113,55	96490,69	73259,66	21103,98	10882,13
14	25221,91	100925,8	24999,3	100035,0	34305,77	9635,06	4733,02
15	25118,24	100511,0	25221,91	100925,8	111624,7	31024,73	15265,82
16	23948,75	95831,22	25118,24	100511,0	115565,0	31889,12	15344,97
17	23217,5	92905,1	23948,75	95831,22	44665,29	12311,15	5746,09
18	21588,51	86386,68	23217,5	92905,1	78403,47	21707,68	10016,57
19	19620,14	78510,22	21588,51	86386,68	74668,91	20816,14	9155,54
20	17402,87	69637,8	19620,14	78510,22	70648,66	19856,58	7843,21
21	15034,06	60158,98	17402,87	69637,8	66312,85	18821,86	6168,6
22	11956,13	47842,59	15034,06	60158,98	76043,3	21872,09	4661,29
23	10338,74	41370,59	11956,13	47842,59	43412,42	12635,2	885,19
24	8053,18	32224,88	10338,74	41370,59	53005,54	15656,02	0,0
25	5804,74	23227,75	8053,18	32224,88	46414,08	14079,82	0,0
26	3710,59	14847,95	5804,74	23227,75	39287,64	12375,69	0,0
27	2512,61	10054,22	3710,59	14847,95	24397,68	8042,75	0,0
28	567,47	2270,74	2512,61	10054,22	30554,44	11060,33	0,0
29	-102,57	-410,42	567,47	2270,74	14498,02	6449,32	0,0
30	90,34	361,49	-102,57	-410,42	5512,69	4304,5	0,0





**ANALISI DI STABILITÀ – SETTORE MONTE  
 COMUNE DI PREDAPPIO  
 SEZIONE 5 - CONDIZIONE NON DRENATA – DURANTE IL SISMA  
 173 SUPERFICI VERIFICATE**

**Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)**

Normativa	Utente
Numero di strati	2,0
Numero dei conci	30,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,0
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	
Analisi	Condizione non drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	397,36 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	170,47 m
Ascissa vertice destro superiore xs	619,08 m
Ordinata vertice destro superiore ys	364,41 m
Passo di ricerca	10,0
Numero di celle lungo x	10,0
Numero di celle lungo y	10,0

**Sisma**

Coefficiente azione sismica orizzontale	0,1
Coefficiente azione sismica verticale	0,05

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	48,73	0,0
3	67,64	2,0
4	90,09	7,0
5	110,93	12,0
6	134,11	17,0
7	160,96	22,0
8	174,43	27,0
9	203,63	32,0
10	210,98	37,0
11	223,1	42,0
12	246,93	47,0
13	265,43	52,0
14	285,52	57,0
15	307,03	62,0
16	325,51	67,0
17	342,74	72,0
18	358,45	78,5

19	419,5	78,5
20	434,35	82,0
21	454,59	87,0
22	506,65	92,0
23	561,99	97,0
24	593,49	102,0
25	622,09	107,0
26	647,32	112,0
27	670,23	117,0
28	677,06	122,0
29	691,22	127,0
30	702,6	132,0

**Falda**

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,0	-1,77
2	53,68	-1,77
3	88,67	1,89
4	109,95	4,03
5	139,81	10,31
6	189,33	22,26
7	276,38	46,66
8	352,69	70,07
9	366,97	73,51
10	391,47	75,53
11	420,16	77,12
12	452,89	82,82
13	488,68	86,99
14	528,36	90,8
15	577,46	96,76
16	611,14	102,07
17	638,23	107,16
18	653,12	110,82
19	671,83	116,21
20	702,6	127,11

**Piezometrica Nr..1****Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	48,73	0,0
3	79,08	-0,68
4	93,75	-0,36
5	105,2	0,6
6	123,75	3,56
7	173,82	15,91
8	213,19	25,98
9	252,1	36,67
10	273,75	43,07
11	330,9	60,14
12	353,9	68,21
13	376,51	73,18
14	399,09	75,26
15	416,82	75,88



