



POLITECNICO
DI MILANO

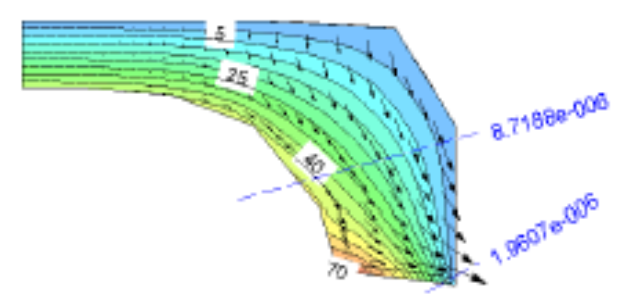
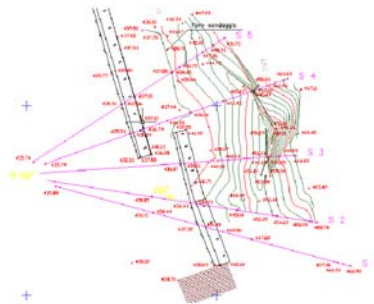
POLO REGIONALE
DI LECCO

Master Universitario in Protezione Civile



Analisi di stabilità di un versante e Progettazione preliminare delle opere di messa in sicurezza

ing. Andrea Galli
Lecco, 10 marzo 2006

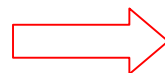




Introduzione

Rilievo
geologico

Rilievo geologico



Inquadramento
Geologico-strutturale,
Geomorfologico, prove
geofisiche e definizione
stratigrafia

Definizione
modello di
calcolo

Definizione del
modello di calcolo

Analisi di
stabilità

Analisi di stabilità

Interventi

Interventi



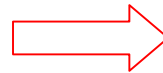
Introduzione

Rilievo
geologico

Rilievo geologico

Definizione
modello di
calcolo

Definizione del
modello di calcolo



Rilievo topografico e
Caratterizzazione
meccanica dei materiali

Analisi di
stabilità

Analisi di stabilità

Interventi

Interventi



Introduzione

Rilievo
geologico

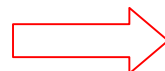
Rilievo geologico

Definizione
modello di
calcolo

Definizione del
modello di calcolo

Analisi di
stabilità

Analisi di stabilità



Analisi numeriche:
circolazione idrica e
metodi dei conci

Interventi

Interventi



Introduzione

Rilievo
geologico

Rilievo geologico

Definizione
modello di
calcolo

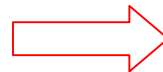
Definizione del
modello di calcolo

Analisi di
stabilità

Analisi di stabilità

Interventi

Interventi



Tubi drenanti, soil nailing
graticcio tirantato,
monitoraggio a lungo
termine, ...



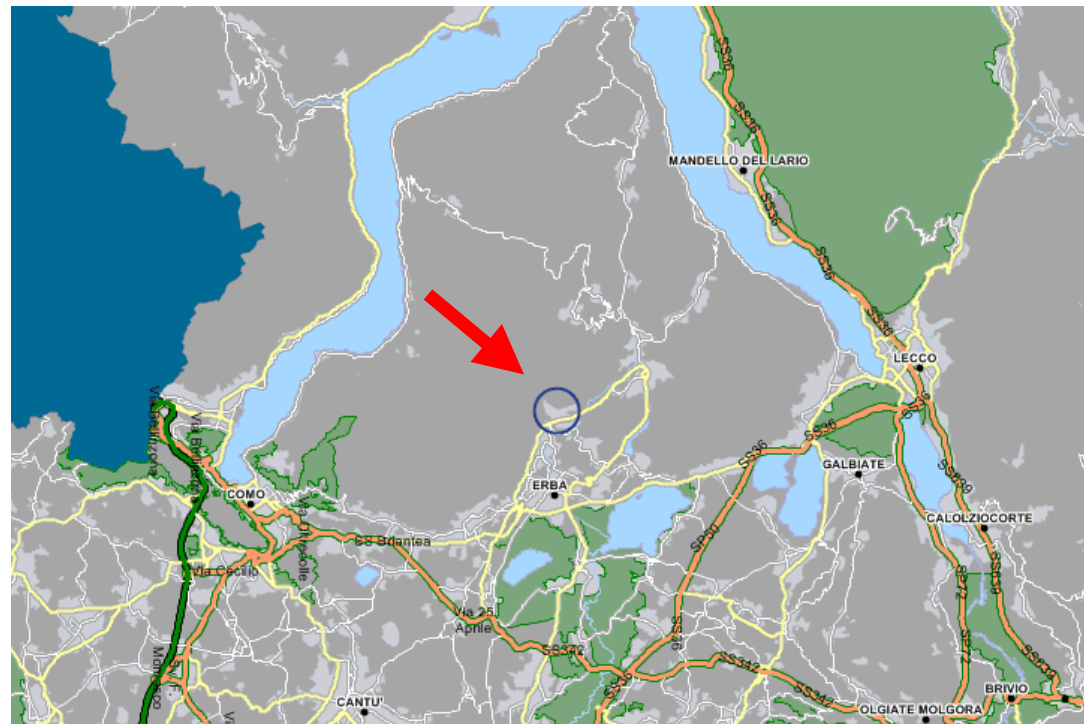
Inquadramento geologico-strutturale

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



Formazioni risalenti al Giurassico, di carattere calcareo (calcari marnosi e selciferi). Gran parte del TL è stata ricoperta dai ghiacciai pleistocenici, e tutta la zona si presenta ammantata da diffusi depositi glaciali.



Inquadramento geologico-strutturale

**Rilievo
geologico**

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Inquadramento geologico-strutturale

**Rilievo
geologico**

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Inquadramento geologico-strutturale

**Rilievo
geologico**

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Inquadramento geologico-strutturale

**Rilievo
geologico**

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Inquadramento geologico-strutturale

**Rilievo
geologico**

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Inquadramento geologico-strutturale

**Rilievo
geologico**

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Inquadramento geologico-strutturale

**Rilievo
geologico**

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



Orizzonte alterato, venute d'acqua (3-4 l/s)



Inquadramento geologico-strutturale

**Rilievo
geologico**

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



Presenza di blocchi instabili



**Rilievo
geologico**

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

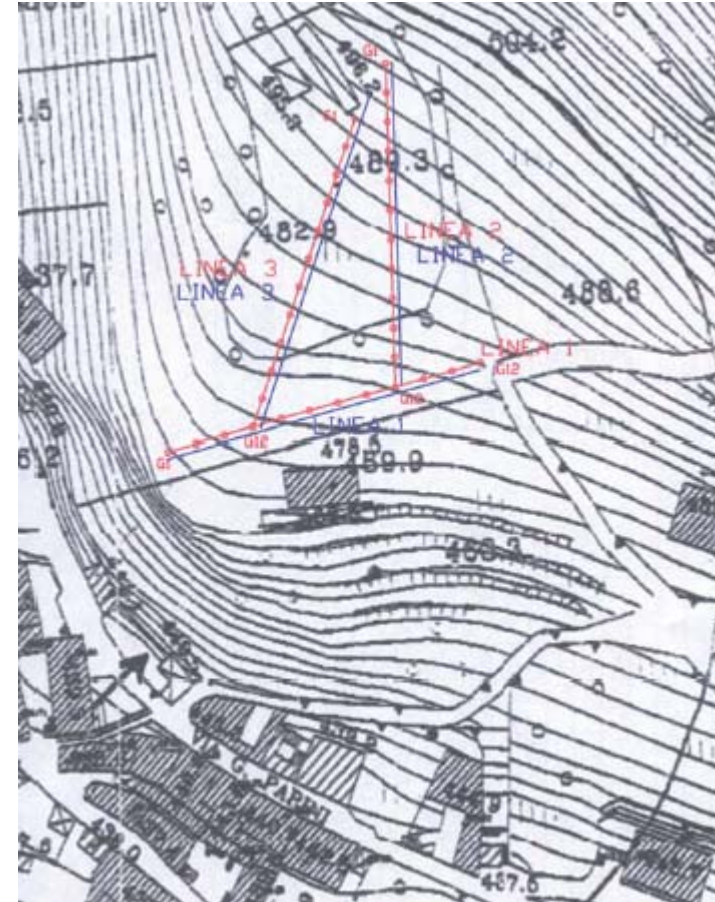
Interventi

Indagini geognostiche

3 stendimenti
(sismica a riflessione)

3 stendimenti
(tomografie elettriche)

Una perforazione suboriz-
zontale alla base del pendio





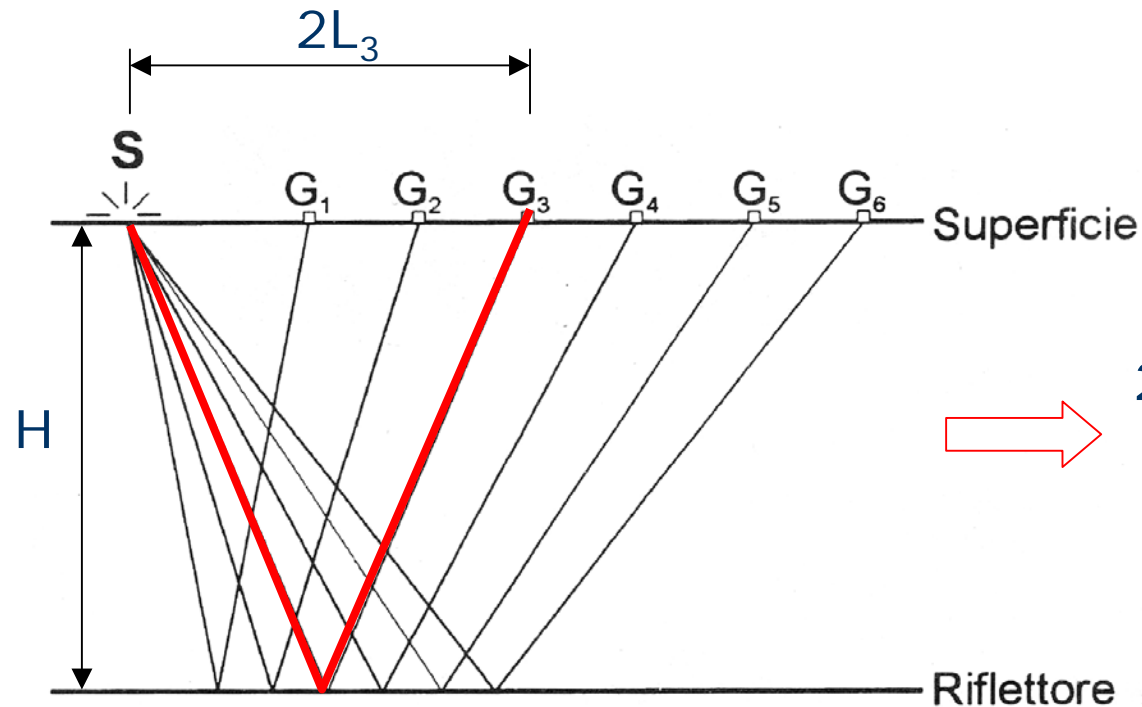
Sismica a riflessione

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



2 incognite:
 V_p e H

$$V_P = \frac{2\sqrt{H^2 + L_i^2}}{T_i} \quad i = 1, 2 \dots N$$



Sismica a riflessione

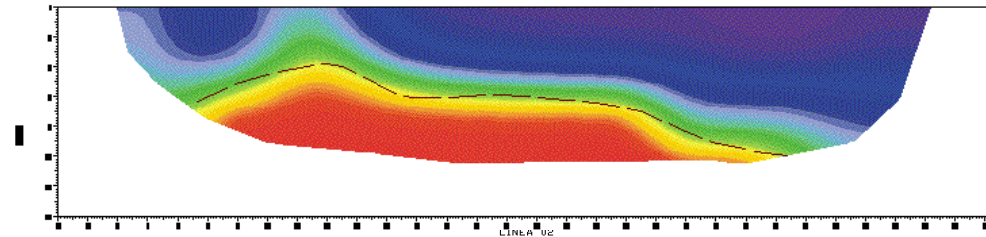
Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

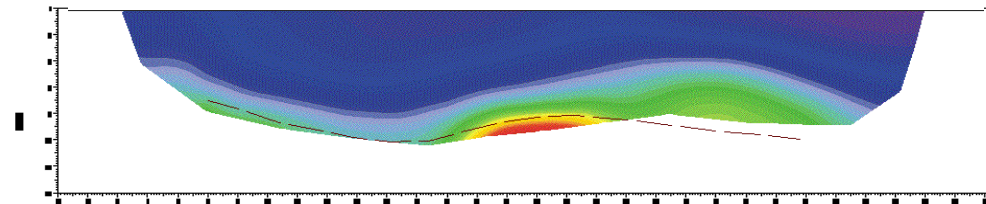
Analisi di
stabilità

Interventi

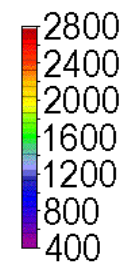
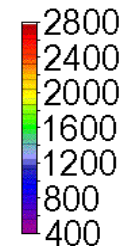
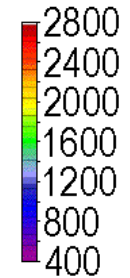
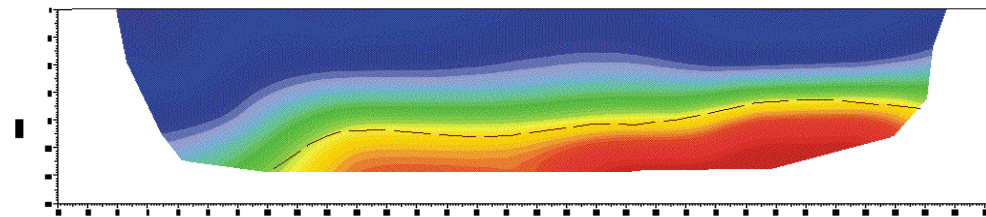
L1



L2



L3



Substrato roccioso ($V_p=2,6$ km/s), coperto da un deposito sciolto ($V_p\approx 150$ m/s) di materiale di origine glaciale e/o da alterazione del substrato roccioso



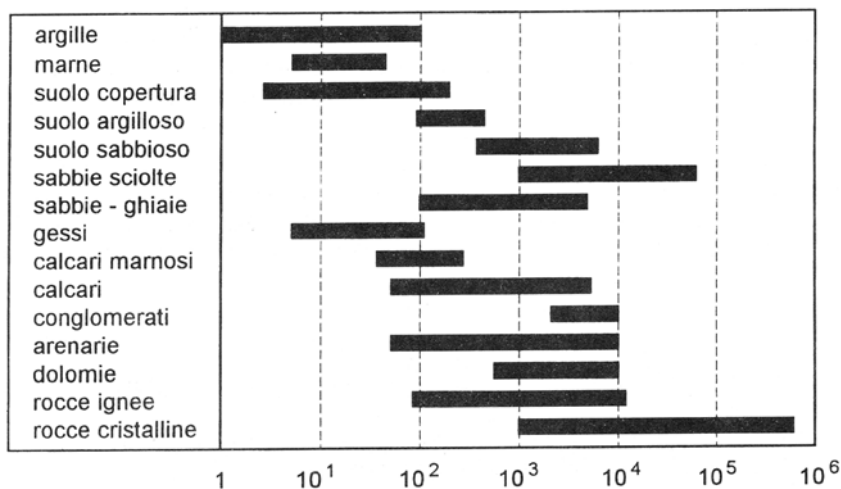
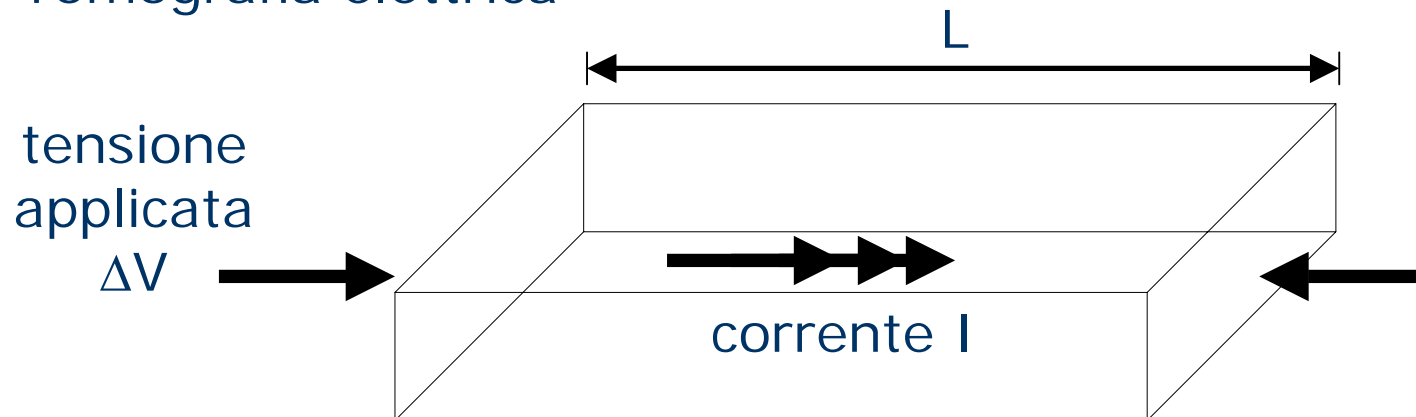
Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Tomografia elettrica



