



UNIVERSITÀ
DI TRENTO

Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

AUTONOME PROVINZ
BOZEN - SÜDTIROL



PROVINCIA AUTONOMA
DI BOLZANO - ALTO ADIGE

PROVINCIA AUTONOMA DE BULSAN - SÜDTIROL

Agenzia per la Protezione civile
Ufficio Dighe

Analisi di stabilità della diga storica «Bau – 1893» in Val Martello (BZ)

Daniele Fellin

Relatore

Prof. Alessandro Gajo

Correlatore

Ing. Fabio De Polo



6° Edizione Premio ITCOLD
Tesi di Laurea su temi attinenti le Dighe
Webinar – 24 Febbraio 2021

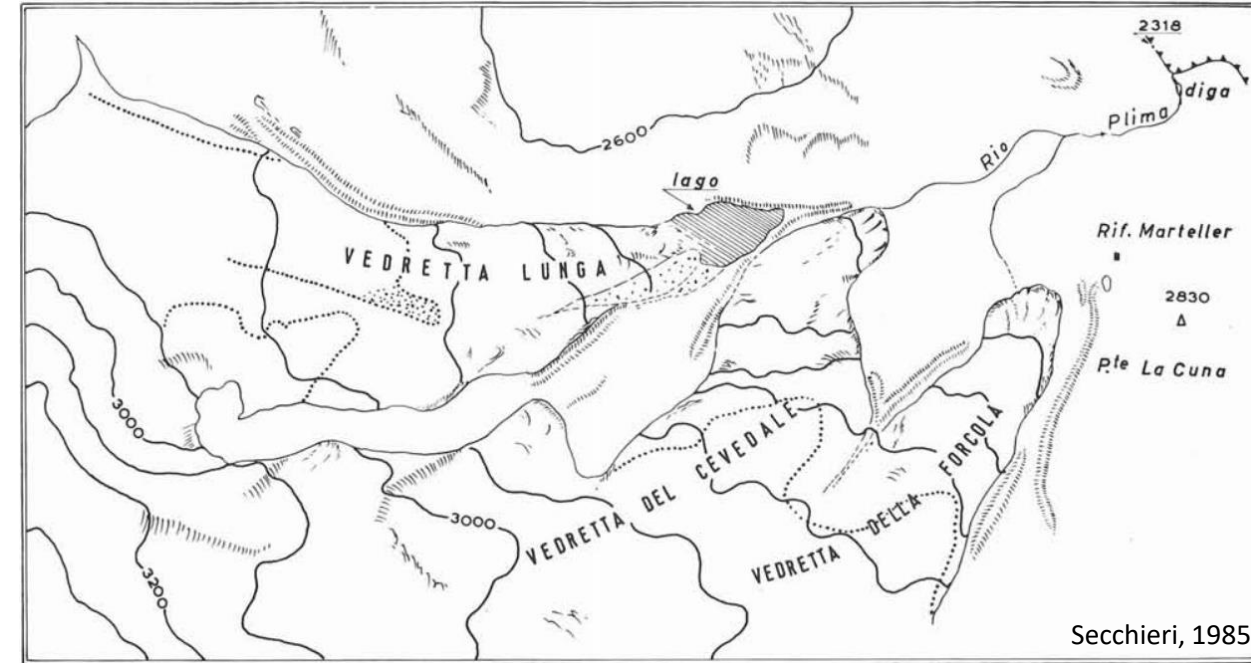
DESCRIZIONE GENERALE DELL'OPERA

- Diga di materiali sciolti
- Riempimento di terra
- Paramenti rivestiti con pietrame posto in opera a secco
- Anno di realizzazione: 1893
- Quota: 2319,77 m s.l.m.
- Altezza massima: 19,32 m
- Scarico di superficie: quota 2319,50 m s.l.m.
- Scarico di fondo: cunicolo scavato nella roccia (6,90 m²)



INQUADRAMENTO STORICO

- Inondazioni del fondovalle: giugno 1887, 1888, 1889, 1891
- Formazione del «lago dei detriti»
- Periodo primaverile-estivo: fusione del manto nevoso e arretramento delle lingue glaciali
- Rapido svuotamento del lago e conseguente onda di piena
- Realizzazione della diga su progetto dell'ing. Geppert negli anni 1892 e 1893
- Laminazione onda di piena 1895
- Dismessa ufficialmente nel 2011

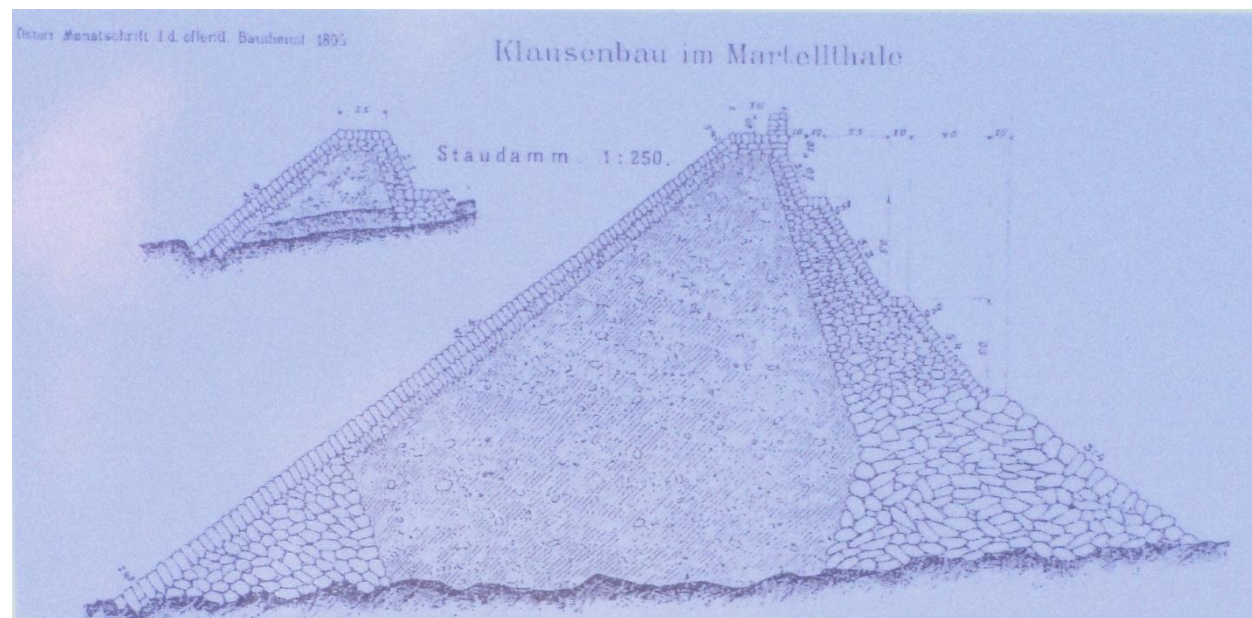


Toula, 1892

INDAGINI GEOTECNICHE

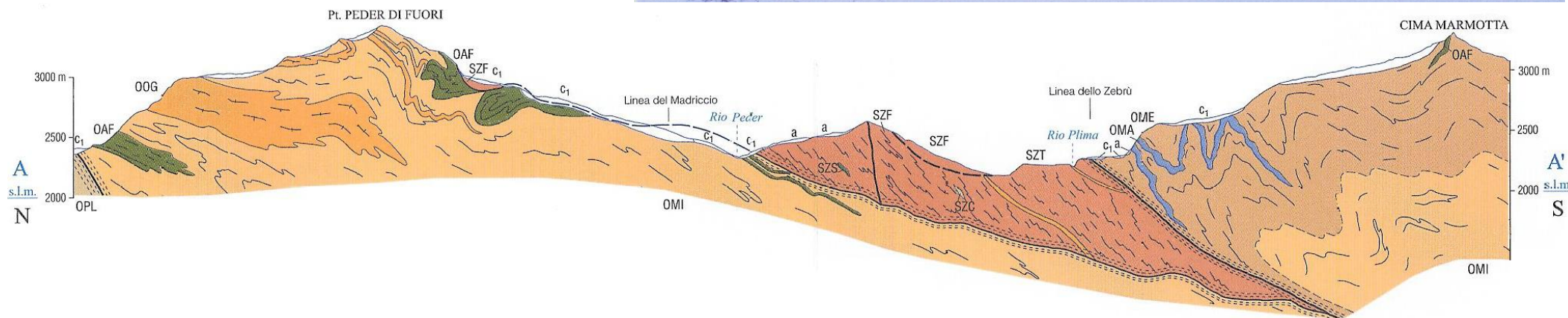
Campagna di indagini, settembre 2016:

- Perforazioni a carotaggio continuo
- Prove penetrometriche dinamiche (SPT)
- Prove pressiometriche
- Prova dilatometrica in roccia
- Prove di laboratorio (granulometria)