16	432,2	77,79
17	443,11	80,07
18	454,59	82,0
19	490,02	86,33
20	526,55	89,35
21	563,83	93,7
22	608,14	100,25
23	642,81	106,66
24	660,58	111,9
25	670,23	117,0
26	677,06	122,0
27	691,22	127,0
28	702,6	132,0

**Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

Tangente angolo di resistenza al taglio	1,25
Coesione efficace	1,25
Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

**Stratigrafia**

Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (Kg/m <sup>3</sup> )	Litologia	
1	0.1	0.5	22	1800	2000	a1	
2	0.5	3	28	2200	2400	FCO	

**Risultati analisi pendio [Utente]**

Fs minimo individuato	2,17
Ascissa centro superficie	430,62 m
Ordinata centro superficie	315,92 m
Raggio superficie	234,79 m

B: Larghezza del concio; Alfa: Angolo di inclinazione della base del concio; Li: Lunghezza della base del concio; Wi: Peso del concio; Ui: Forze derivanti dalle pressioni neutre; Ni: forze agenti normalmente alla direzione di scivolamento; Ti: forze agenti parallelamente alla superficie di scivolamento; Ei, Ei-1: Forze agenti normalmente alle facce del concio; Xi, Xi-1: Forze di tipo tagliante applicate sulle facce laterali.