Resistività (Ωm) tipici per alcuni materiali geologici

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad R = \rho \frac{L}{A}$$

$\rho = f(\text{litologia, porosità, contenuto d'acqua})$



Rilievo
geologico

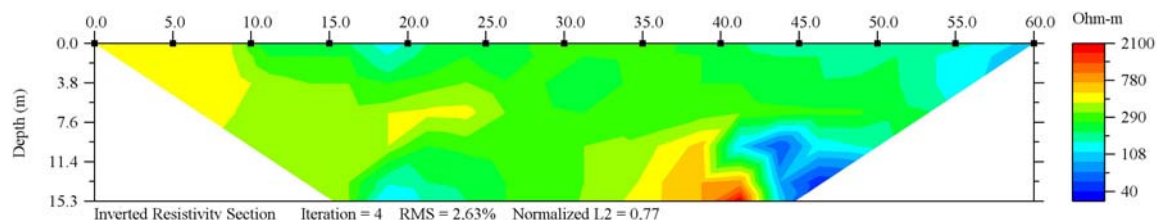
Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

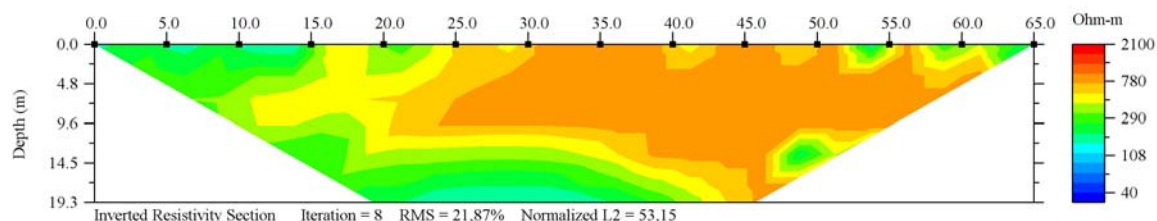
Interventi

Tomografia elettrica

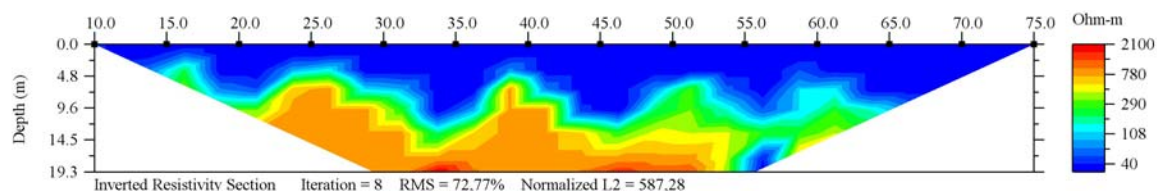
L1



L2



L3



La tomografia elettrica conferma quanto rilevato dalla sismica, ed evidenzia che il deposito superficiale è attualmente caratterizzato da un contenuto d'acqua molto basso



Sondaggio orizzontale

**Rilievo
geologico**

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Sondaggio orizzontale

**Rilievo
geologico**

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Sondaggio orizzontale

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



Strato di materiale fine, saturo, tra m 4 e 5.

Impossibile andare oltre il m 6



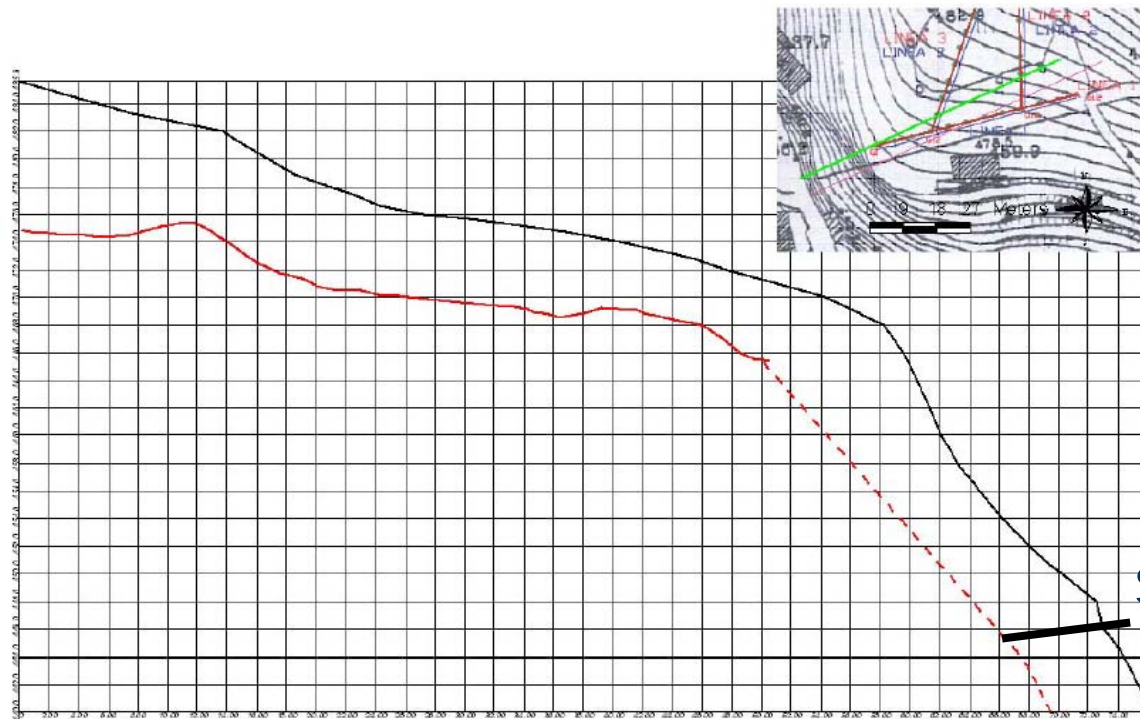
Definizione stratigrafia

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



Sondaggio

Substrato roccioso alla profondità di 8-10 metri, ricoperto da materiale grossolano in matrice limoso-argillosa.



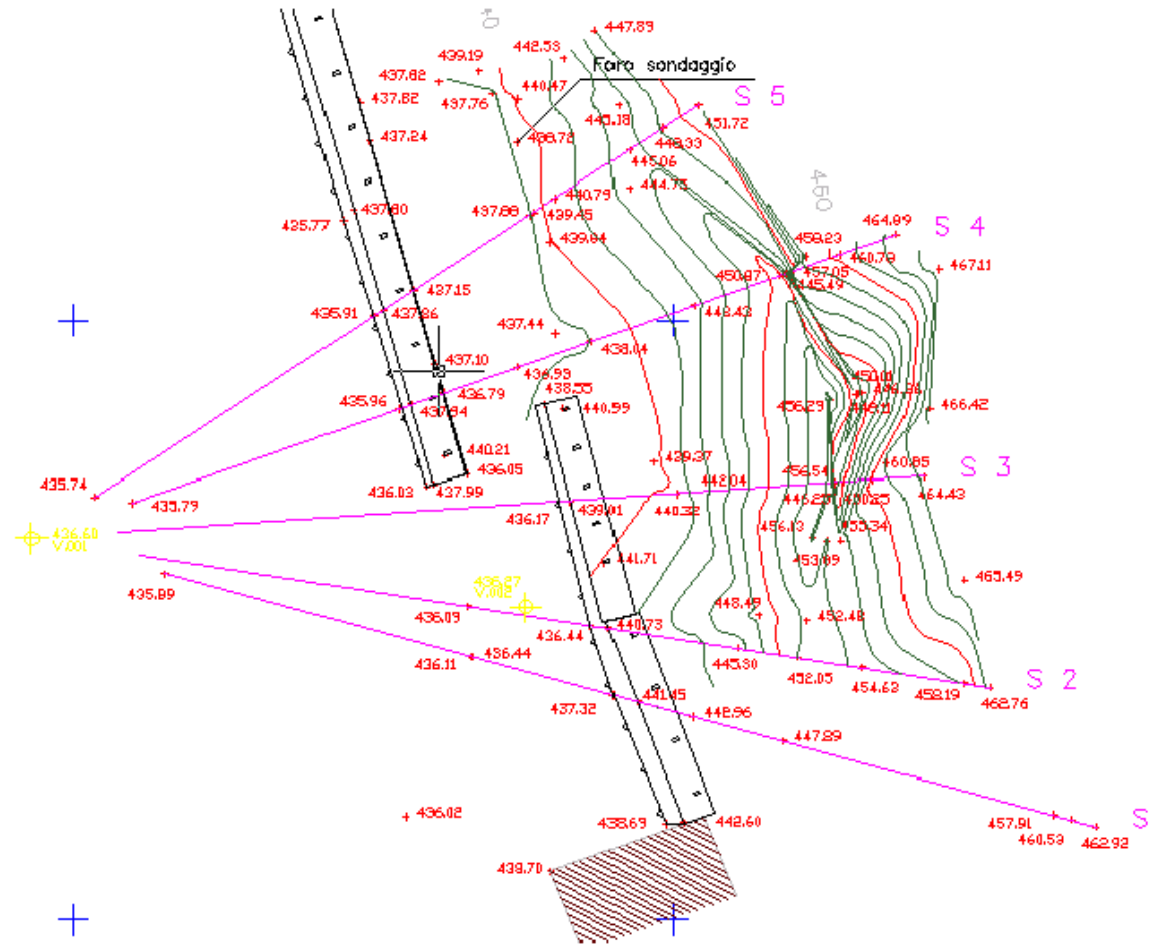
Rilievo topografico tradizionale

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





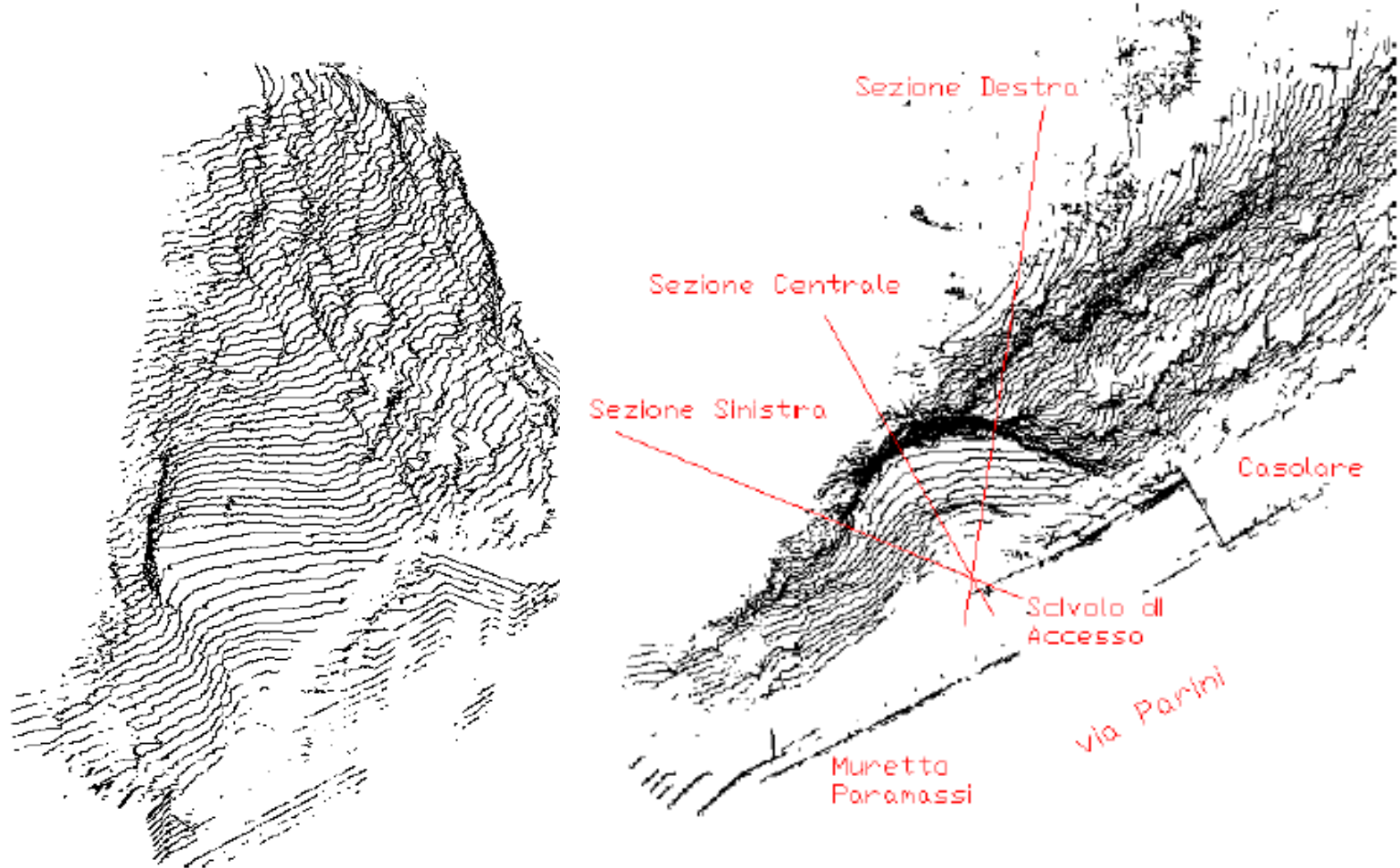
Rilievo topografico mediante laser scanner 3D

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





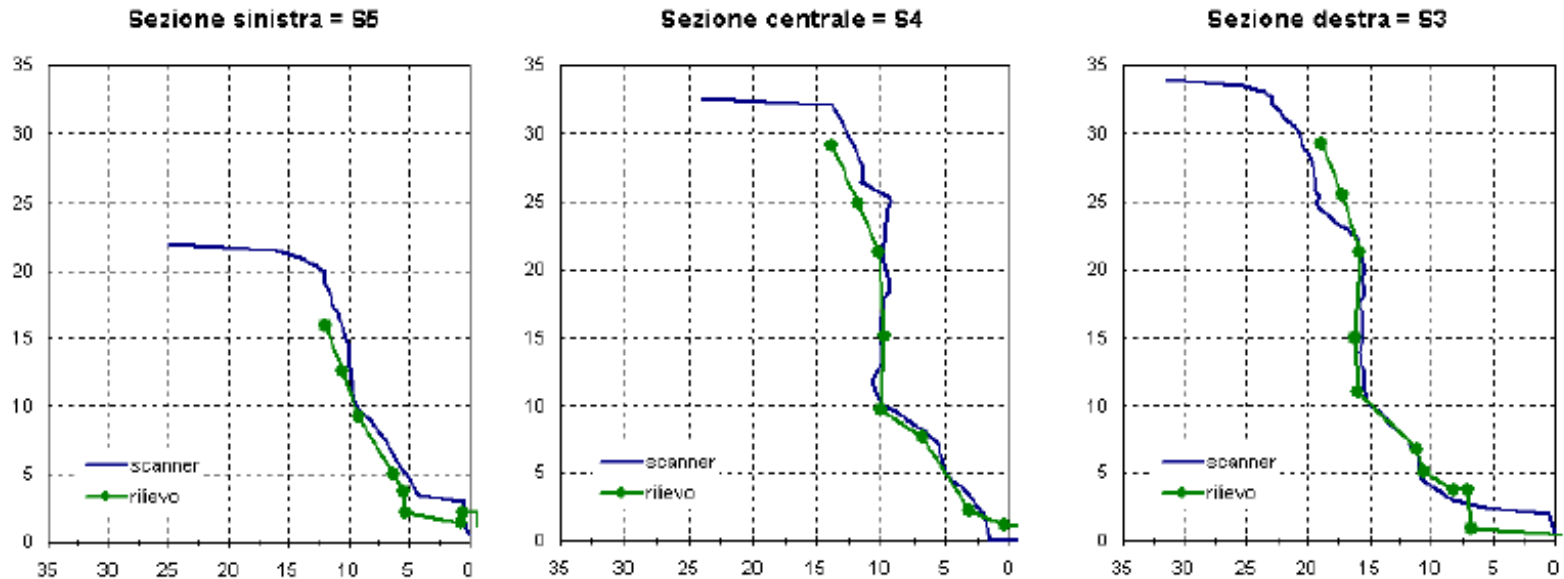
Estrazione sezioni di controllo

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



Si sceglie come significativa la sezione centrale (S4), in quanto caratterizzata da un certo aggrottamento.



