



AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI SIENA

Settore Servizi Tecnici - Servizio Viabilità

PROGETTO

SISTEMAZIONE MOVIMENTO FRANOSO S.P. 35C  
"DI RADICONDOLI" IN LOC. LE CELLE

PROGETTO DEFINITIVO - ESECUTIVO

ELABORATO

RELAZIONE DI CALCOLO ESECUTIVO  
DIMENSIONAMENTI E VERIFICHE  
OPERE DI SISTEMAZIONE  
DEL MOVIMENTO FRANOSO

ENTE ATTUATORE

AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI SIENA

Settore Servizi Tecnici - Servizio Viabilità

Piazza Duomo, 9 - 53100 Siena (SI)

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO

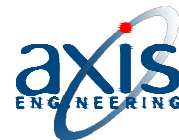
Dott. Arch. Maria Elena Di Trolio

UBICAZIONE

Comune di Radicondoli

S.P. 35C "di Radicondoli"

PROGETTO ED ELABORAZIONE GRAFICA



P R O G E T T I G L O B A L I

Via Alessandria, 55 - 53045 MONTEPULCIANO STAZIONE (SI)

Tel. +39 0578 737010 - Fax +39 0578 737721

E-Mail: info@axisengineering.eu - www.axisengineering.eu

GEOLOGIA

GE.MIN.A

GEOL. RITA NARDI

Geologia e Ingegneria Geotecnica

SPAZIO PER L'ENTE

COMMESSA	PARTE	FASE	SETTORE	VAR	ELABORATO	REV
18017	01	D	INF	0	R08	0
ARCHIVIO			DATA		RAPPORTO	
18017_01_DINF_0R08_0			GENNAIO 2022			
N. REV.	NOTA DI REVISIONE	DATA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	
0	EMISSIONE	03/01/2022	GT	GT	GT	



P R O G E T T I G L O B A L I

**Amministrazione Provinciale di Siena**  
*Settore Servizi Tecnici - Servizio Viabilità*

*Comune di Radicondoli*  
*Provincia di Siena*

---

**SISTEMAZIONE MOVIMENTO FRANOSO S.P. 35C**  
**"DI RADICONDOLI" IN LOC. LE CELLE**

---

**PROGETTO DEFINITIVO - ESECUTIVO**

**RELAZIONE DI CALCOLO ESECUTIVO, DIMENSIONAMENTI E VERIFICHE OPERE DI**  
**SISTEMAZIONE DEL MOVIMENTO FRANOSO**

INDICE

1. Premessa.....	2
2. Riferimenti normativi .....	2
3. Verifiche di stabilità del pendio -stato attuale- .....	2
3.1 <i>RISULTATI CASO A -BACK ANALYSIS-</i> .....	4
3.2 <i>RISULTATI CASO B</i> .....	5
3.3 <i>RISULTATI CASO B sisma</i> .....	7
3.4 <i>RISULTATI CASO C</i> .....	9
3.5 <i>RISULTATI CASO C sisma</i> .....	11
4. Progettazione degli interventi di stabilizzazione del pendio .....	13
4.1 <i>Predimensionamento sistema dreni sub-orizzontali</i> .....	14
4.2 <i>Analisi filtrazione lungo il pendio nell'ipotesi progettuale</i> .....	18
5. Verifiche di stabilità del pendio - stato progetto- .....	20
5.1 <i>RISULTATI CASO A -PROGETTO-</i> .....	21
5.2 <i>RISULTATI CASO A sisma -PROGETTO-</i> .....	21
5.3 <i>RISULTATI CASO B -PROGETTO-</i> .....	23
5.4 <i>RISULTATI CASO B sisma -PROGETTO-</i> .....	25
5.5 <i>RISULTATI CASO C -PROGETTO-</i> .....	27
5.6 <i>RISULTATI CASO C sisma -PROGETTO-</i> .....	29
5.7 <i>CONCLUSIONI</i> .....	31

## 1. Premessa

La presente relazione, allegata al Progetto Definitivo-Esecutivo dei lavori di "Sistemazione movimento franoso S.P. 35c "Di Radicondoli" in località Le Celle", riporta i dimensionamenti e le verifiche delle opere necessarie per la stabilizzazione del pendio interessato dal movimento franoso.

A supporto del progetto è stata eseguita una campagna d'indagine geologica e geotecnica, nonché uno specifico studio geologico, quest'ultimo predisposto dal Dr. Geol. Rita Nardi -GE.MI.NA Geologia e Ingegneria Geotecnica-, i cui risultati sono riassunti nell'elaborato "Relazione Geologica di supporto al progetto dei lavori di sistemazione del movimento franoso sulla S.P. 35C "Di Radicondoli" in loc. Le Celle" e nell'elaborato tavola OR07 "Relazione Geotecnica ed allegati" allegati alla documentazione di progetto.

In via sintetica, il progetto di stabilizzazione della frana prevede la realizzazione di due ordini di dreni suborizzontali allo scopo di ridurre le pressioni interstiziali e quindi accrescere la resistenza al taglio del terreno.

## 2. Riferimenti normativi

L'analisi di stabilità del pendio ed il progetto degli interventi di stabilizzazione, sono stati predisposti in conformità alle normative di seguito elencate:

- D.M. 17/01/2018 Norme tecniche per le costruzioni,
- Circolare 21 gennaio 2019 n. 7,

e con particolare riferimento ai seguenti capitoli e paragrafi:

- capitolo 6.3 *Stabilità dei pendii naturali*
- paragrafo 7.11.3.5 *Stabilità dei pendii*

## 3. Verifiche di stabilità del pendio -stato attuale-

Allo stato attuale delle conoscenze ed in particolare in base ai dati delle letture inclinometriche, sintetizzati nella "Relazione Geotecnica ed allegati", sono ipotizzabili due superfici di rottura, così come riportato nella sezione stratigrafica di riferimento riprodotta in Tav. 003.

Si può inoltre notare che tali superfici, tracciate tenendo conto dei dati inclinometrici, coincidono stanzialmente con le superfici di discontinuità tra i vari litotipi più superficiali: "Terreno argilloso scarsamente consistente" con "Terreno limoso argilloso alterato" e "Terreno limoso argilloso alterato" con "Argilliti alterate".

Come sintetizzato nella "Relazione Geotecnica ed allegati", per i vari litotipi individuati le prove di laboratorio hanno fornito sia i valori caratteristici dei parametri di resistenza drenati sia i valori residui.

Nel caso in esame, essendo avvenuta già la frana che attualmente si trova in uno stato di movimento estremamente lento, è possibile eseguire un'analisi a ritroso (back analysis), ovvero a partire dalle superfici di rottura "reali", nelle condizioni idrologiche esistenti al momento della frana, imponendo  $FS=1$  è possibile ricavare i valori medi delle resistenze a

taglio.

Per completezza si riporta di seguito la tabella con i "parametri geotecnici di riferimento" estratta dalla "Relazione Geotecnica ed allegati".

ORIZZONTE GEOTECNICO DI RIFERIMENTO	$\gamma$ (kN/mc)	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$\phi'_{res}$ (°)	$c'_{res}$ (kPa)	$C_u$ (kPa)
TERRENO DI RIPORTO	20	23	18	15	2	46
TERRENO ARGILLOSO SCARSAMENTE CONSISTENTE	20	23	18	15	2	46
TERRENO LIMOSO ARGILLOSO ALTERATO	20	23	18	15	2	46
ARGILLITI ALTERATE	21	25	50	14	9	10

Quindi, premesso ciò, l'analisi di stabilità del pendio nelle **condizioni attuali** è stata condotta secondo il seguente schema:

- **CASO A:** *Back Analysis* Analisi delle due superfici di frana ipotizzate con FS=1
  - ipotesi di terreno saturo → falda a piano campagna
  - ricerca dei valori medi dei parametri meccanici efficaci
- **CASO B:** Analisi di stabilità del pendio, considerando lo strato delle "argilliti-calcare marnoso" come stabile e con le seguenti ipotesi:
  - valori caratteristici dei parametri meccanici efficaci
  - ipotesi di terreno saturo → falda a piano campagna
- **CASO B SISMA:** Analisi di stabilità del pendio, considerando lo strato delle "argilliti-calcare marnoso" come stabile e con le seguenti ipotesi:
  - valori caratteristici dei parametri meccanici efficaci
  - ipotesi di terreno saturo → falda a piano campagna
  - azione sismica presente
- **CASO C:** Analisi di stabilità del pendio, considerando lo strato delle "argilliti-calcare marnoso" come stabile e con le seguenti ipotesi:
  - valori dei parametri meccanici efficaci derivanti dallo studio del caso A
  - ipotesi di terreno saturo → falda a piano campagna
- **CASO C SISMA:** Analisi di stabilità del pendio, considerando lo strato delle "argilliti-calcare marnoso" come stabile e con le seguenti ipotesi:
  - valori dei parametri meccanici efficaci derivanti dallo studio del caso A
  - ipotesi di terreno saturo → falda a piano campagna
  - azione sismica presente

Le analisi di stabilità sono state condotte utilizzando il programma *Slope Stability Analysis Program release 5.0.2 (c) (1991-2021)* elaborato da Dr. Geol. Lorenzo Borselli.

Il metodo di calcolo adottato è quello di Morgenstern-Price (1965).

Nella schematizzazione stratigrafica gli strati di "riporto" e di "terreno argilloso scarsamente consistente" sono stati considerati come unico strato:

Lo strato 1 corrisponde al "riporto"+"terreno argilloso scarsamente consistente"

Lo strato 2 corrisponde al "terreno limoso argilloso alterato"

Lo strato 3 corrisponde alle "argilliti alterate"

Lo strato 4 corrisponde alle "argilliti + calcare marnoso" stabili.

### 3.1 RISULTATI CASO A -BACK ANALYSIS-

A partire dalle superfici di scorrimento ipotizzate sono stati individuati i valori dei parametri geotecnici da assegnare allo strato 1 e 2 per ottenere un valore del coefficiente di sicurezza **FS = 1**.

Il pendio è stato supposto saturo, quindi il profilo di falda è stato posto a piano campagna.

In figura sono evidenziate di rosso le due superfici di scorrimento ipotizzate e di grigio le superfici ottenute con  $FS \approx 1$ .

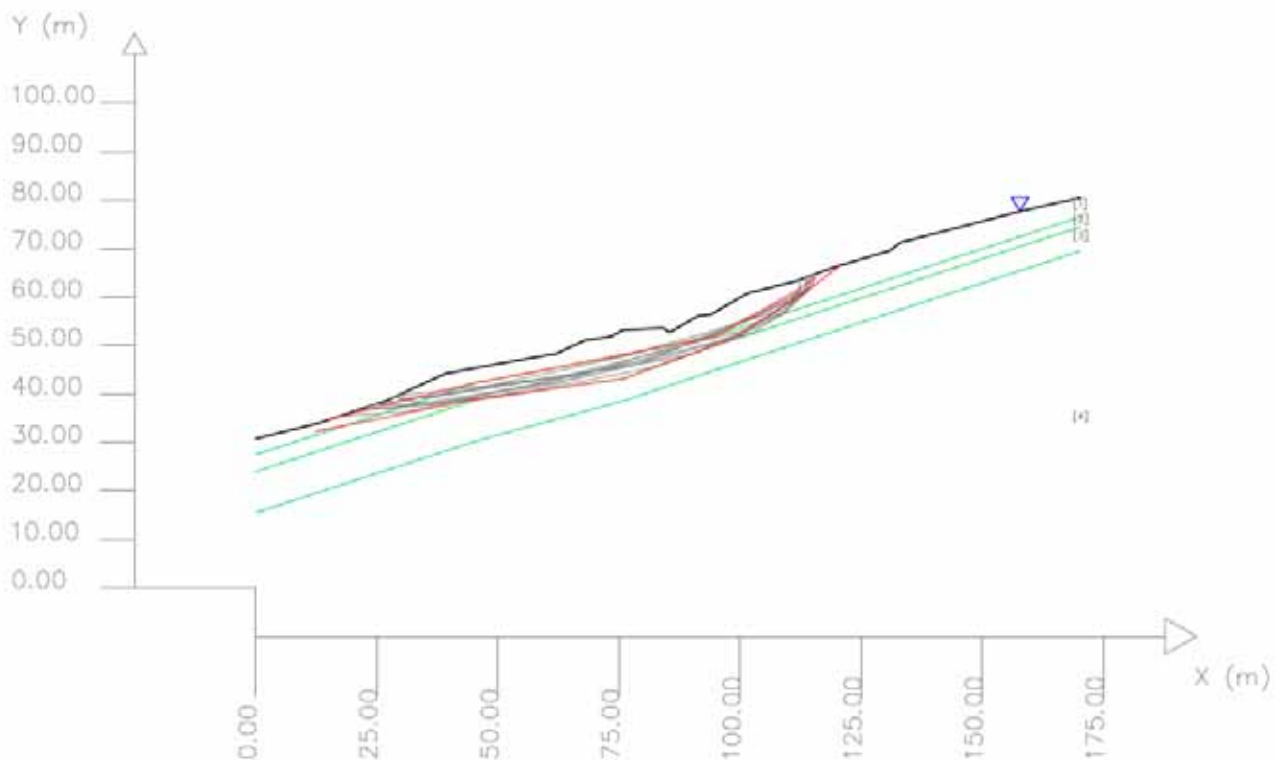
Quindi sono stati ottenuti i seguenti valori per gli strati "instabili" (riporto+terreno argilloso scarsamente consistente, terreno limoso argilloso alterato):

**$\phi' = 18^\circ$**

**$c' = 11 \text{ kPa}$**

tali valori sono di fatto intermedi tra i valori di picco e residui ricavati dalle prove di taglio.

Nell'elaborato 0R09 "Fascicolo dei calcoli esecutivi delle opere di sistemazione del movimento franoso" è riportato il report di verifica.