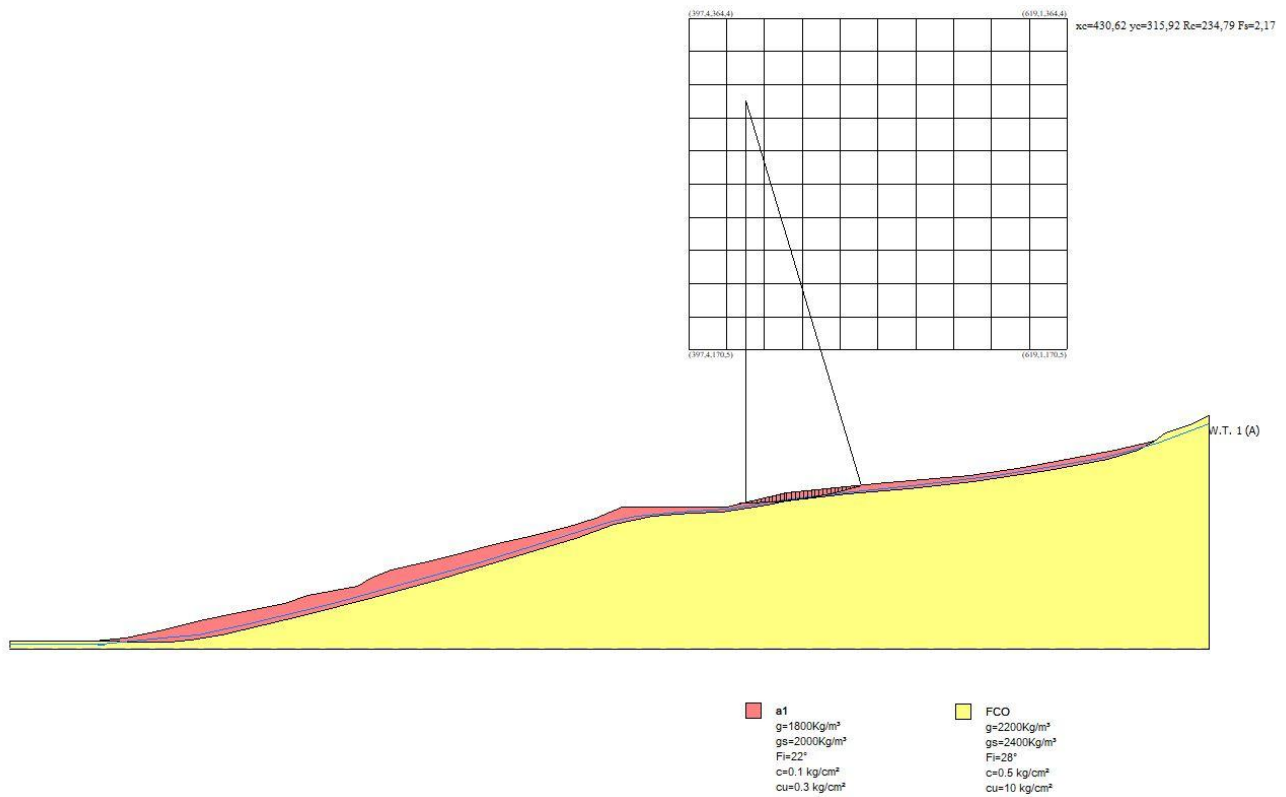
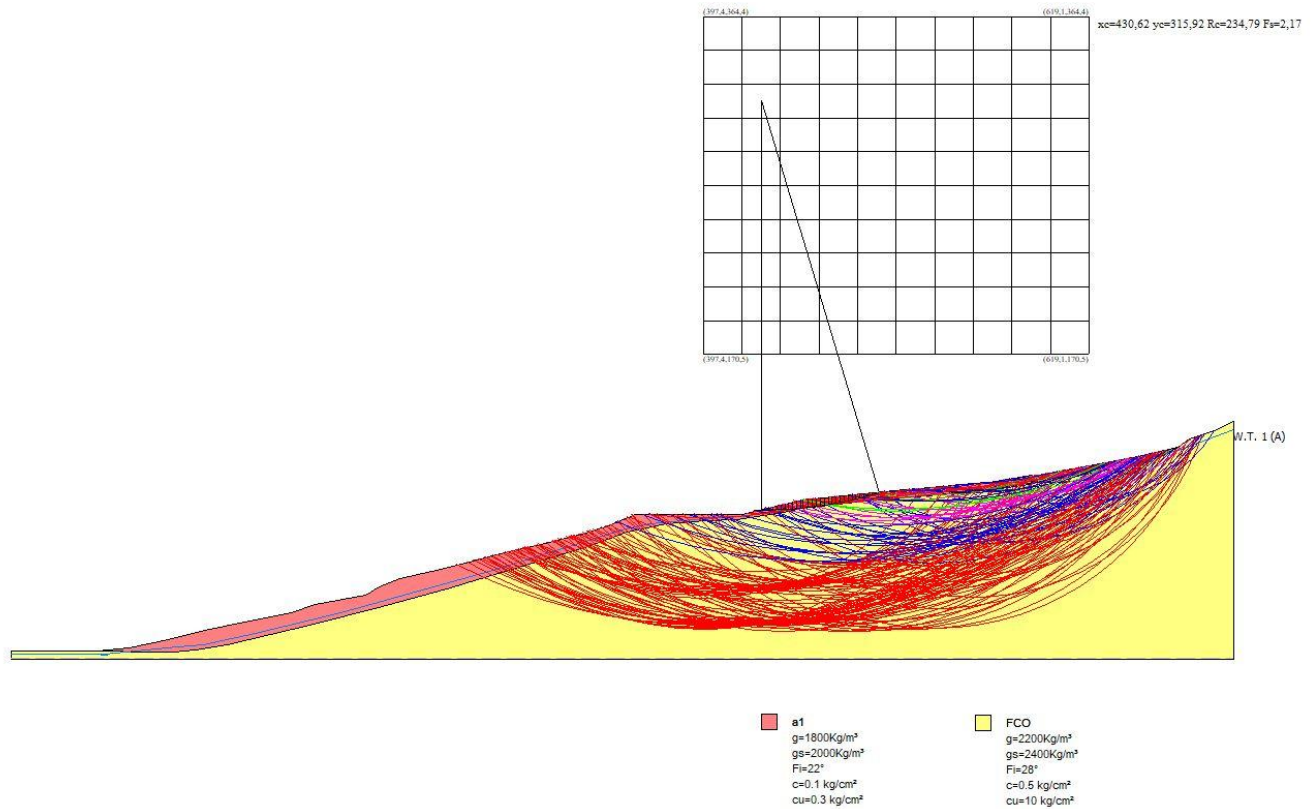
**xc = 430,615 yc = 315,925 Rc = 234,788 Fs=2,169**  
 Lambda = 0,284