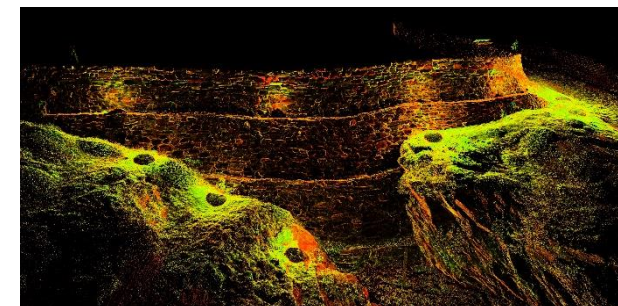
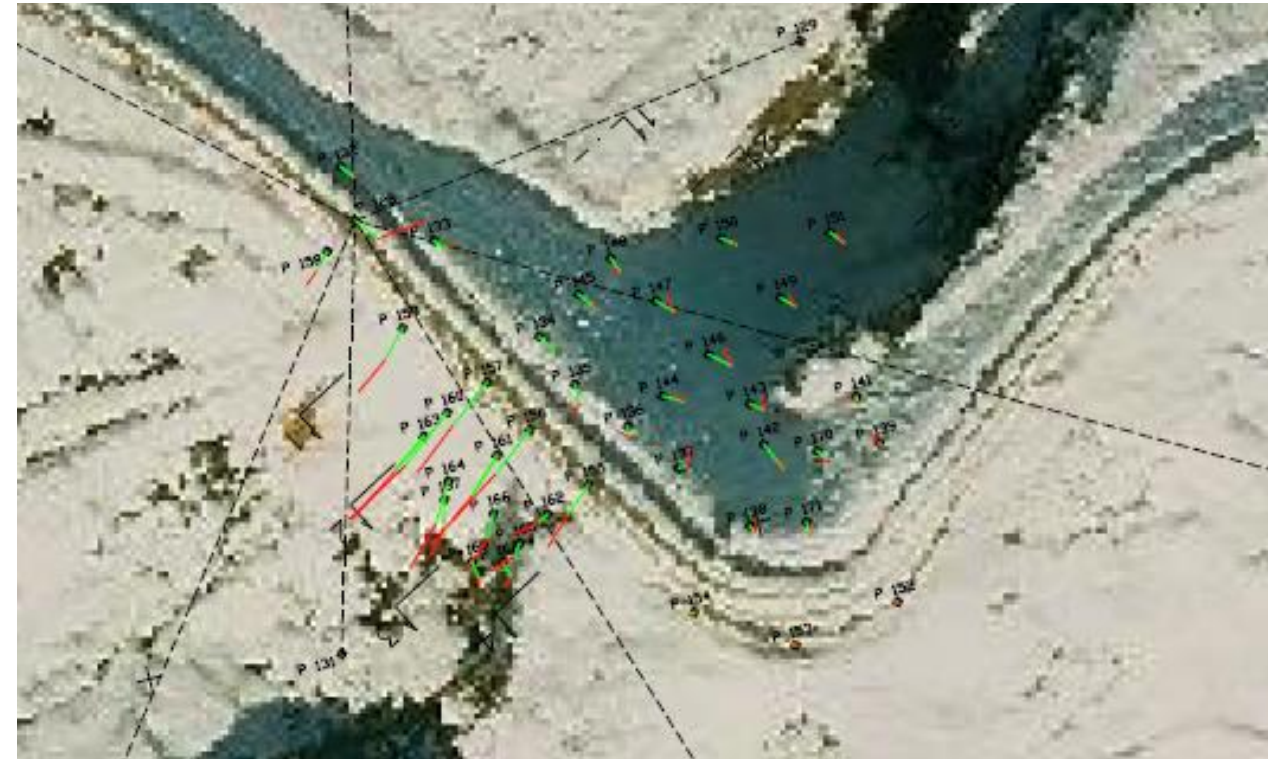
Profilo
geologico:

CARG, 2009



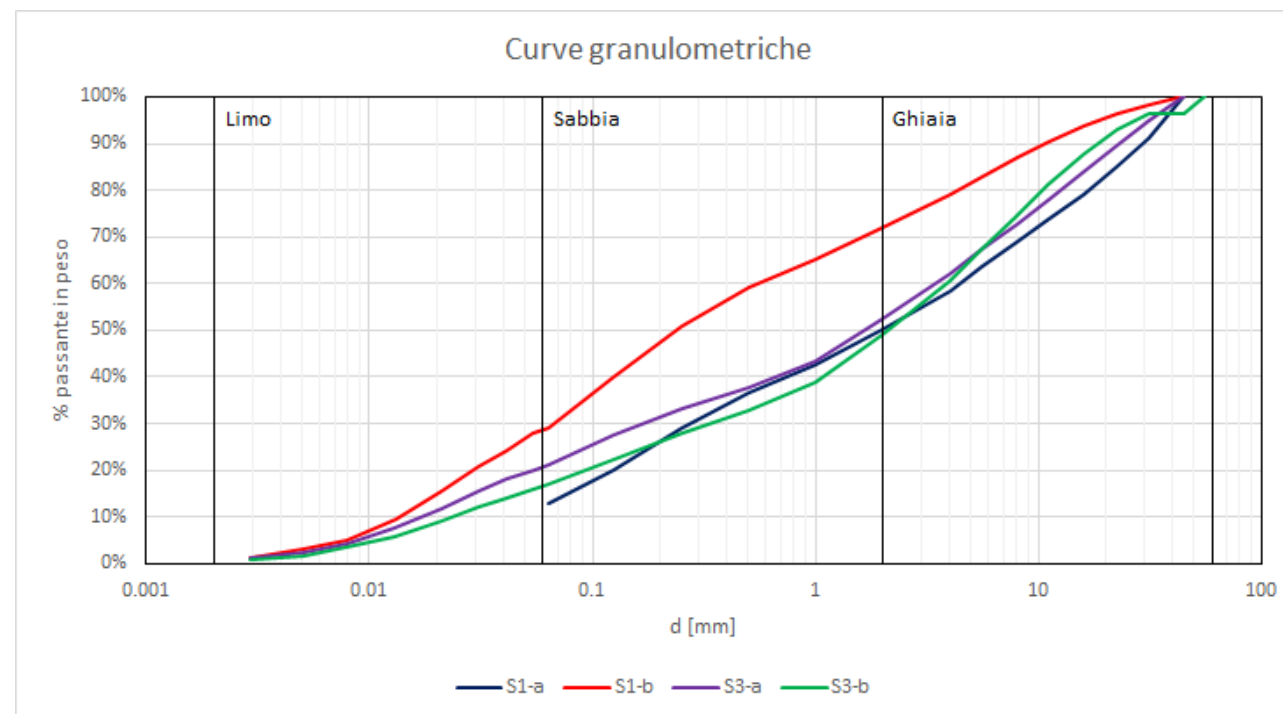
MONITORAGGIO

- Misure topografiche
 - Paramento di valle fermo
 - Paramento di monte: spost. fino 15 mm
- Misure inclinometriche
- Misure piezometriche
 - Strumenti non evidenziano filtrazione
 - Presenza infiltrazioni sezione maestra



INDAGINI GEOTECNICHE: granulometrie

- Classificazione delle terre [UNI 11531]:
 - Classe A-1-b (solo S1-b in A-2-4)
 - Capacità portante da buona a eccellente
 - Bassissima sensibilità all'azione del gelo
- Terreni grossolani:
 - Ghiaia 50% (30% per S1-b)
 - Sabbia 30% (40% per S1-b)
 - Limo <20% (30% per S1-b)
- Terreni decisamente ben graduati:
 - $C_U = d_{60}/d_{10} > 6$
 - S3-a: $C_U = 204$
 - S1-b: $C_U = 40$
- Permeabilità $k = 10^{-3} m/s$



Passante [%]		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Diametro [mm]	S1-a	-	0,122	0,272	0,753	1,952	4,374	8,425	16,985	29,677	44,412
	S1-b	0,014	0,029	0,063	0,125	0,233	0,548	1,605	4,302	10,84	44,141
	S3-a	0,017	0,053	0,166	0,691	1,654	3,441	6,551	12,508	22,72	44,141
	S3-b	0,023	0,093	0,326	1,084	2,13	3,832	6,363	10,317	18,1	54,906