**Fig. 1 Risultati caso A**

### 3.2 RISULTATI CASO B

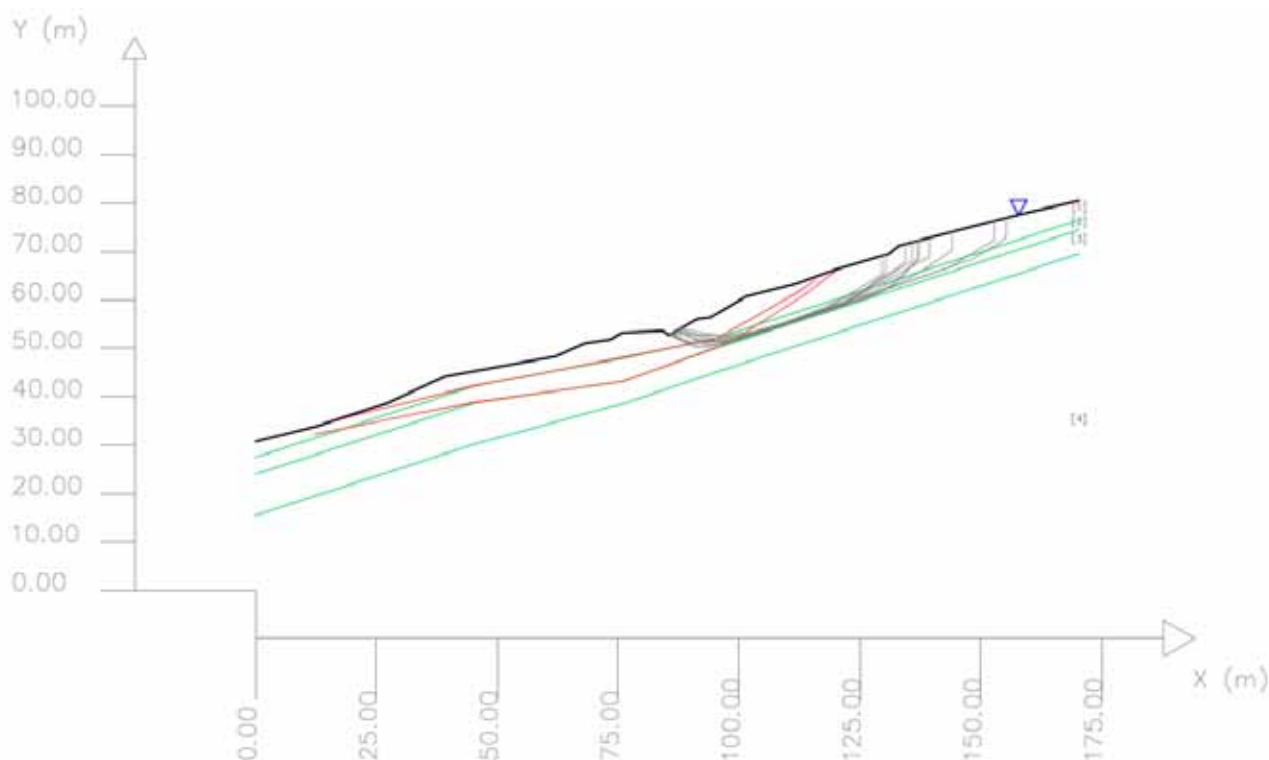
In questo caso è stata analizzata la stabilità del pendio a prescindere dalle superfici di rottura rilevate e quindi ricercando superfici di scivolamento generiche.

Le ipotesi assunte in fase di calcolo sono le seguenti:

- Strato 4 (argilliti + calcare marnoso) stabile;
- Pendio saturo con falda a piano campagna;
- Resistenze dei materiali pari ai valori efficaci caratteristici.

Nell'elaborato 0R09 "Fascicolo dei calcoli esecutivi delle opere di sistemazione del movimento franoso" è riportato il report di verifica.

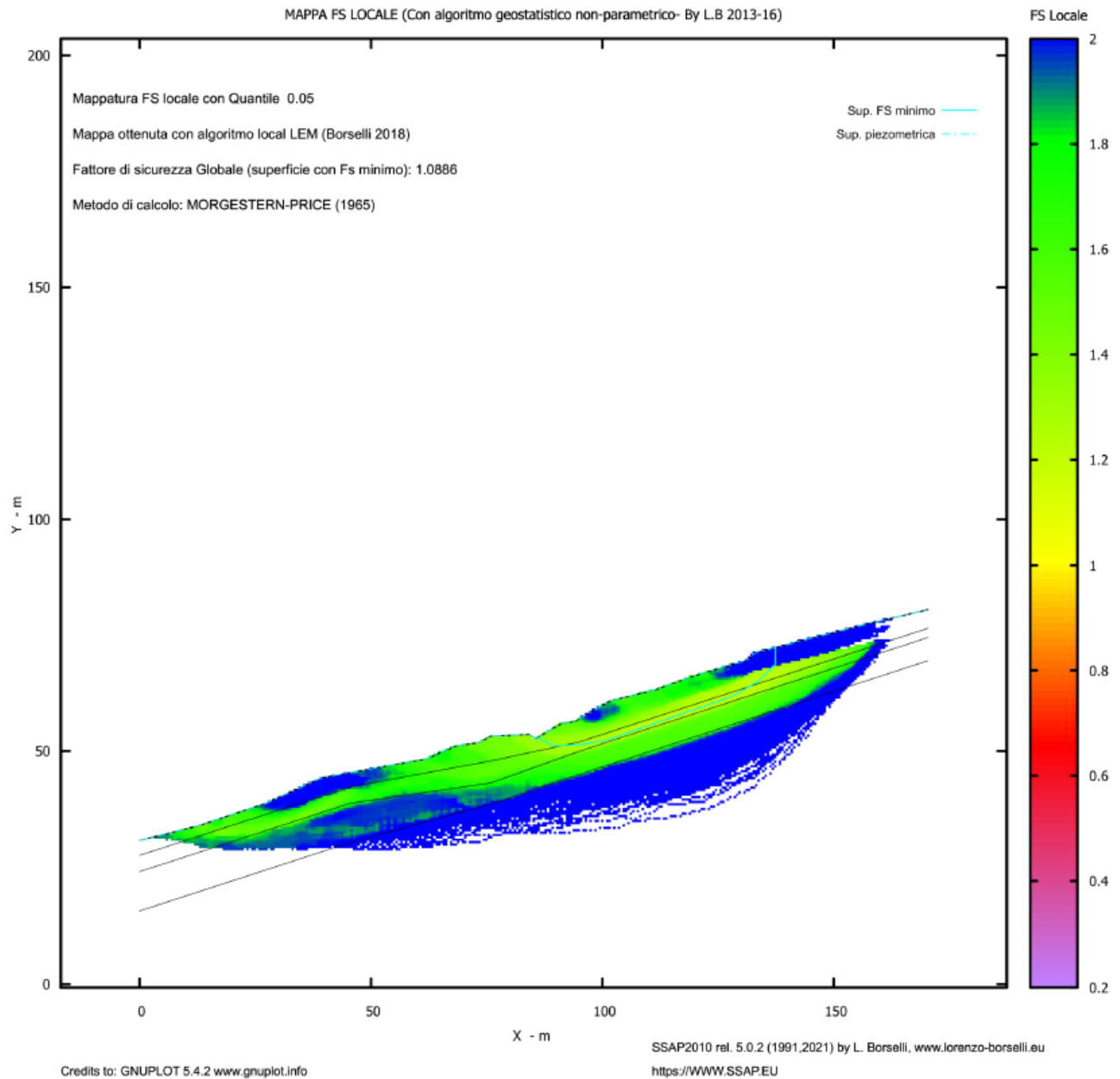
Dai risultati delle verifiche di stabilità condotte nel caso in esame è emerso la presenza di una famiglia di superfici critiche con fattore di sicurezza prossimo all'unità ( $FS_{\text{MINIMO}} = 1,08$ ) in corrispondenza della porzione di pendio a monte della strada esistente che interessano gli strati 1 e 2.



**Fig. 2 Risultati caso B - n. 10 superfici con FS minore -**

Nella figura seguente è riportata la mappa con il coefficiente di sicurezza locale determinato con l'algoritmo *Local LEM*.

Dalla mappa si evince la presenza della famiglia di superfici critiche a monte della strada.



**Fig. 3 Risultati caso B**

### 3.3 RISULTATI CASO B sisma

L'analisi condotta per il caso B è stata ripetuta con le stesse ipotesi ed aggiungendo l'azione sismica come riportato nella "Relazione Geotecnica ed Allegati".

Le componenti orizzontale e verticale dell'azione statica equivalente con cui viene rappresentata l'azione sismica sono esprimibili come delle aliquote del peso del volume di terreno potenzialmente instabile W:

$$F_v = W \cdot k_v$$

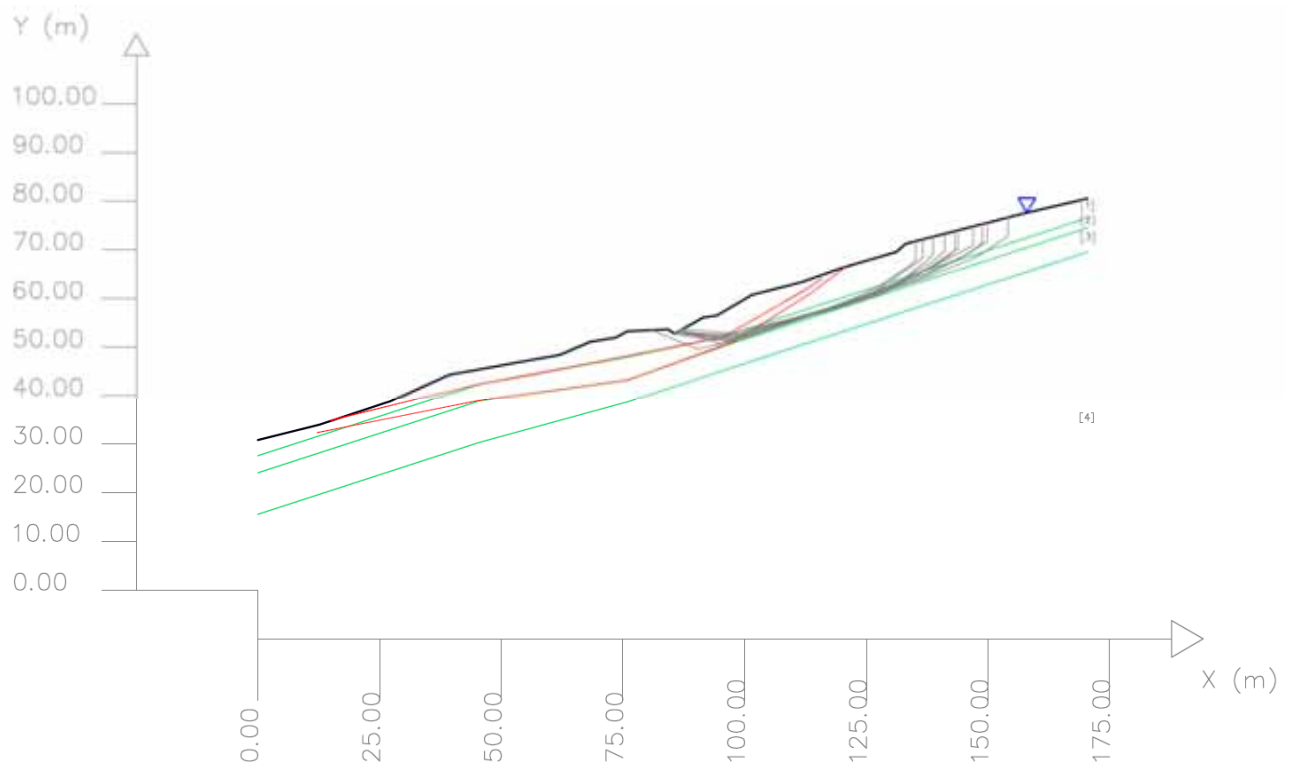
$$F_h = W \cdot k_h$$

dove

$$k_h = 0,048$$

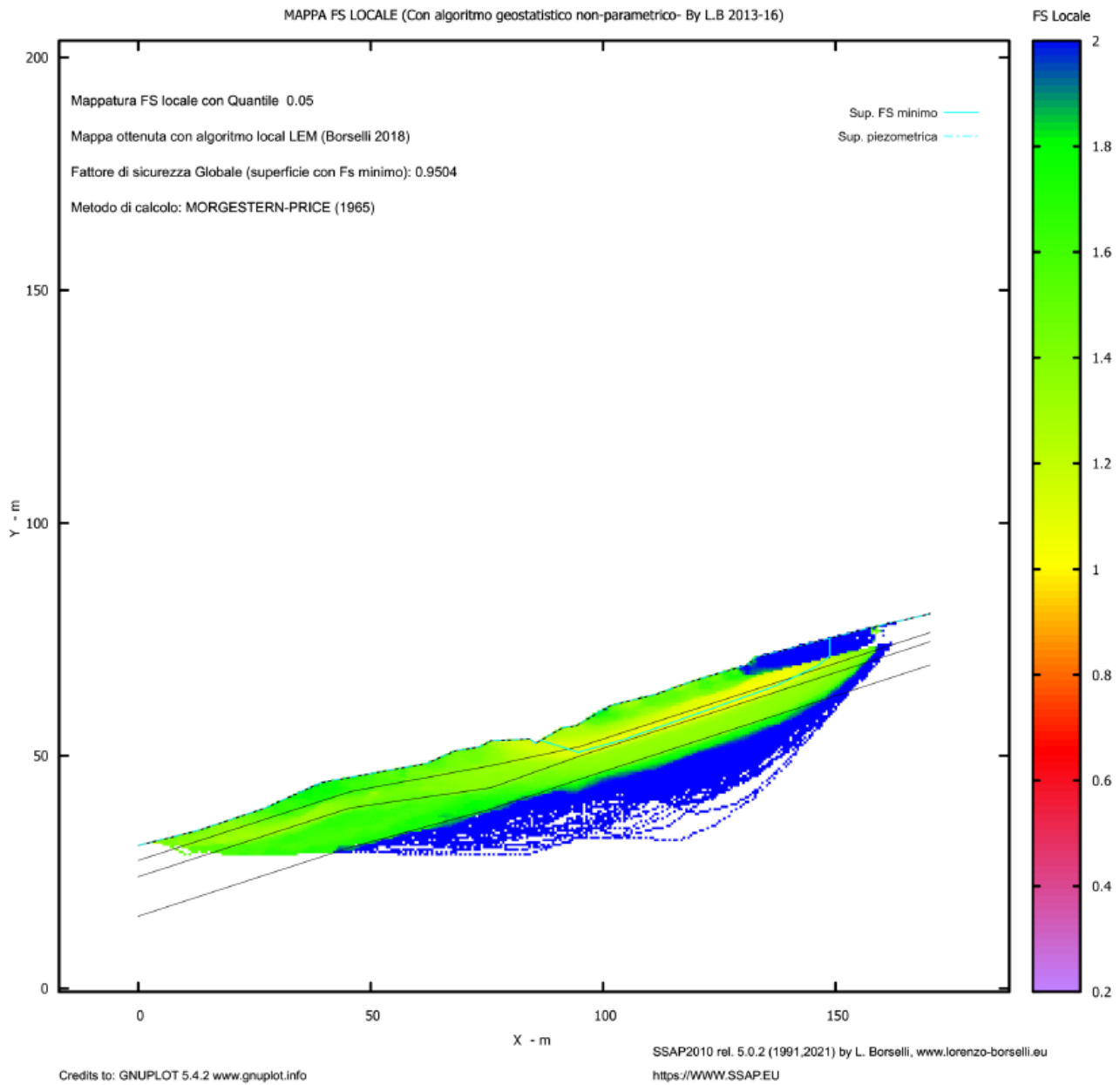
$$k_v = \pm 0,024$$

Come è logico attendersi, rispetto al caso B si riducono i valori dei coefficienti di sicurezza ( $FS_{MINIMO} = 0,95$ ).



