

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Anno accademico 2018 - 2019

# COMPORTAMENTO E STABILITÀ DELLA SPALLA DESTRA DELLA DIGA DI RIDRACOLI

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA

Scuola di Ingegneria e Architettura

D.I.C.A.M.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Opere in sottoterraneo M

**COMPORTAMENTO E STABILITÀ  
DELLA SPALLA DESTRA  
DELLA DIGA DI RIDRACOLI**

Candidato:  
EDOARDO LUSINI

Relatore:  
Prof.ssa Ing. DANIELA BOLDINI

Correlatori:  
Chiar.mo Prof. Ing. ARMANDO BRATH  
Dott. Ing. GIUSEPPE MONTANARI  
Dott. Ing. ANDREA GAMBI  
Dott. Geol. CARLO FABBRI

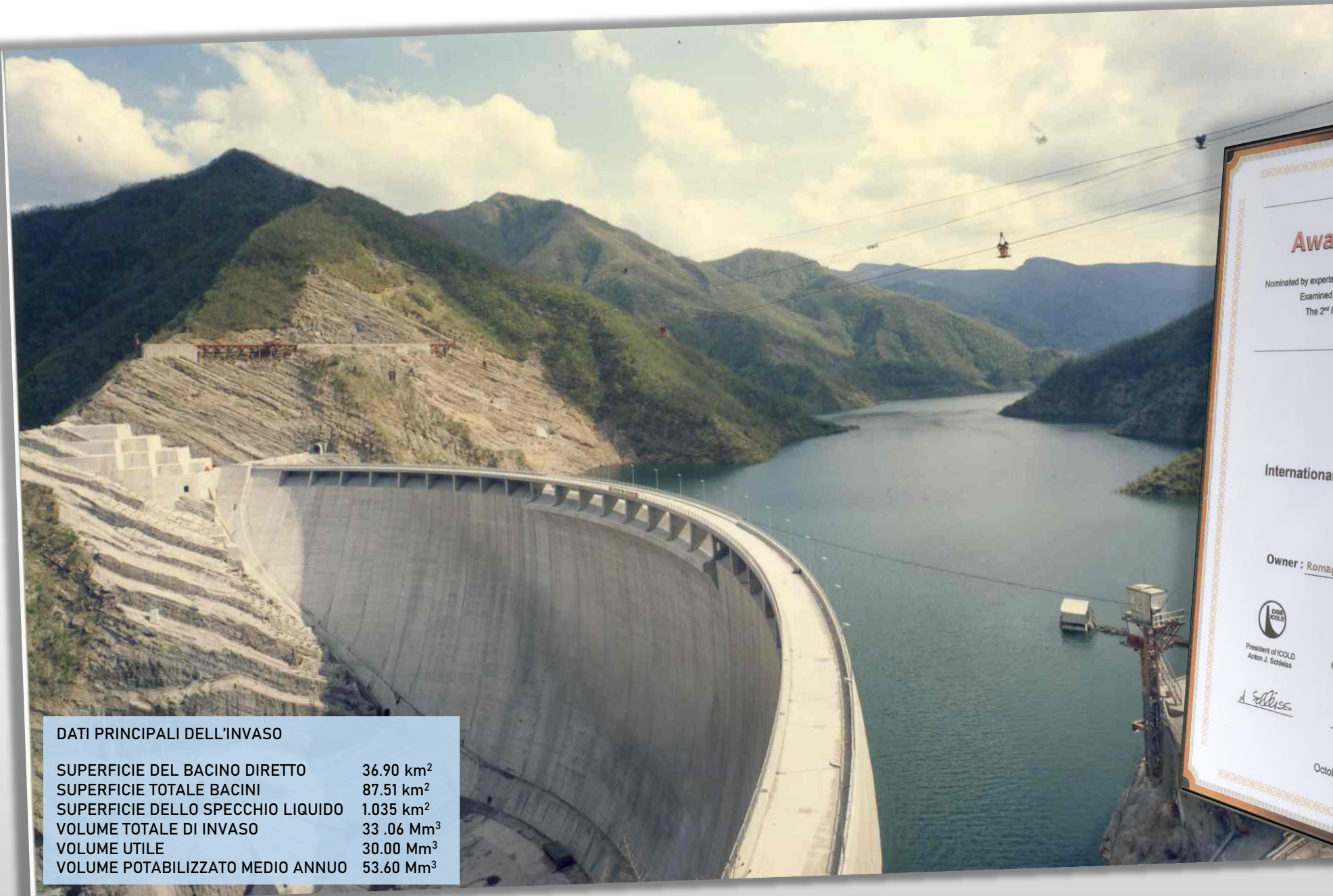
Anno Accademico 2018/2019

Sessione I

Candidato  
Edoardo Lusini

Relatore:  
Chiar.ma Prof. Ing. Daniela Boldini

Correlatori:  
Chiar.mo Prof. Ing. Armando Brath  
Dott. Ing. Giuseppe Montanari  
Dott. Ing. Andrea Gambi  
Dott. Geol. Carlo Fabbri