RESISTENZA AL TAGLIO: riempimento

- Risultati prove SPT

- $N_1 = N_{SPT} \cdot \sqrt{98/\sigma'_{v0}}$

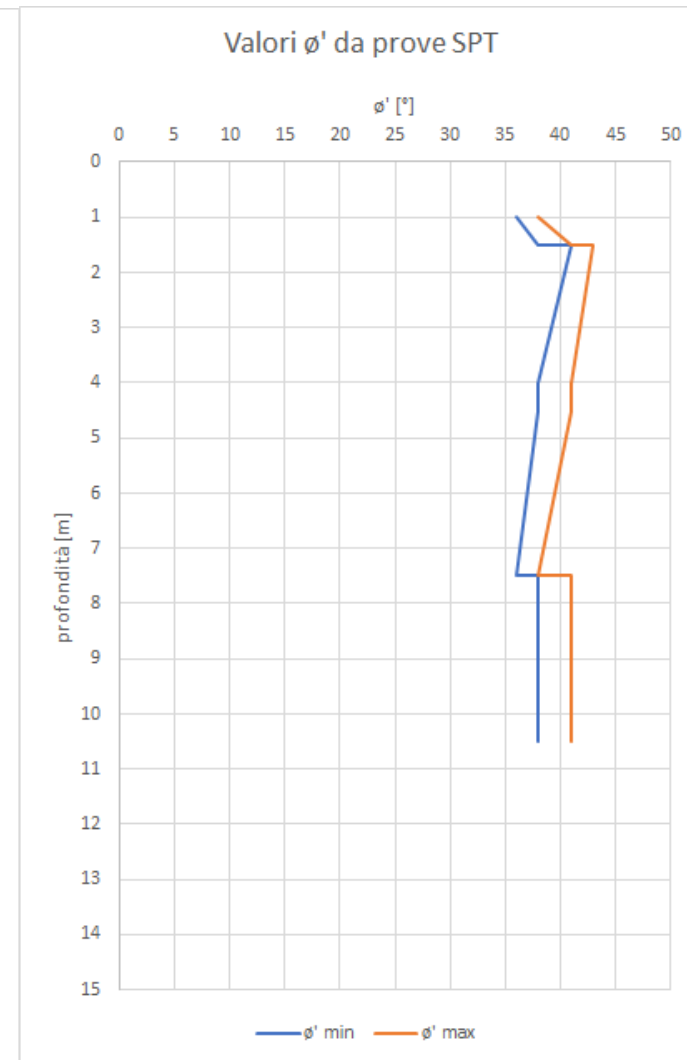
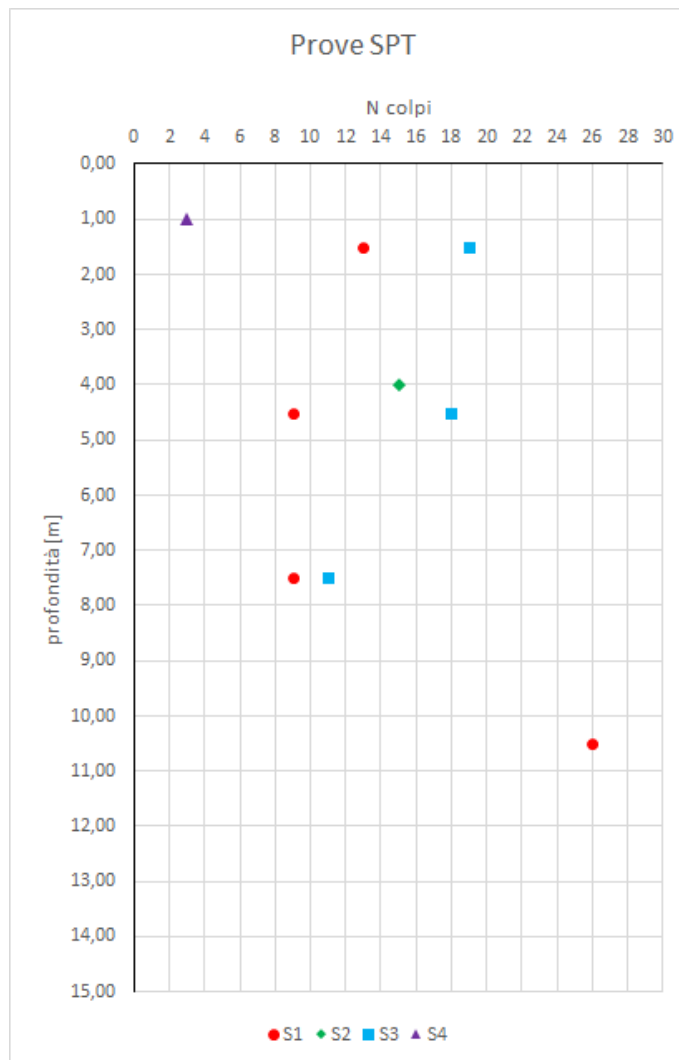
- Determinazione densità relativa D_R

N_1	Addensamento	D_R [%]
0 – 3	Molto sciolti	0 – 15
3 – 8	Sciolti	15 – 35
8 – 25	Mediamente addensati	35 – 65
25 – 45	Addensati	65 – 85
42 – 58	Molto addensati	85 – 100

Cestari, 2009

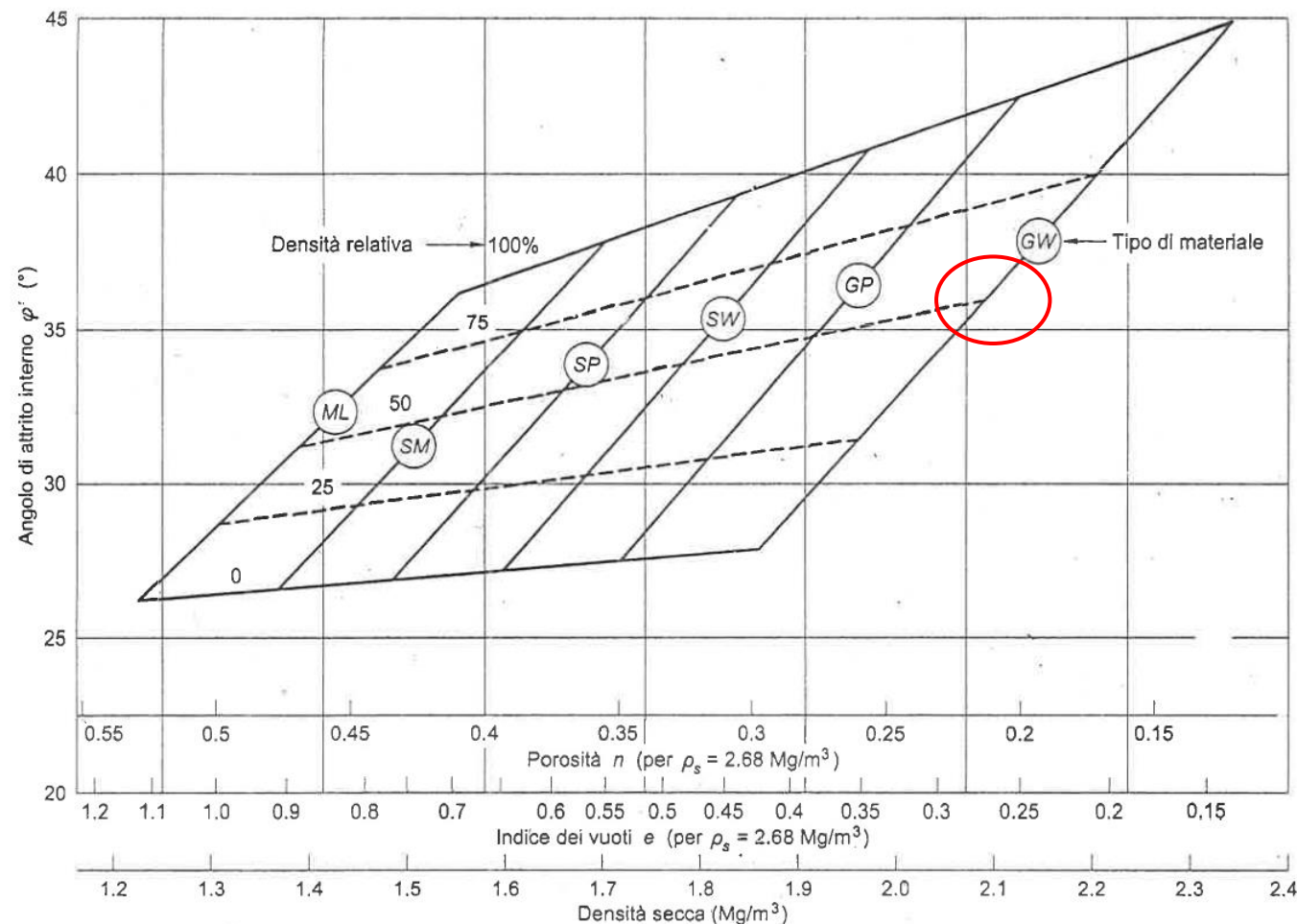
- Determinazione angolo di attrito ϕ'

- Relazione di Schmertmann per sabbie grosse ben graduate: $\phi' = 34,5 + 0,1 \cdot D_R$