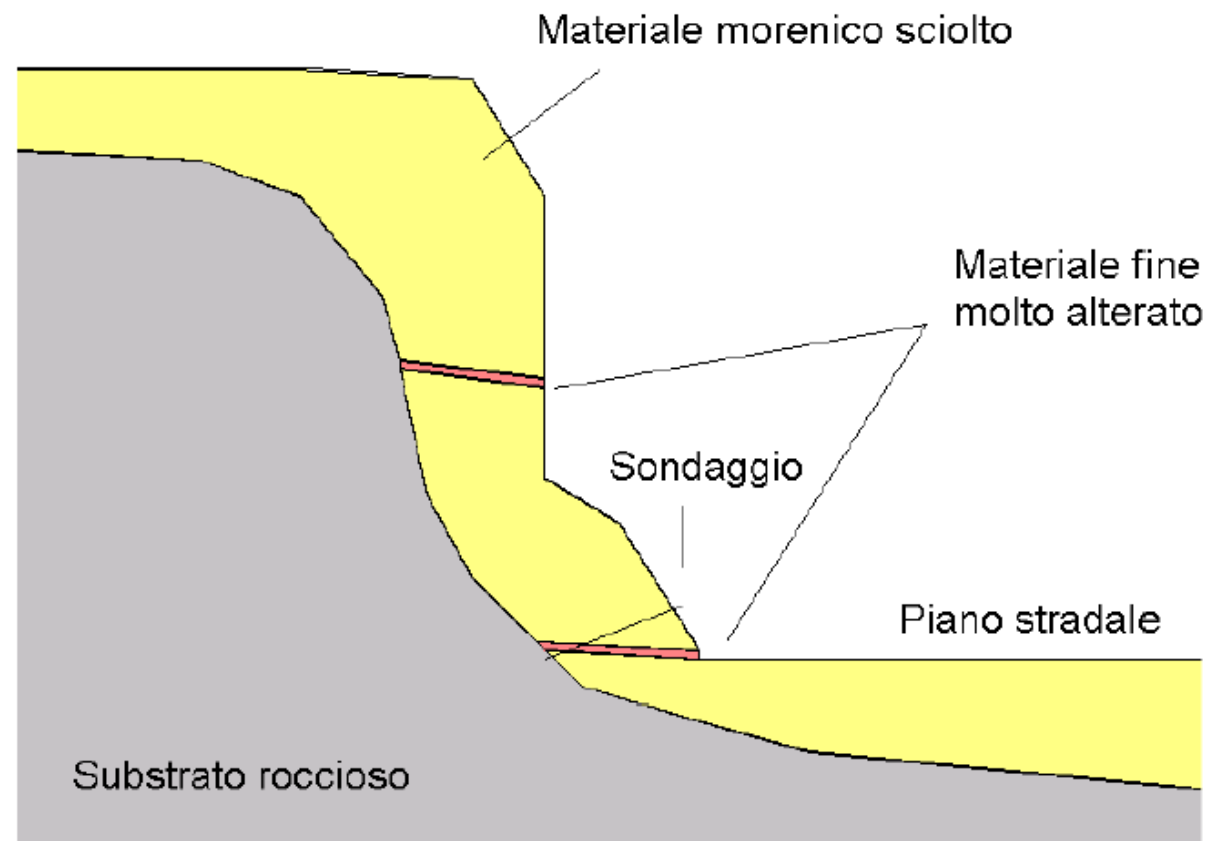
Definizione della sezione di riferimento

Rilievo
geologico

**Definizione
modello di
calcolo**

Analisi di
stabilità

Interventi





Caratterizzazione meccanica dei materiali (Granulometria)

Rilievo
geologico

**Definizione
modello di
calcolo**

Analisi di
stabilità

Interventi



Determinazione della
curva granulometrica
per setacciatura e
deposizione (mediante
densimetro).





Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Caratterizzazione meccanica dei materiali

(Granulometria)

campione 1

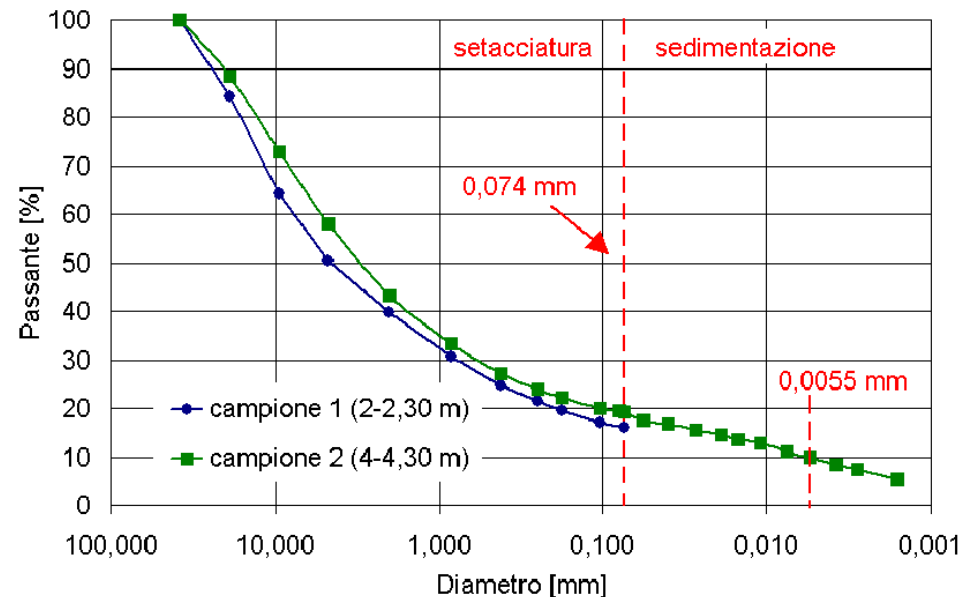
profondità = 2m

(materiale morenico)

campione 2

profondità = 4m

(materiale fine)



I due campioni hanno curve granulometriche molto simili, e possono essere classificati come *pietriscio fine in matrice limosa*.

Il campione 2 ha una % di fine leggermente maggiore.



Caratterizzazione meccanica dei materiali (Permeabilità)

Rilievo geologico

Definizione modello di calcolo

Analisi di stabilità

Interventi

In base alla relazione di Hazen: $k [cm / s] = 100 \cdot D_{10}^2 [cm]$

$$k_1 = 10^{-6} \text{ m/s;}$$

$$k_2 = 10^{-7} \text{ m/s}$$

k (m/s)	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
<i>Drenaggio</i>	buono				povero				praticamente impermeabile			
	ghiaia pulita		sabbia pulita e miscele di sabbia e ghiaia pulita			sabbia fine, limi organici e inorganici, miscele di sabbia, limo e argilla, depositi di argilla stratificati			terreni impermeabili, argille omogenee sotto la zona alterata dagli agenti atmosferici			



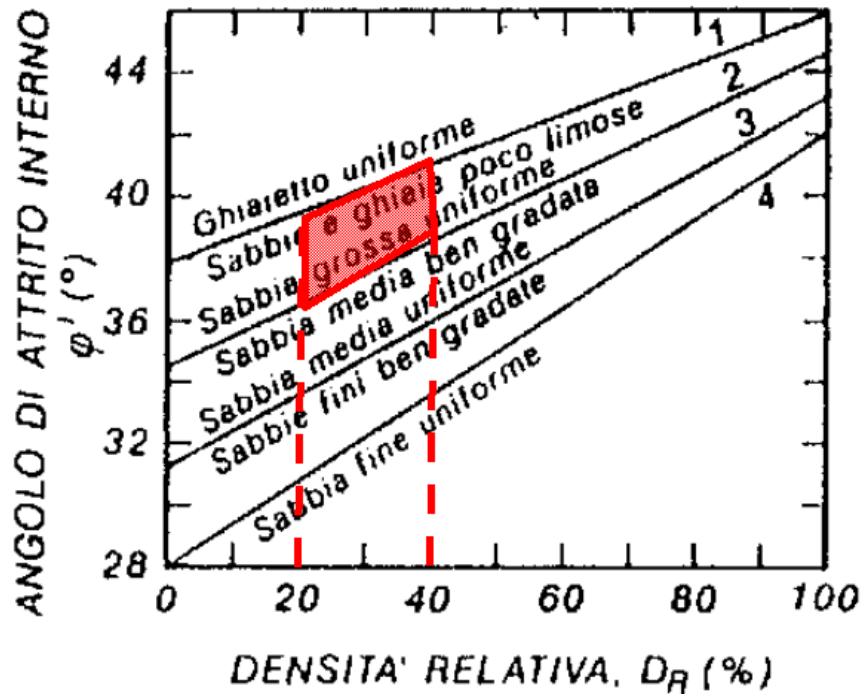
Caratterizzazione meccanica dei materiali (Resistenza e deformabilità)

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



$38^\circ \leq \phi \leq 40^\circ$

Schmertmann (1977)



Caratterizzazione meccanica dei materiali (Resistenza e deformabilità)

Rilievo geologico

Definizione modello di calcolo

Analisi di stabilità

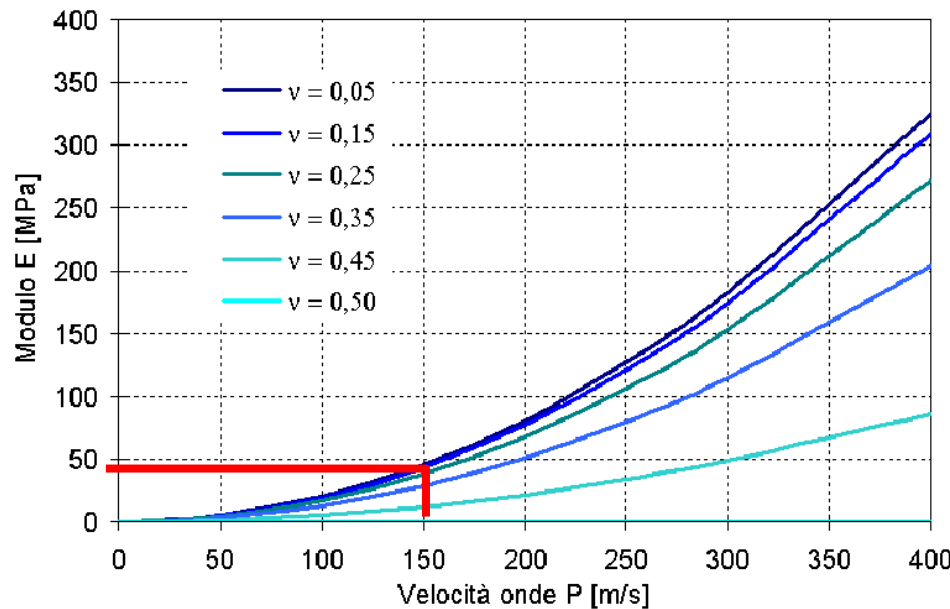
Interventi

Assumendo: $\rho = 2 \text{ t/m}^3$

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$



→ $E \approx 40 \text{ Mpa}$
 $E \approx 400 \text{ kg/cm}^2$



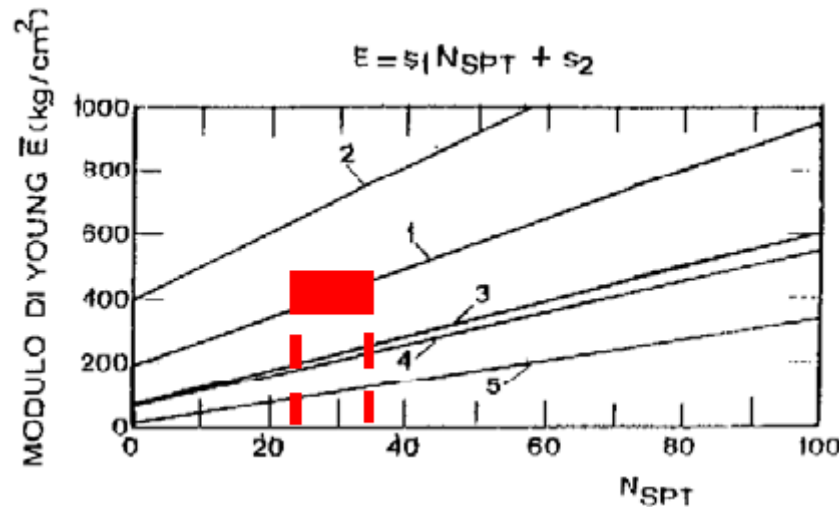
Caratterizzazione meccanica dei materiali (Resistenza e deformabilità)

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

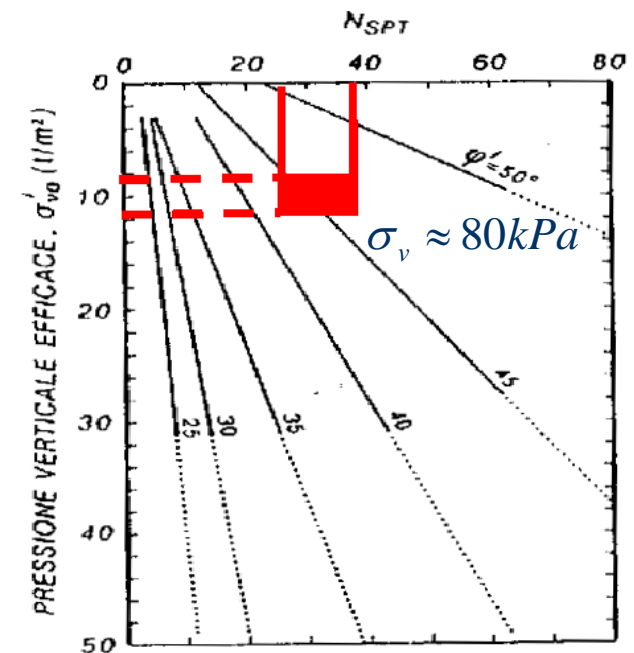
Analisi di
stabilità

Interventi



- 1) sabbia e ghiaia NC
- 2) sabbia NC
- 4) sabbia satura
- 5) sabbia argillosa

Denver (1982)