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	2,27	0,29	2,27	1199,47
2	1,4	0,74	1,4	1896,87
3	3,14	1,29	3,14	7491,43
4	2,27	1,96	2,27	8093,85
5	2,27	2,51	2,27	10236,42
6	2,27	3,06	2,27	12278,82
7	2,27	3,62	2,27	14221,16
8	2,27	4,17	2,28	16063,86
9	2,27	4,73	2,28	17805,91

10	2,27	5,29	2,28	19447,58
11	1,21	5,71	1,22	11044,07
12	3,32	6,27	3,34	30709,78
13	2,27	6,95	2,29	20711,39
14	2,27	7,51	2,29	20393,13
15	2,27	8,07	2,29	19973,02
16	2,27	8,63	2,3	19450,23
17	2,27	9,19	2,3	18824,1
18	2,27	9,75	2,3	18094,9
19	2,27	10,32	2,31	17261,6
20	2,27	10,88	2,31	16324,08
21	2,27	11,44	2,32	15281,04
22	2,27	12,01	2,32	14132,42
23	2,27	12,58	2,32	12877,66
24	2,27	13,14	2,33	11515,52
25	2,27	13,71	2,34	10046,13
26	2,27	14,28	2,34	8467,71
27	2,27	14,86	2,35	6780,09
28	2,27	15,43	2,35	4982,44
29	2,27	16,0	2,36	3073,37
30	2,27	16,58	2,37	1052,74

**Sforzi sui concii**

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	855,08	3007,87	0,0	0,0	419,1	3138,57	0,0
2	1683,17	5920,8	855,08	3007,87	1198,72	1930,51	0,0
3	2308,32	8119,87	1683,17	5920,8	7271,77	4347,83	0,0
4	2883,39	10142,77	2308,32	8119,87	7960,28	3140,36	0,0
5	3346,59	11772,12	2883,39	10142,77	10301,71	3141,55	0,0
6	3690,92	12983,37	3346,59	11772,12	12529,61	3143,02	0,0
7	3910,02	13754,07	3690,92	12983,37	14642,67	3144,8	0,0
8	3998,66	14065,89	3910,02	13754,07	16639,73	3146,87	0,0
9	3952,13	13902,21	3998,66	14065,89	18518,58	3149,26	0,0
10	3766,93	13250,74	3952,13	13902,21	20278,36	3151,94	0,0
11	4017,3	14131,48	3766,93	13250,74	11267,32	1687,82	0,0
12	3069,87	10798,74	4017,3	14131,48	32294,96	4625,28	0,0
13	2647,17	9311,82	3069,87	10798,74	21575,76	3161,79	0,0
14	2189,36	7701,42	2647,17	9311,82	21205,45	3165,72	0,0
15	1705,59	5999,68	2189,36	7701,42	20723,31	3169,95	0,0
16	1205,68	4241,17	1705,59	5999,68	20129,83	3174,53	0,0
17	699,99	2462,31	1205,68	4241,17	19425,62	3179,38	0,0
18	200,04	703,67	699,99	2462,31	18613,11	3184,58	0,0
19	-281,78	-991,21	200,04	703,67	17693,14	3190,1	0,0
20	-732,64	-2577,18	-281,78	-991,21	16667,38	3195,99	0,0
21	-1138,27	-4004,02	-732,64	-2577,18	15537,4	3202,19	0,0
22	-1483,99	-5220,15	-1138,27	-4004,02	14305,2	3208,78	0,0
23	-1753,92	-6169,69	-1483,99	-5220,15	12973,35	3215,7	0,0
24	-1931,29	-6793,6	-1753,92	-6169,69	11543,54	3222,96	0,0
25	-1998,66	-7030,59	-1931,29	-6793,6	10018,78	3230,64	0,0
26	-1937,27	-6814,63	-1998,66	-7030,59	8401,11	3238,65	0,0
27	-1727,69	-6077,42	-1937,27	-6814,63	6693,69	3247,09	0,0
28	-1349,33	-4746,48	-1727,69	-6077,42	4899,81	3255,9	0,0
29	-780,58	-2745,82	-1349,33	-4746,48	3022,12	3265,09	0,0
30	1,08	3,81	-780,58	-2745,82	1064,97	3274,74	0,0