**Fig. 4 Risultati caso B sisma – n.10 superfici con FS minore -**





**Fig. 5 Risultati caso B sisma**

### 3.4 RISULTATI CASO C

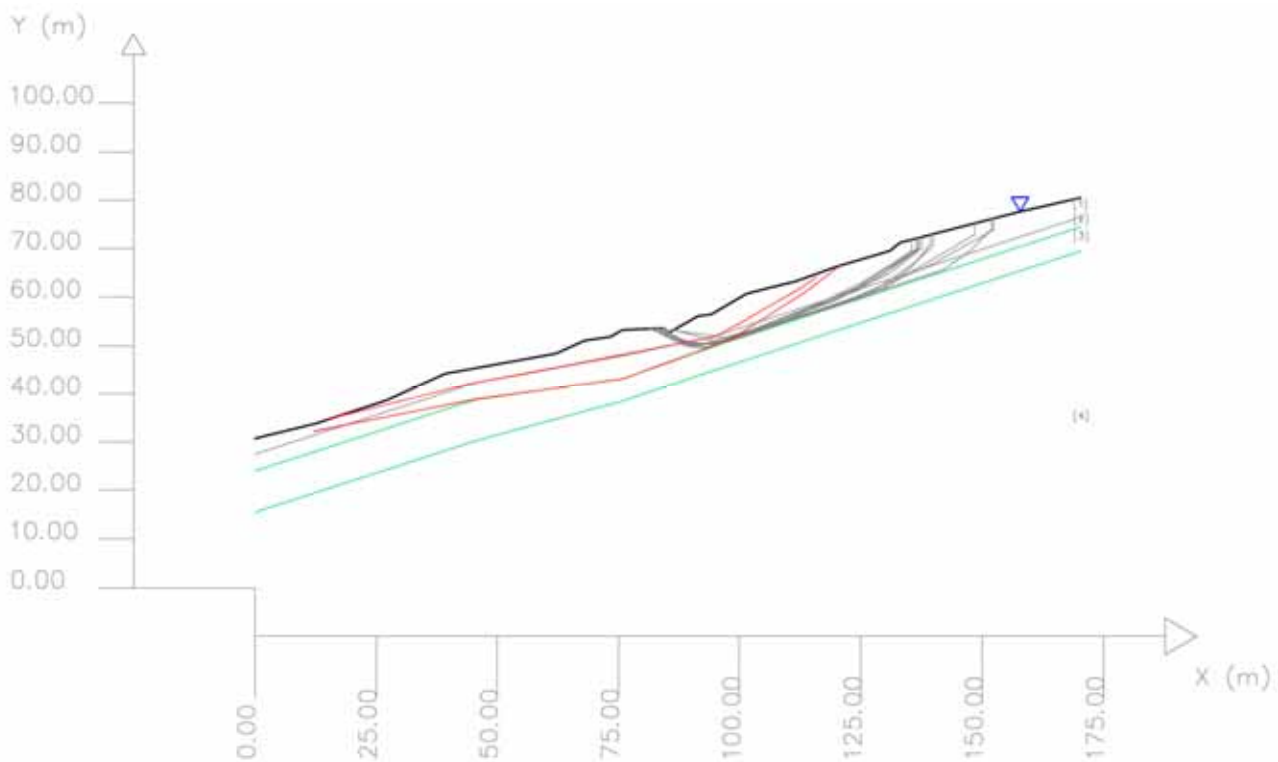
In questo caso è stata ripetuta l'analisi del caso B, ma assumendo come resistenze dei materiali quelle ricavate dallo studio del Caso A.

Le ipotesi assunte in fase di calcolo sono le seguenti:

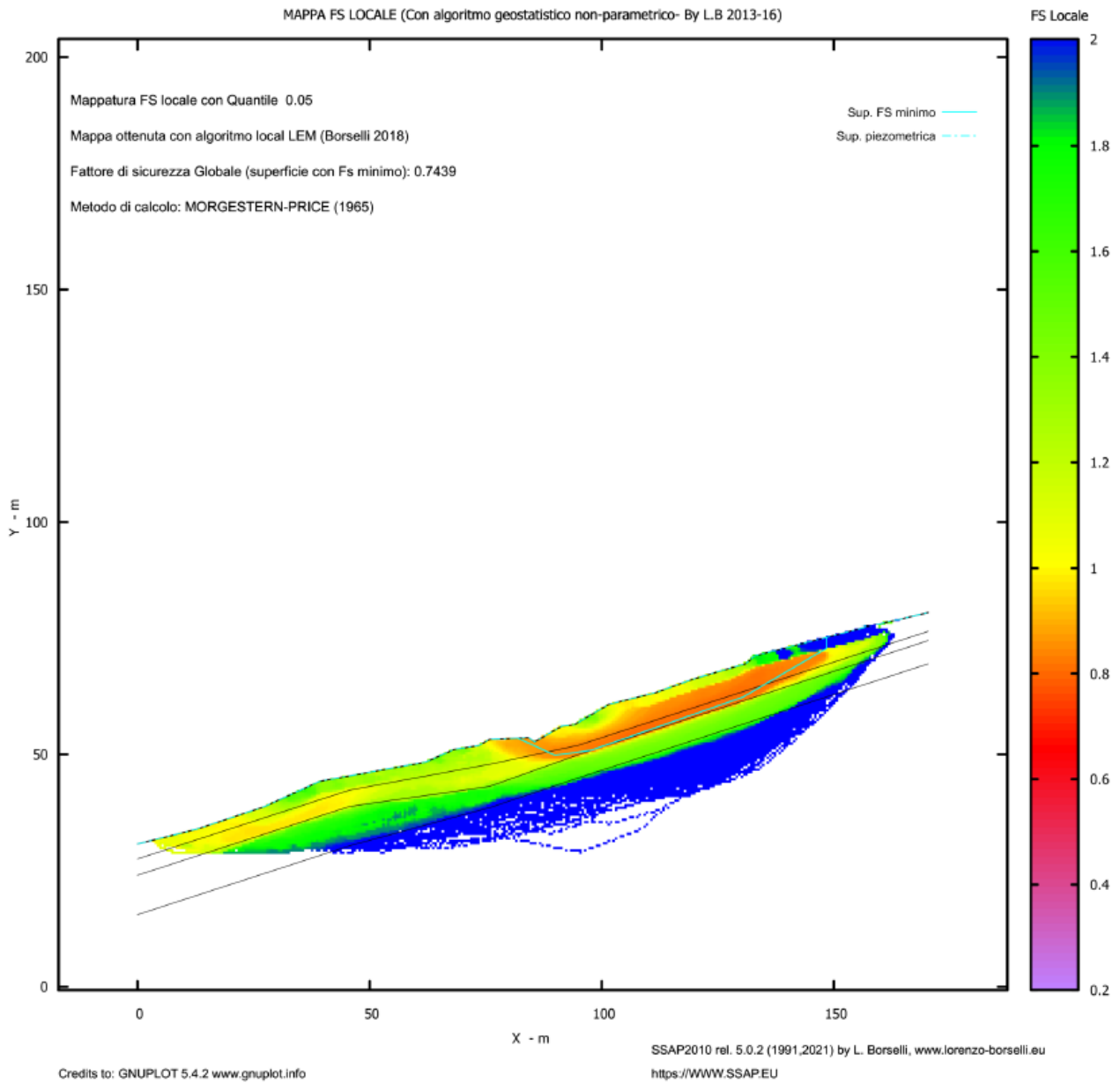
- Strato 4 (argilliti + calcare marnoso) stabile;
- Pendio saturo con falda a piano campagna;
- Resistenze dei materiali pari ai valori efficaci ricavati dallo studio Caso A, ovvero per lo strato 1 e lo strato 2:  
 $\varphi' = 18^\circ$   
 $c' = 11 \text{ kPa}$

Nell'elaborato 0R09 "Fascicolo dei calcoli esecutivi delle opere di sistemazione del movimento franoso" è riportato il report di verifica.

Come è logico attendere, per la famiglia di superfici critiche e a monte della strada in esame, evidenziate nello studio del caso B, vi è una diminuzione del fattore di sicurezza ( $FS_{\text{MINIMO}} = 0,74$ ). Inoltre sono presenti delle superfici critiche con fattore di sicurezza poco maggiore di 1,00 anche a valle della strada.



**Fig. 6 Risultati caso C – n.10 superfici con FS minore -**



**Fig. 7 Risultati caso C**

### 3.5 RISULTATI CASO C sisma

L'analisi condotta per il caso C è stata ripetuta con le stesse ipotesi ed aggiungendo l'azione sismica come riportato nella "Relazione Geotecnica ed Allegati".

Le componenti orizzontale e verticale dell'azione statica equivalente con cui viene rappresentata l'azione sismica sono esprimibili come delle aliquote del peso del volume di terreno potenzialmente instabile W:

$$F_v = W \cdot k_v$$

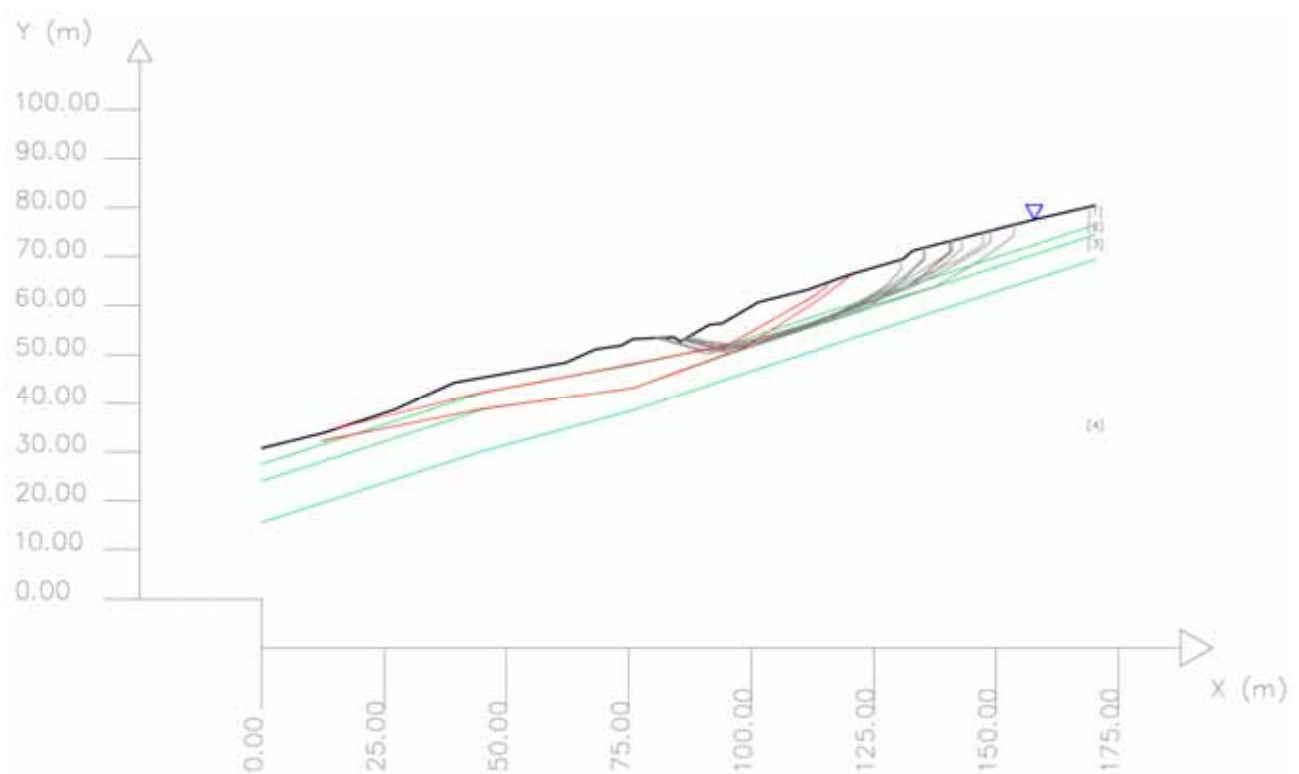
$$F_h = W \cdot k_h$$

dove

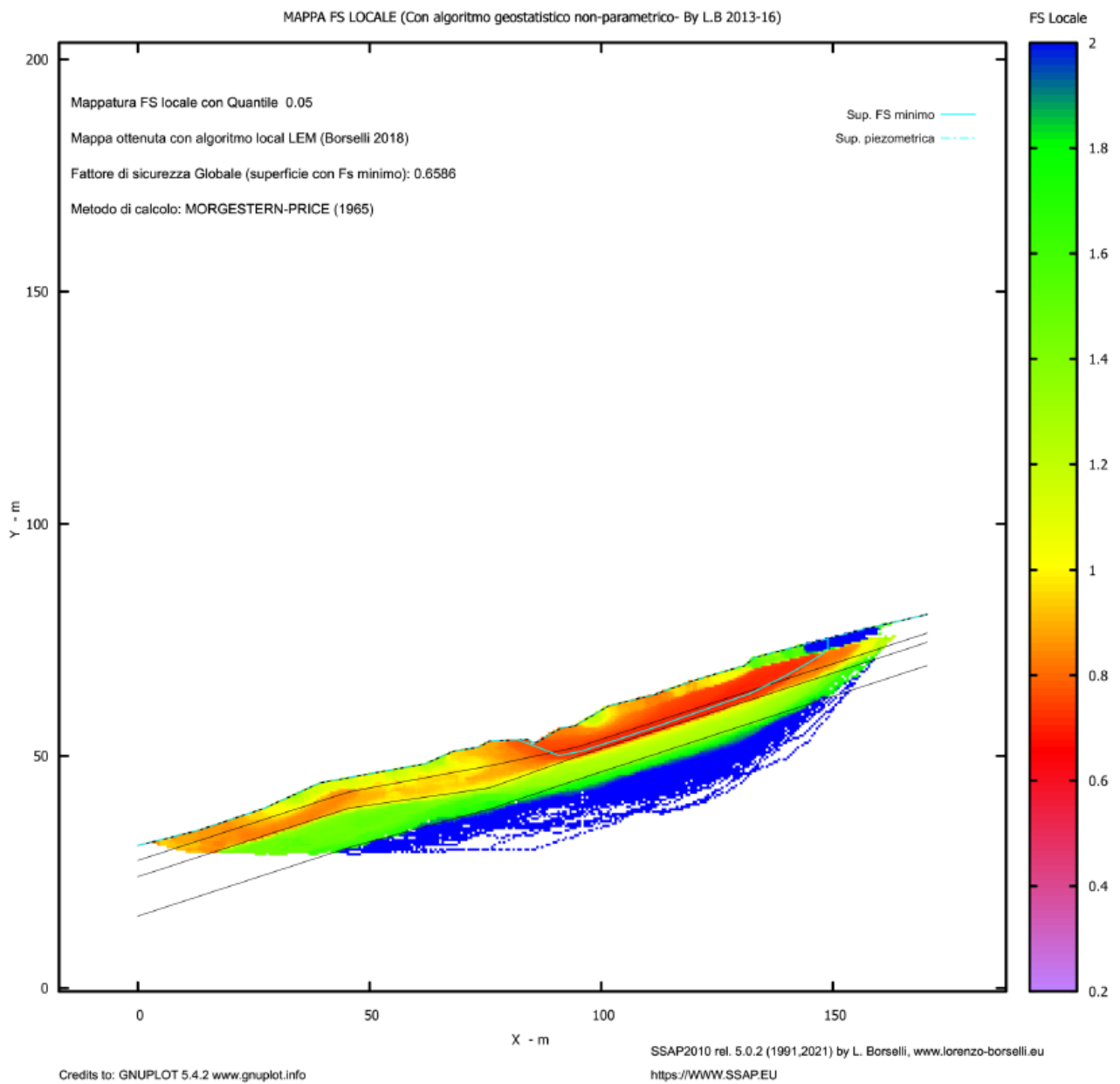
$$k_h = 0,048$$

$$k_v = \pm 0,024$$

Come è logico attendersi, rispetto al caso C si riducono i valori dei coefficienti di sicurezza ( $FS_{MINIMO} = 0,65$ ). Inoltre sono presenti superfici a valle della strada con  $FS < 1$  come evidenziato nella figura 9.



**Fig. 8 Risultati caso C sisma - n.10 superfici con FS minore -**



**Fig. 9 Risultati caso C sisma**

## 4. Progettazione degli interventi di stabilizzazione del pendio

Date le dimensioni della massa instabile (schematizzabile in un cuneo unitario con dimensioni circa 48m e circa 10m di altezza) e alla luce delle conoscenze fino a ora acquisite, non appare perseguibile un intervento che preveda la realizzazione di opere di sostegno. Infatti la realizzazione di un'opera di sostegno o di contrasto alla massa instabile risulterebbe essere eccessivamente onerosa e con efficacia difficilmente valutabile; pertanto, si è supposto che il pendio possa essere stabilizzato mediante riduzione delle pressioni interstiziali con un sistema di drenaggio profondo.

Il processo di drenaggio è un fenomeno complesso, influenzato dal regime delle piogge, dai livelli di infiltrazione, dalla presenza di superfici di discontinuità, dalla disomogeneità e anisotropia dei terreni nei riguardi della permeabilità, ecc., quindi anche il dimensionamento di un sistema drenante presenta molte difficoltà ed incertezze. Tuttavia, in linea generale, quando i fenomeni di instabilità sono innescati da valori alti delle pressioni interstiziali, tale tipologia di intervento risulta essere quella più efficace. Ciò è confermato sia per i meccanismi di collasso superficiali, che risentono in modo significativo delle variazioni stagionali delle pressioni interstiziali in dipendenza dell'andamento delle precipitazioni atmosferiche, sia per i meccanismi profondi caratterizzati da un regime pressoché stazionario delle pressioni interstiziali e da un elevato grado di mobilitazione della resistenza al taglio.

Per controllare l'efficacia di un sistema drenante è necessario procedere con la misura delle pressioni interstiziali installando un numero adeguato di celle piezometriche in prossimità della superficie di scorrimento (esistente o potenziale). Le misure piezometriche permettono di valutare l'abbassamento delle pressioni interstiziali prodotto dal sistema drenante e di controllarne l'efficacia nel tempo. È fondamentale che l'installazione dei piezometri preceda la realizzazione del sistema drenante per permettere il confronto tra i valori misurati e quelli previsti della riduzione di pressione interstiziale.

Come riportato nella "*Relazione Geotecnica e allegati*" nel settembre 2021 sono stati installati n.4 piezometri di Casagrande (**F1-F2-F3-F4**) attrezzati per eseguire, ciascuno, misure in continuo delle pressioni interstiziali a 3,00m e 7,00m di profondità.

Quindi il monitoraggio della situazione iniziale è di fatto iniziato in data 12-15 ottobre 2021.

L'intervento progettuale prevede di realizzare due ordini di dreni sub-orizzontali:

- il primo ordine costituito da n. 7 microdreni lunghi circa 50,00m, disposti ad interasse orizzontale pari a 7,00m;
- il secondo ordine costituito da n. 9 microdreni lunghi circa 60,00m, disposti ad interasse orizzontale pari a 10,00m.

Ciascun dreno è realizzato con tubo finestrato in PVC del diametro di 125 mm rivestito con filtro geotessile con pendenza pari longitudinale pari al 5%. Per impedire l'ingresso di radici in prossimità del piano campagna e l'occlusione del dreno, ciascun tubo in prossimità del piano campagna, per circa 6m, non deve essere del tipo "finestrato".

Per ciascuna fila deve essere realizzata una canaletta superficiale per la raccolta dell'acqua drenata che dovrà essere regimata e portata fuori dall'area di frana.

La canaletta prevista in corrispondenza del primo ordine di microdreni è del tipo alla "francese" ed è rivestita con geocomposito antierosivo ed impermeabile.

La canaletta prevista in corrispondenza del secondo ordine di dreni è realizzata con un rivestimento del fondo scavo con materassi "reno" per una larghezza di 3,0m in modo tale da

realizzare una pista carrabile per le operazioni di manutenzione del sistema. I dettagli del progetto sono riportati nella tavola grafica 0016 "Sistemazione movimento franoso: Planimetria, sezione e dettagli opere di drenaggio".

#### 4.1 Predimensionamento sistema dreni sub-orizzontali

Per il predimensionamento del sistema di dreni sub-orizzontali sono stati utilizzati gli abachi predisposti da *Desideri et al. (1997)*. Nello studio condotto da *Desideri* il terreno viene assimilato ad un mezzo omogeneo ed isotropo nei riguardi della permeabilità e la condizione al contorno al piano campagna è quella di apporto continuo con formazione di una lama d'acqua.

Gli abachi sono stati formulati per il caso di singolo livello di dreni e per il caso di doppio livello di dreni.

La lunghezza complessiva del fronte da stabilizzare risulta essere pari a:

$$L = 110,00 \text{ m} \quad \text{lunghezza del tratto di pendio da stabilizzare}$$

con

$$D = 7,00\text{m}-10,00\text{m} \quad \text{profondità del piano di valutazione dell'efficienza}$$

quindi il rapporto D/L risulta essere pari a:

$$D/L = 0,06-0,09$$

Poiché tutti gli abachi sono stati formulati a partire dal valore minimo del rapporto  $D/L = 0,2$  non risulta essere pertinente al caso l'utilizzo dell'abaco formulato per il caso di doppio livelli di dreni.

Quindi per il predimensionamento del sistema è stato fatto riferimento agli abachi per singolo livello con i seguenti schemi geometrici.

FILA 1

$$L2 = 50,00\text{m}$$

$$D = 10,00\text{m}$$

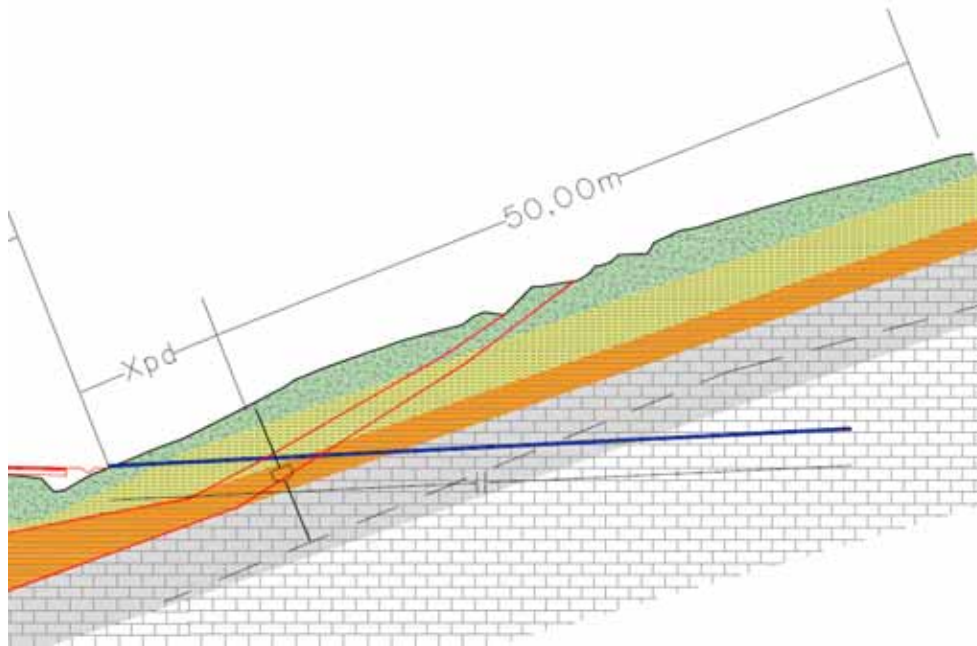
$$\beta = 20^\circ \quad \text{inclinazione pendio}$$

FILA 2

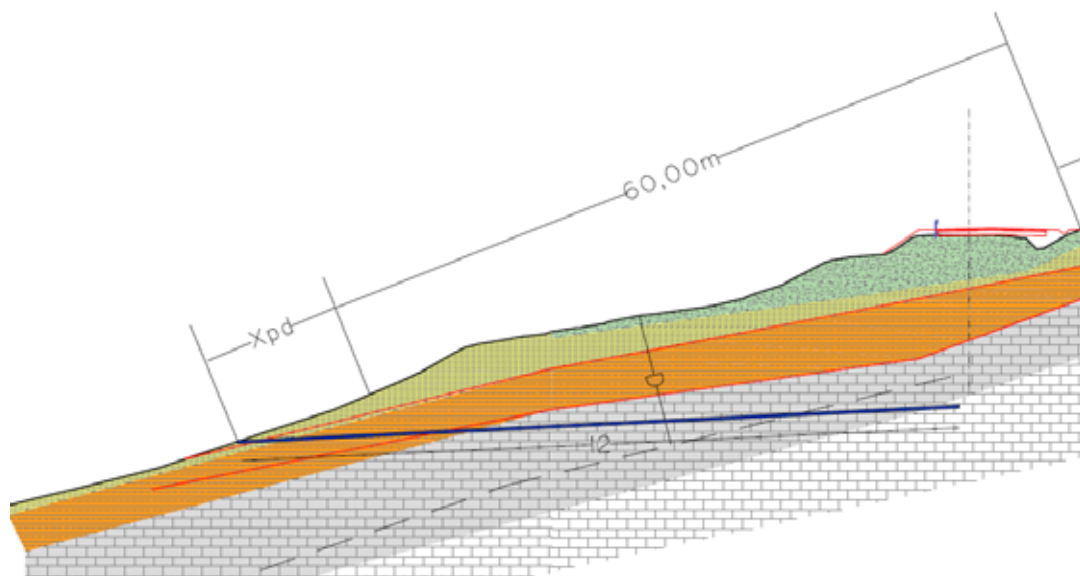
$$L2 = 60,00\text{m}$$

$$D = 12,00\text{m}$$

$$\beta = 20^\circ \quad \text{inclinazione pendio}$$

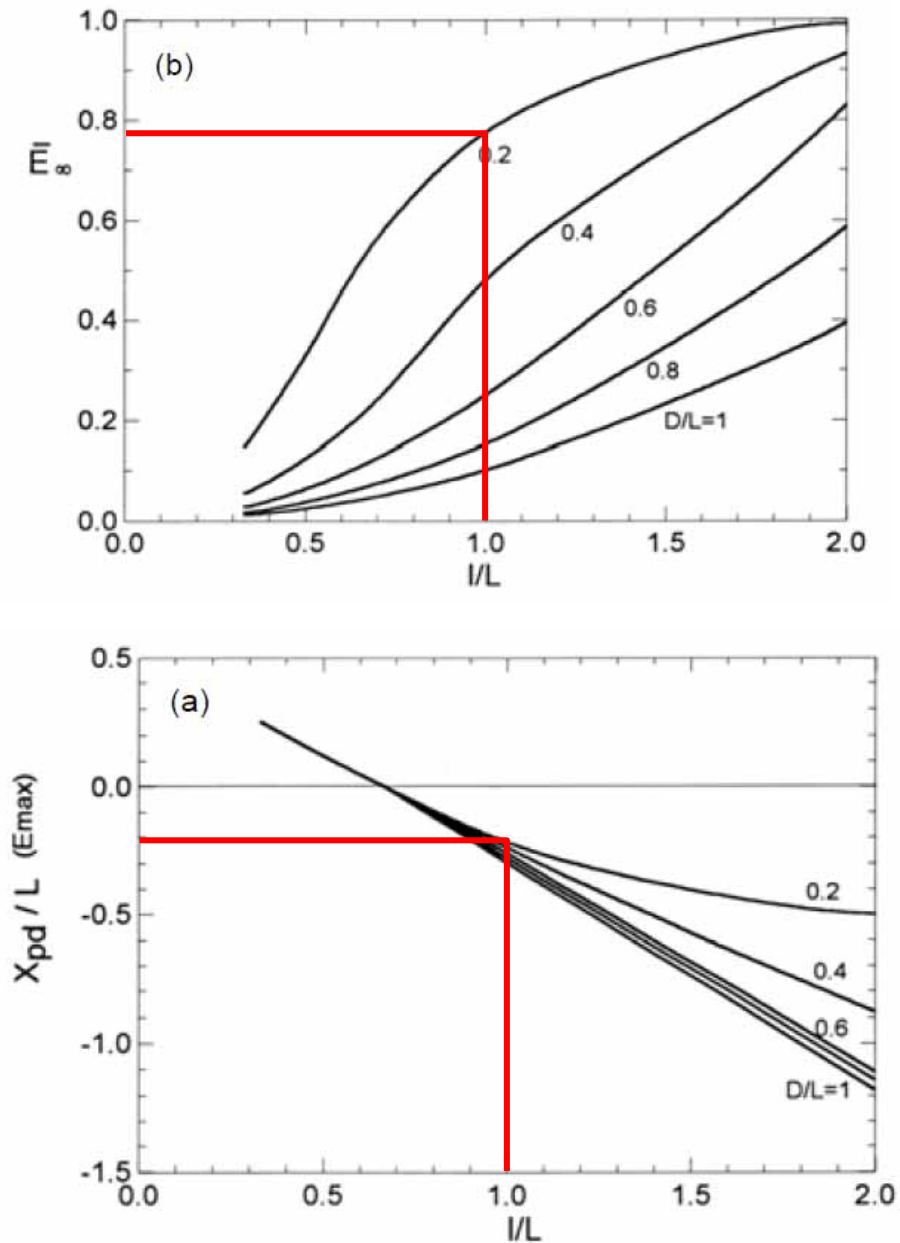


**Fig. 11 Schema calcolo per l'applicazione abachi Desideri e al. (1997) FILA 1**



**Fig. 12 Schema calcolo per l'applicazione abachi Desideri e al. (1997) FILA 2**





**Fig. 12 Abachi per il dimensionamento di dreni tubolari- singolo livello -  $\beta=20^\circ$**

Fissato un valore di efficienza idraulica regime pari a  $E_{\infty} \cong 0,80$  si ottiene dal primo grafico sulla curva  $D/L = 0,2$  il valore