De Mello (1971)



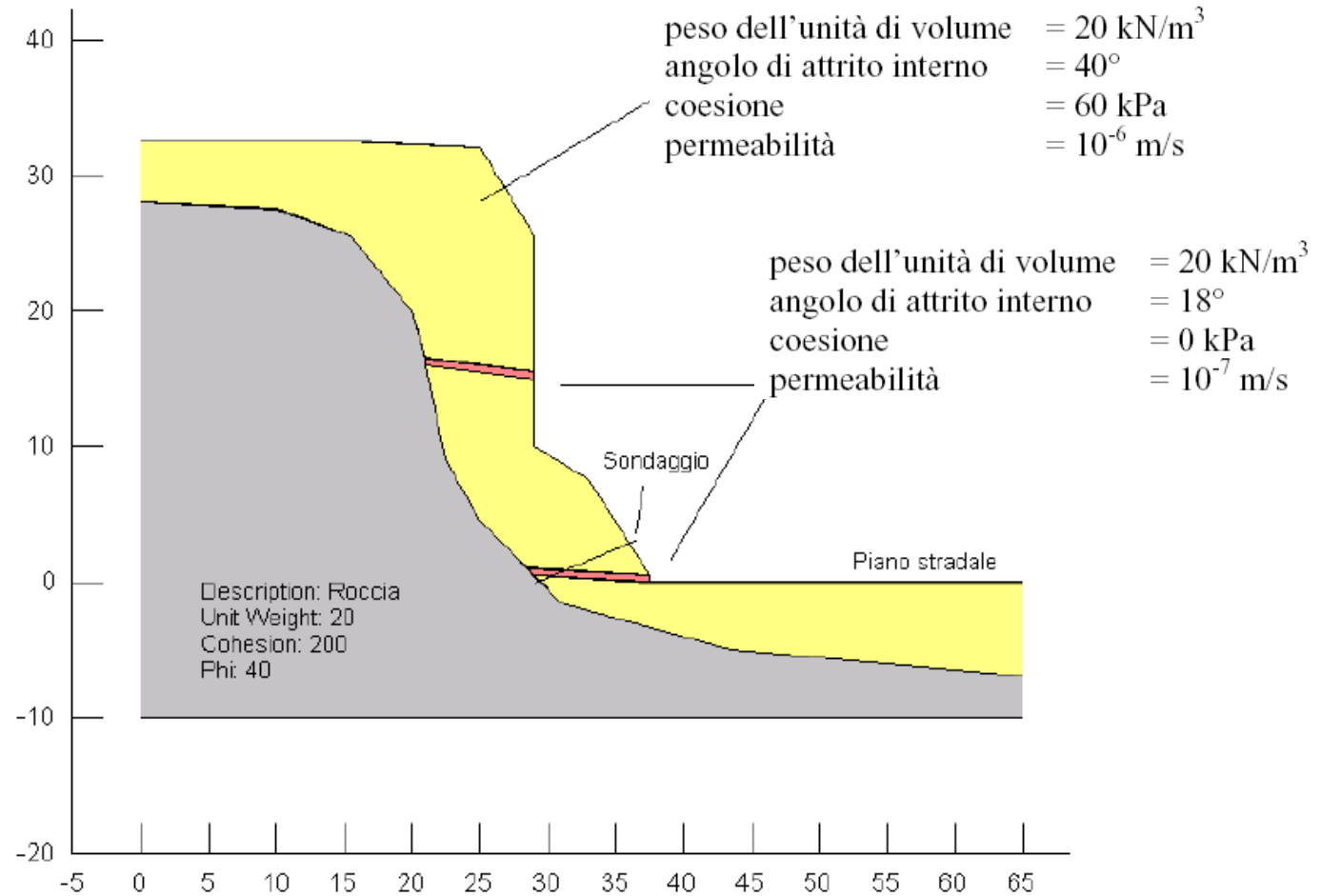
Modello Geotecnico 2D

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





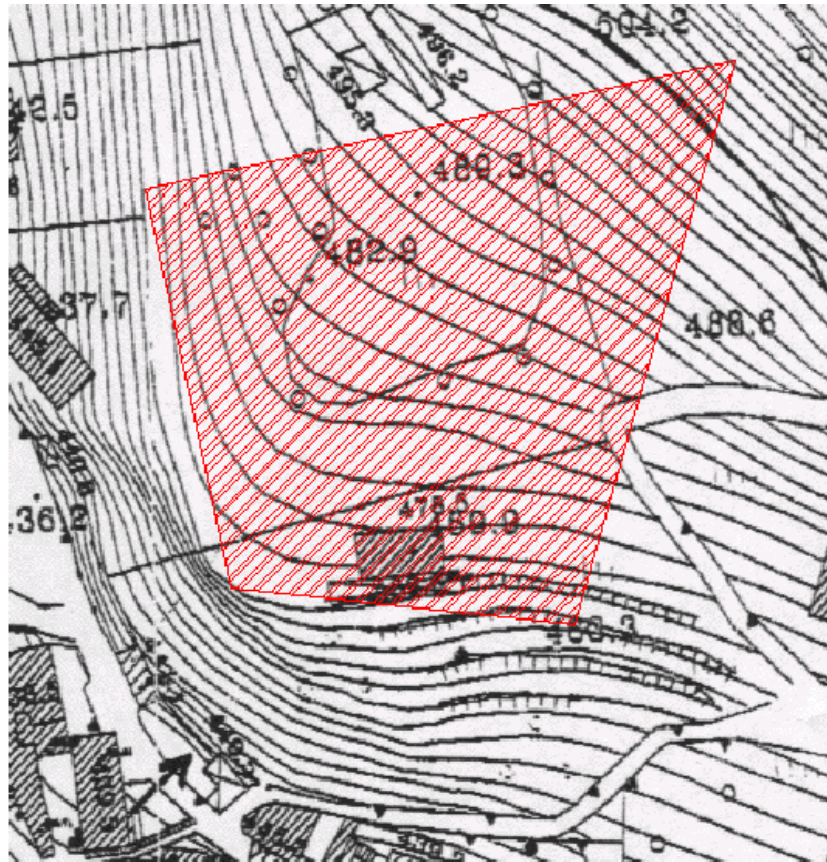
Circolazione idrica nel versante

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

**Analisi di
stabilità**

Interventi



Area di impluvio = 4500 m²

Fronte ≈ 100 m

Altezza di pioggia = 400
mm/mese (Nov, 2000)

Portata stimata = 10⁻⁵ m³/s,
per ogni metro lineare di
fronte



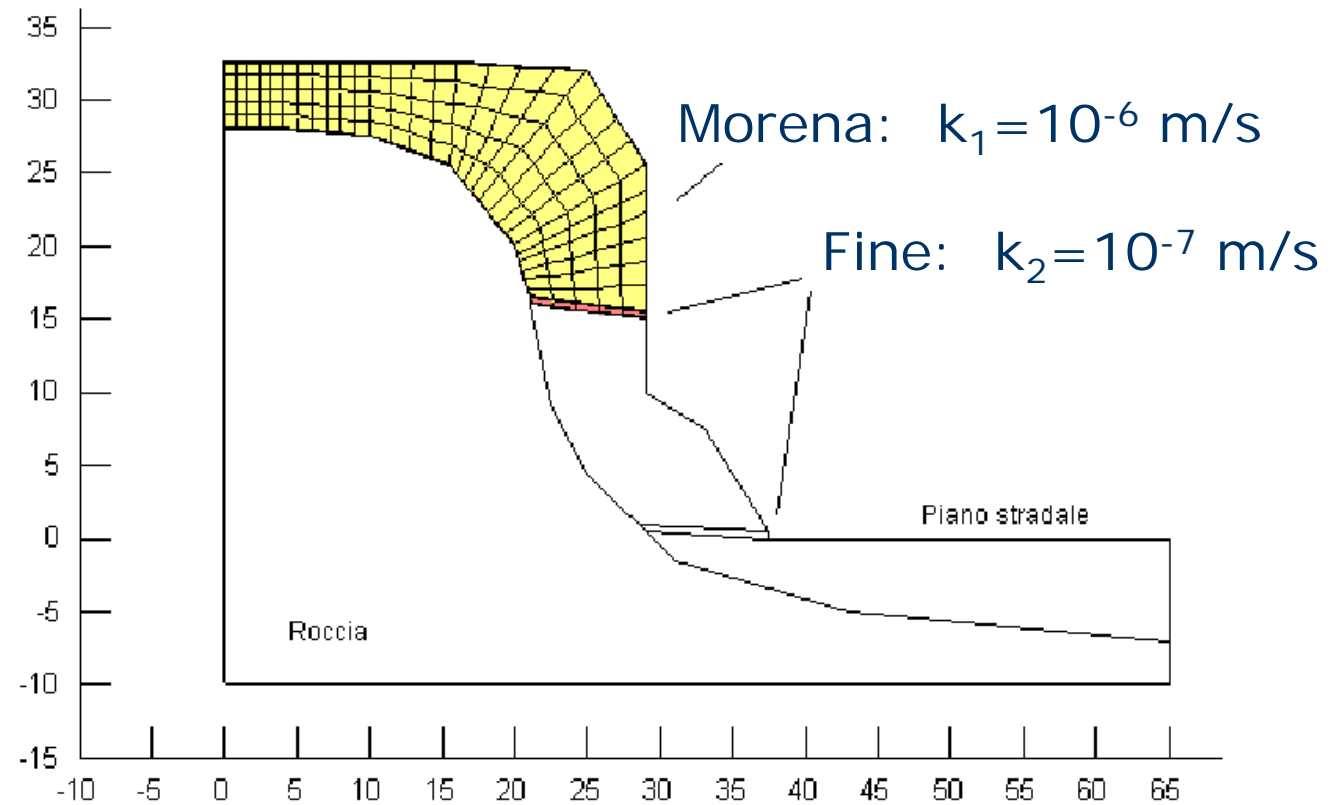
Circolazione idrica nel versante - simulazioni FEM 2D

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

**Analisi di
stabilità**

Interventi





Rilievo
geologico

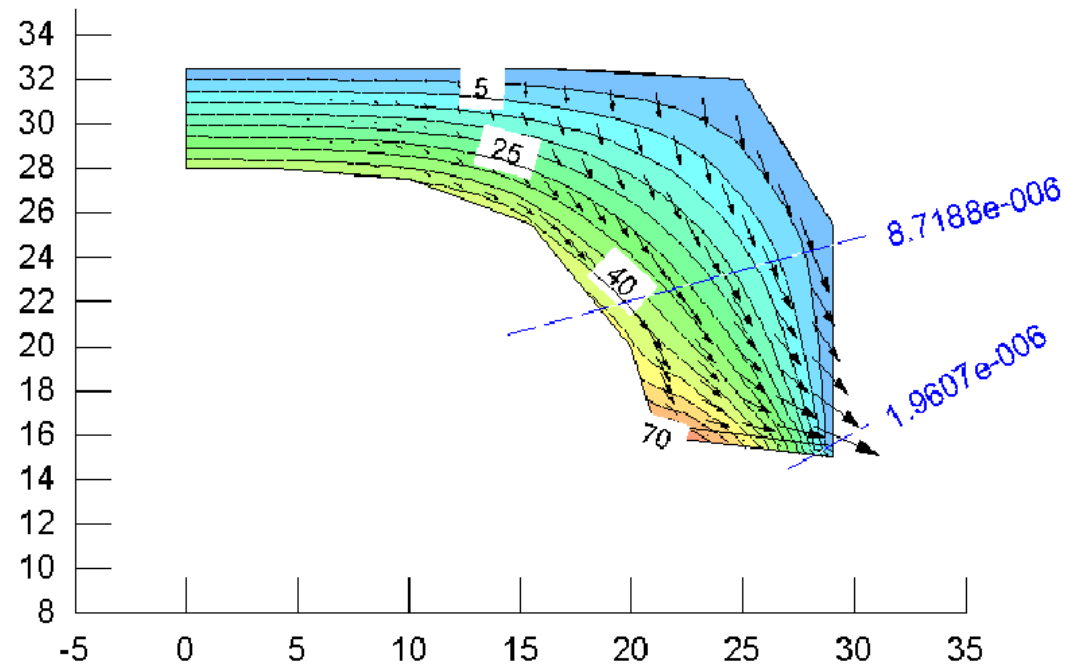
Definizione
modello di
calcolo

**Analisi di
stabilità**

Interventi

Circolazione idrica nel versante - simulazioni FEM 2D

1) Strato fine poco permeabile



Elevate pressioni alla base, venute d'acqua diffuse sulla parete



Rilievo
geologico

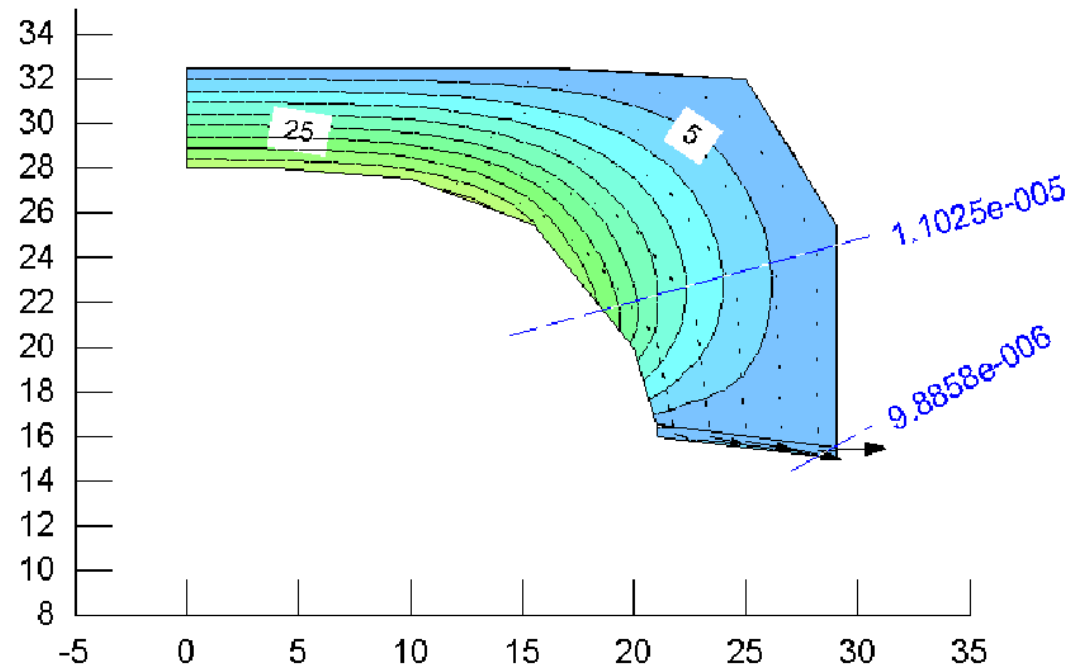
Definizione
modello di
calcolo

**Analisi di
stabilità**

Interventi

Circolazione idrica nel versante - simulazioni FEM 2D

2) Inserimento di un orizzonte drenante



Pressioni nulle alla base, venute d'acqua concentrate

Si ritiene necessario inserire dei tubi drenanti.