**ANALISI DI STABILITÀ – SETTORE VALLE  
 COMUNE DI PREDAPPIO  
 SEZIONE 5 - CONDIZIONE NON DRENATA – DURANTE IL SISMA  
 189 SUPERFICI VERIFICATE**

**Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)**

Normativa	Utente
Numero di strati	2,0
Numero dei conci	30,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,0
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	
Analisi	Condizione non drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	3,84 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	117,24 m
Ascissa vertice destro superiore xs	406,74 m
Ordinata vertice destro superiore ys	333,51 m
Passo di ricerca	10,0
Numero di celle lungo x	10,0
Numero di celle lungo y	10,0

**Sisma**

Coefficiente azione sismica orizzontale	0,1
Coefficiente azione sismica verticale	0,05

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	48,73	0,0
3	67,64	2,0
4	90,09	7,0
5	110,93	12,0
6	134,11	17,0
7	160,96	22,0
8	174,43	27,0
9	203,63	32,0
10	210,98	37,0
11	223,1	42,0
12	246,93	47,0
13	265,43	52,0
14	285,52	57,0
15	307,03	62,0
16	325,51	67,0
17	342,74	72,0
18	358,45	78,5

19	419,5	78,5
20	434,35	82,0
21	454,59	87,0
22	506,65	92,0
23	561,99	97,0
24	593,49	102,0
25	622,09	107,0
26	647,32	112,0
27	670,23	117,0
28	677,06	122,0
29	691,22	127,0
30	702,6	132,0

**Falda**

Nr.	X (m)	y (m)
1	0,0	-1,77
2	53,68	-1,77
3	88,67	1,89
4	109,95	4,03
5	139,81	10,31
6	189,33	22,26
7	276,38	46,66
8	352,69	70,07
9	366,97	73,51
10	391,47	75,53
11	420,16	77,12
12	452,89	82,82
13	488,68	86,99
14	528,36	90,8
15	577,46	96,76
16	611,14	102,07
17	638,23	107,16
18	653,12	110,82
19	671,83	116,21
20	702,6	127,11

**Piezometrica Nr..1****Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	48,73	0,0
3	79,08	-0,68
4	93,75	-0,36
5	105,2	0,6
6	123,75	3,56
7	173,82	15,91
8	213,19	25,98
9	252,1	36,67
10	273,75	43,07
11	330,9	60,14
12	353,9	68,21
13	376,51	73,18
14	399,09	75,26
15	416,82	75,88

16	432,2	77,79
17	443,11	80,07
18	454,59	82,0
19	490,02	86,33
20	526,55	89,35
21	563,83	93,7
22	608,14	100,25
23	642,81	106,66
24	660,58	111,9
25	670,23	117,0
26	677,06	122,0
27	691,22	127,0
28	702,6	132,0

**Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

Tangente angolo di resistenza al taglio	1,25
Coesione efficace	1,25
Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

**Stratigrafia**

Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (Kg/m <sup>3</sup> )	Litologia	
1	0.1	0.5	22	1800	2000	a1	
2	0.5	3	28	2200	2400	FCO	

**Risultati analisi pendio [Utente]**

Fs minimo individuato	0,92
Ascissa centro superficie	205,29 m
Ordinata centro superficie	160,5 m
Raggio superficie	131,5 m

B: Larghezza del concio; Alfa: Angolo di inclinazione della base del concio; Li: Lunghezza della base del concio; Wi: Peso del concio; Ui: Forze derivanti dalle pressioni neutre; Ni: forze agenti normalmente alla direzione di scivolamento; Ti: forze agenti parallelamente alla superficie di scivolamento; Ei, Ei-1: Forze agenti normalmente alle facce del concio; Xi, Xi-1: Forze di tipo tagliante applicate sulle facce laterali.