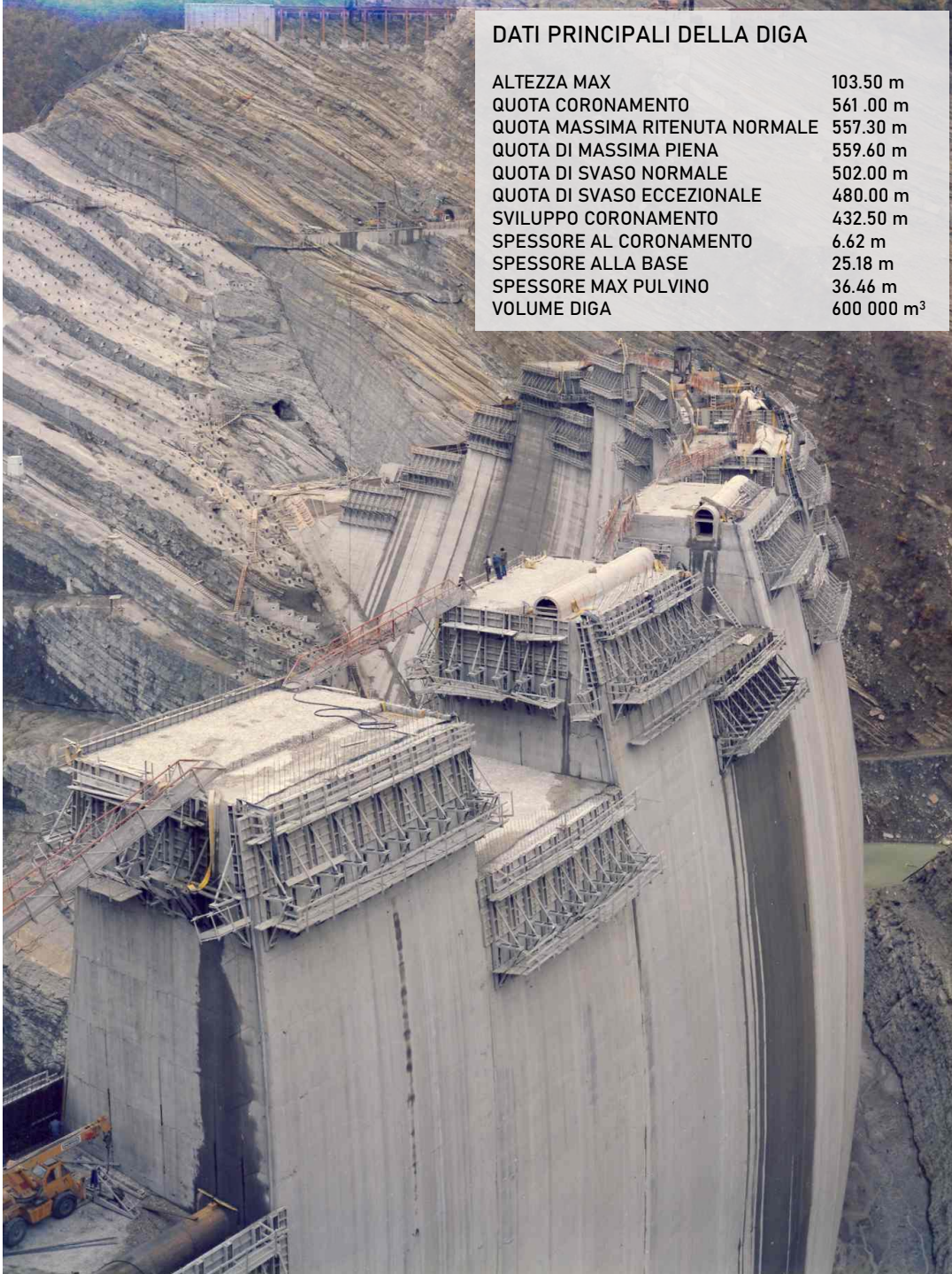


#### DATI PRINCIPALI DELL'INVASO

SUPERFICIE DEL BACINO DIRETTO	36.90 km <sup>2</sup>
SUPERFICIE TOTALE BACINI	87.51 km <sup>2</sup>
SUPERFICIE DELLO SPECCHIO LIQUIDO	1.035 km <sup>2</sup>
VOLUME TOTALE DI INVASO	33.06 Mm <sup>3</sup>
VOLUME UTILE	30.00 Mm <sup>3</sup>
VOLUME POTABILIZZATO MEDIO ANNUO	53.60 Mm <sup>3</sup>







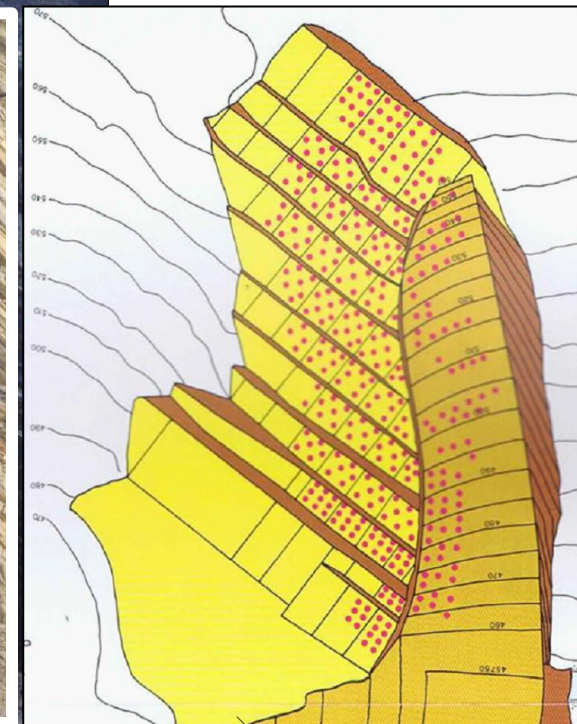
## DATI PRINCIPALI DELLA DIGA

ALTEZZA MAX	103.50 m
QUOTA CORONAMENTO	561.00 m
QUOTA MASSIMA RITENUTA NORMALE	557.30 m
QUOTA DI MASSIMA PIENA	559.60 m
QUOTA DI SVASO NORMALE	502.00 m
QUOTA DI SVASO ECCEZIONALE	480.00 m
SVILUPPO CORONAMENTO	432.50 m
SPESSORE AL CORONAMENTO	6.62 m
SPESSORE ALLA BASE	25.18 m
SPESSORE MAX PULVINO	36.46 m
VOLUME DIGA	600 000 m <sup>3</sup>

## II FASE: «ADDENTRAMENTO»



**652 TIRANTI •**  
1800 kN ogni tirante



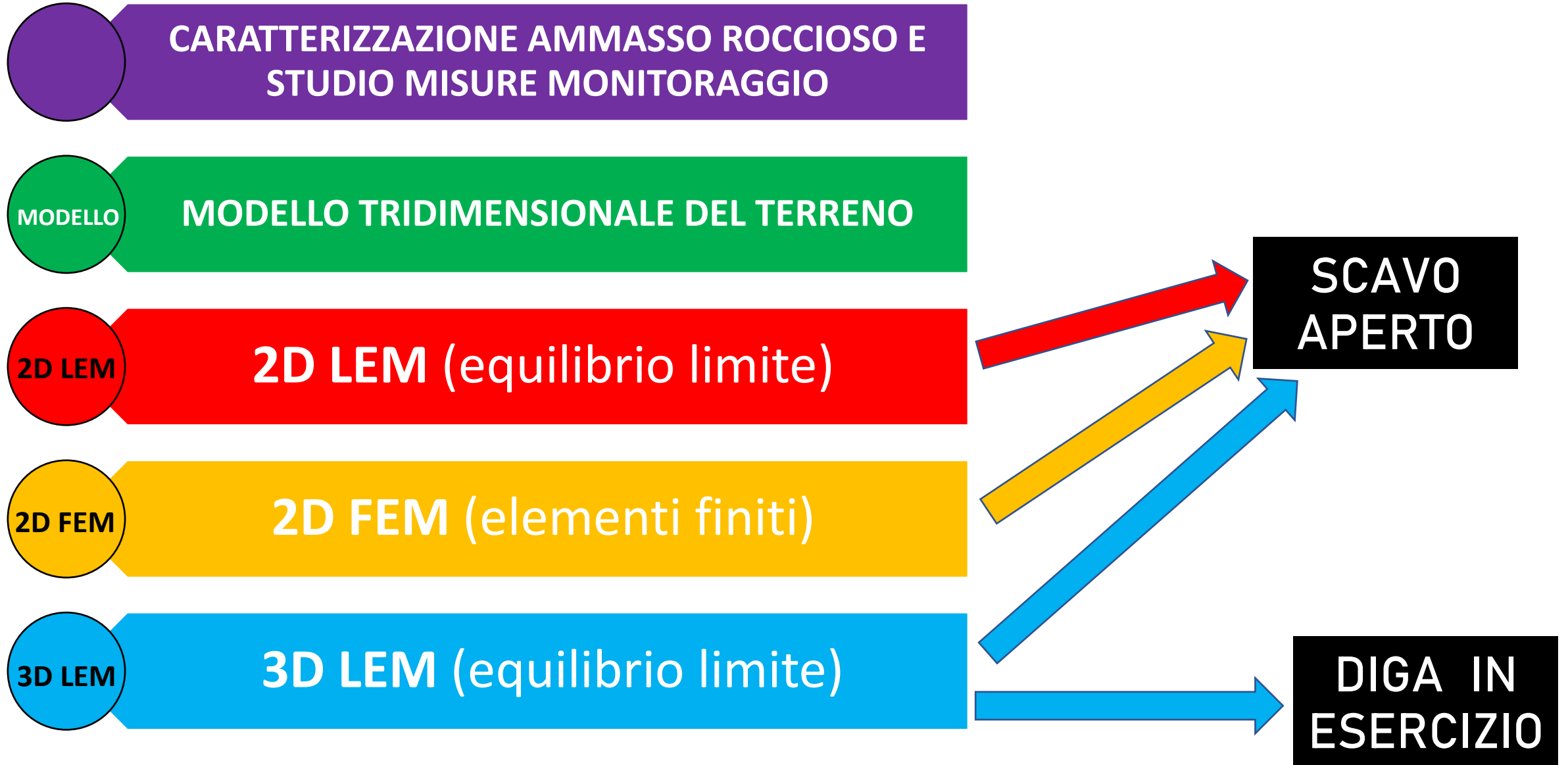
## I FASE: PROFILATURA A «BANCHE»

## DATI SPALLA DESTRA

SVILUPPO DEL FRONTE DI SCAVO	100 m
ALTEZZA MEDIA DEL PROFILO DAL FONDO DELLO SCAVO	15-20 m
LARGHEZZA MIN SCAVO	10 m
LARGHEZZA MAX SCAVO	38 m
VOLUME SCAVATO IN I FASE	116 000 m <sup>3</sup>
VOLUME SCAVATO IN II FASE	65 000 m <sup>3</sup>
VOLUME DI ROCCIA INSTABILE	111 000 m <sup>3</sup>