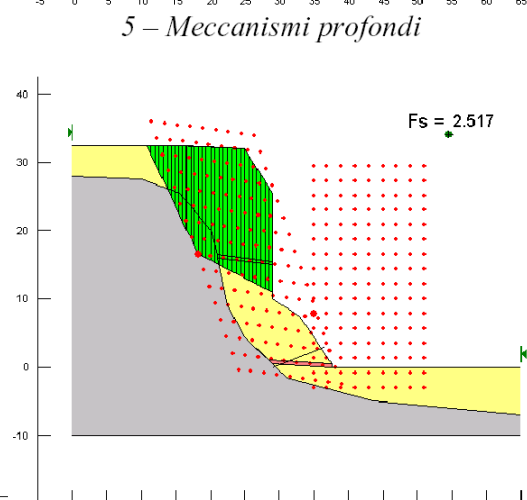
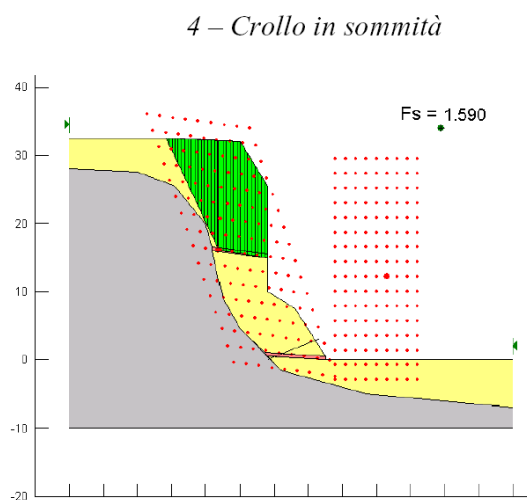
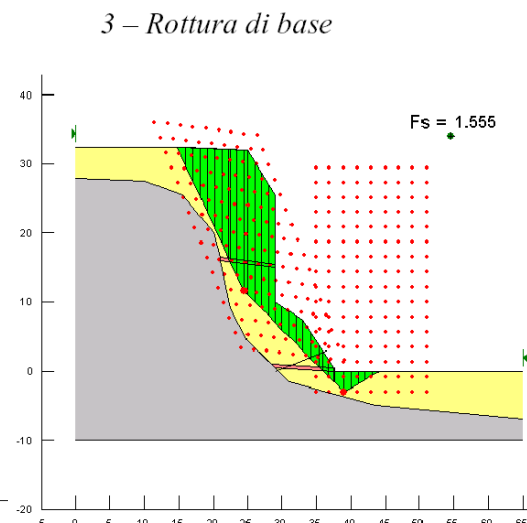
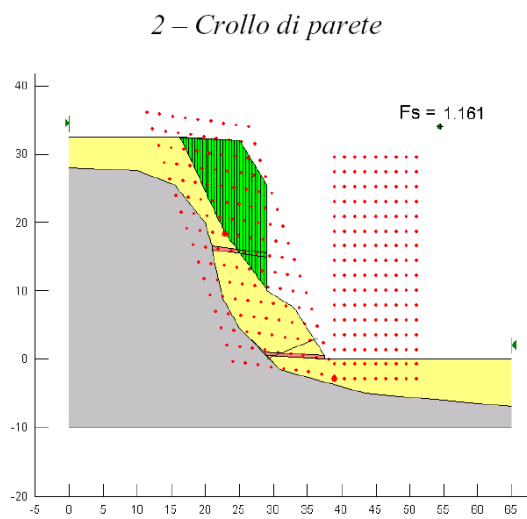
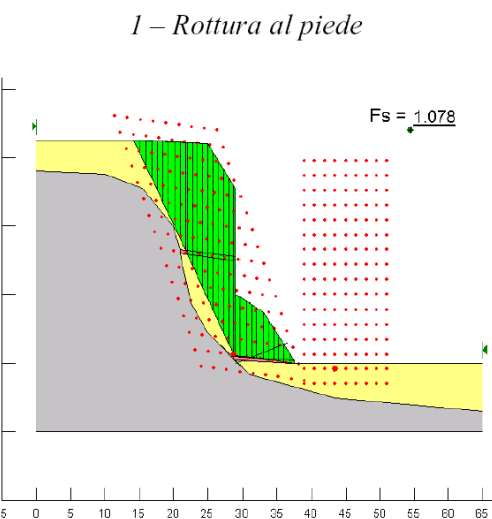
Analisi di stabilità – Metodo dei conci (Janbu)

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



Possibile rottura
al piede ($F_s \approx 1$),
con scivolamento
sullo strato fine.

$\text{Vol} \approx 110\text{m}^3/\text{m}$



Analisi di stabilità – Valutazione delle spinte

Per valutare la spinta di progetto, in accordo con l'EC7:

$$\tan \phi_d = \frac{\tan \phi}{1.25} \Rightarrow \phi_d = 35^\circ \quad c'_d = \frac{c'}{1.6} = 37.5 \text{ kPa} \approx 30 \text{ kPa}$$

Spinta = 2550 kN/m

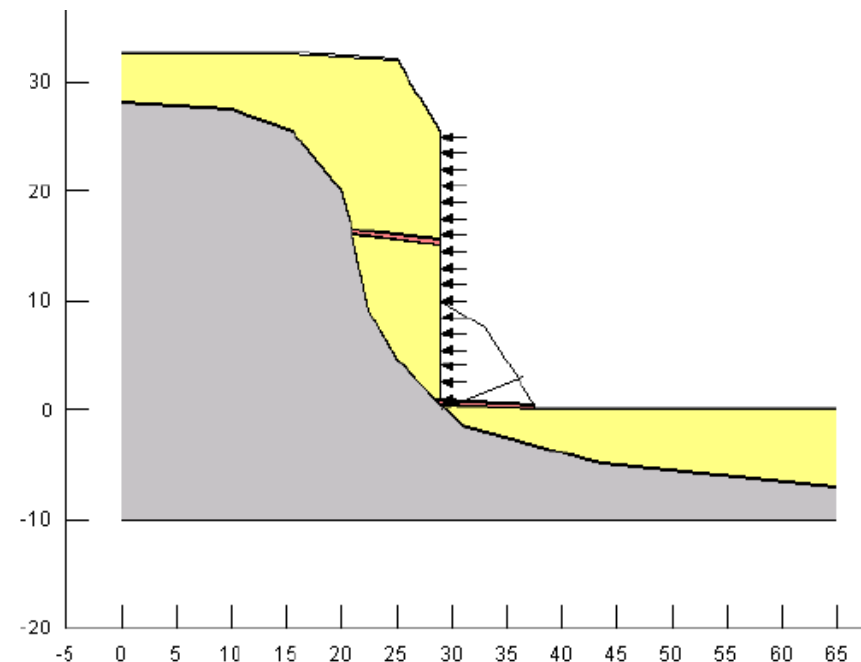
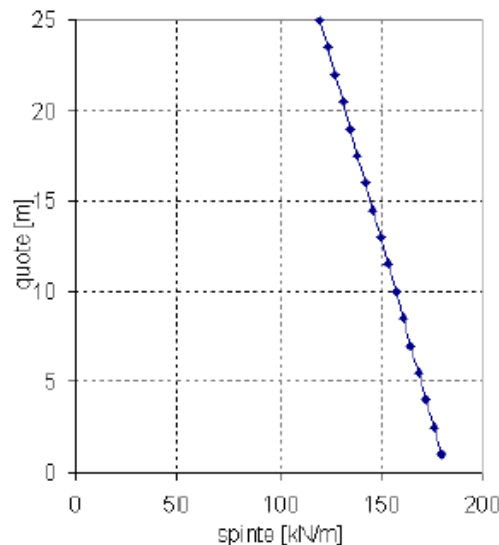
Punto di applicazione = 12,1 m

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Analisi di stabilità – Verifica spinta di progetto

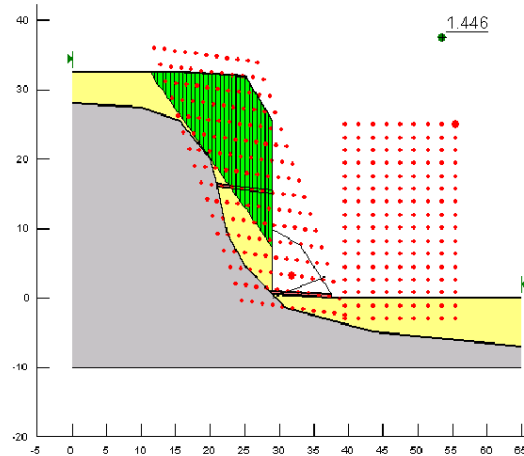
Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

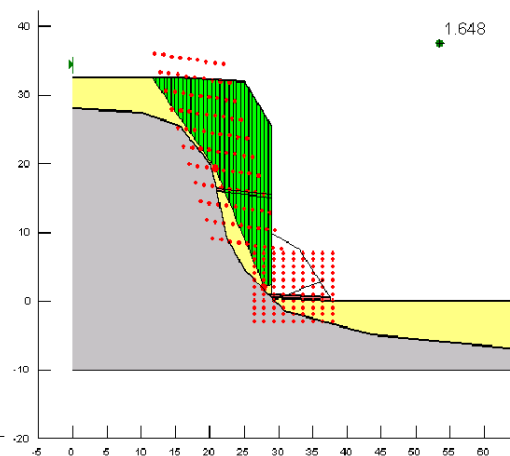
Analisi di
stabilità

Interventi

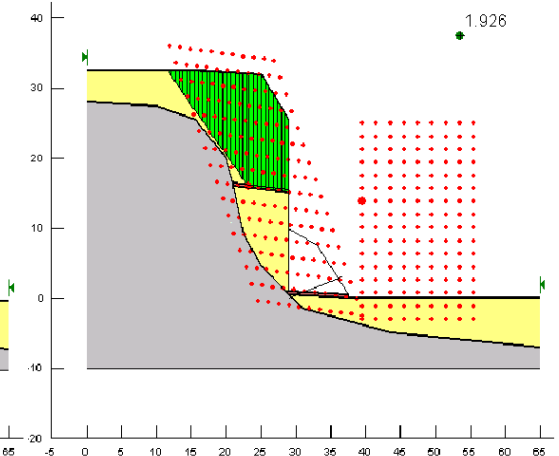
1 – Crollo di parete



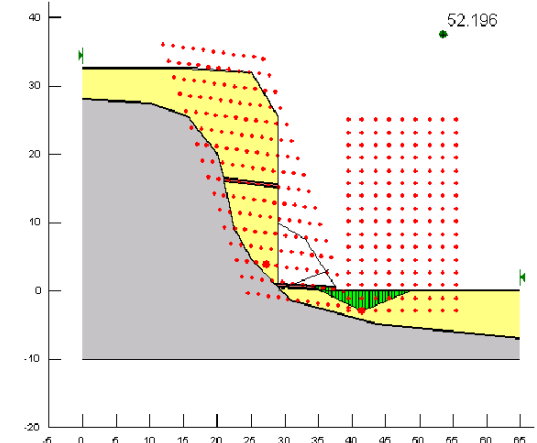
2 – Rottura al piede



3 – Crollo in sommità



4 – Rottura di base



Applicando le spinte di progetto si modificano i valori di F_s , e risultano tutti maggiori di 1,3

→ Il versante è in sicurezza



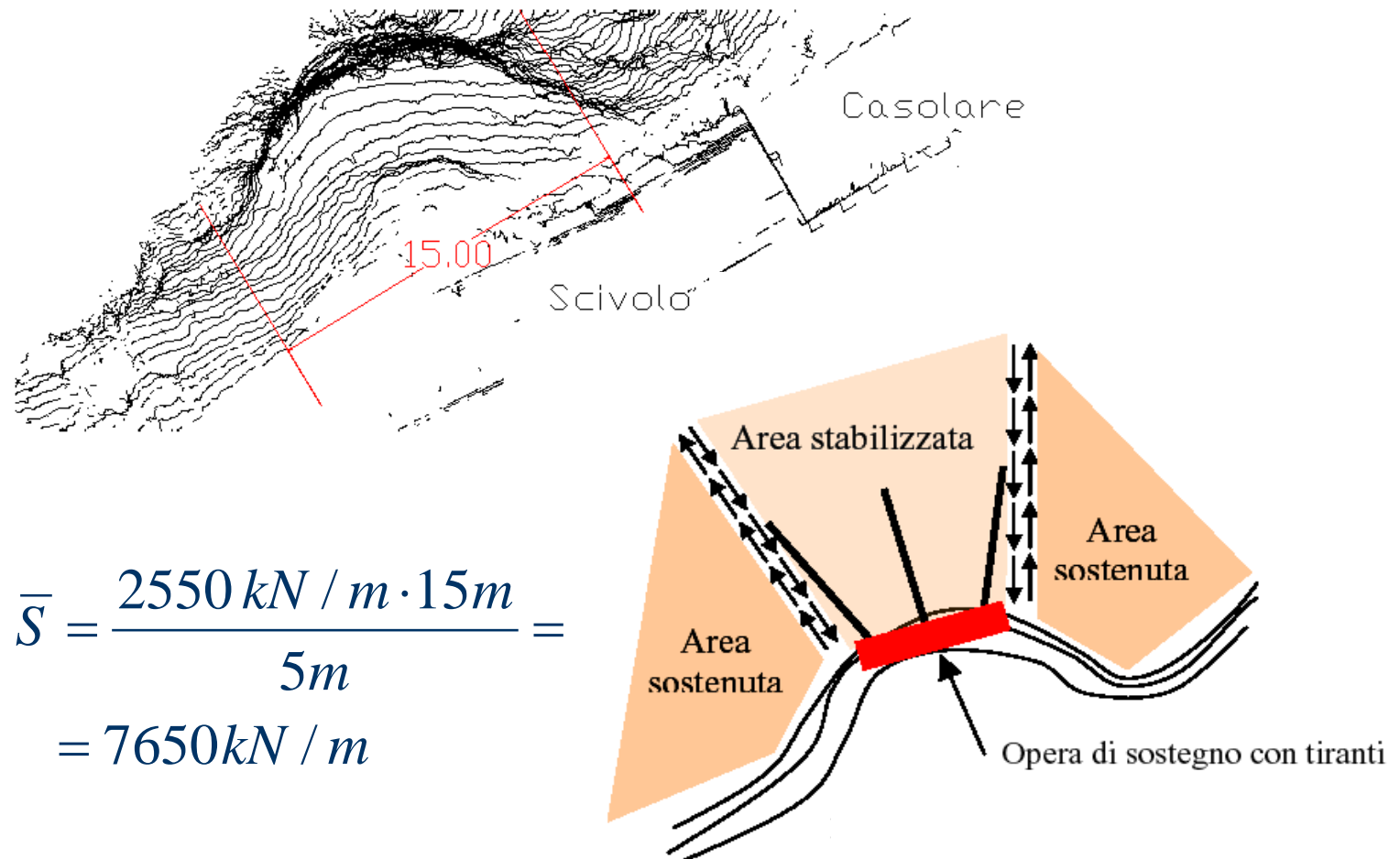
Analisi di stabilità – Effetto 3D

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

**Analisi di
stabilità**

Interventi



$$\bar{S} = \frac{2550 \text{ kN} / \text{m} \cdot 15 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 7650 \text{ kN} / \text{m}$$