RESISTENZA AL TAGLIO: riempimento

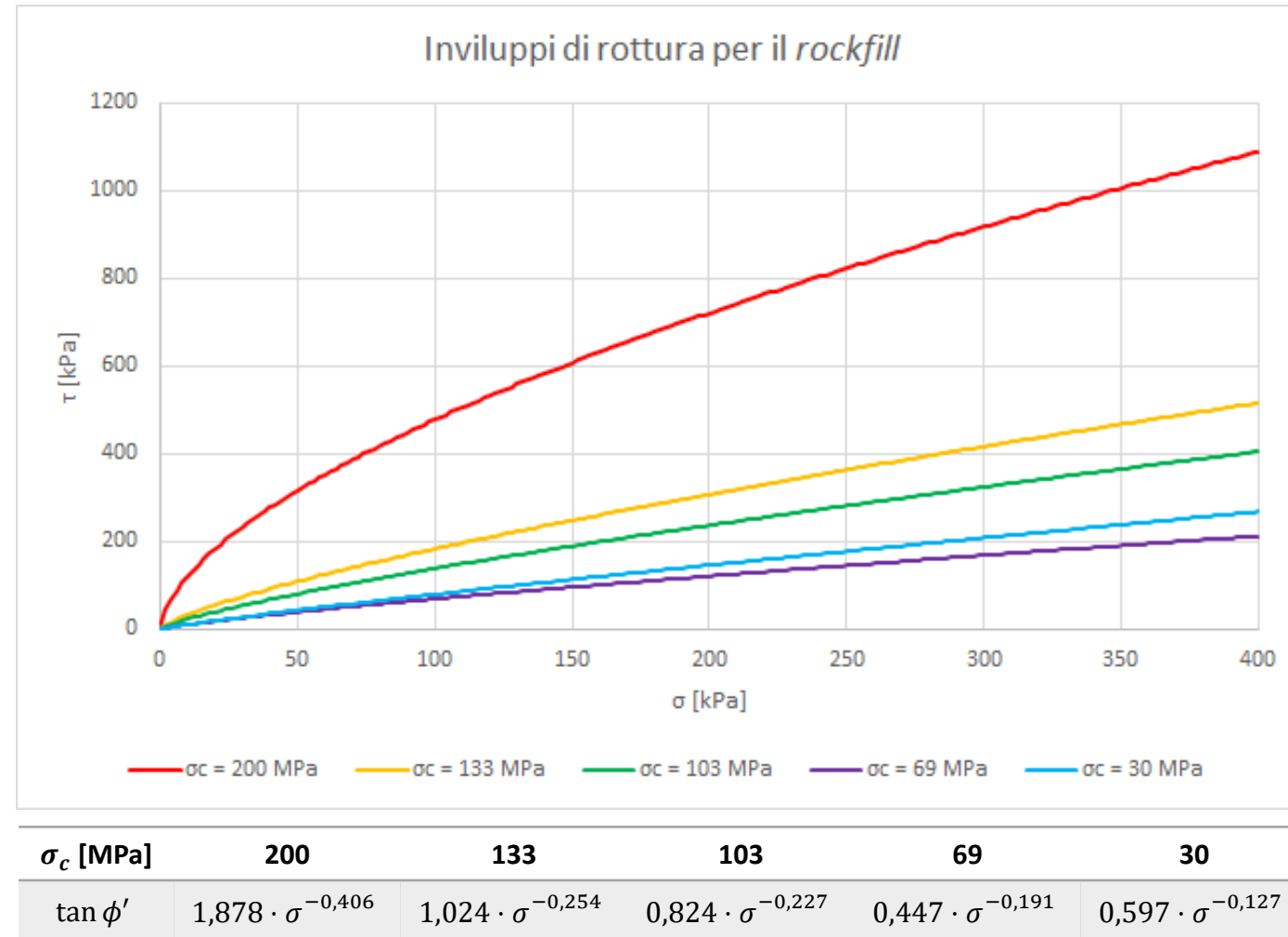
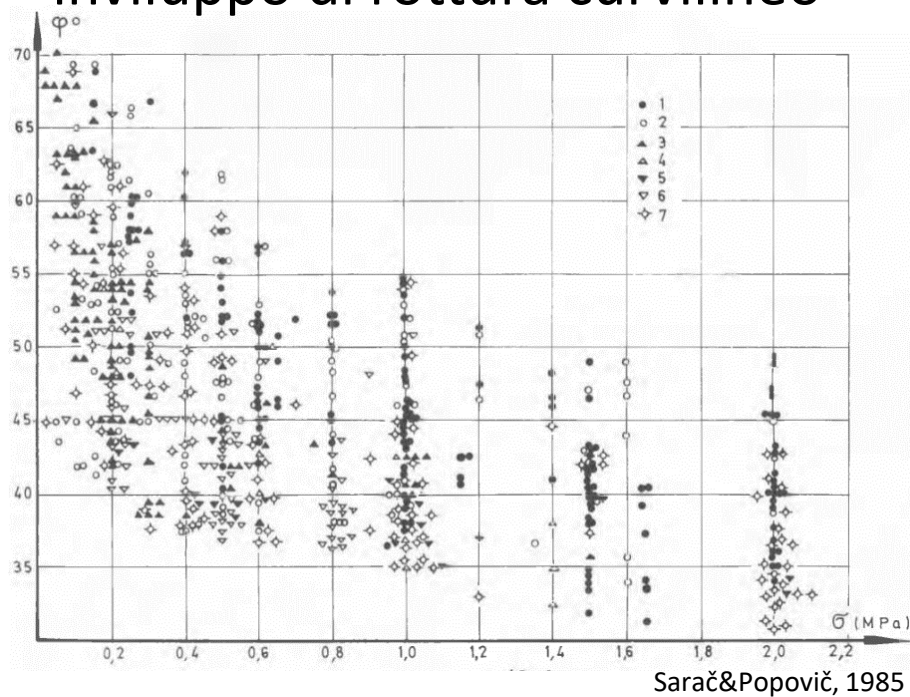
- Densità relativa media ottenuta: 50%
- Tipo di materiale: GW
ghiaia ben graduata (*well-graded gravel*)
- Angolo di attrito $\phi' = 35 - 36^\circ$
- Valore caratteristico del parametro geotecnico deve intendersi come una *stima ragionata e cautelativa*
- Si assume $\phi' = 36^\circ$



Naval Facilities Engineering Command, Soil Mechanics Design Manual

RESISTENZA AL TAGLIO: rivestimento

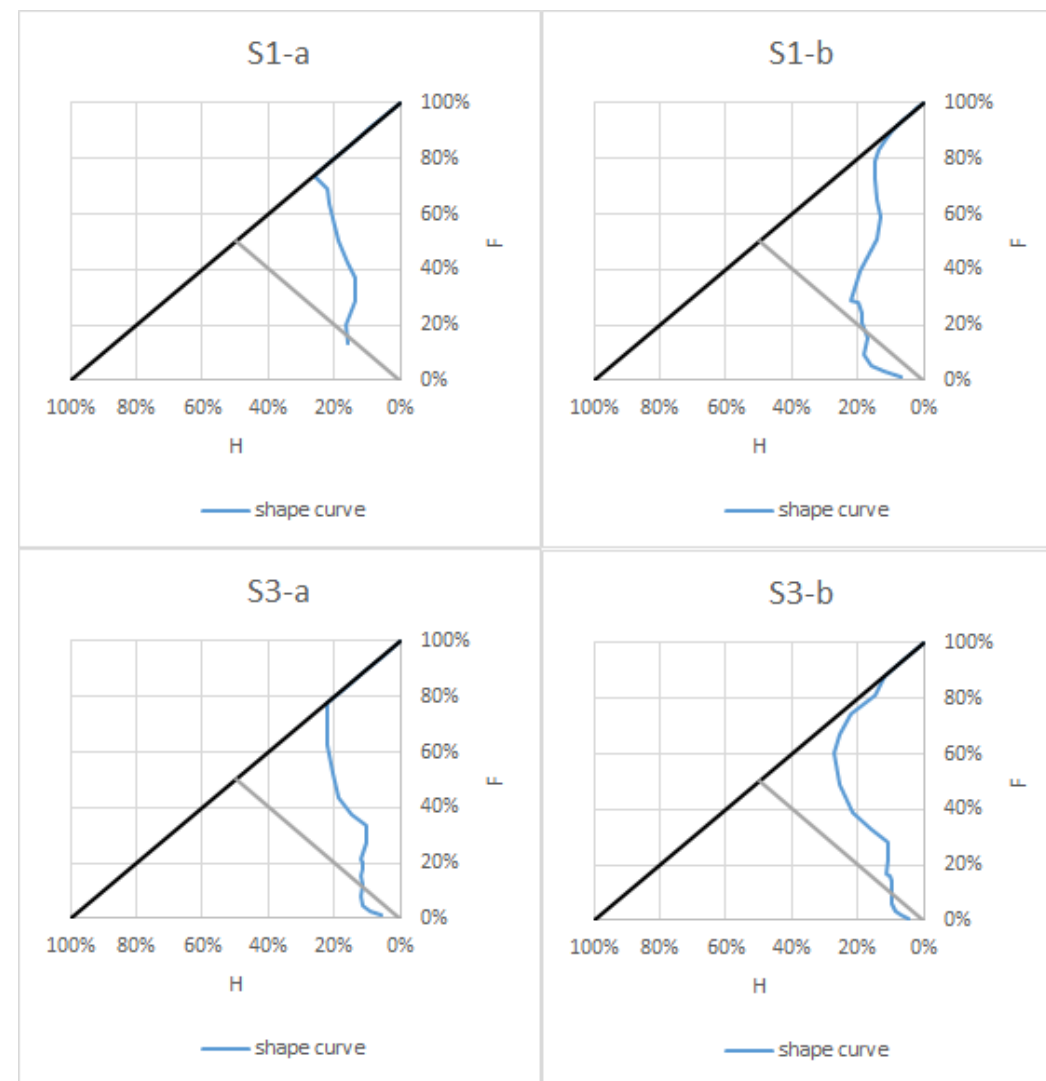
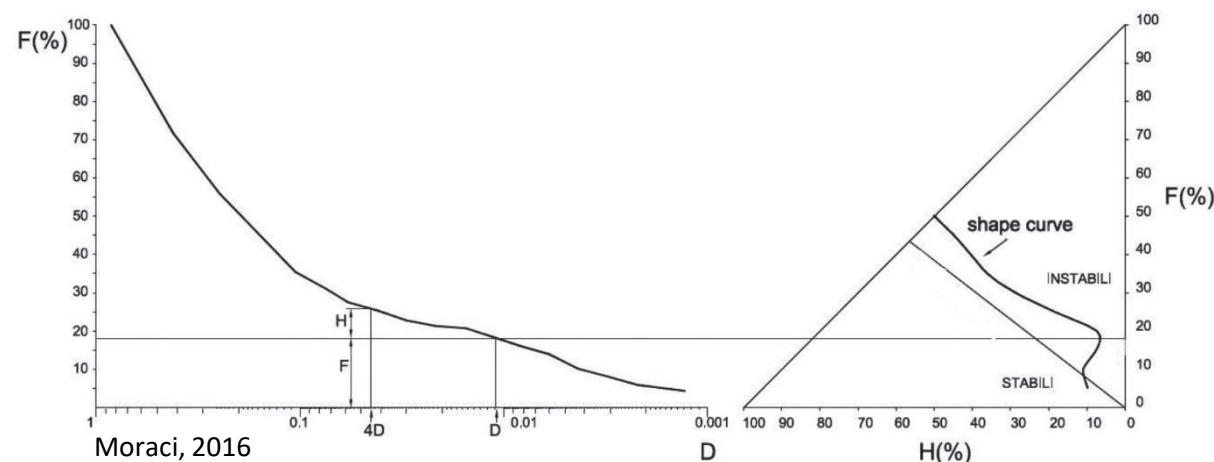
- Letteratura tecnica resistenza *rockfill*
- Grande variabilità dei parametri
- Dipendenza dallo stato di sforzo: inviluppo di rottura curvilineo