# STRUTTURA DELLA TESI

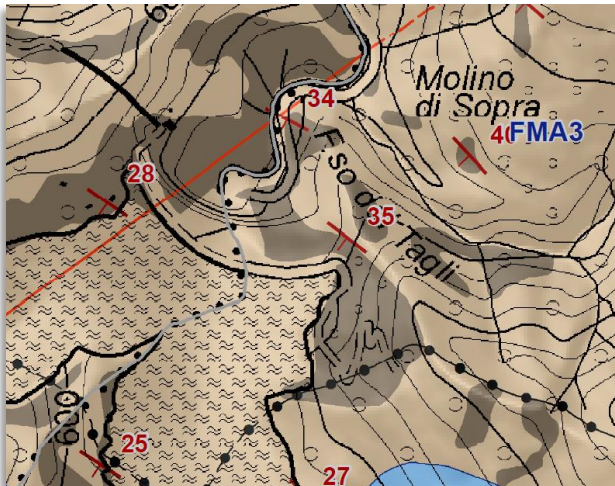


# RILIEVO GEOMECCANICO

Diagramma stereografico di Schmidt delle principali famiglie di discontinuità

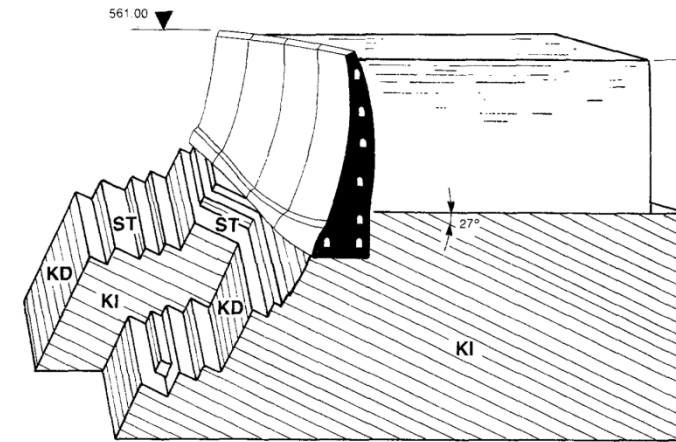
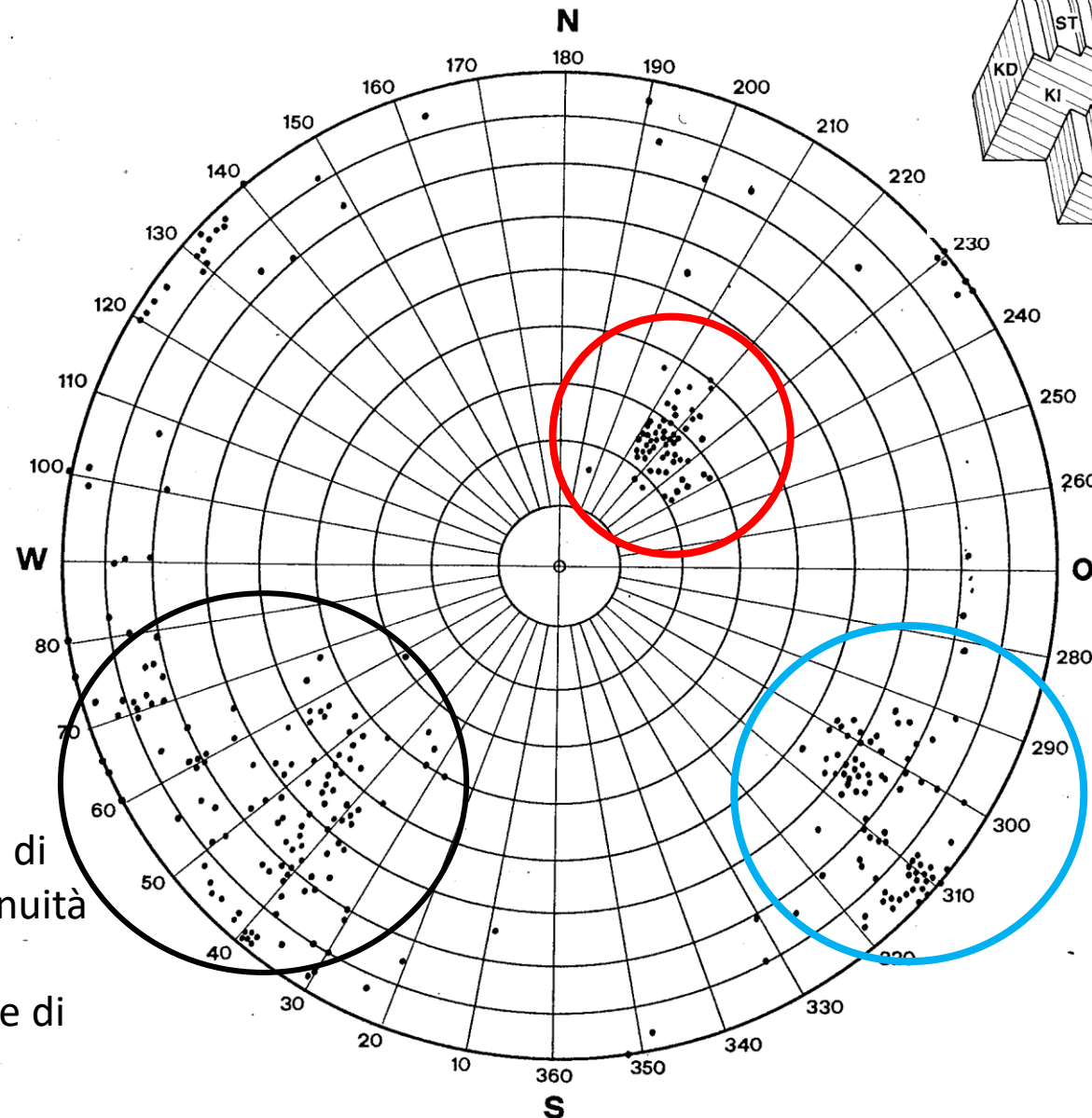


FORMAZIONE MARNOSO ARENACEA



CARTA GEOLOGICA REGIONALE

**KKD**  
**50°/70°**  
Famiglia di discontinuità lungo la direzione di strato



**ST**  
(Strati)  
**218°/27°**

**KKI**  
**304°/70°**  
Famiglia di giunti lungo l'immersione degli strati

# INDAGINI GEOGNOSTICHE

## PROVE IN SITO E IN LABORATORIO

AMMASSO ROCCIOSO

- Prove di resistenza a taglio su giunto in sito:
  - prove di taglio diretto
- Prove di deformabilità in sito:
  - prove di carico su piastra
  - prove di carico in camera idraulica
- Prove soniche:
  - cross-hole
  - velocità diretta
- Prove idrauliche:
  - permeabilità
  - Iniettabilità

$$E = 12 \text{ GPa}$$

MATERIALE  
ROCCIOSO

- Prove di compressione in laboratorio:
  - monoassiali
  - triassiali

$$\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$$



Prove in sito	Resistenza a taglio su giunti ST ( $\phi$ , c)	$\phi = 13^\circ - 35^\circ$	$c = 0 - 0,2 \text{ MPa}$
	Modulo elastico (MPa)	$E_{  } = 6\,400 - 14\,000$	$E_{\perp} = 9\,300 - 11\,400$
	Velocità sonica (m/s)	$4\,000 - 5\,000$	
	Permeabilità (m/s)	$K_{  } = 5 \cdot 10^{-6}$	$K_v = 4 \cdot 10^{-7}$

Prove in Lab		Arenaria	Marna
	Peso di volume ( $\text{kN/m}^3$ )	27	26,5
	Resistenza alla compressione monoassiale (MPa)	75 - 145	45 - 74
	Modulo elastico (MPa)	18 000 - 26 000	8 000 - 18 000