**xc = 205,291 yc = 160,496 Rc = 131,496 Fs=0,923**  
 Lambda = 0,257

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	3,2	-5,63	3,22	2825,25
2	3,2	-4,23	3,21	8097,13
3	3,2	-2,83	3,2	12866,6
4	3,24	-1,43	3,24	17373,34
5	3,16	-0,04	3,16	25752,06
6	4,19	1,57	4,19	54686,16
7	2,21	2,96	2,21	36581,81
8	3,2	4,14	3,21	59049,6
9	3,2	5,54	3,21	65762,11

10	3,51	7,01	3,54	79312,75
11	2,89	8,42	2,92	68633,51
12	3,2	9,76	3,25	77028,91
13	3,2	11,18	3,26	77540,52
14	3,2	12,61	3,28	77525,07
15	3,2	14,04	3,3	76972,8
16	3,2	15,48	3,32	75875,13
17	3,2	16,93	3,34	74221,13
18	1,75	18,06	1,84	39581,57
19	4,65	19,54	4,94	102946,9
20	3,2	21,36	3,44	68203,95
21	3,2	22,87	3,47	65419,4
22	3,2	24,39	3,51	61996,85
23	4,25	26,18	4,73	75916,9
24	2,15	27,75	2,43	35067,08
25	3,2	29,07	3,66	47154,93
26	3,2	30,68	3,72	40489,65
27	3,2	32,32	3,79	33041,54
28	3,2	33,98	3,86	24767,33
29	3,2	35,68	3,94	15618,55
30	3,2	37,42	4,03	5540,1

**Sforzi sui concii**

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	4621,0	17962,11	0,0	0,0	-3380,83	17413,29	0,0
2	9142,94	35539,18	4621,0	17962,11	2732,34	17376,73	0,0
3	13508,57	52508,66	9142,94	35539,18	8357,8	17350,52	0,0
4	17666,38	68670,3	13508,57	52508,66	13719,93	17549,39	0,0
5	21467,0	83443,55	17666,38	68670,3	23231,5	17114,76	0,0
6	24099,25	93675,29	21467,0	83443,55	54897,94	22702,65	0,0
7	27077,42	105251,6	24099,25	93675,29	35794,56	11980,53	0,0
8	28851,71	112148,4	27077,42	105251,6	60142,11	17374,69	0,0
9	29910,22	116262,9	28851,71	112148,4	67436,23	17410,76	0,0
10	29764,67	115697,1	29910,22	116262,9	81762,47	19164,4	0,0
11	29808,99	115869,4	29764,67	115697,1	70264,93	15807,94	0,0
12	28878,52	112252,6	29808,99	115869,4	78706,68	17584,02	0,0
13	27448,52	106694,1	28878,52	112252,6	78693,7	17664,58	0,0
14	25560,47	99355,12	27448,52	106694,1	77988,16	17757,42	0,0
15	23265,5	90434,45	25560,47	99355,12	76602,88	17862,81	0,0
16	20624,98	80170,57	23265,5	90434,45	74558,77	17981,63	0,0
17	17710,94	68843,52	20624,98	80170,57	71880,98	18114,66	0,0
18	18105,24	70376,2	17710,94	68843,52	38385,88	9944,02	0,0
19	11234,58	43669,51	18105,24	70376,2	95972,73	26744,36	0,0
20	7762,86	30174,71	11234,58	43669,51	62527,92	18607,6	0,0
21	4257,95	16550,91	7762,86	30174,71	58686,0	18807,33	0,0
22	842,46	3274,68	4257,95	16550,91	54356,97	19027,0	0,0
23	-4929,88	-19162,73	842,46	3274,68	63461,37	25637,97	0,0
24	-5100,04	-19824,18	-4929,88	-19162,73	30797,09	13165,61	0,0
25	-7251,74	-28187,96	-5100,04	-19824,18	38799,18	19827,65	0,0
26	-8556,36	-33259,11	-7251,74	-28187,96	33031,44	20149,76	0,0
27	-8774,71	-34107,83	-8556,36	-33259,11	27284,53	20505,37	0,0
28	-7634,9	-29677,33	-8774,71	-34107,83	21711,15	20898,58	0,0
29	-4826,82	-18762,16	-7634,9	-29677,33	16495,51	21333,94	0,0
30	4,47	17,39	-4826,82	-18762,16	11856,81	21818,73	0,0