Andjelkovic&al, 2018

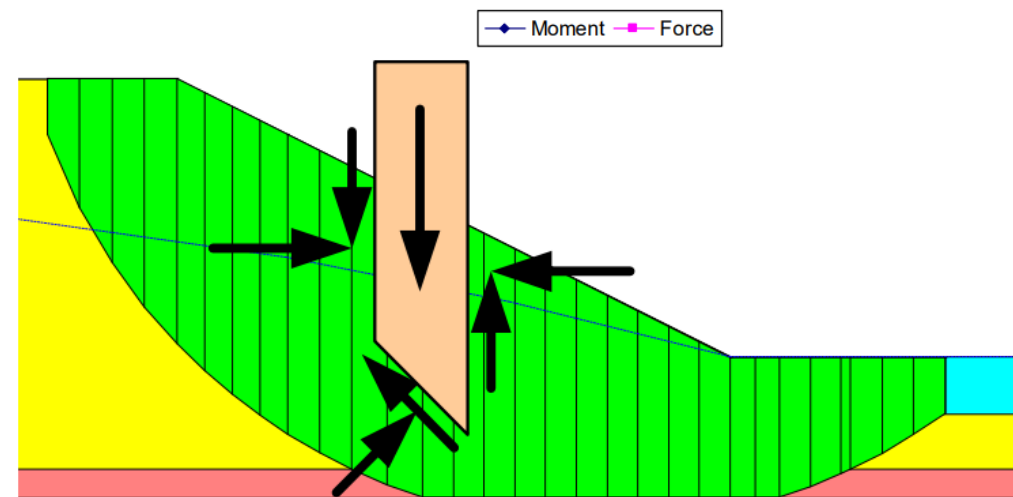
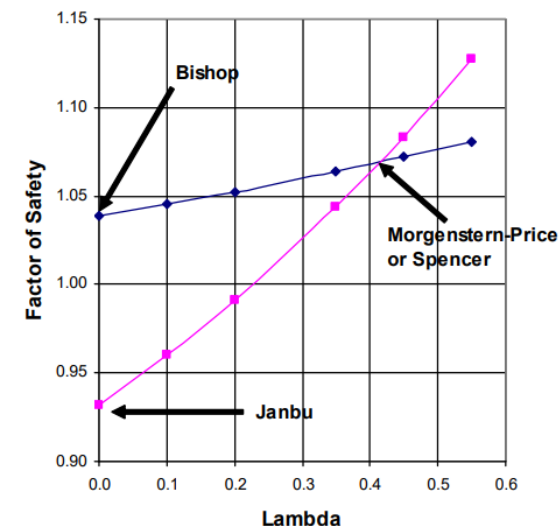
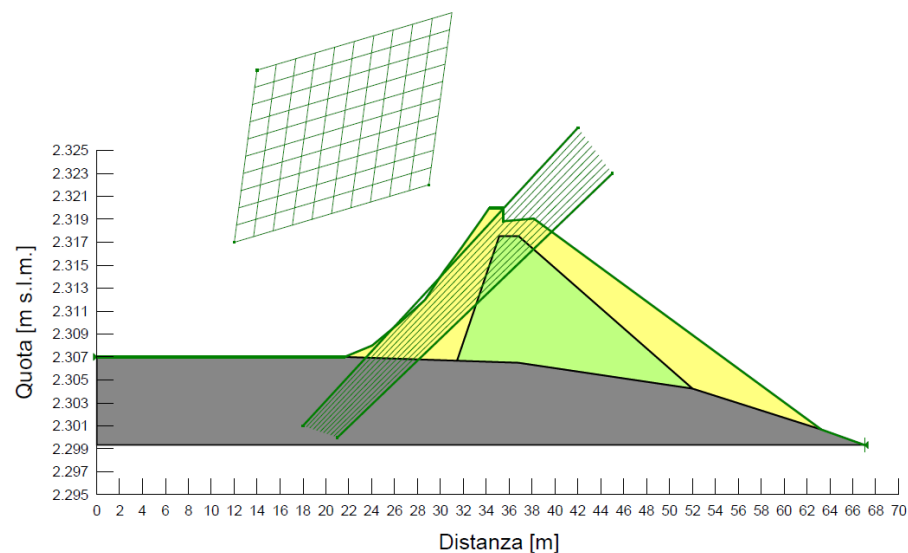
STABILITÀ ALL'EROSIONE INTERNA

- Trascinamento della frazione fine all'interno dello scheletro solido
- In genere i terreni a granulometria estesa sono suscettibili a tale fenomeno
- Analisi della distribuzione granulometrica (Kenney&Lau, 1985)
- Terreno risulta internamente instabile



ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE

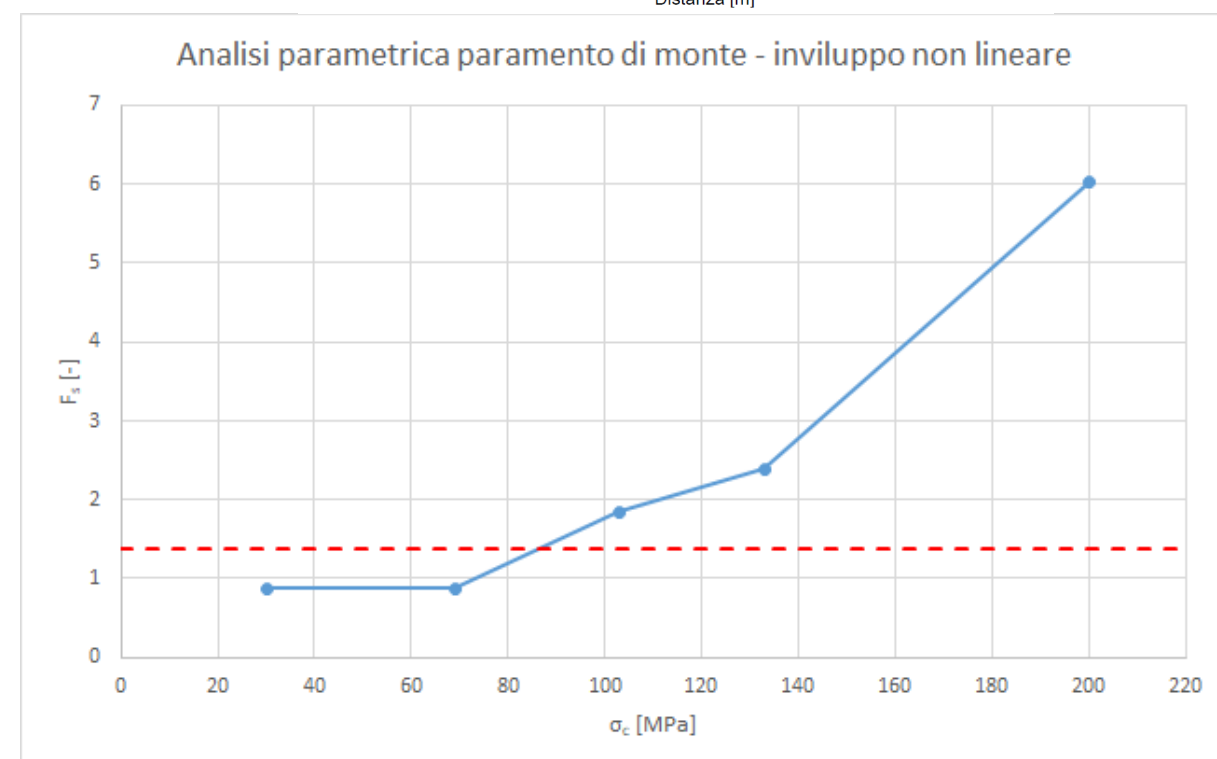
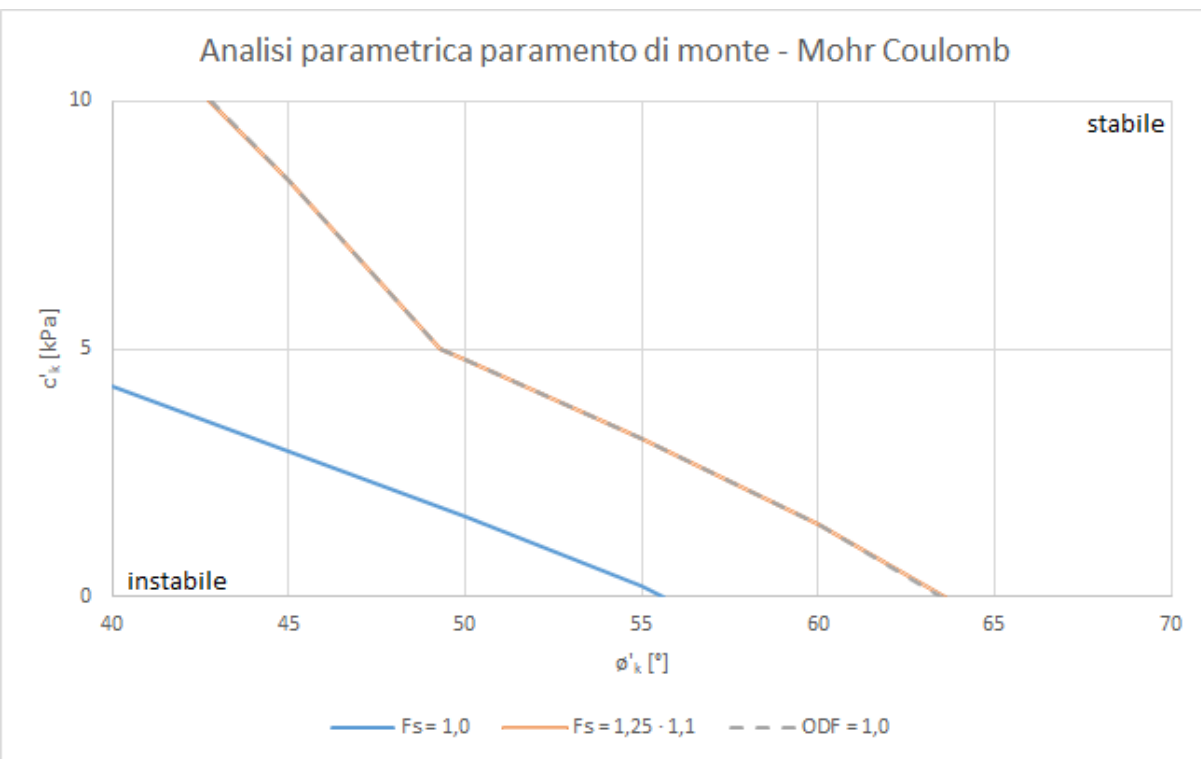
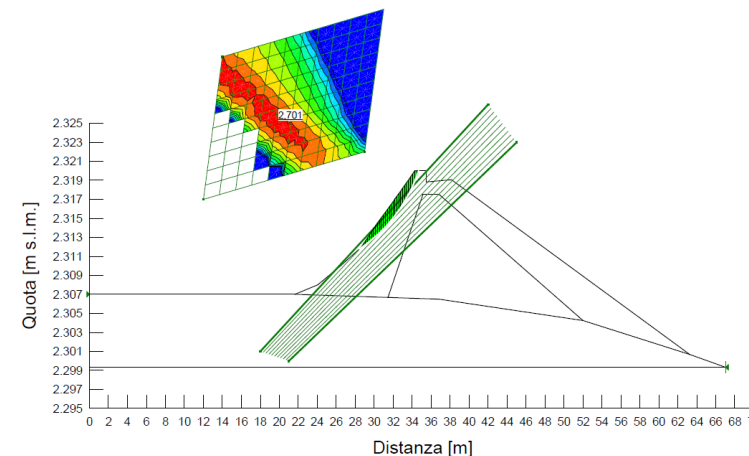
- Metodi di verifica all'equilibrio limite globale, detti *metodi delle strisce*
- Discretizzazione massa instabile
- Assunzioni per forze di interfaccia
- Metodo utilizzato: Morgenstern&Price, 1965