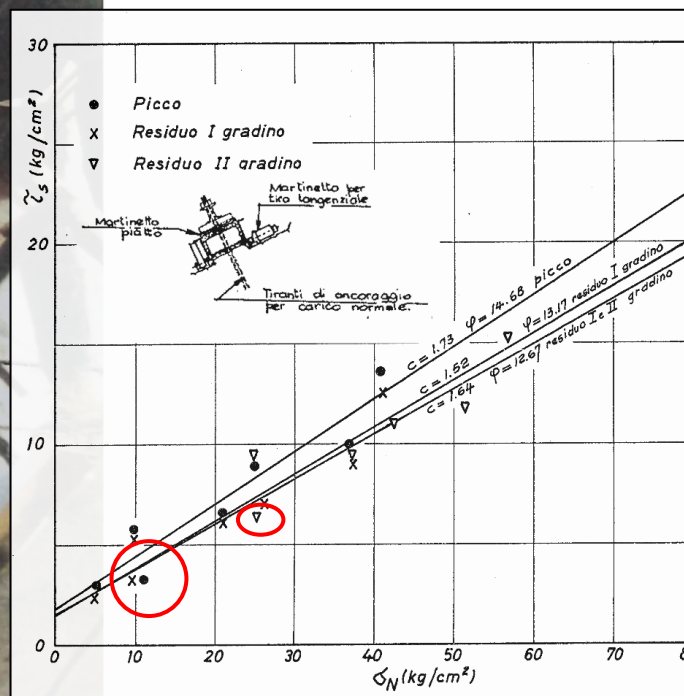
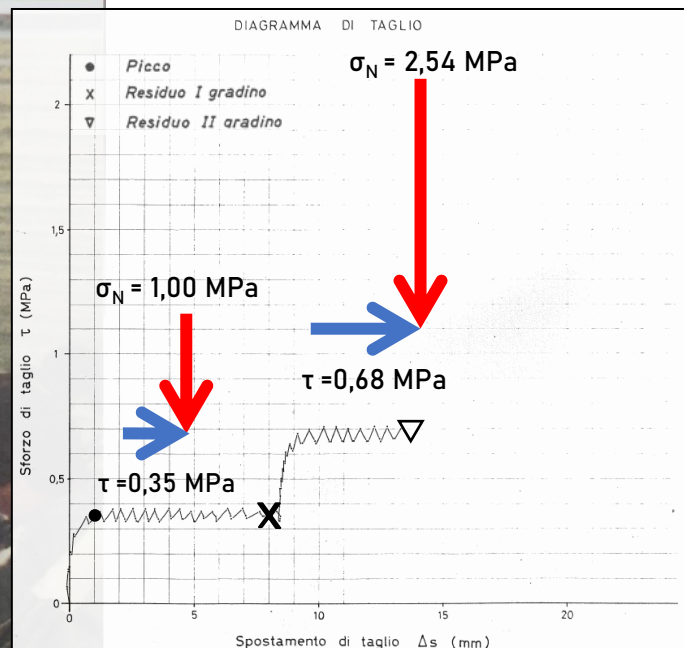
## STRATO LAMINATO:

Livello di natura argilloso-marnosa  
disposto in sottilissime strutture  
piano-parallele

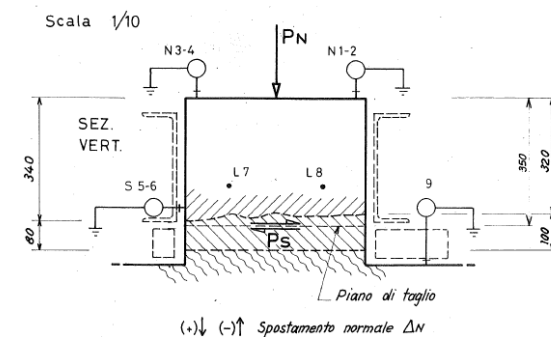
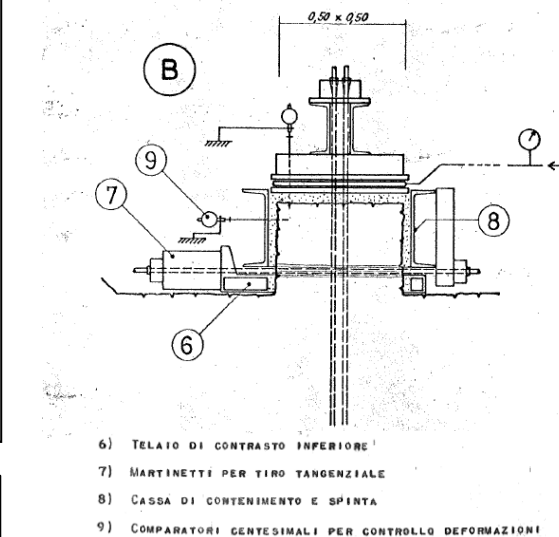
DEPOSITO DI MARE PROFONDO E IN  
ASSENZA DI CORRENTI DI FONDO

## PARAMETRI DI RESISTENZA:

ST:  $\phi = 13^\circ$   $c = 150 \text{ kPa}$



## PROVE DI TAGLIO IN SITO SUGLI STRATI LAMINATI

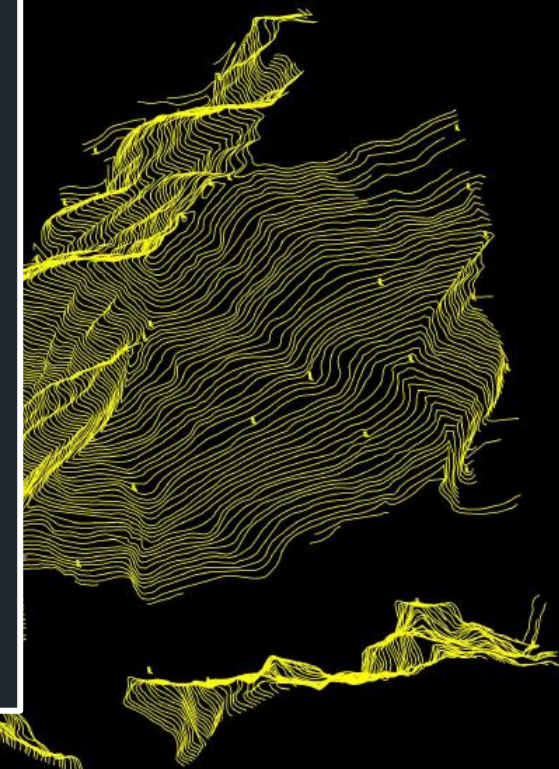
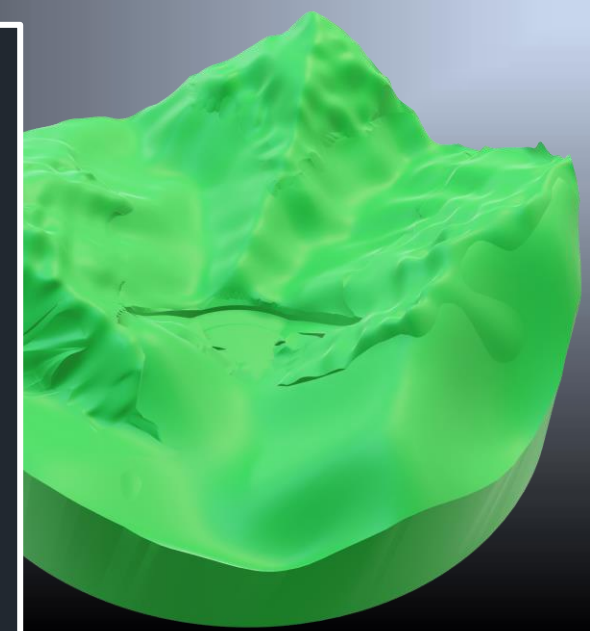
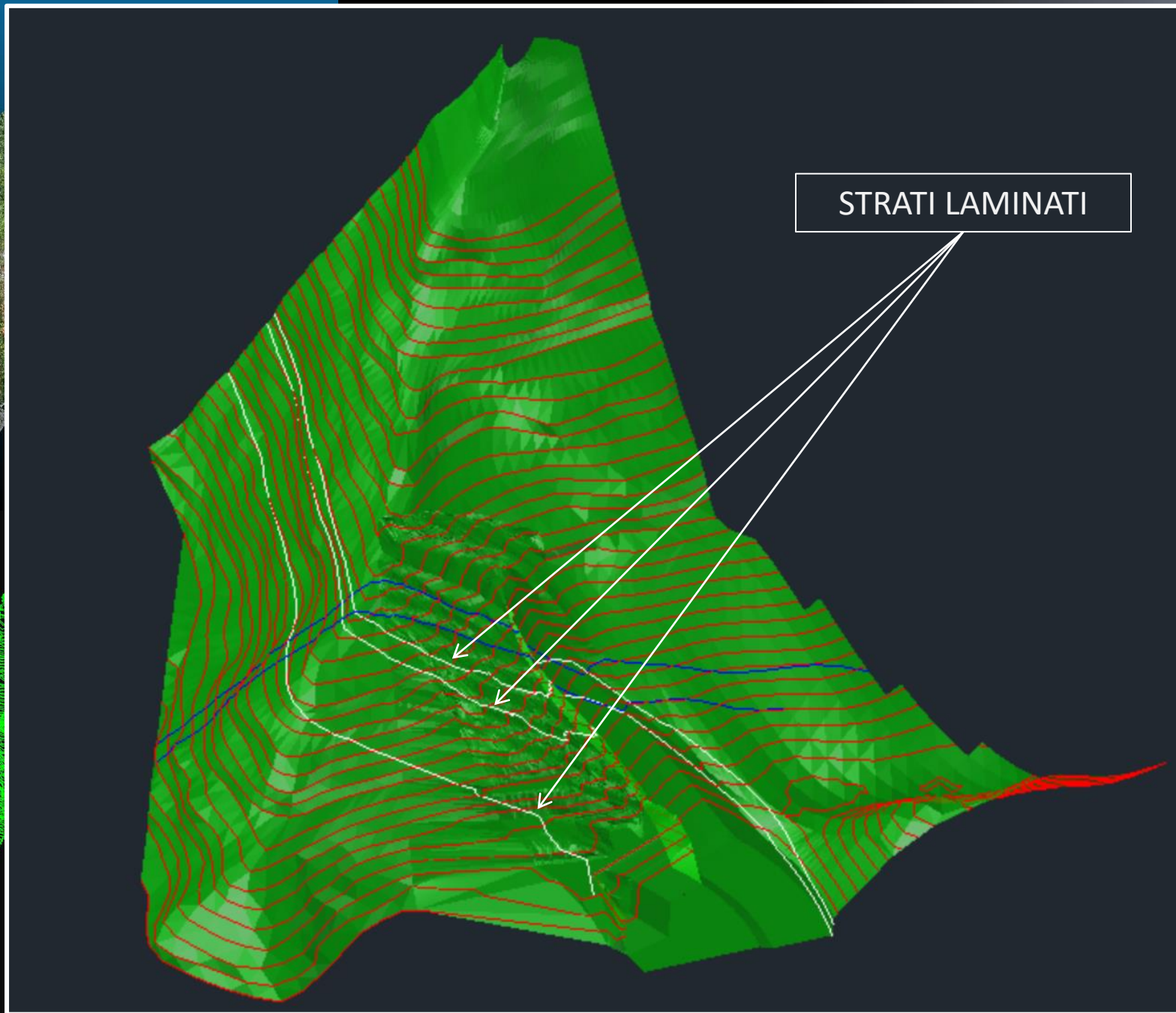