$$I/L = 1,00$$

che comporta per

$$\text{FILA 1} \rightarrow l_1 = \text{lunghezza dreni} = 50,00\text{m}$$

$$\text{FILA 2} \rightarrow l_2 = \text{lunghezza dreni} = 60,00\text{m}$$

Dal secondo grafico si ottiene la posizione ottimale della fila di dreni rispetto al pendio da drenare:

$$I/L = 1,00 \text{ e } D/L=0,20 \rightarrow X_{pd} / L = -0,20$$

che comporta per

$$\text{FILA 1} \rightarrow X_{pd} = -10\text{m}$$

$$\text{FILA 2} \rightarrow X_{pd} = -12\text{m}$$

Affinché la fila di dreni sia assimilabile ad un piano drenante, *Di Maio et al. (1988)* hanno dimostrato che:

$$i/l \leq 0,2$$

per cui si ottiene che per la

$$\text{FILA 1} \rightarrow i_1 = 7.00\text{m} - i_1/l_1 = 0,14 < 0,2$$

$$\text{FILA 2} \rightarrow i_2 = 10.00\text{m} - i_2/l_2 = 0,16 < 0,2$$

L'evoluzione temporale del processo è rappresentata in funzione del fattore tempo T:

$$t = (\gamma_w \cdot (l \cdot \sin\beta)^2 / k_v) \cdot (2 \cdot (1+v) \cdot (1-2v) / E) \cdot T$$

dove

$\gamma_w$  = peso specifico acqua

$k_v$  = coefficiente filtrazione

$v$  = coefficiente Poisson terreno

$E$  = modulo elastico terreno

T è il fattore tempo fornito dagli abachi elaborati da *Desideri* per il 50% ed il 90% dell'efficienza idraulica a regime.

per  $i/L$  1,0 sulla curva  $D/L=0,2$  si ottengono

$$T_{50} = 0,035$$

$$T_{90} = 0,35$$

Per una stima del tempo t necessario sono state fatte le seguenti ipotesi sui valori dei parametri della formula:

$E = 11$  Mpa (stimato da prove  $N_{SPT}$  su terreno limoso argilloso alterato)

$v = 0,3$  (ipotesi)

$k_v = 3,3 \times 10^{-8}$  m/s (valore più basso rinvenuto per lo strato 3)

ottenendo

$t$  (50%)  $\cong$  5 giorni

$t$  (90%)  $\cong$  49 giorni

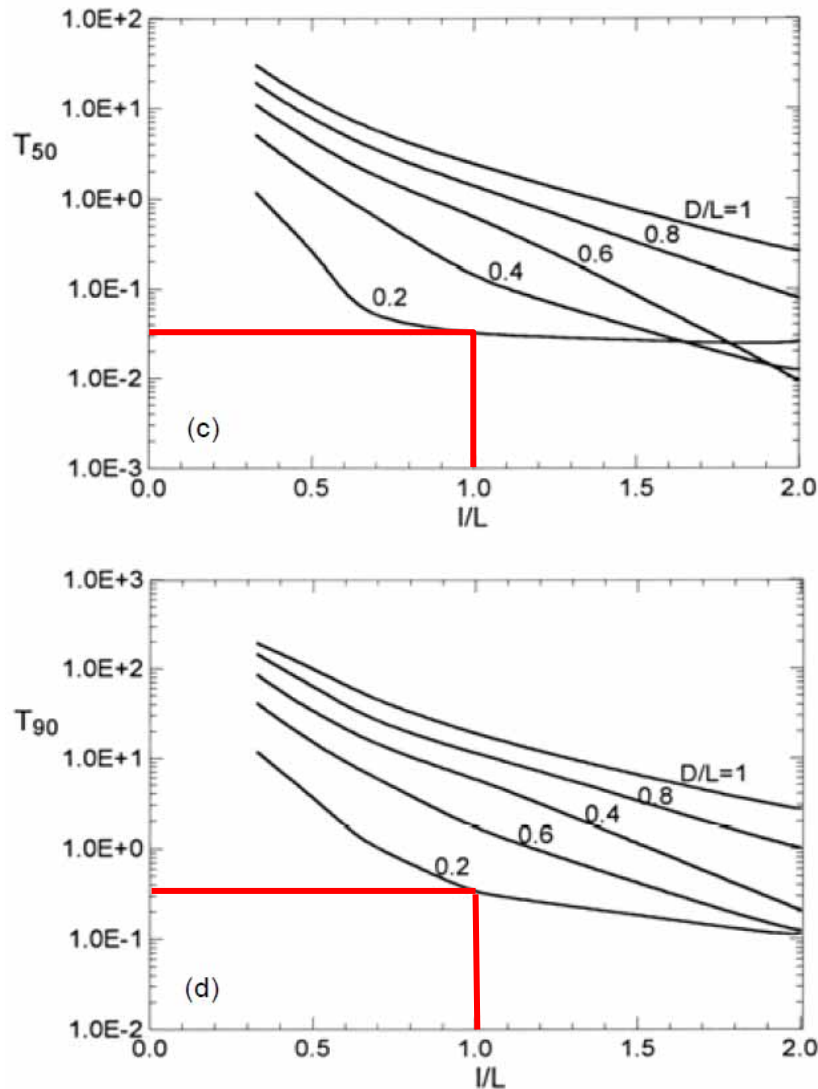


Fig. 13 Abachi per il fattore tempo T - singolo livello -  $\beta=20^\circ$

#### 4.2 Analisi filtrazione lungo il pendio nell'ipotesi progettuale

Per la determinazione del profilo di falda lungo il pendio nella condizione di progetto, ovvero dopo la realizzazione dei dreni, è stato utilizzato il programma *AZTEC FEM GT 16.5 versione 16.50g* della Aztec Informatica s.r.l. che consente di analizzare nel piano bidimensionale un problema di filtrazione in moto permanente.

Quindi è stato schematizzato il pendio come rappresentato nella sezione geologica di riferimento della Tavola 003 ed inserendo le due file di microdreni modellate come "inclusioni".

Ai diversi strati sono stati associati i seguenti valori cautelativi dei coefficienti di permeabilità considerando i dati emersi dalle prove di permeabilità come riportati nella "Relazione Geotecnica e allegati":

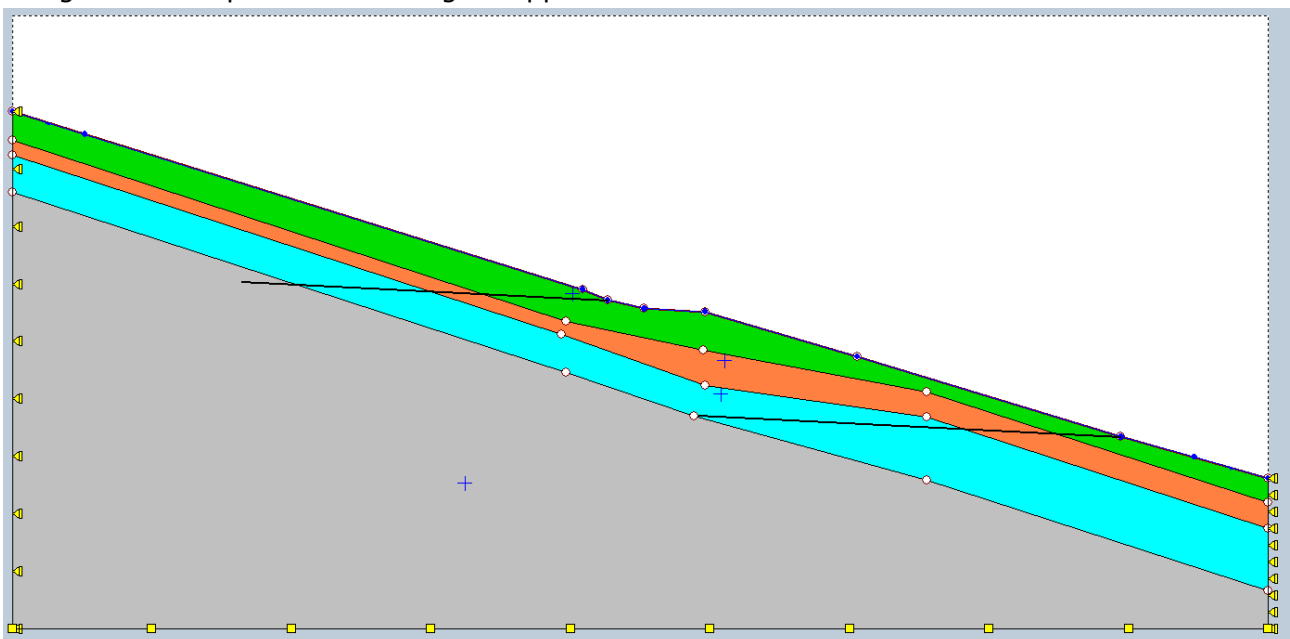
Strato 1 "riporto"+"terreno argilloso scarsamente consistente"  $\rightarrow k=1,1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$

- Strato 2 "terreno limoso argilloso alterato" →  $k=3,0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$
- Strato 3 "argilliti alterate" →  $k=3,0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$
- Strato 4 "argilliti + calcare marnoso" (ipotesi di roccia compatta) →  $k=1,0 \times 10^{-10} \text{cm/s}$

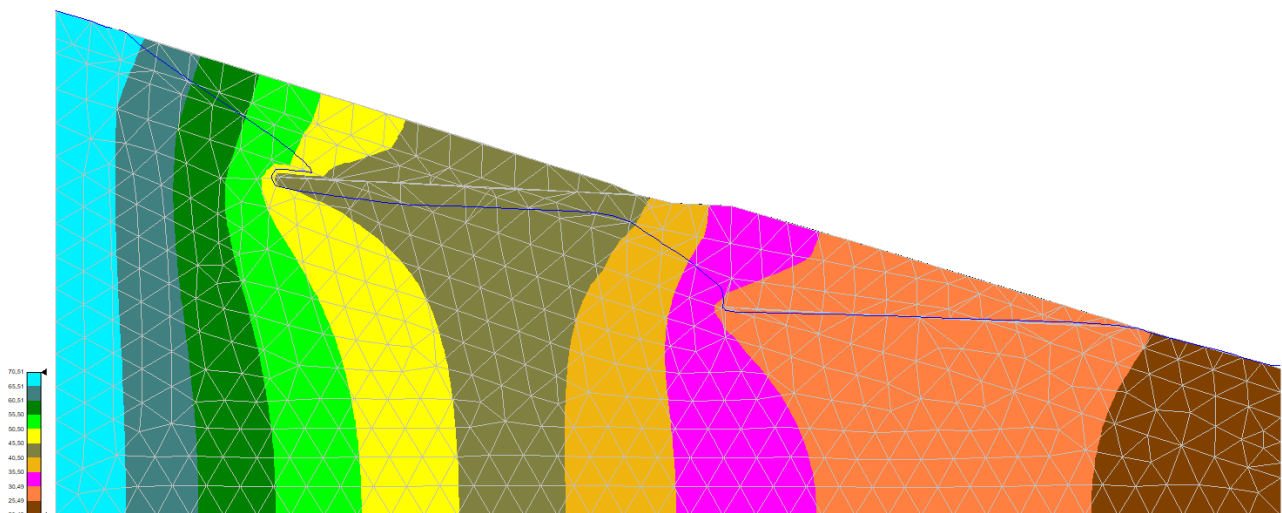
Per la realizzazione dei microdreni il progetto prevede di utilizzare tubi in PVC con diametro esterno pari a 125mm e percentuale di foratura pari al 12% (portata filtrata= 4,5m<sup>3</sup>/h/m). Quindi al materiale schematizzante i microdreni è stato associato il seguente valore cautelativo del coefficiente di permeabilità:

$$k_{\text{MICRODRENI}} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$$

Nella condizione iniziale il pelo libero della falda è stato posto a piano campagna.  
 Nell'elaborato OR09 "Fascicolo dei calcoli esecutivi delle opere di sistemazione del movimento franoso" è riportato il report di verifica.  
 Di seguito sono riportate le immagini rappresentative dell'analisi.



**Fig. 14 Modello studio**



**Fig. 15 Grafica del Potenziale e Pelo libero falda a regime**

## 5. Verifiche di stabilità del pendio - stato progetto-

Le verifiche di stabilità condotte per lo studio del pendio nelle condizioni attuali sono state ripetute nella condizione di progetto, ovvero con il profilo della falda come desunto dall'analisi di filtrazione riportata al paragrafo 4.2.

In corrispondenza della piattaforma stradale è stato considerato presente un carico uniforme pari a 25 kN/mq.