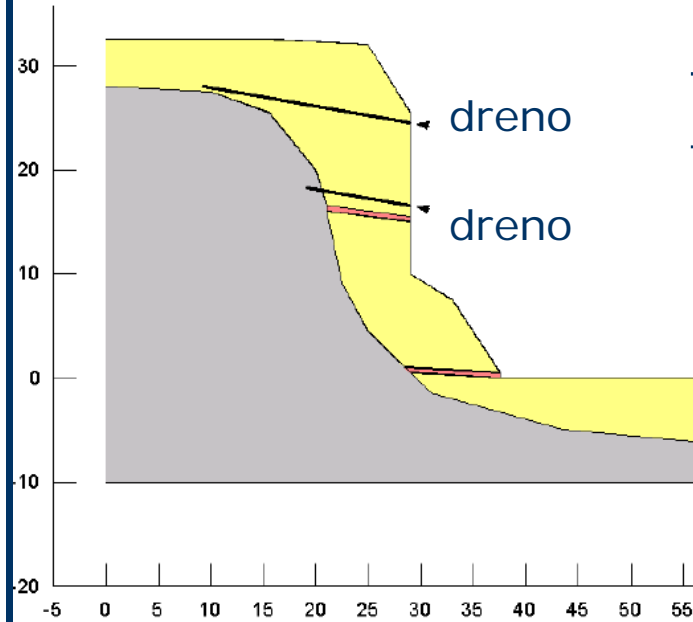
Interventi preliminari – tubi drenanti

Rilievo
geologico

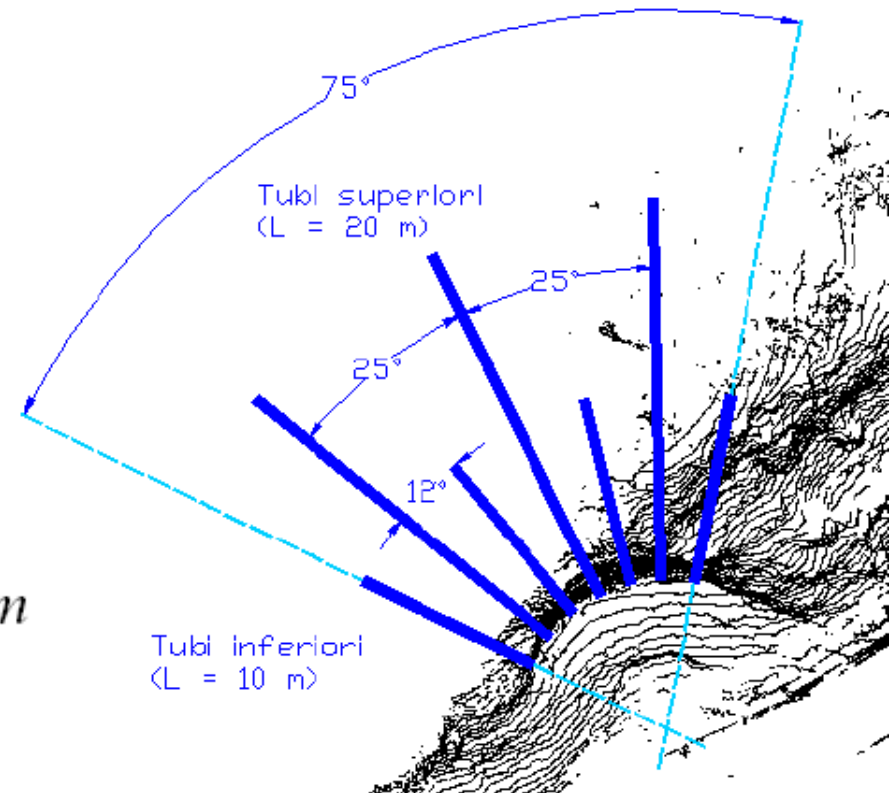
Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



Tubi in PVC
finestrati $\Phi 90$



Totale perforazione:
 $L = 3 \cdot 20m + 5 \cdot 10m = 110m$



Interventi preliminari – tubi drenanti

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Interventi preliminari – tubi drenanti

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Rilievo
geologico

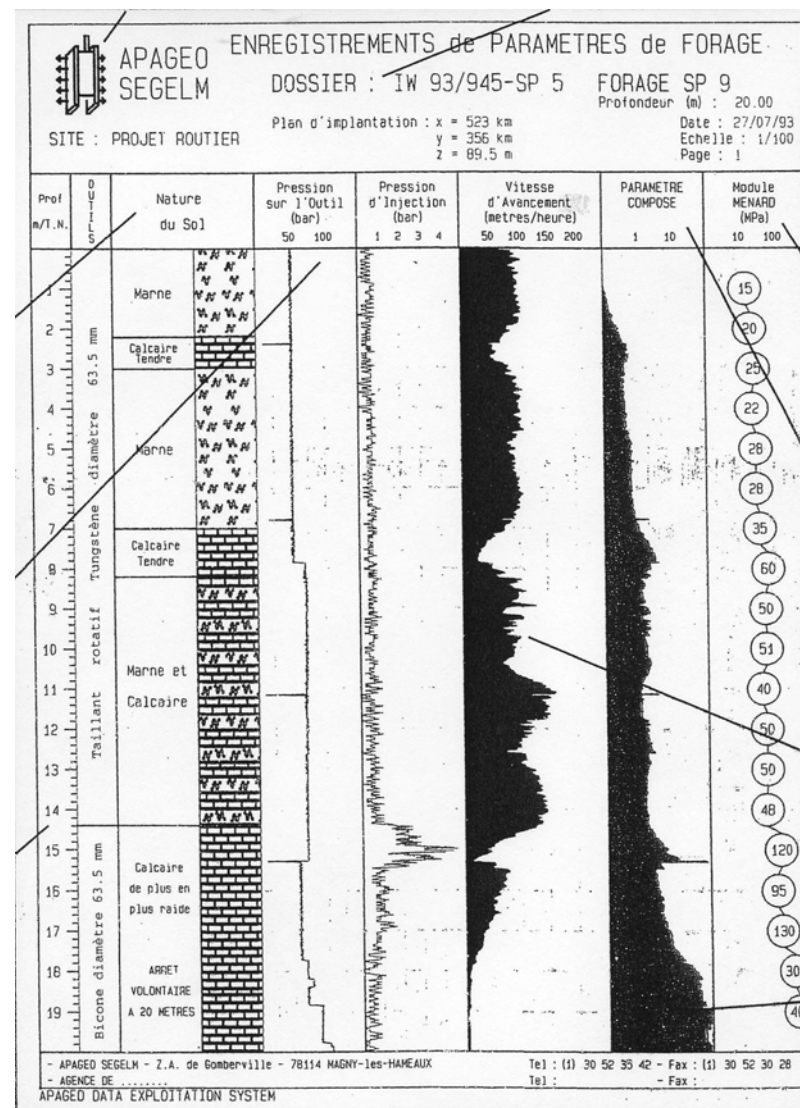
Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Parametri perforazione

1. Pressione sulla corona
2. Pressione del fluido di perforazione
3. Velocità avanzamento





Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

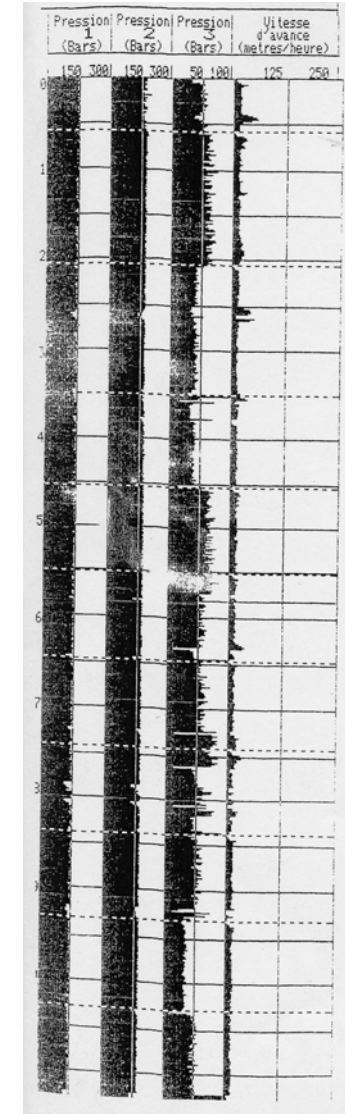
Analisi di
stabilità

Interventi

Parametri perforazione

Velocità di avanzamento e pressione fluido pressoché uniformi, a parte qualche orizzonte fratturato o eventuali trovanti.

La copertura ha proprietà meccaniche non trascurabili.





Interventi/1: Soil nailing

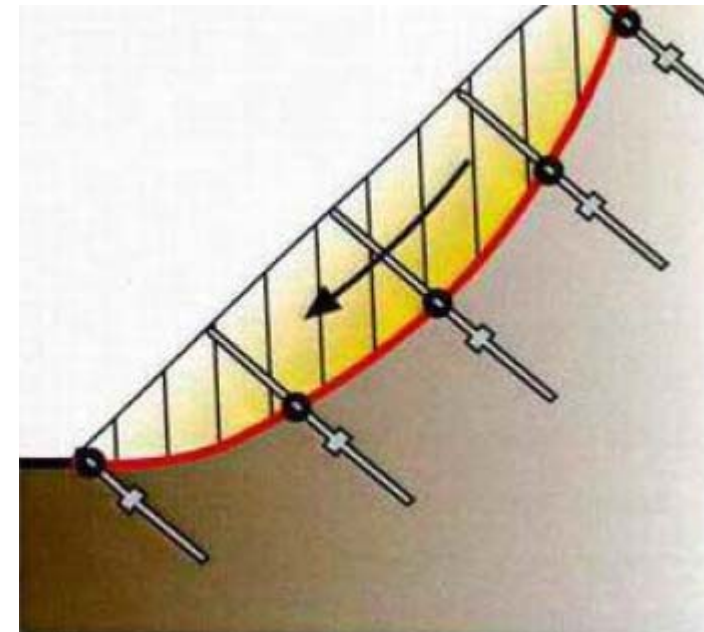
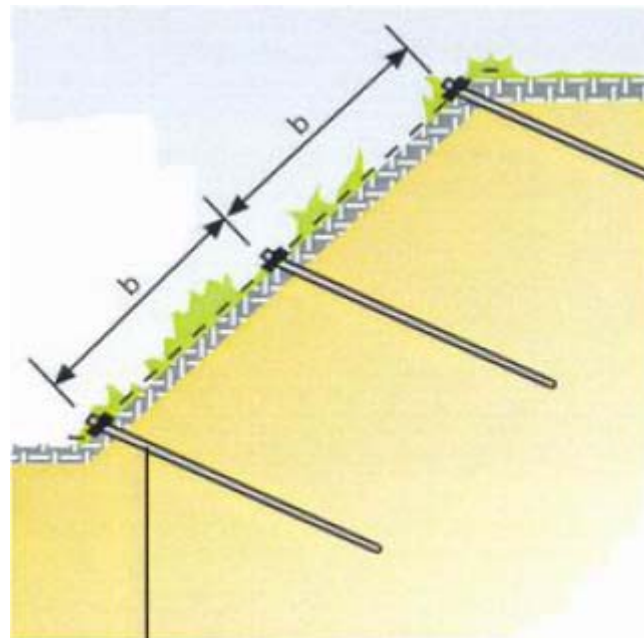
Rilievo
geologico

Si è valutata l'ipotesi di intervenire con soil mailing

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





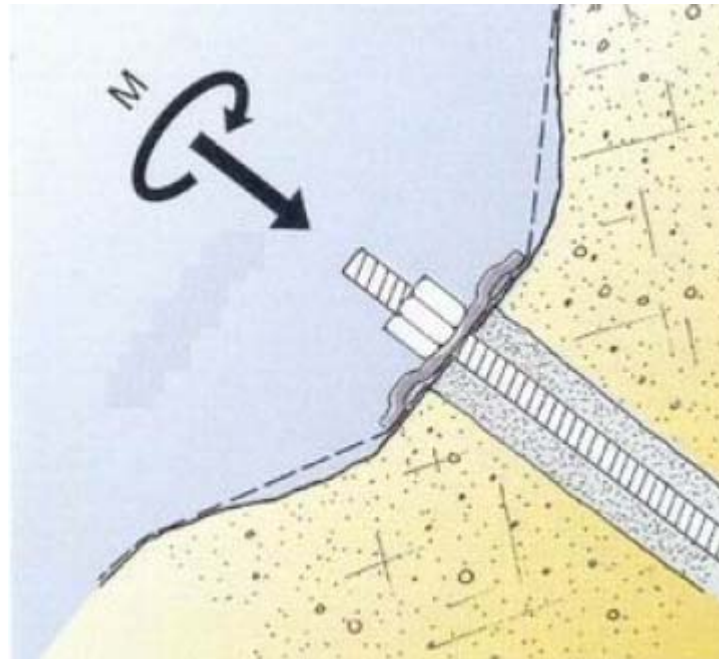
Interventi/1: Soil nailing

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



Chiodature +
piastre di distribuzione +
rete di contenimento



Interventi/1: Soil nailing

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Interventi/1: Soil nailing

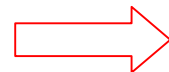
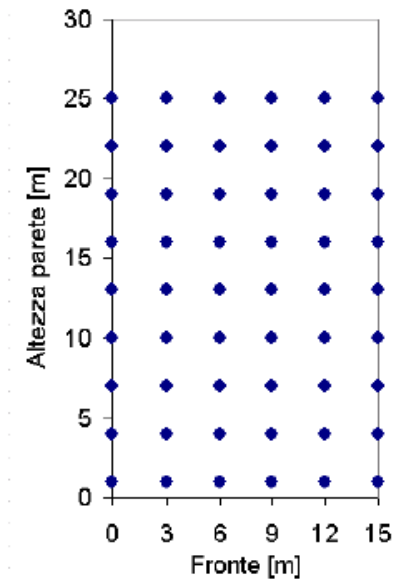
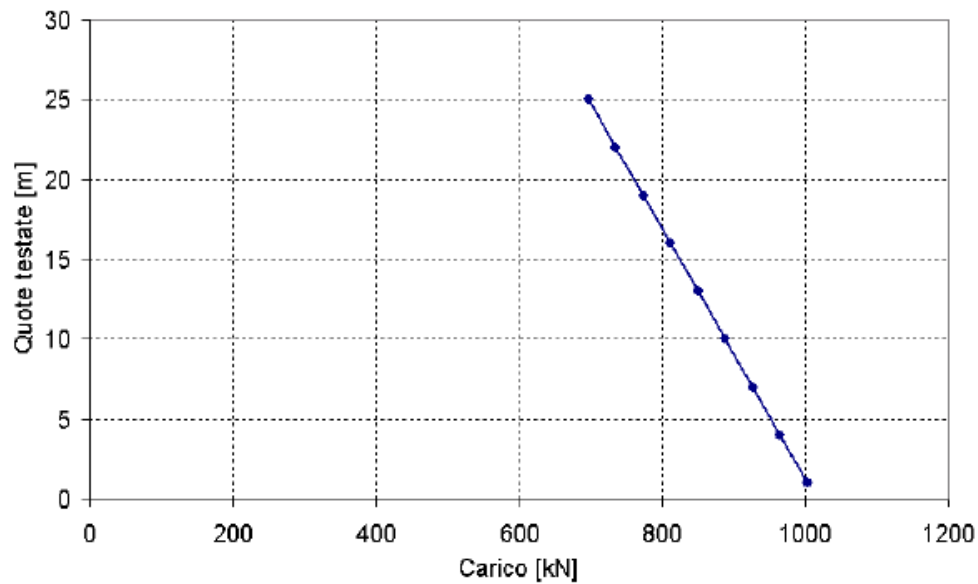
Posizionamento chiodi e tesatura delle teste