### Legenda

- Arenaria
- Marna siltosa laminata e fogliettata



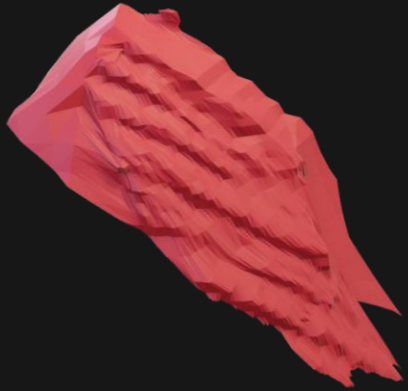
MODELLO



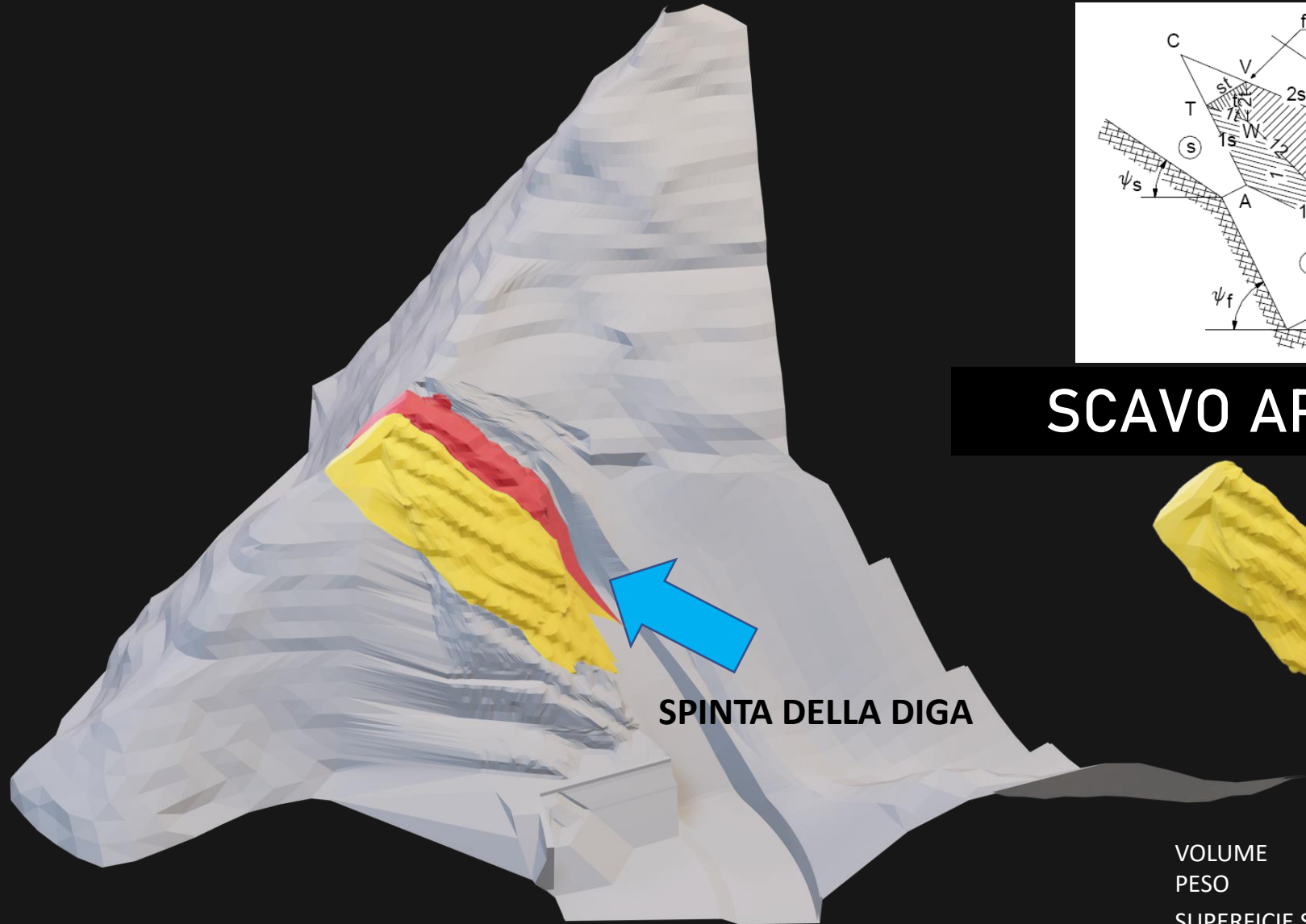


MODELLO

## DIGA IN ESERCIZIO

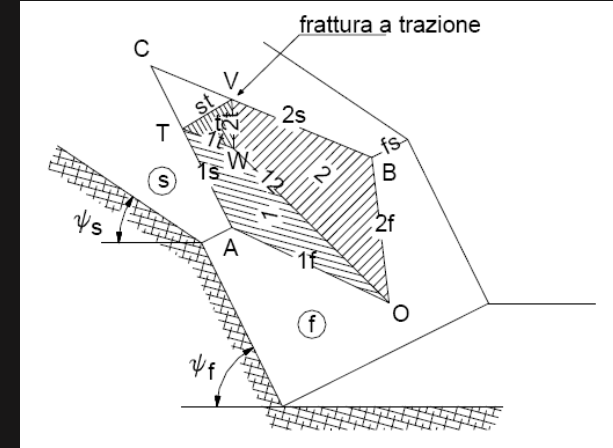


VOLUME	83504 m <sup>3</sup>
PESO	2171110 kN
SUPERFICIE ST	6340 m <sup>2</sup>
SUPERFICIE KKI	2346 m <sup>2</sup>
FRATTURA A TRAZIONE	427 m <sup>2</sup>