GeoStudio, 2018

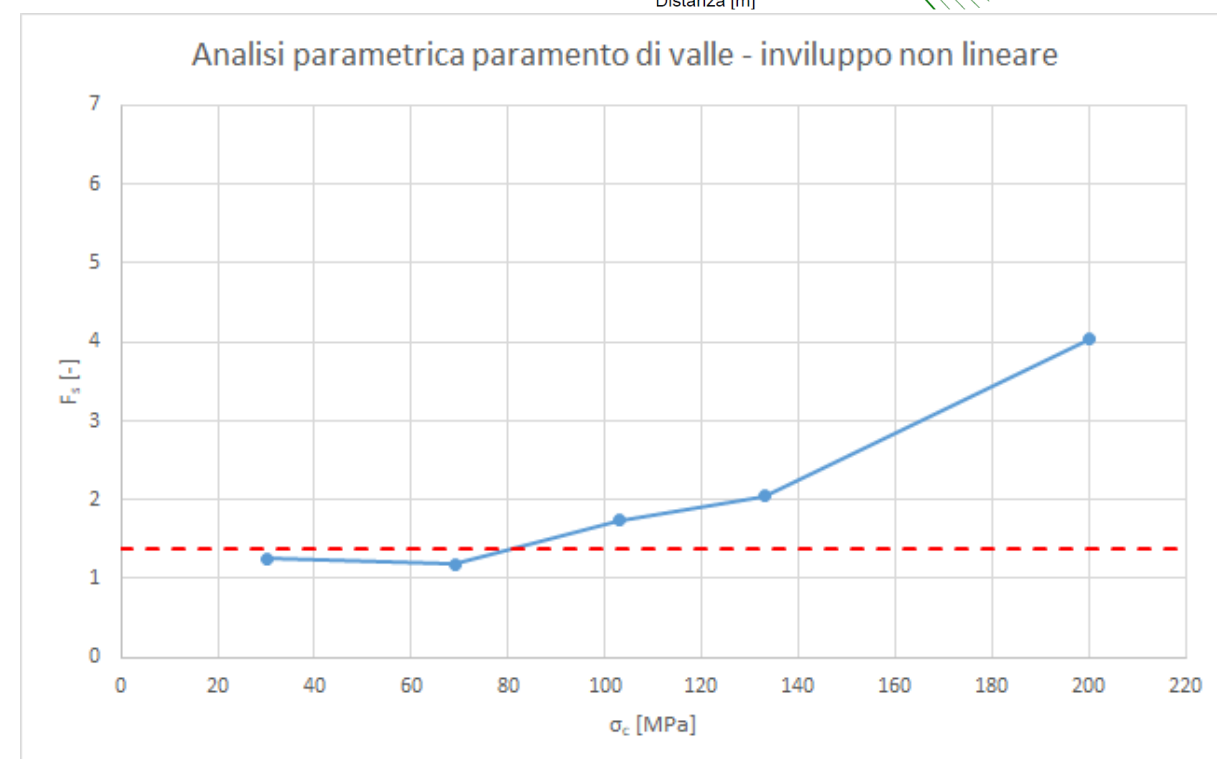
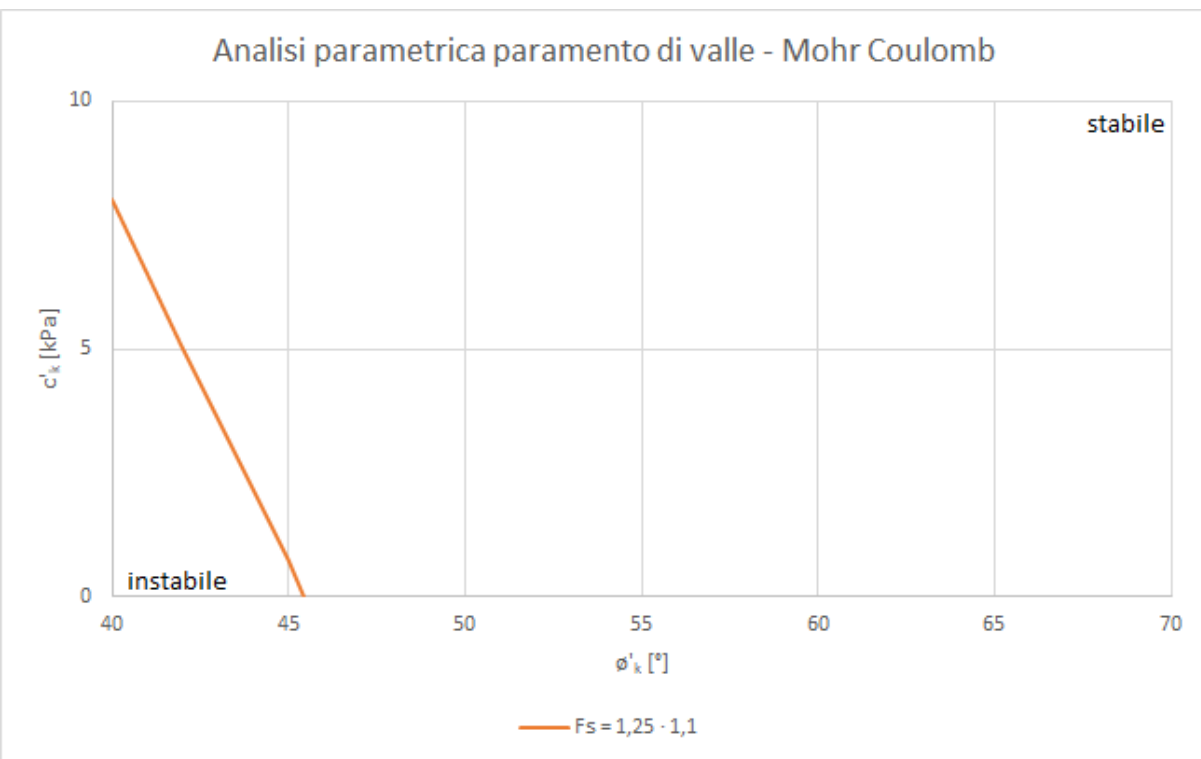
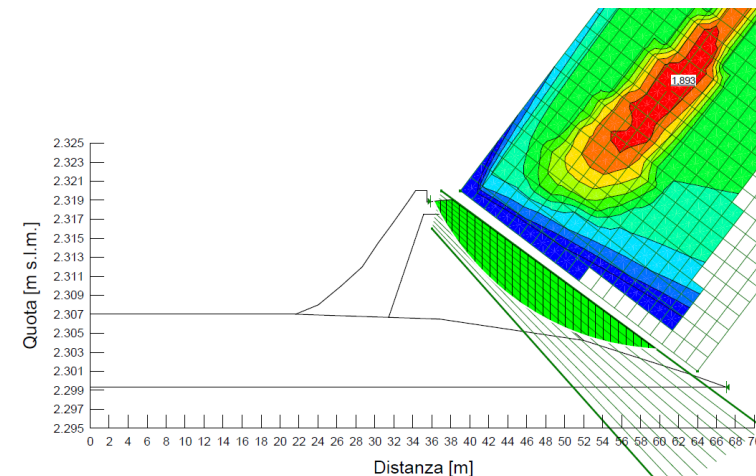
ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE: stato di fatto