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



54 chiodi sulla parete



Interventi/1: Soil nailing

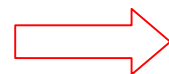
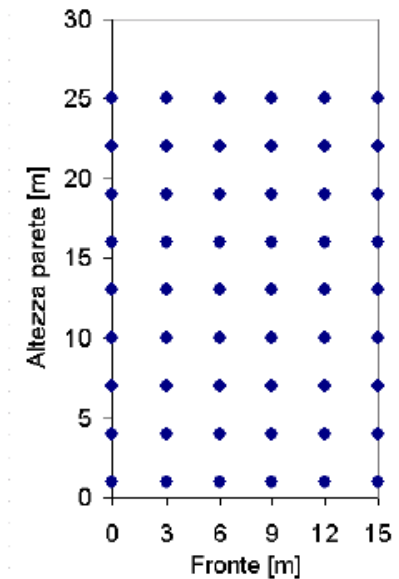
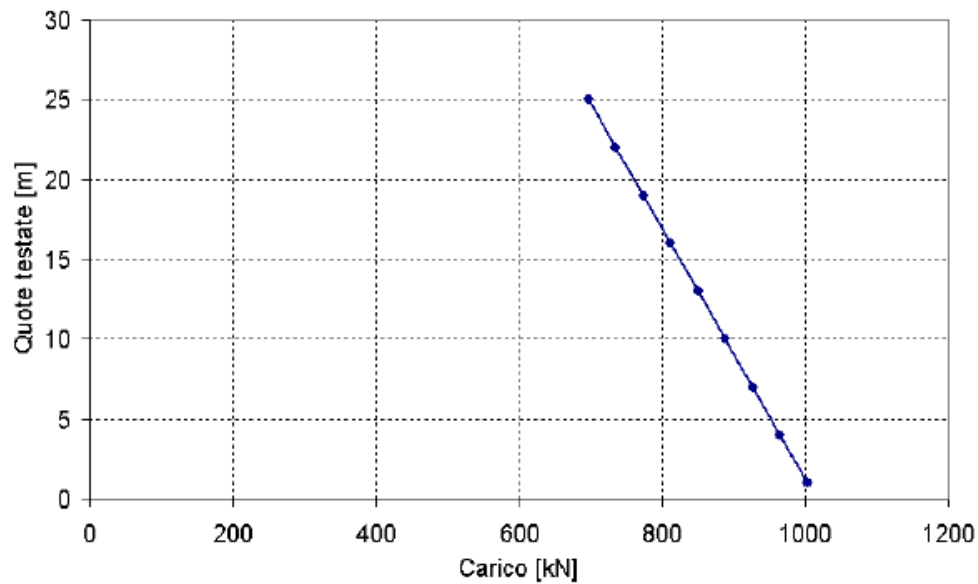
Posizionamento chiodi e tesatura delle teste

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi



54 chiodi sulla parete

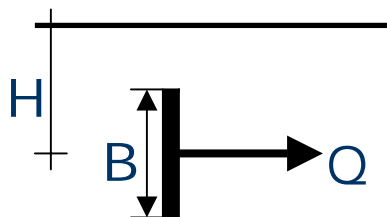


Interventi/1: Soil nailing

Dimensionamento delle piastre (Ovesen, 1964)

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo



$$Q = \gamma H B K_0 N_q d_c$$

in cui:

Coefficiente di spinta a riposo

$$K_0 = 1 - \sin(\phi')$$

Coefficiente di capacità portante

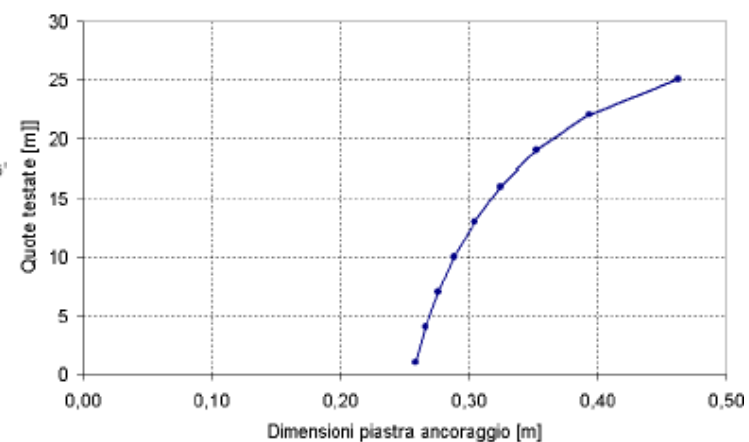
$$N_q = \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \cdot e^{\pi \tan \phi'}$$

Coefficiente correttivo

$$d_c = 1 + \frac{0,35}{\frac{B}{H} + \frac{0,6}{1 + 7 \tan \phi'}}$$

Interventi

Quota testata m	Carico unitario orizzontale kN/m	Carico orizz.tile kN	σ N/mm ²	Ovesen piastra m	d_c -	Pull-out esterno $L_{\text{ancoraggio}}$ m
25	232,33	697,0	312,20	0,463	1,637	4,65
22	245,08	735,3	329,33	0,394	1,669	4,91
19	257,83	773,5	346,46	0,353	1,685	5,17
16	270,58	811,8	363,60	0,325	1,694	5,42
13	283,33	850,0	380,73	0,304	1,700	5,68
10	296,08	888,3	397,86	0,289	1,704	5,93
7	308,83	926,5	415,00	0,276	1,707	6,19
4	321,58	964,8	432,13	0,266	1,710	6,44
1	334,33	1003,0	449,26	0,258	1,711	6,70





Interventi/1: Soil nailing

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Commenti:

1. Soluzione economica e di facile realizzazione (+)
2. Non necessita di una progettazione ad hoc (+)
3. Elevato numero di chiodi (-)
4. Elevate lunghezze di ancoraggio (-)
5. Non sfrutta l'effetto membrana della rete (--)



Rilievo
geologico

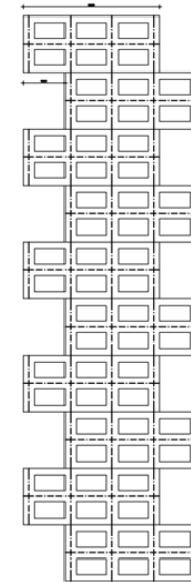
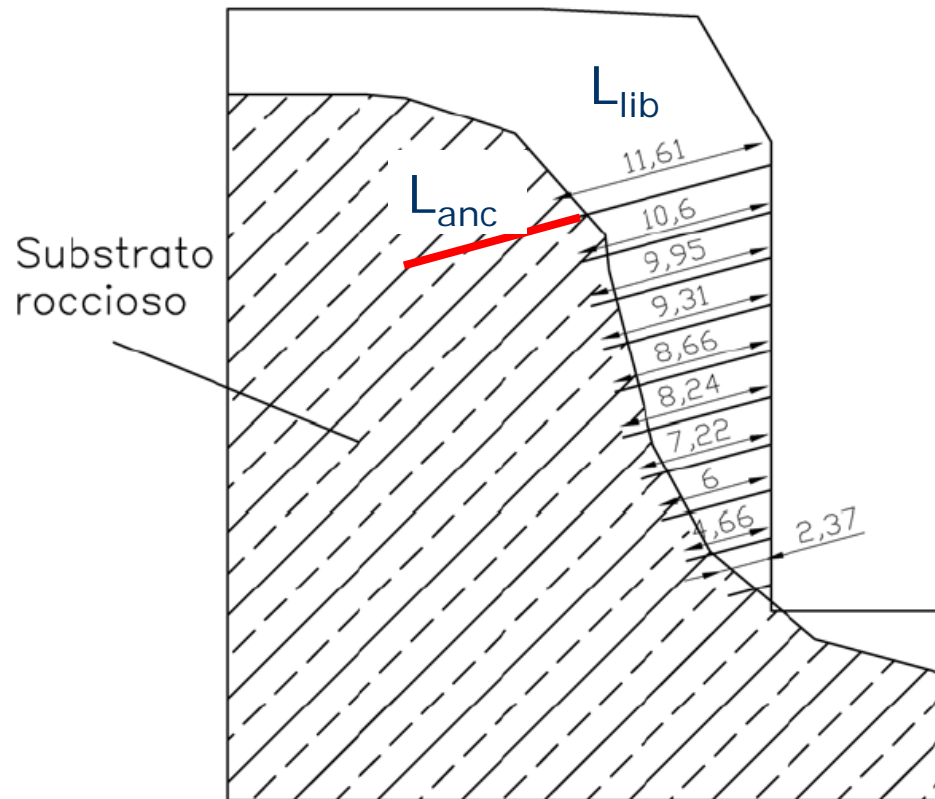
Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Interventi/2– graticcio tirantato

Elementi prefabbricati in CAP





Rilievo
geologico

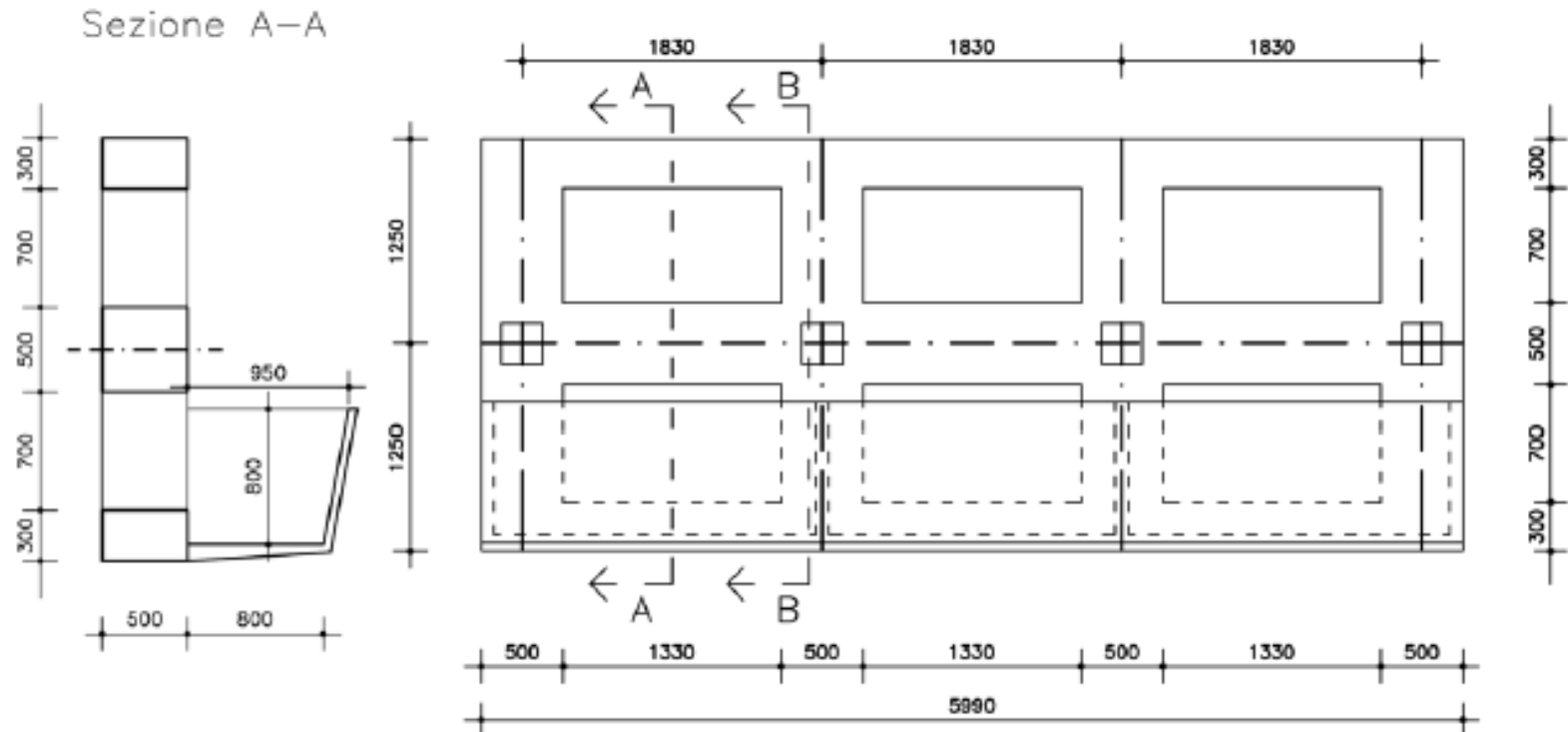
Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Interventi/2– graticcio tirantato

Progettazione dell'elemento prefabbricato





Interventi/2– graticcio tirantato

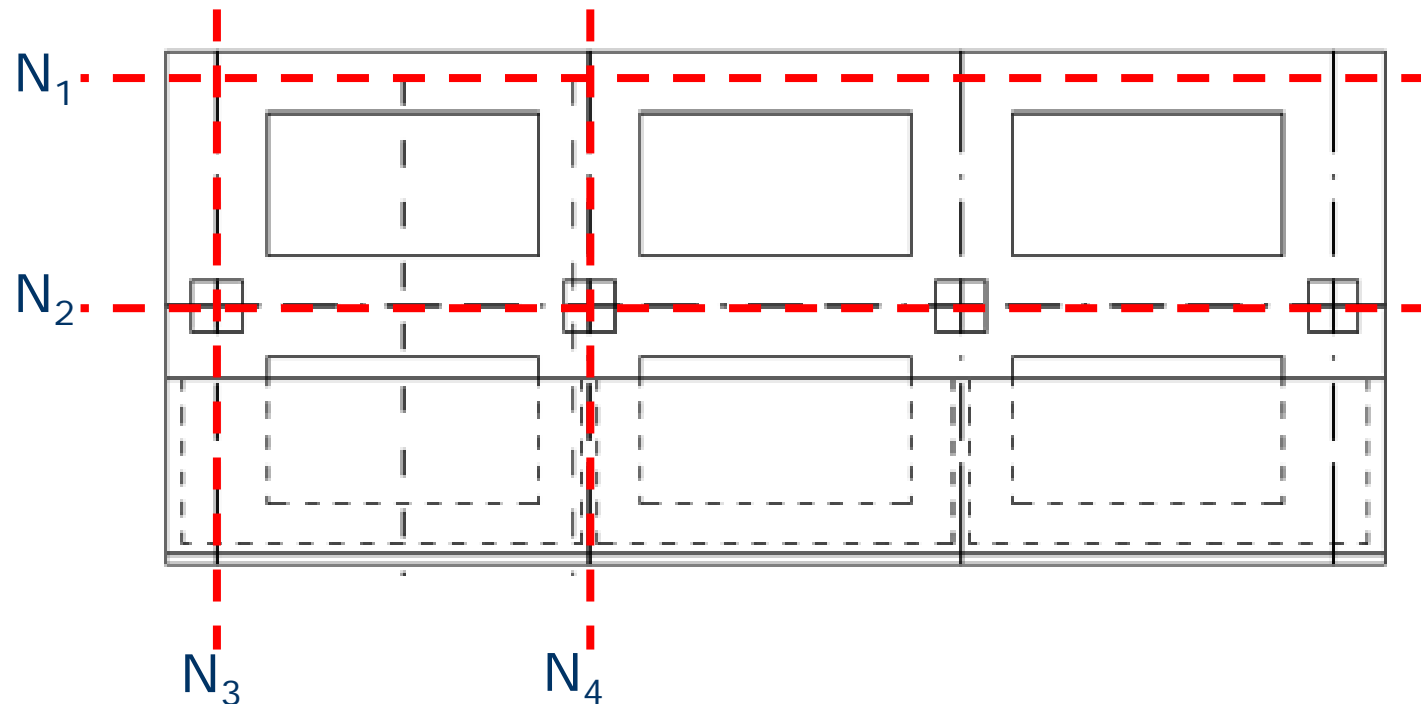
Progettazione dell'elemento prefabbricato