SPINTA DELLA DIGA

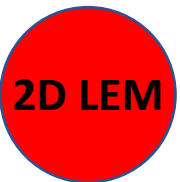
Equilibrio alla traslazione  
di un cuneo



## SCAVO APERTO



VOLUME	36492 m <sup>3</sup>
PESO	948792 kN
SUPERFICIE ST	4235 m <sup>2</sup>
SUPERFICIE KKI	1860 m <sup>2</sup>



# ANALISI ALL'EQUILIBRIO LIMITE 2D

## SCAVO APERTO

### TEORIA

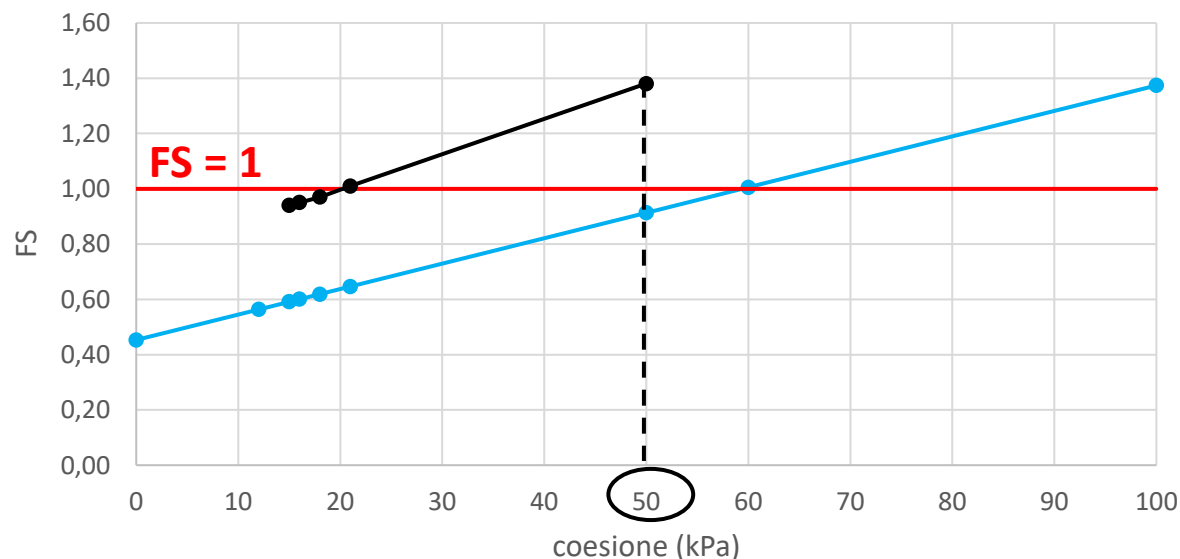
Scelta a priori di una superficie di potenziale rottura corrispondente a una o più superfici di discontinuità.

Le condizioni di stabilità del pendio vengono definite da coefficiente di sicurezza (FS): rapporto tra la resistenza a taglio disponibile lungo la superficie di rottura e la sollecitazione agente.

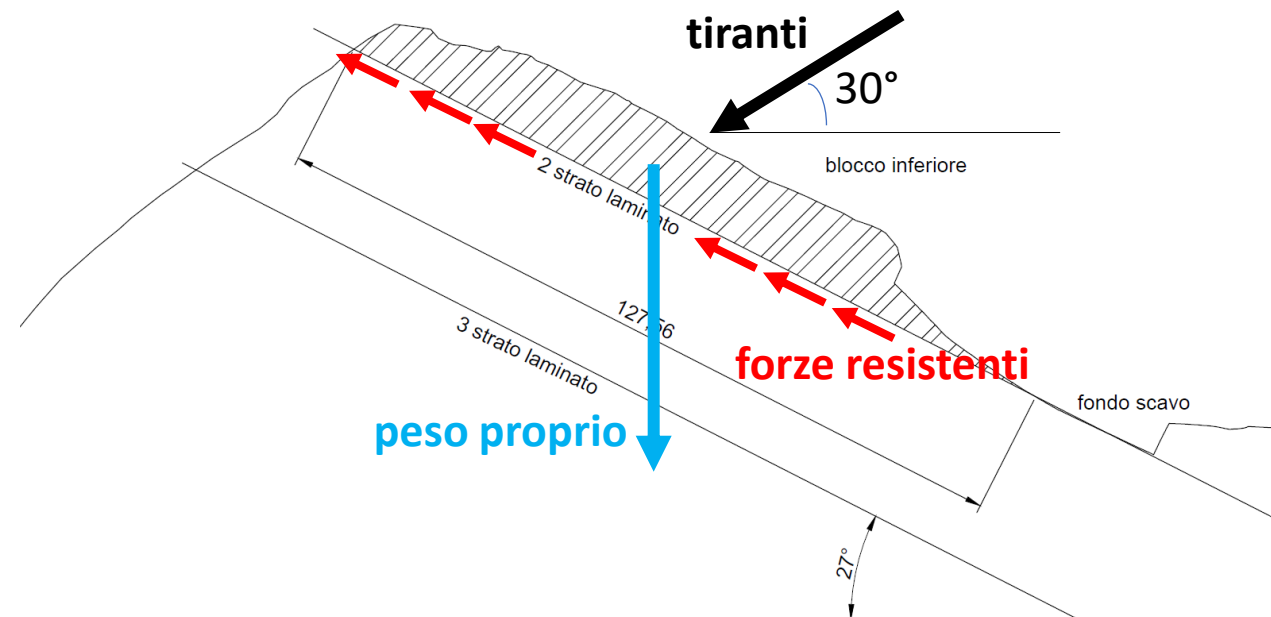
### RISULTATI IN TERMINI DI FS

□ **senza tiranti**

□ **con tiranti**



- ❖ si considerano condizioni di deformazione piane;
- ❖ le forze agenti sono il **peso proprio** e la **forza trasmessa dai tiranti**;
- ❖ le **forze resistenti** sono distribuite solo lungo ST secondo una legge alla Mohr-Coulomb.







2D FEM

# ANALISI PIANE AGLI ELEMENTI FINITI

PLAXIS

Version 2016

(Build 5251)

Copyright 2006-2015 Plaxis bv

- ❖ stesse sezioni di analisi e stessi parametri dell'analisi LEM;
- ❖ si eseguono analisi plastiche successive che riproducono la scansione delle fasi di scavo.