- Paramento di monte ($i_{max} = 55^\circ$)



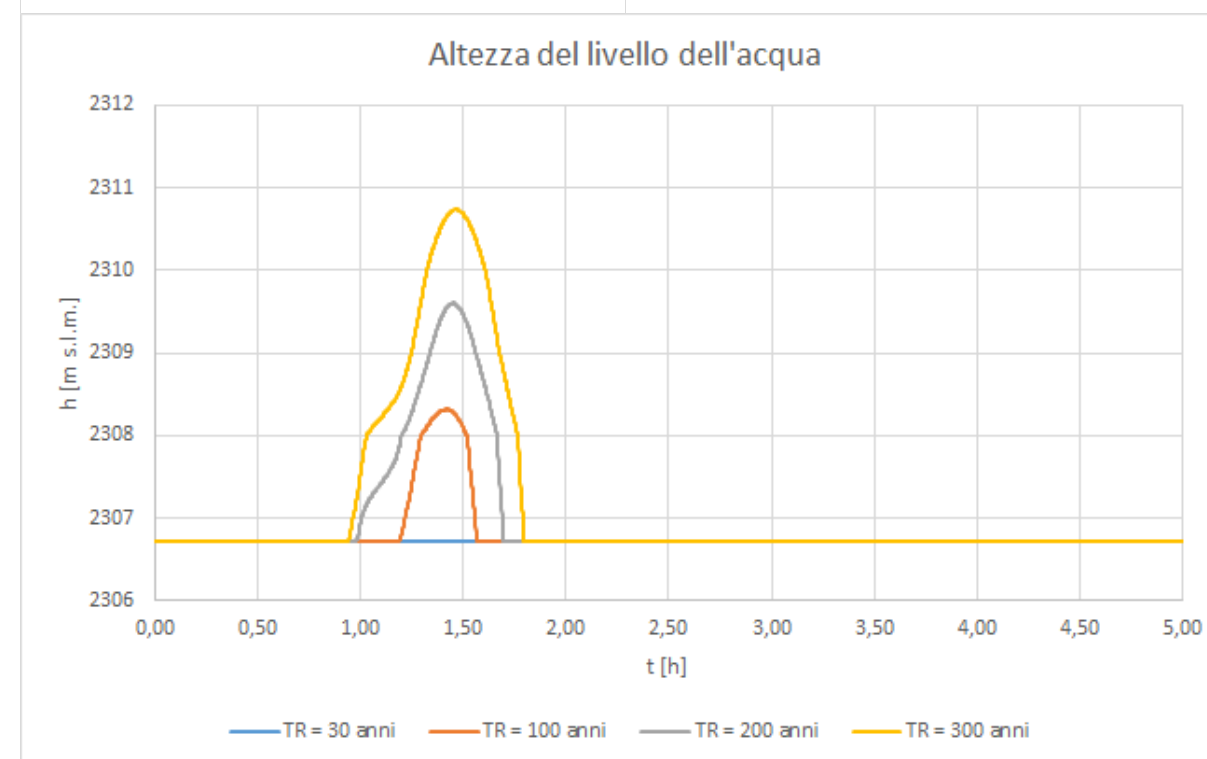
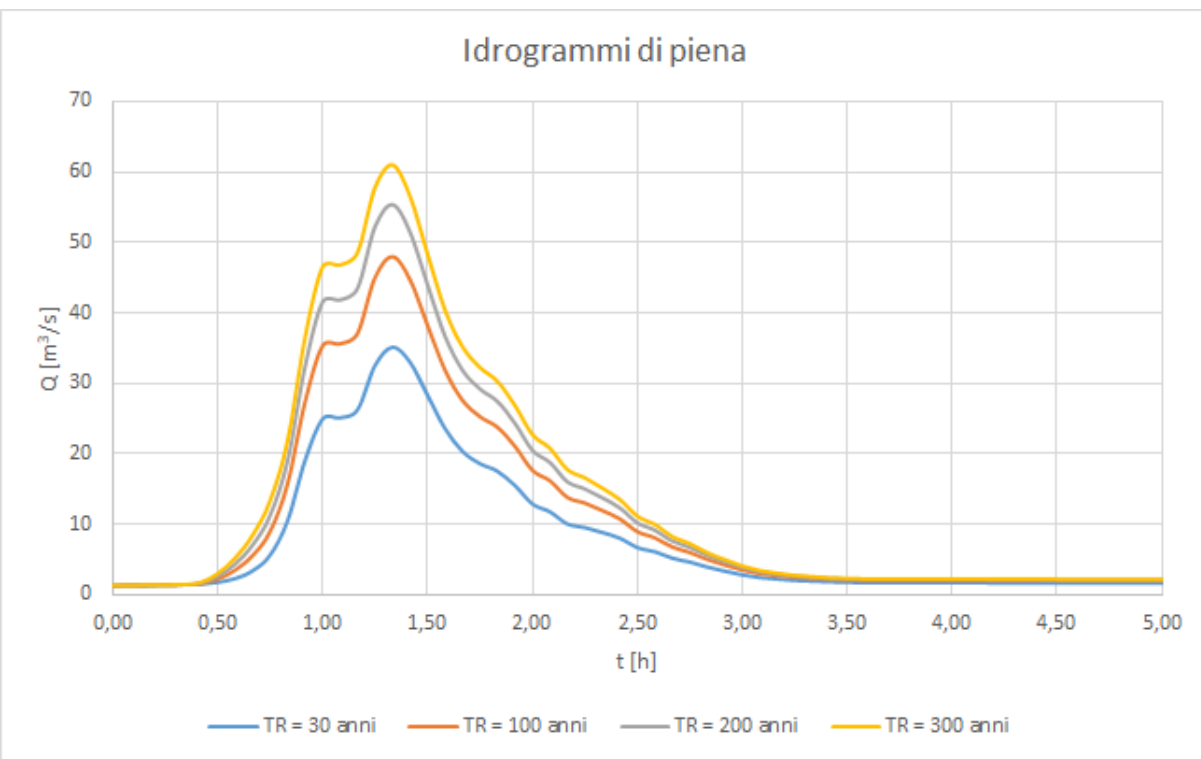
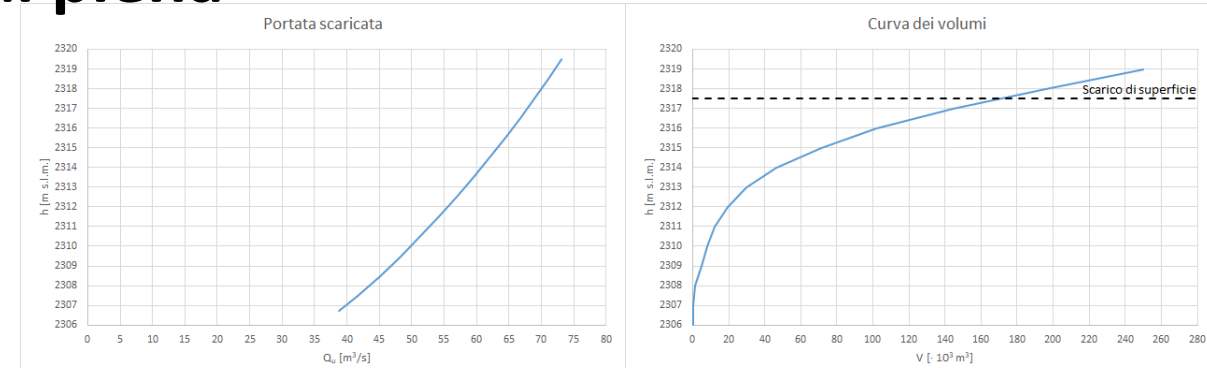
ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE: stato di fatto

- Paramento di valle ($i_{med} = 36^\circ$)