Quindi, premesso ciò, l'analisi di stabilità del pendio nelle **condizioni di progetto** è stata condotta secondo il seguente schema:

- **CASO A - PROGETTO:**
  - profilo della falda di progetto
  
- **CASO A SISMA - PROGETTO:**
  - profilo della falda di progetto
  - azione sismica presente
  
- **CASO B - PROGETTO:** Analisi di stabilità del pendio, considerando lo strato delle "argilliti-calcare marnoso" come stabile e con le seguenti ipotesi:
  - valori caratteristici dei parametri meccanici efficaci
  - profilo della falda di progetto
  
- **CASO B SISMA - PROGETTO :** Analisi di stabilità del pendio, considerando lo strato delle "argilliti-calcare marnoso" come stabile e con le seguenti ipotesi:
  - valori caratteristici dei parametri meccanici efficaci
  - profilo della falda di progetto
  - azione sismica presente
  
- **CASO C - PROGETTO:** Analisi di stabilità del pendio, considerando lo strato delle "argilliti-calcare marnoso" come stabile e con le seguenti ipotesi:
  - valori dei parametri meccanici efficaci derivanti dallo studio del caso A *back analysis*
  - profilo della falda di progetto
  
- **CASO C SISMA:** Analisi di stabilità del pendio, considerando lo strato delle "argilliti-calcare marnoso" come stabile e con le seguenti ipotesi:
  - valori dei parametri meccanici efficaci derivanti dallo studio del caso A *back analysis*
  - profilo della falda di progetto
  - azione sismica presente

Le analisi di stabilità sono state condotte utilizzando il programma *Slope Stability Analysis Program release 5.0.2 (c) (1991-2021)* elaborato da Dr. Geol. Lorenzo Borselli.

Il metodo di calcolo adottato è quello di Morgenstern-Price (1965).

Nella schematizzazione stratigrafica gli strati di "riporto" e di "terreno argilloso scarsamente consistente" sono stati considerati come unico strato:

Lo strato 1 corrisponde al "riporto"+"terreno argilloso scarsamente consistente"

Lo strato 2 corrisponde al "terreno limoso argilloso alterato"

Lo strato 3 corrisponde alle "argilliti alterate"

Lo strato 4 corrisponde alle "argilliti + calcare marnoso" stabili.

### 5.1 RISULTATI CASO A -PROGETTO-

La verifica di stabilità è stata ripetuta per la famiglia di superfici che approssimano quelle di rottura ipotizzate ( $FS \cong 1$  nella condizione attuale) considerando il profilo della falda di progetto.

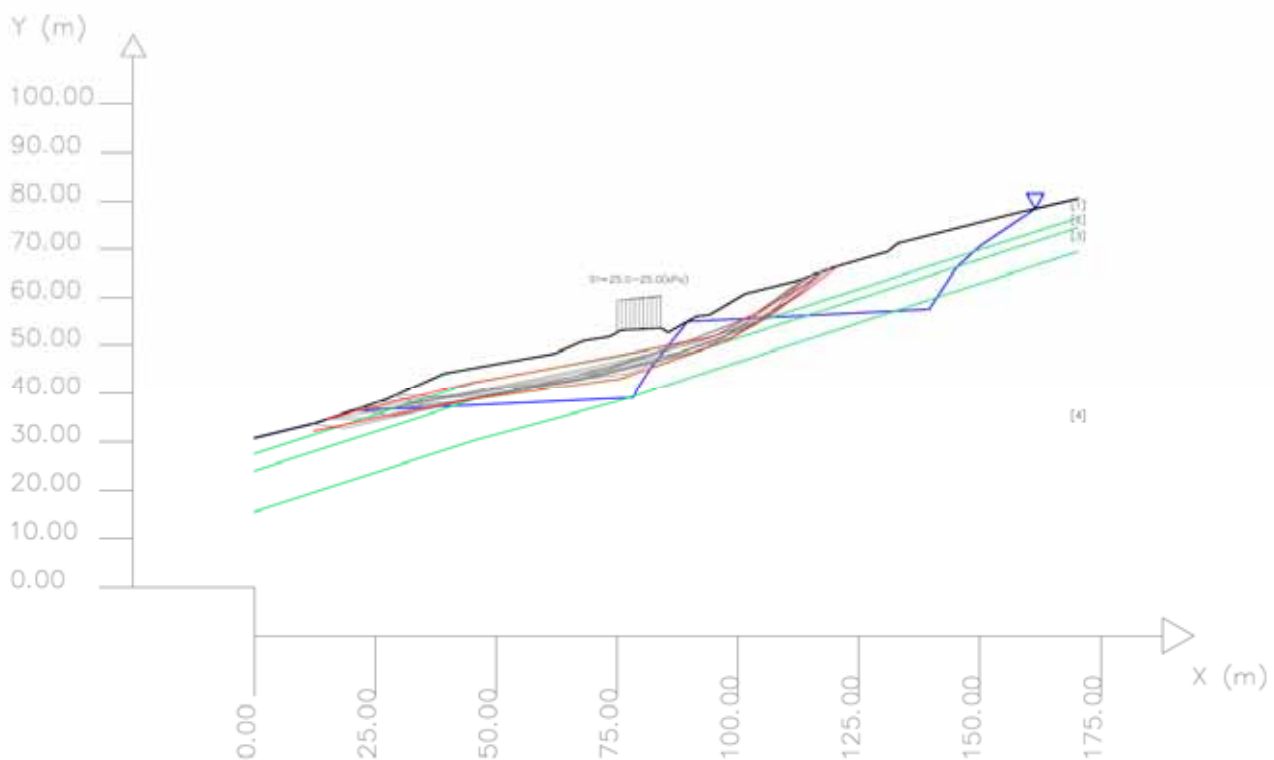
Per lo strato 1 e per lo strato 2 sono stati assunti i seguenti parametri geotecnici:

$$\varphi' = 18^\circ$$

$$c' = 11 \text{ kPa}$$

Con il profilo della falda di progetto il coefficiente di sicurezza minimo è risultato essere pari a  $FS_{\text{MINIMO}} = 1,53$ .

Nell'elaborato 0R09 "Fascicolo dei calcoli esecutivi delle opere di sistemazione del movimento franoso" è riportato il report di verifica.



**Fig. 16 Risultati caso A- PROGETTO-**

### 5.2 RISULTATI CASO A sisma -PROGETTO-

Le verifiche del caso A-progetto- sono state ripetute considerando presente l'azione sismica. In questo caso il valore del coefficiente di sicurezza minimo è risultato essere pari  $FS_{\text{MINIMO}} = 1,27$ .

Le componenti orizzontale e verticale dell'azione statica equivalente con cui viene rappresentata l'azione sismica sono esprimibili come delle aliquote del peso del volume di terreno potenzialmente instabile W:

$$F_v = W \cdot k_v$$

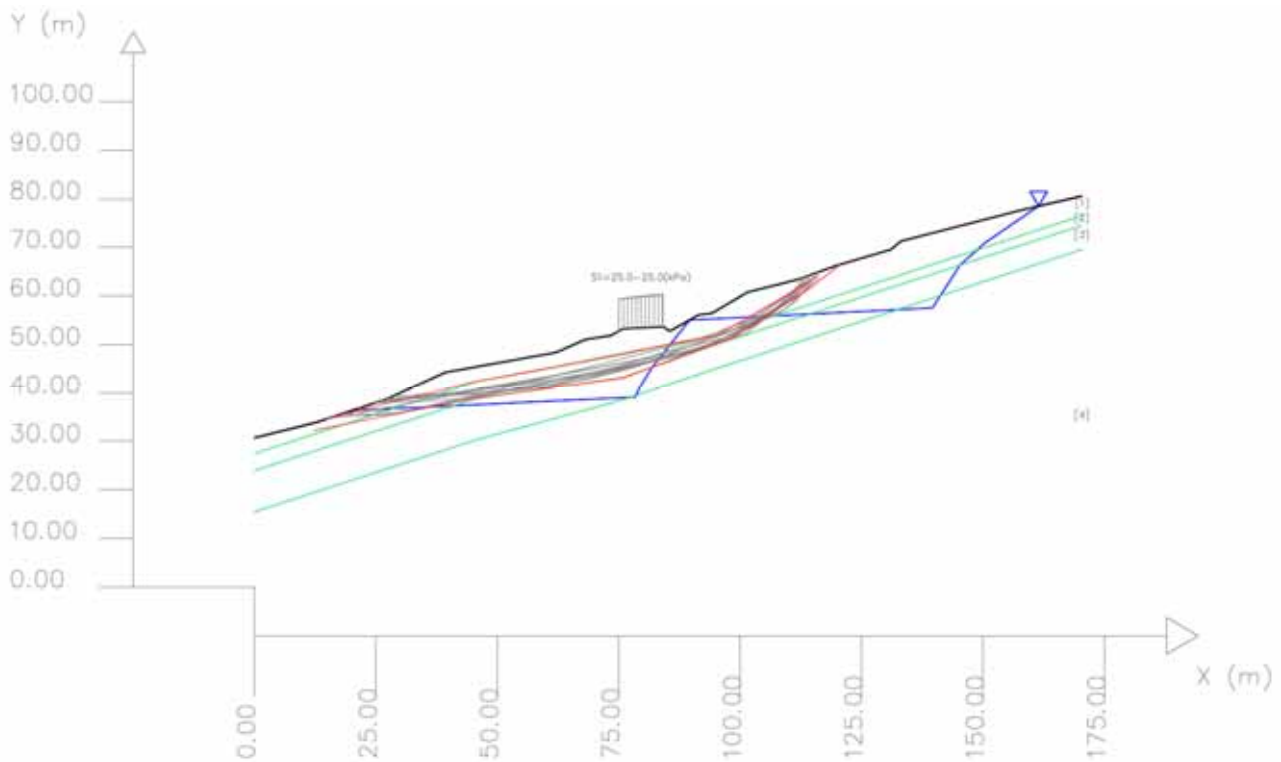
$$F_h = W \cdot k_h$$

dove

$$k_h = 0,048$$

$$k_v = \pm 0,024$$

Nell'elaborato 0R09 "Fascicolo dei calcoli esecutivi delle opere di sistemazione del movimento franoso" è riportato il report di verifica.



**Fig. 17 Risultati caso A sisma - PROGETTO-**

### 5.3 RISULTATI CASO B -PROGETTO-

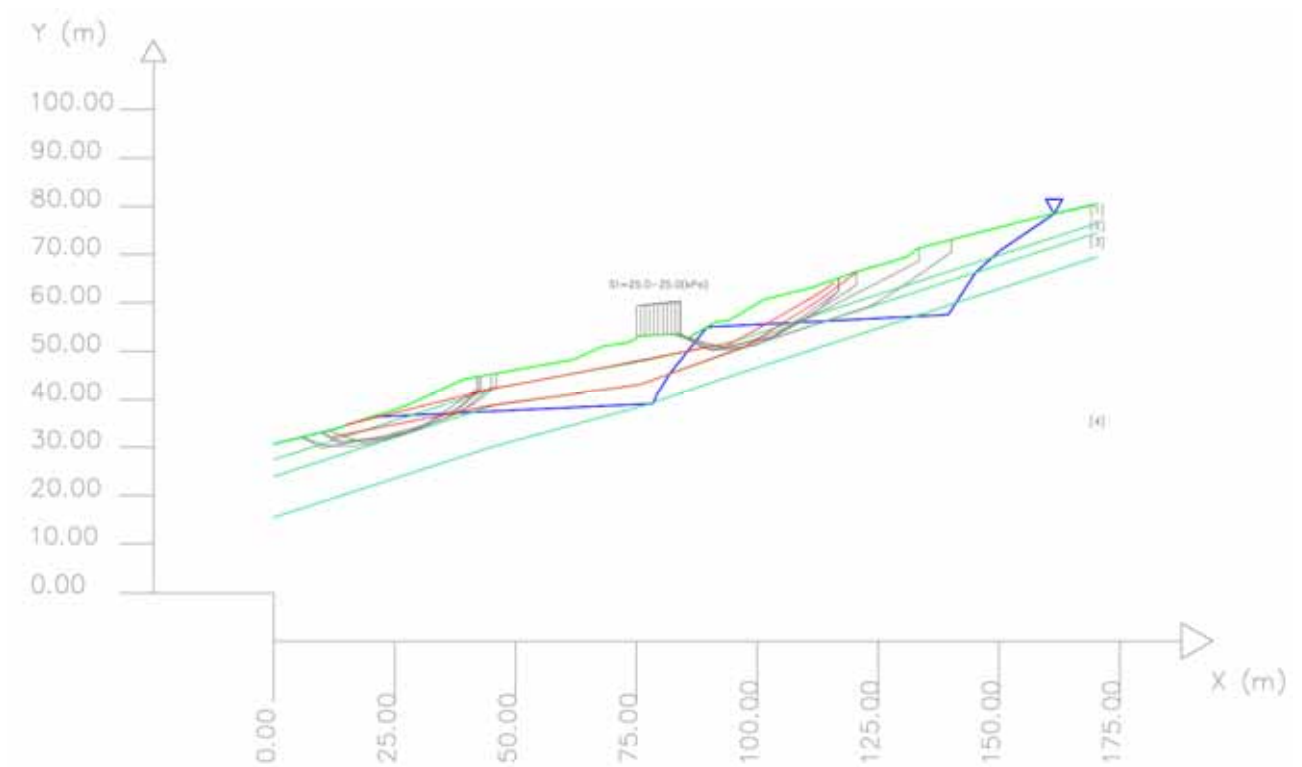
In questo caso è stata analizzata la stabilità del pendio a prescindere dalle superfici di rottura rilevate e quindi ricercando superfici di scivolamento generiche.

Le ipotesi assunte in fase di calcolo sono le seguenti:

- Strato 4 (argilliti + calcare marnoso) stabile;
- Profilo della falda di progetto;
- Resistenze dei materiali pari ai valori efficaci caratteristici.