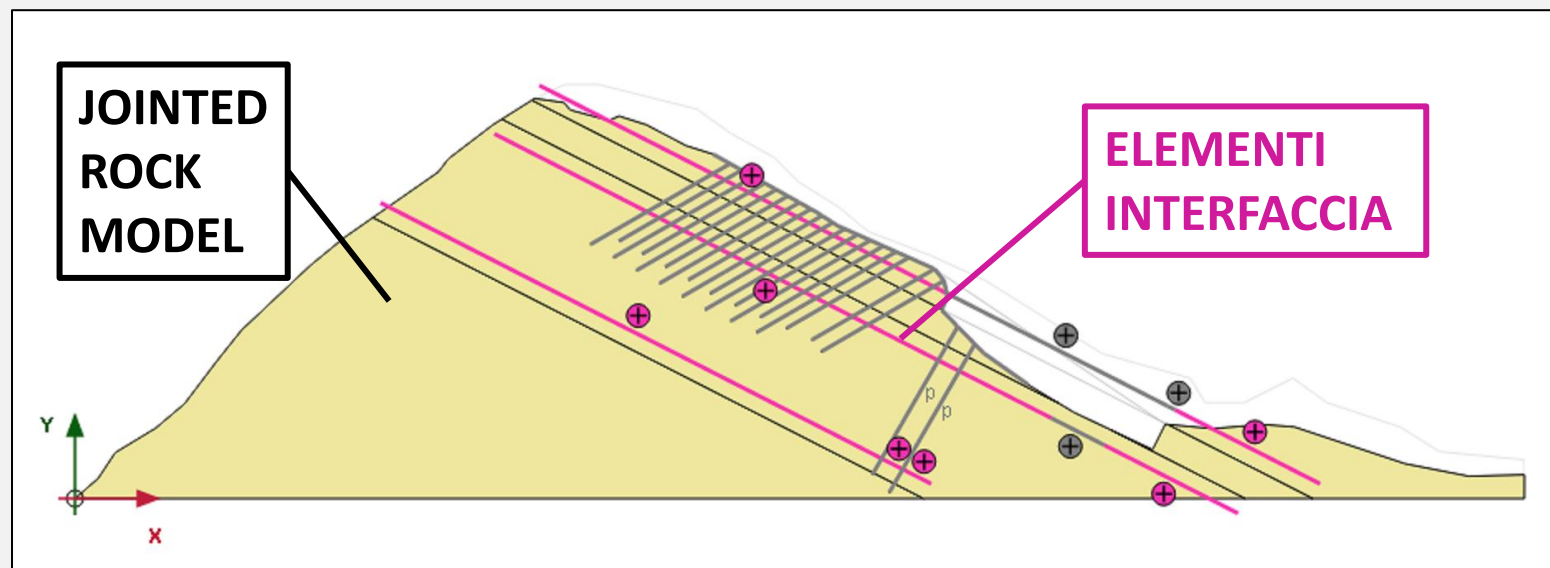
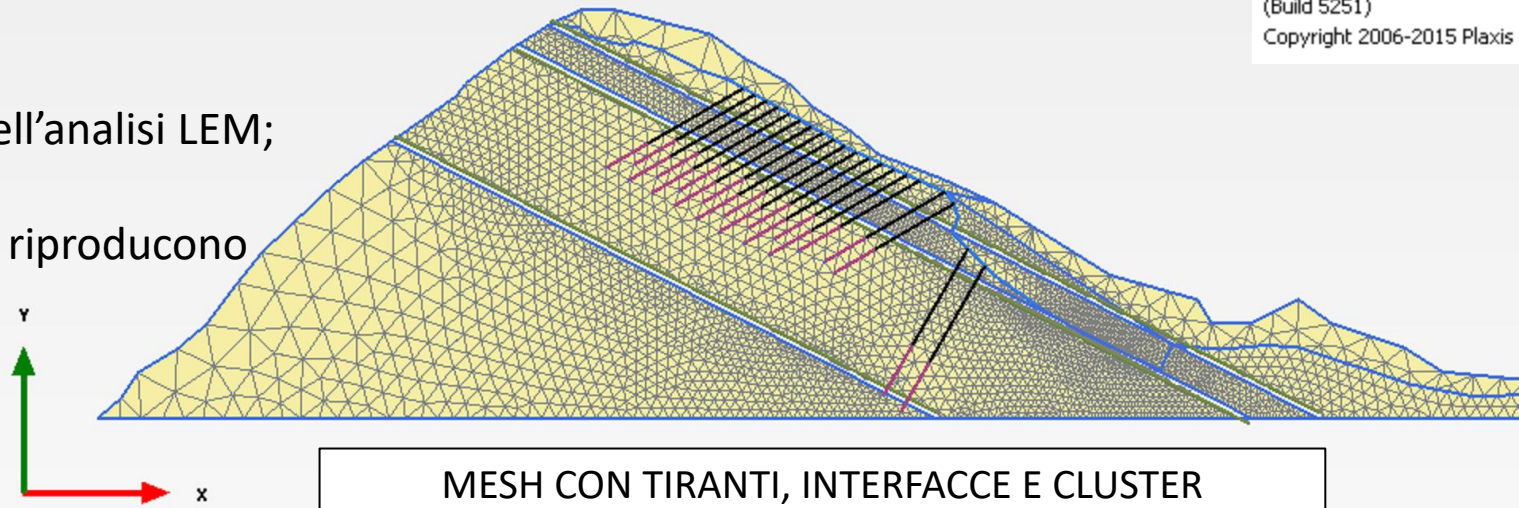
## JOINTED ROCK MODEL

Modello costitutivo elasto-plastico anisotropo che permette di definire **direzioni** di debolezza nell'ammasso.

Lungo tali direzioni lo sforzo di taglio è limitato dal raggiungimento del criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

## INTERFACCE PER GLI STRATI LAMINATI

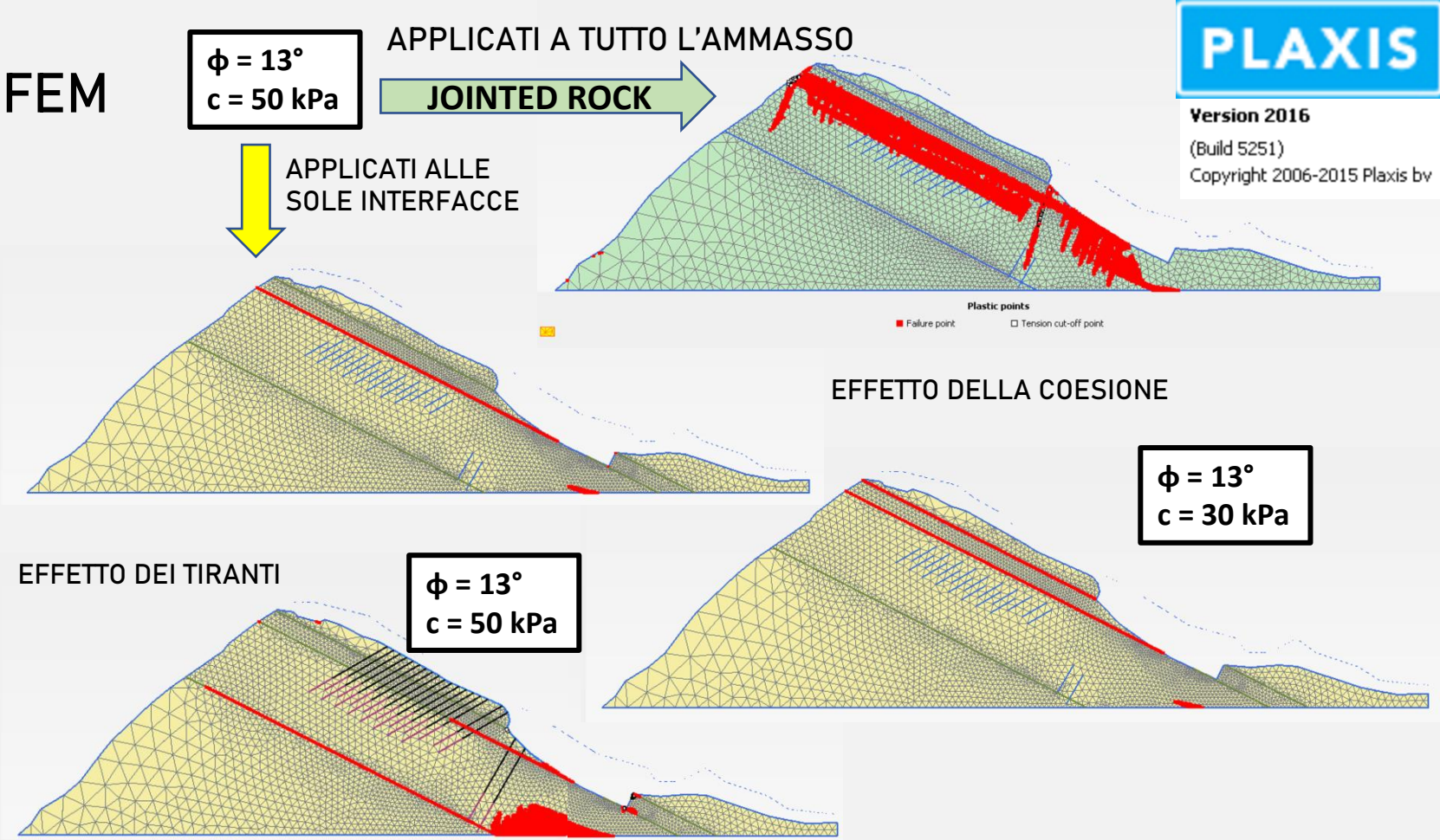
Discontinuità piane di **posizione nota** a cui è assegnato un modello costitutivo elasto-plastico alla Mohr-Coulomb





# RISULTATI ANALISI FEM in termini di punti plastici

- ❖ valutato l'effetto della modellazione degli strati laminati come **interfacce** rispetto ad applicare all'intero **ammasso** il modello Jointed Rock;
- ❖ analizzati i meccanismi di collasso al variare del parametro di **coesione** attraverso lo studio della distribuzione dei punti plastici e l'analisi degli spostamenti incrementali;
- ❖ valutato l'effetto dei **tiranti** sul meccanismo deformativo;
- ❖ verificati tramite la **procedura *phi-c reduction*** i FS ottenuti con l'analisi LEM.