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Rilievo
geologico

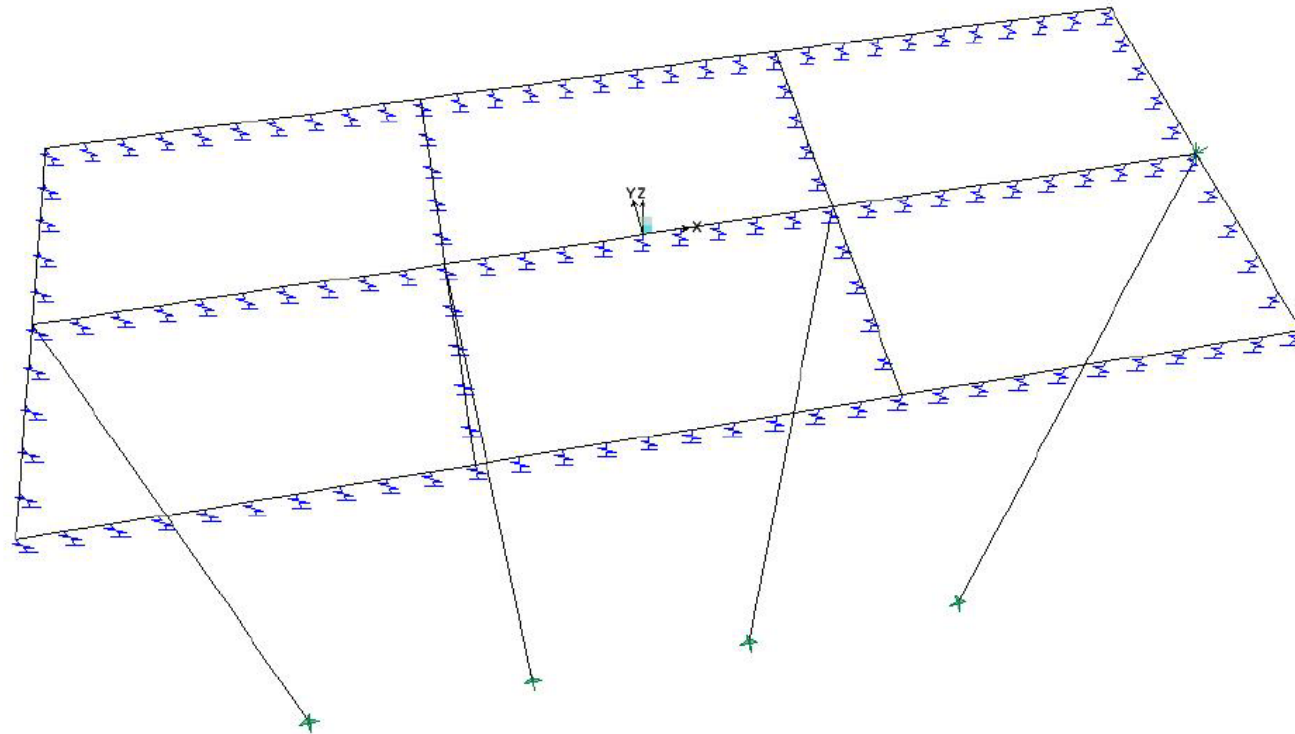
Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Interventi/2– graticcio tirantato

Progettazione dell'elemento prefabbricato





Rilievo
geologico

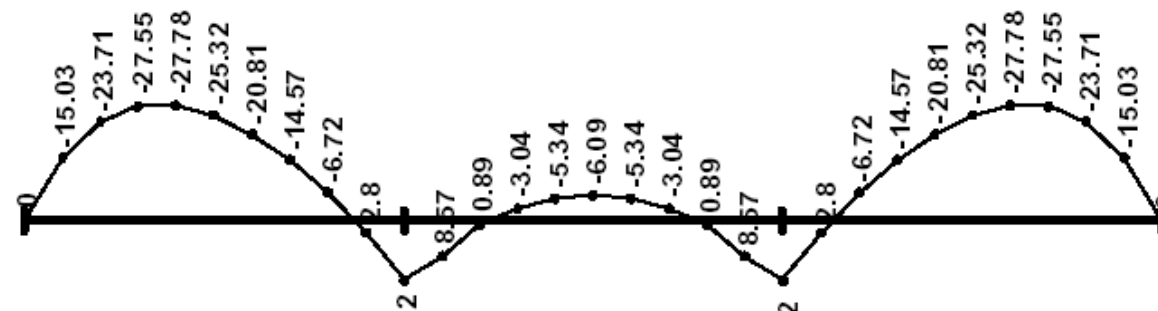
Interventi/2– graticcio tirantato

Definizione
modello di
calcolo

Progettazione dell'elemento prefabbricato

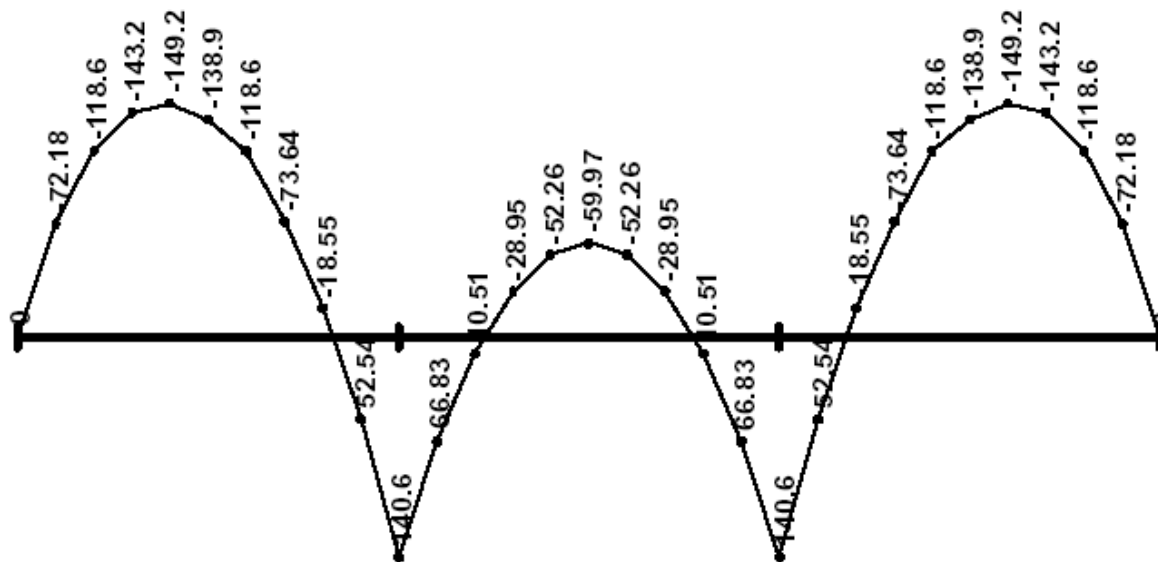
Analisi di
stabilità

Nervatura
esterna N_1



Interventi

Nervatura
centrale N_2





Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

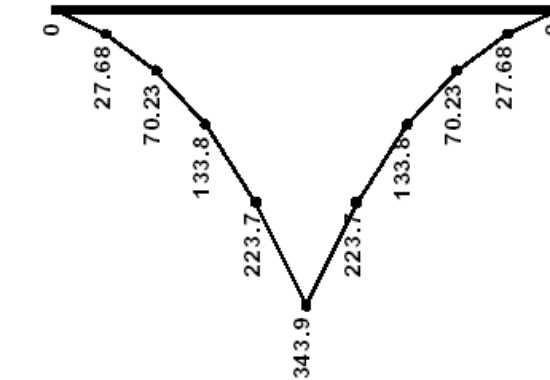
Analisi di
stabilità

Interventi

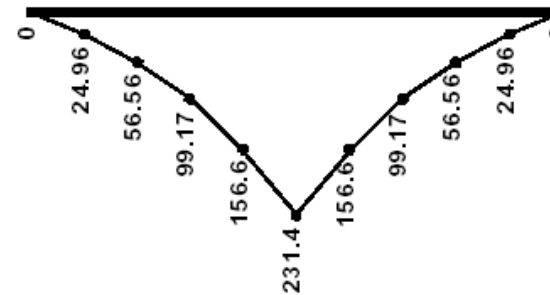
Interventi/2– graticcio tirantato

Progettazione dell'elemento prefabbricato

Nervatura
esterna N_3



Nervatura
centrale N_4





Interventi/2– graticcio tirantato

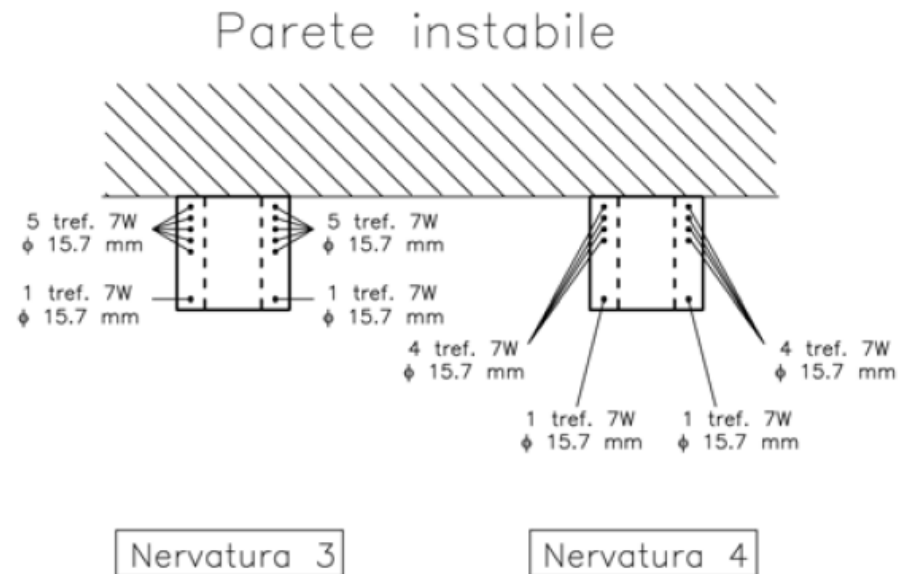
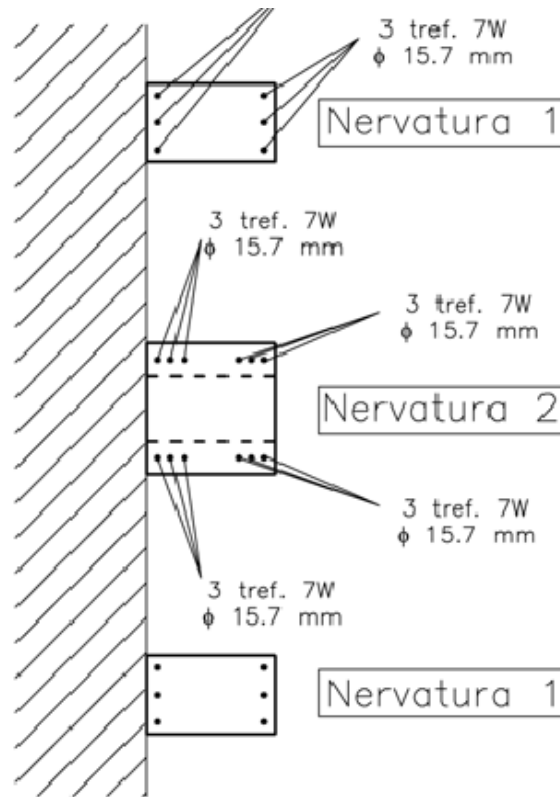
Progettazione dell'elemento prefabbricato

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi





Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Interventi/2– graticcio tirantato

Prova di tiro su piastra di carico





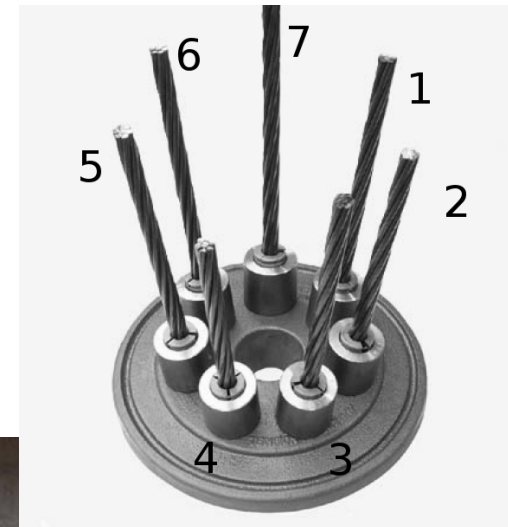
Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Interventi/2– graticcio tirantato Prova di tiro su piastra di carico





Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Interventi/2– graticcio tirantato

Prova di tiro su piastra di carico





Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

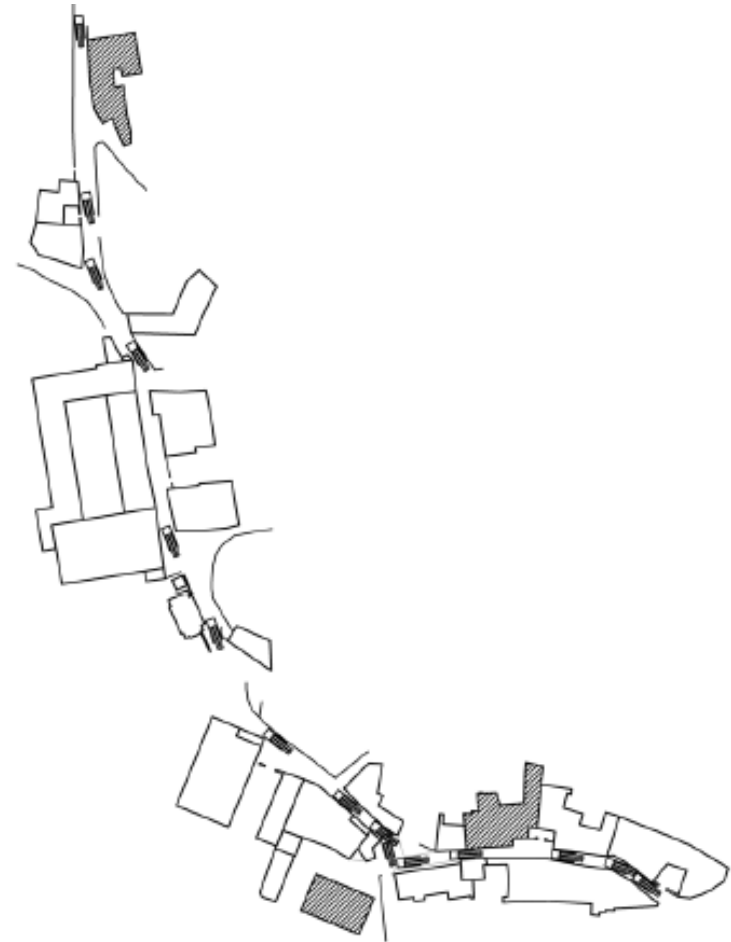
Analisi di
stabilità

Interventi

Interventi/2– graticcio tirantato

Verifica trasportabilità

Per opere speciali, spesso la possibilità di raggiungere facilmente il cantiere è un fattore determinante, in particolare in luoghi di limitata accessibilità.





Rilievo
geologico

Interventi/2– graticcio tirantato

Verifica trasportabilità

Commenti:

Definizione
modello di
calcolo

1. Progettazione ad hoc (-)

2. Limitata trasportabilità (-)

3. Prefabbricazione (+)

Analisi di
stabilità

4. Facilità di montaggio in opera (+)

5. Possibilità di controllare il tiro dei tiranti (+)

Interventi

6. Protezione "attiva", sfrutta l'effetto 3D (++)



Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Interventi/2– graticcio tirantato

Monitoraggio a lungo termine

Come per tutte le opere di sostegno, si rende necessario realizzare un sistema di monitoraggio a lungo termine:

- Rete estensimetri ad acquisizione automatica
- Trasmissione wireless ad una centralina
- Acquisizione in remoto mediante rete GPRS



Conclusioni

Rilievo
geologico

Definizione
modello di
calcolo

Analisi di
stabilità

Interventi

Definizione di una metodologia di intervento (rilievo, caratterizzazione materiali, modellazione geotecnica, analisi stabilità e progettazione intervento e monitoraggio post-operam).