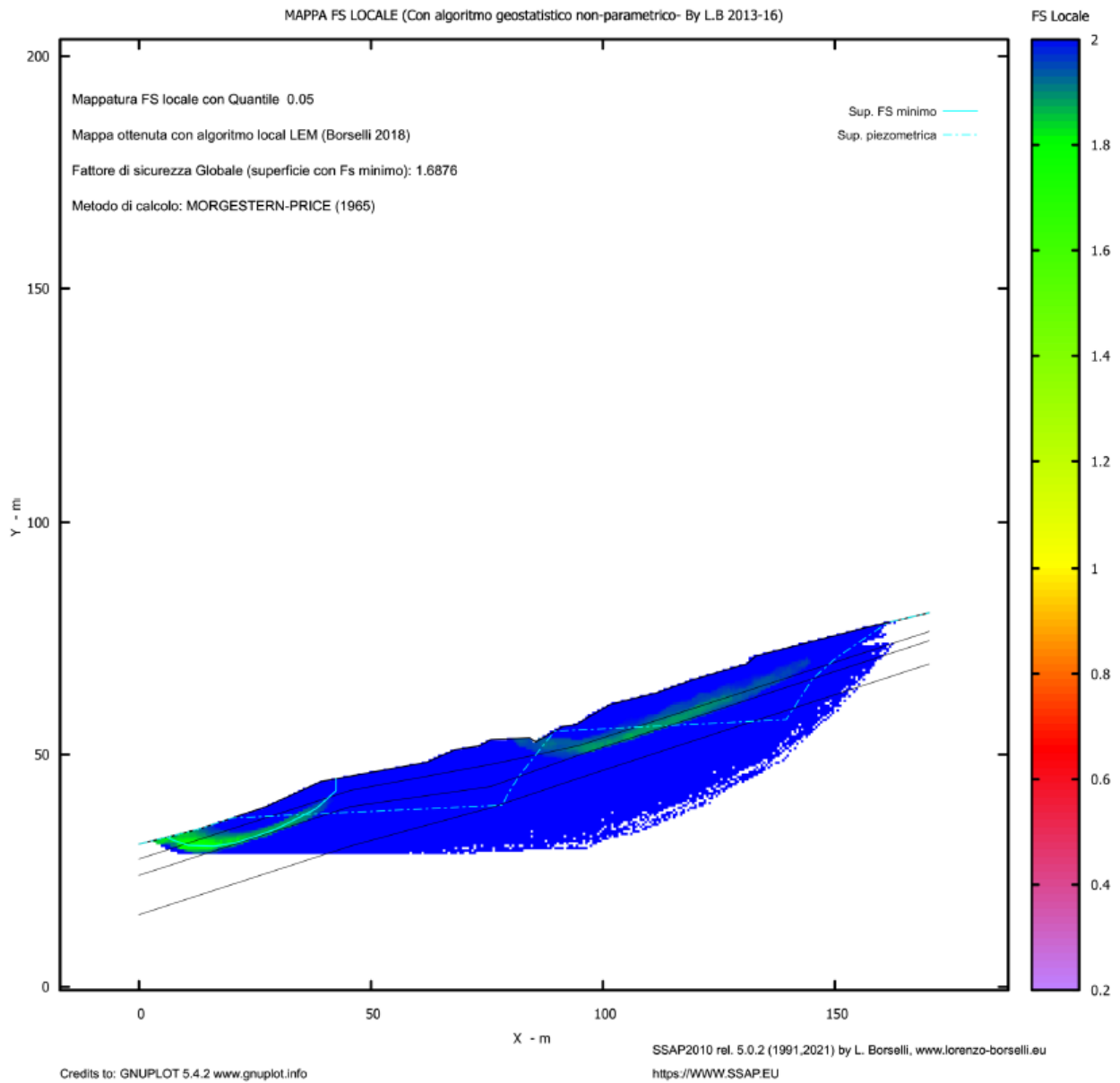
Nell'elaborato 0R09 "Fascicolo dei calcoli esecutivi delle opere di sistemazione del movimento franoso" è riportato il report di verifica.

Rispetto al caso B dello stato attuale si evidenzia un netto miglioramento delle condizioni di stabilità ( $FS_{MINIMO} = 1,68$ ).



**Fig. 18 Risultati caso B PROGETTO - n.10 superfici con FS minore -**





**Fig. 19 Risultati caso B PROGETTO**

### 5.4 RISULTATI CASO B sisma -PROGETTO-

L'analisi condotta per il caso B di progetto è stata ripetuta con le stesse ipotesi ed aggiungendo l'azione sismica come riportato nella "Relazione Geotecnica ed Allegati".

Le componenti orizzontale e verticale dell'azione statica equivalente con cui viene rappresentata l'azione sismica sono esprimibili come delle aliquote del peso del volume di terreno potenzialmente instabile W:

$$F_v = W \cdot k_v$$

$$F_h = W \cdot k_h$$

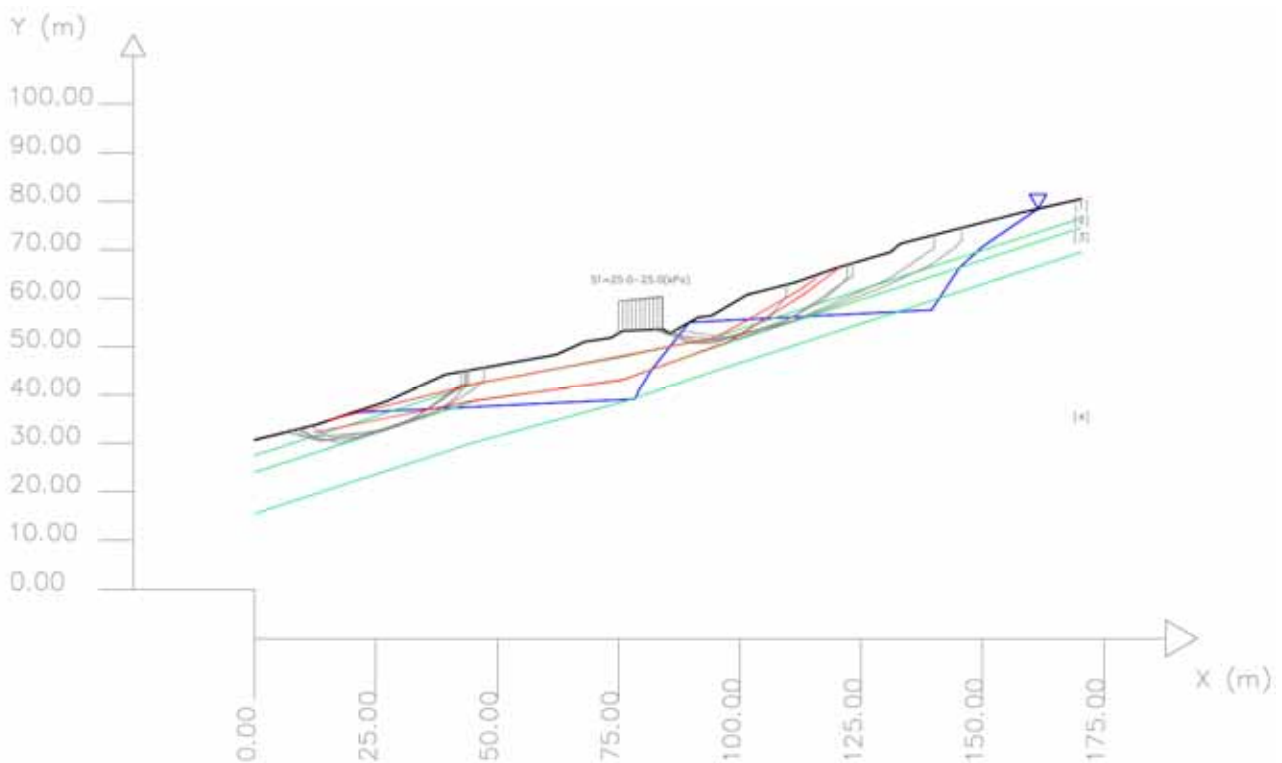
dove

$$k_h = 0,048$$

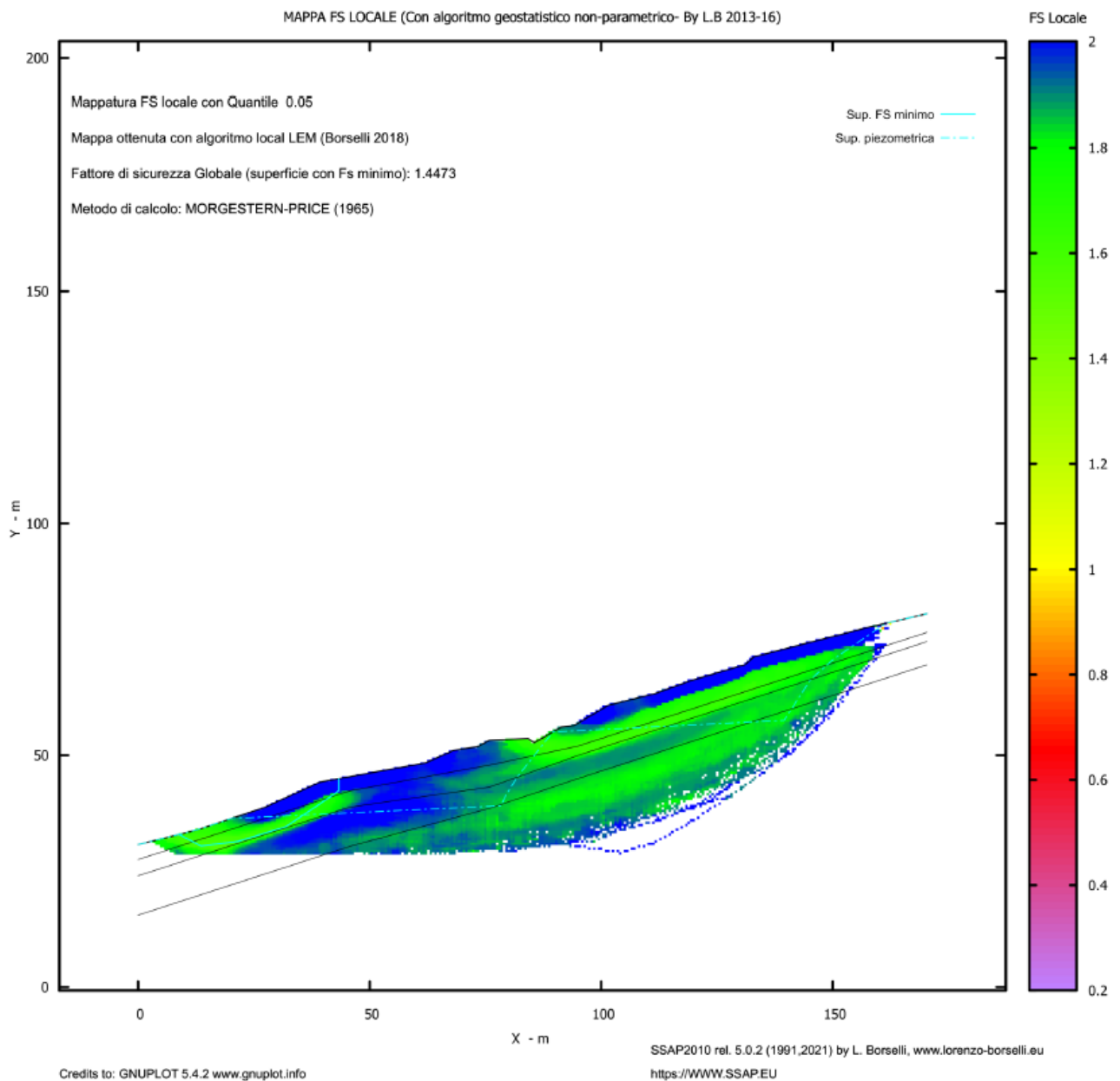
$$k_v = \pm 0,024$$

Nell'elaborato 0R09 "Fascicolo dei calcoli esecutivi delle opere di sistemazione del movimento franoso" è riportato il report di verifica.

Rispetto al caso B con sisma dello stato attuale si evidenzia un netto miglioramento delle condizioni di stabilità ( $FS_{MINIMO} = 1,44$ ).



**Fig. 20 Risultati caso B sisma - PROGETTO - n.10 superfici con FS minore -**



**Fig. 21 Risultati caso B sisma - PROGETTO -**

### 5.5 RISULTATI CASO C -PROGETTO-

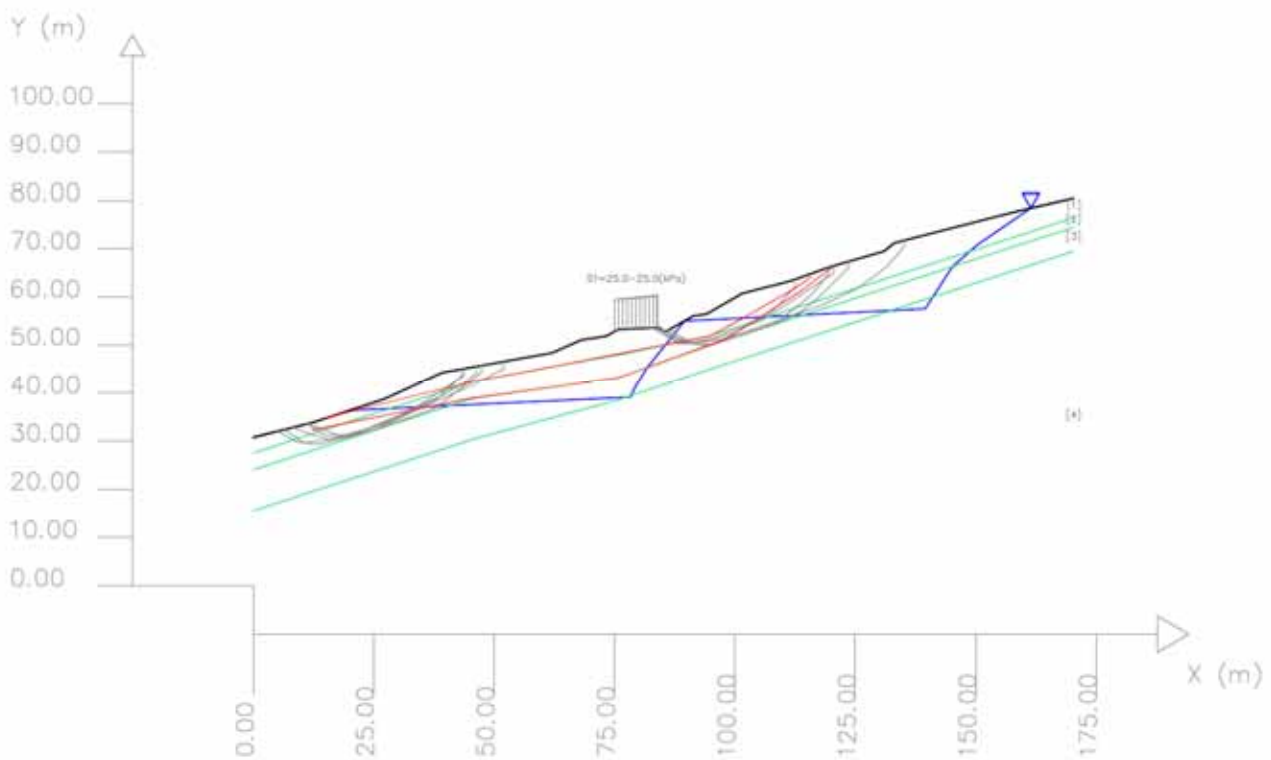
In questo caso è stata ripetuta l'analisi del caso C con il profilo di falda di progetto.