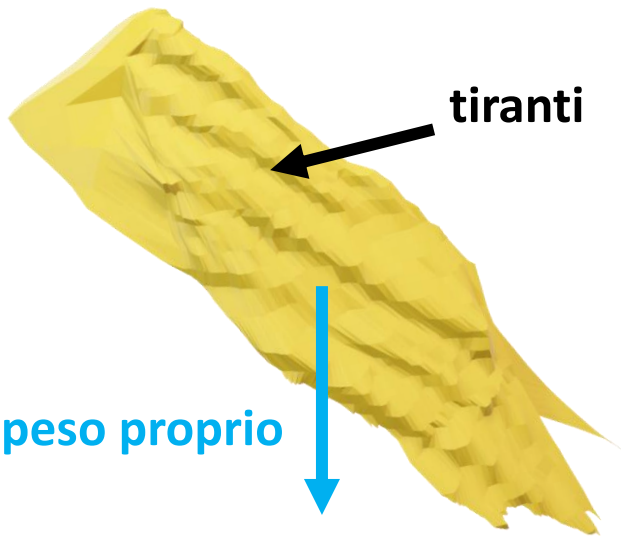
CASO SENZA TIRANTI		
PARAMETRI JOINTED ROCK	FEM 2D	LEM 2D
$\phi_{ST} = 13^\circ$ ; $c_{ST} = 60 \text{ kPa}$ ;	1,01	1,01
$\phi_{ST} = 20^\circ$ ; $c_{ST} = 60 \text{ kPa}$ ;	1,28	1,27
CASO CON TIRANTI		
PARAMETRI STRATI LAMINATI	FEM 2D	LEM 2D
$\phi_{ST} = 13^\circ$ ; $c_{ST} = 50 \text{ kPa}$ ;	1,39	1,38





# CASO DI SCAVO APERTO

- ❖ le forze agenti sono il **peso proprio** e la forza trasmessa dai **tiranti**;
- ❖ si applicano i parametri di progetto con coesione nulla, a favore di sicurezza;
- ❖ per i calcoli, si sono realizzati fogli di calcolo Excel con interfaccia utente.



## Interfaccia utente del foglio di calcolo Excel

Analisi LEM

Impostazioni

Parametri

Proprietà

posiz

analisi

norm

pend

fase

Impostazioni

Parametri Geotecnici

peso dell'unità di volume di roccia

26

kN/m3

Superficie di Strato ST

angolo di attrito lungo strato [Ø]

13

°

coesione lungo strato [c]

0

kPa

Giunti KKI

angolo di attrito lungo giunto [Ø]

30

°

coesione lungo giunto [c]

0

kPa

Orientazioni

immersione

inclinazione

ST

218°

27°

KKI

304°

70°

KKD

50°

70°

ANcoraggi

75°

25°

INTersezione

225°

27°

Diagramma di Shmidt

Ripristina Valori Iniziali

Risultati

Esci

Risultati

FS = 0,51

Indietro

Esci

RISULTATI IN TERMINI DI FS:

☒ **senza tiranti**

☐ **con tiranti**

	3D LEM		2D LEM	
	CON TIRANTI	SENZA TIRANTI	CON TIRANTI	SENZA TIRANTI
primo strato laminato	2,17	0,51	-	0,45
secondo strato laminato	2,59	0,51	0,87	0,45

## CASO DI DIGA IN ESERCIZIO

## AZIONE SISMICA:

- normativa (NTD14, NTC18)
- studio sismotettonico

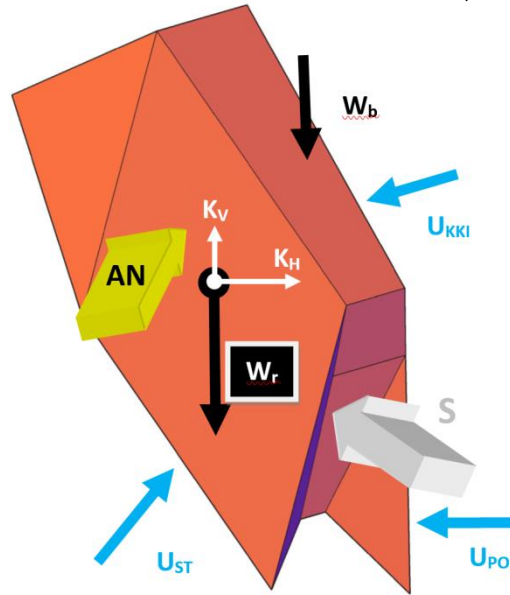
allo SLC per dighe esistenti:

$$PGA = 0,45 \text{ g}$$

$$S_T = 1,4$$

$$S_S = 1$$

$$a_{\max} = S_T \times S_S \times PGA = 0,63 \text{ g}$$



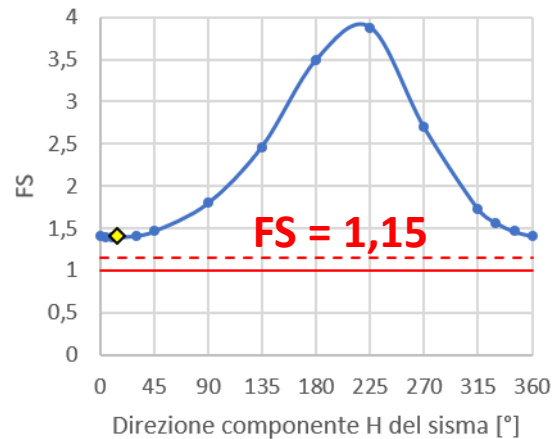
❖ le **forze agenti** per diga in esercizio sono:

- peso proprio ( $W_r$ );
- peso delle opere di appesantimento ( $W_b$ );
- forze di ancoraggio (AN);
- sottospinte idrauliche lungo i piani di discontinuità e l'eventuale frattura di trazione ( $U_{ST}$ ,  $U_{KKI}$ ,  $U_{PO}$ );
- spinta esercitata dalla diga (S);
- forze sismiche pseudostatiche ( $K_H$ ,  $K_V$ );

PRIMO STRATO LAMINATO



SECONDO STRATO LAMINATO



❖ **effetto della azione sismica pseudostatica**  
su coefficiente di sicurezza:

❖ **effetto del sistema di tiranti** sul coefficiente di sicurezza:

	CON TIRANTI	SENZA TIRANTI
primo strato laminato	1,86	2,16
secondo strato laminato	2,46	3,27



# CONCLUSIONI

- Effetto dei tiranti:
  - ✓ scavo aperto → **FAVOREVOLE**
  - ✗ diga in esercizio → **SFAVOREVOLE**
- La spalla destra è stabile per ogni condizione di carico in esercizio
- **Eventuale sviluppo futuro**
  - modello fem 3d che consideri:
    - ☐ interazione terreno-struttura
    - ☐ taratura tramite misure di monitoraggio
    - ☐ controllo deformazioni

GRAZIE

PER L'ATTENZIONE