Le ipotesi assunte in fase di calcolo sono le seguenti:

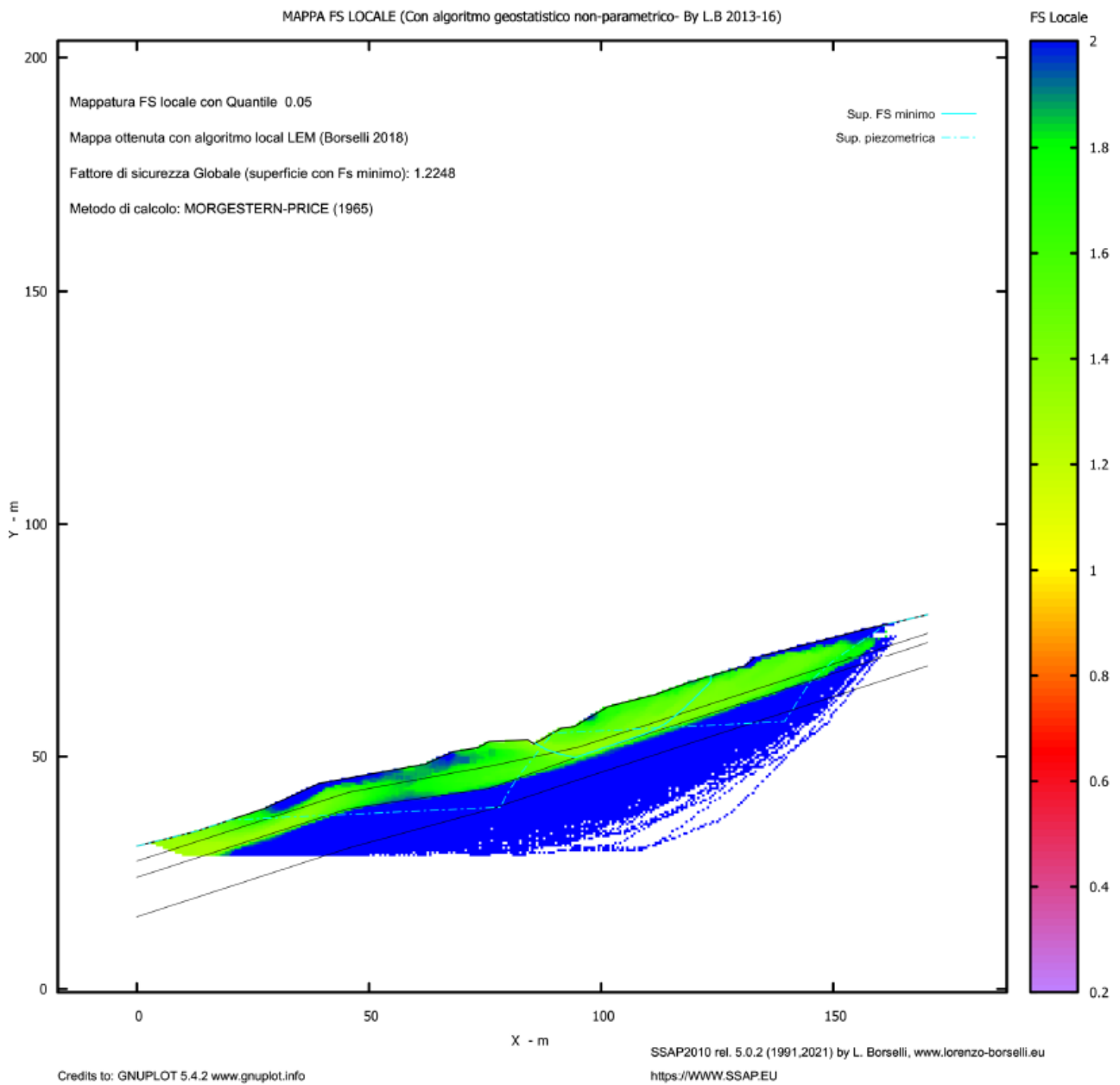
- Strato 4 (argilliti + calcare marnoso) stabile;
- Profilo della falda di progetto;
- Resistenze dei materiali pari ai valori efficaci ricavati dallo studio Caso A, ovvero per lo strato 1 e lo strato 2:  
 $\varphi' = 18^\circ$   
 $c' = 11 \text{ kPa}$

Nell'elaborato 0R09 "Fascicolo dei calcoli esecutivi delle opere di sistemazione del movimento franoso" è riportato il report di verifica.

Rispetto al caso C dello stato attuale si evidenzia un netto miglioramento delle condizioni di stabilità ( $FS_{\text{MINIMO}} = 1,22$ ).



**Fig. 22 Risultati caso C PROGETTO - n.10 superfici con FS minore -**



**Fig. 23 Risultati caso C PROGETTO**

### 5.6 RISULTATI CASO C sisma -PROGETTO-

L'analisi condotta per il caso C di progetto è stata ripetuta con le stesse ipotesi ed aggiungendo l'azione sismica come riportato nella "Relazione Geotecnica ed Allegati".

Le componenti orizzontale e verticale dell'azione statica equivalente con cui viene rappresentata l'azione sismica sono esprimibili come delle aliquote del peso del volume di terreno potenzialmente instabile W:

$$F_v = W \cdot k_v$$

$$F_h = W \cdot k_h$$

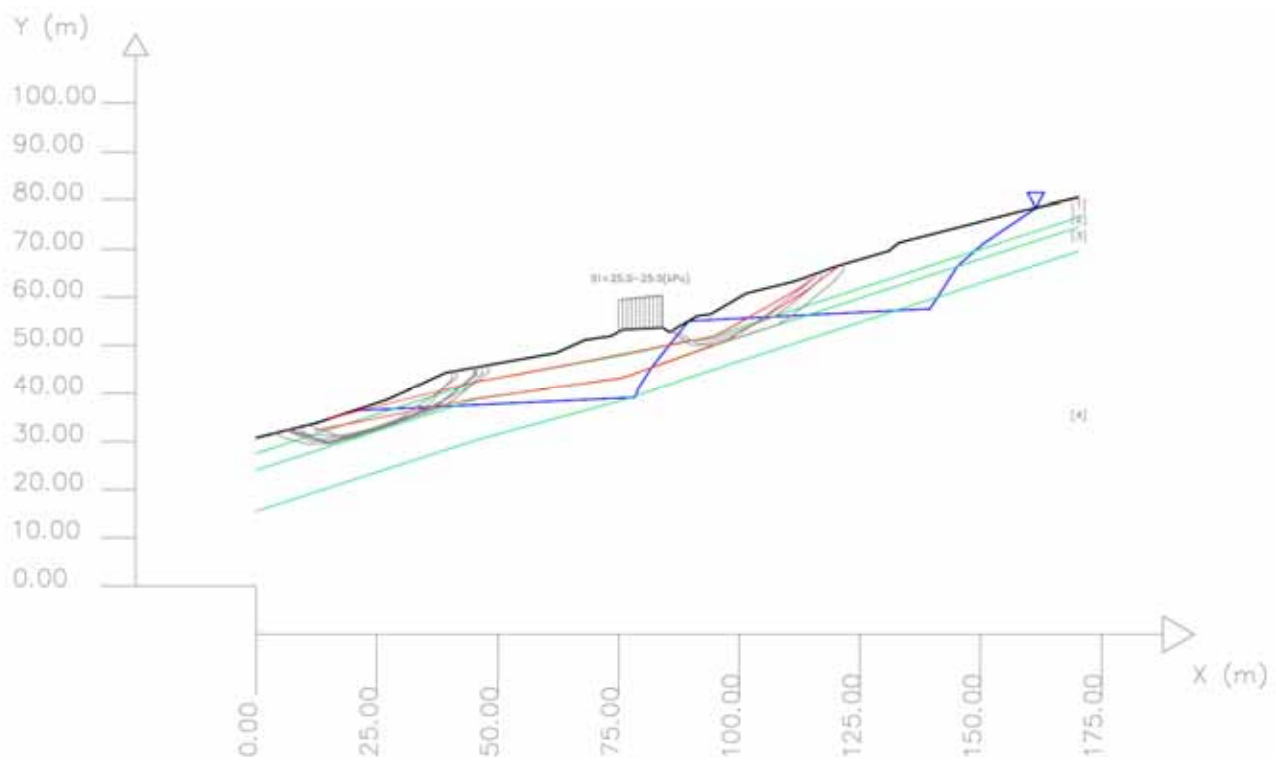
dove

$$k_h = 0,048$$

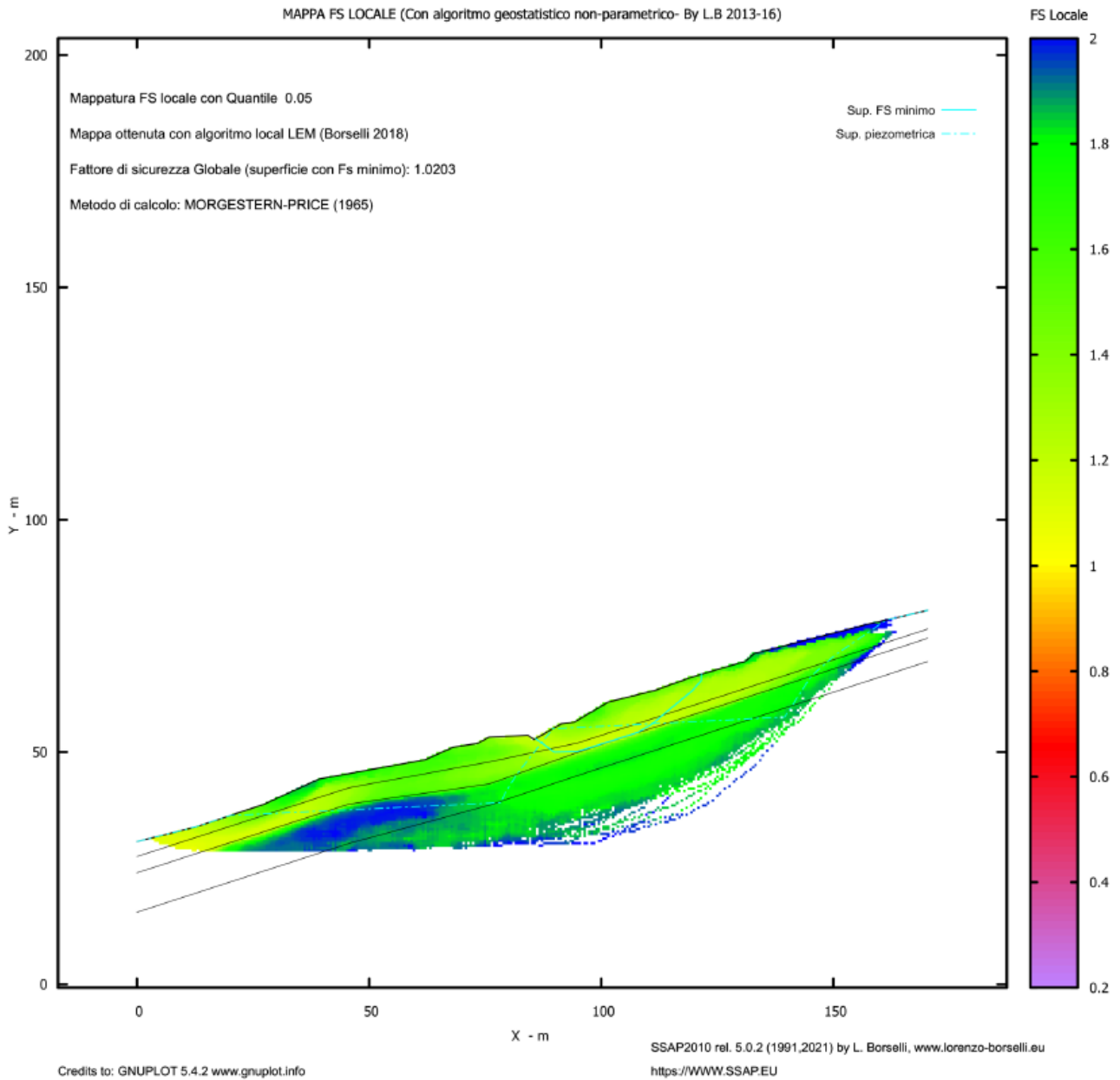
$$k_v = \pm 0,024$$

Nell'elaborato 0R09 "Fascicolo dei calcoli esecutivi delle opere di sistemazione del movimento franoso" è riportato il report di verifica.

Rispetto al caso C con sisma dello stato attuale si evidenzia un netto miglioramento delle condizioni di stabilità ( $FS_{MINIMO} = 1,02$ ).



**Fig. 24 Risultati caso C sisma - PROGETTO - n.10 superfici con FS minore -**



**Fig. 25 Risultati caso C sisma - PROGETTO -**

## 5.7 CONCLUSIONI

Nella tabella seguente è riportato il valore del coefficiente di sicurezza minimo determinato nei vari casi esaminati sia nella condizione attuale che di progetto:

<b>CASO</b>	<b>FS minimo STATO ATTUALE</b>	<b>FS minimo STATO PROGETTO</b>
CASO A Back Analysis	1,00	1,53
CASO A - SISMA	-	1,27
CASO B	1,08	1,68
CASO B - SISMA	0,95	1,44
CASO C	0,74	1,22
CASO C - SISMA	0,65	1,02

Quindi dal punto di vista teorico la realizzazione del sistema di drenaggio profondo consente di migliorare le condizioni stabilità del pendio sia con riferimento alle superfici di scivolamento riscontrate sia rispetto a superfici potenziali individuate a monte ed a valle della strada esistente valutate in termini di parametri efficaci sia "caratteristici" (caso B) che "reali" (caso C).

Come già indicato per valutare l'effettiva efficacia del sistema drenante dovrà essere proseguita la campagna di monitoraggio in continuo dei piezometri installati, sia di Casagrande che a tubo aperto, nonché la lettura degli inclinometri.

**AXIS Engineering Srl**

*Ing. Gianluca Terrosi - Arch. Roberta Meniconi*