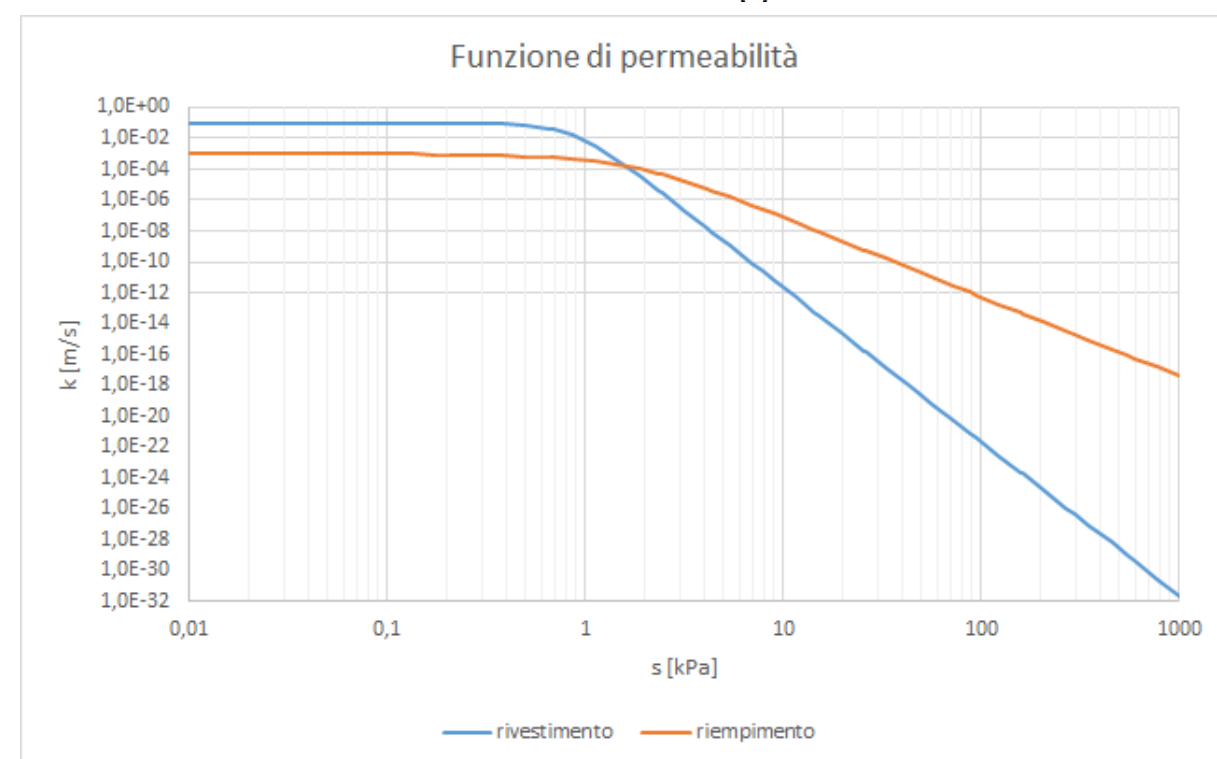
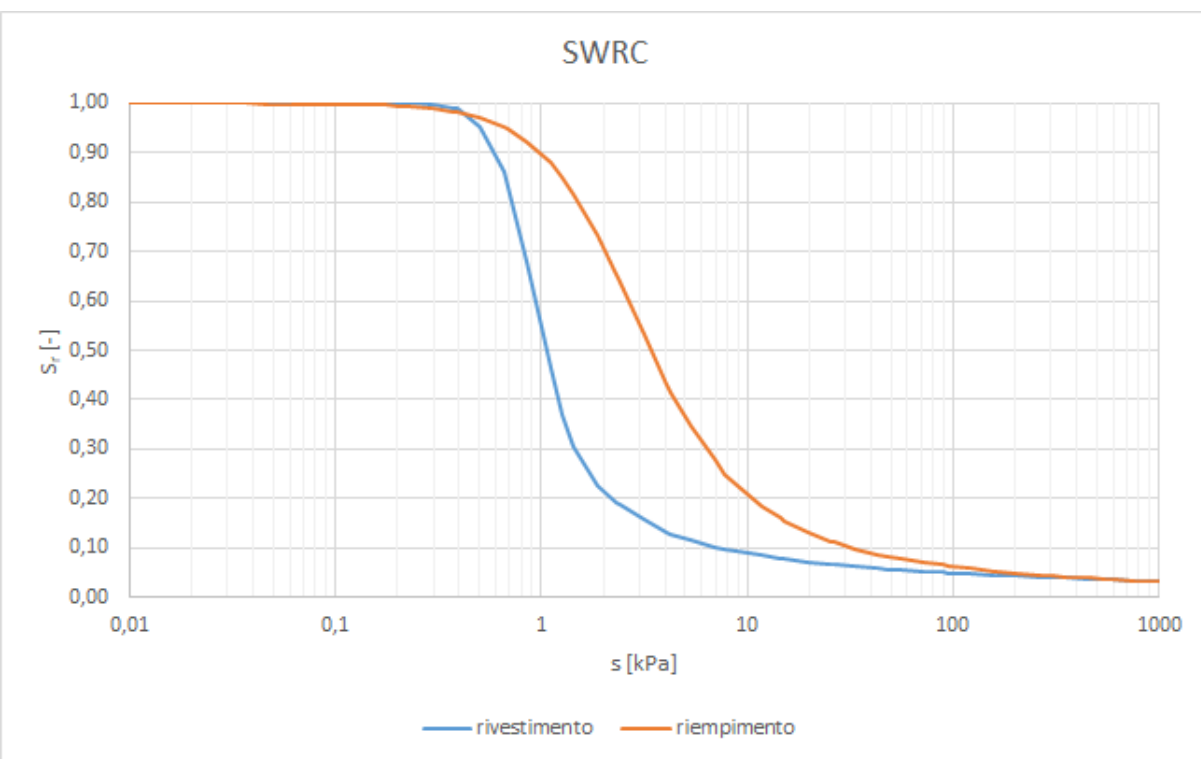
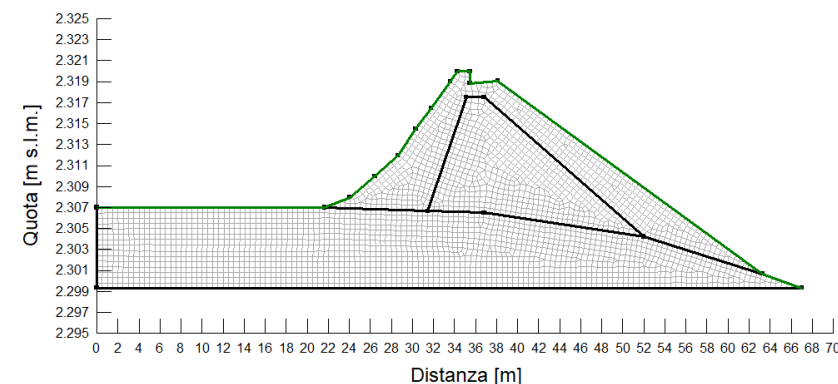
ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE: onda di piena

- Analisi idrologica e idraulica
- $$\frac{dW(h(t))}{dt} = Q_e(t) - Q_u(h(t))$$



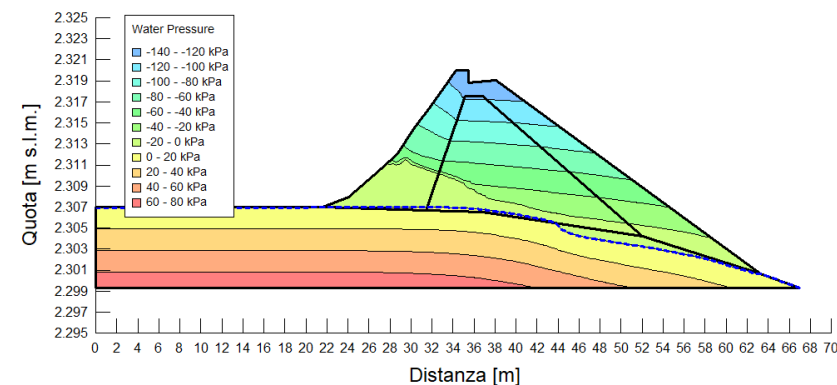
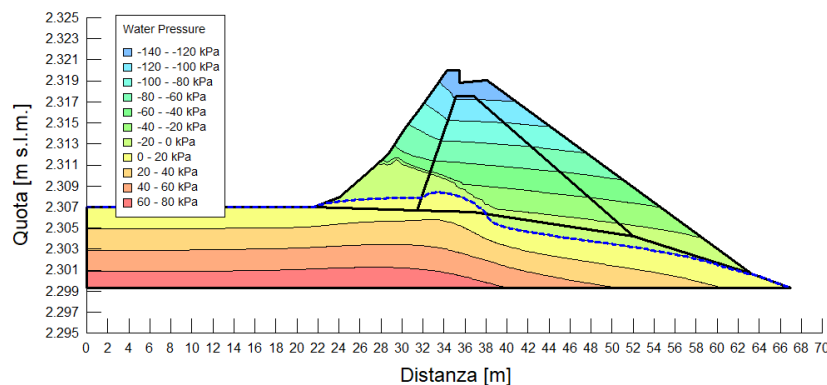
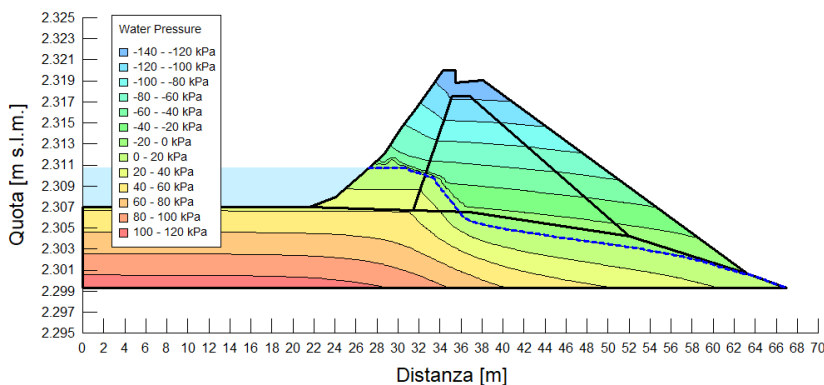
ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE: onda di piena

- Analisi del moto di filtrazione
- Definizione di SWRC e funzione di permeabilità (Van Genuchten, 1980)

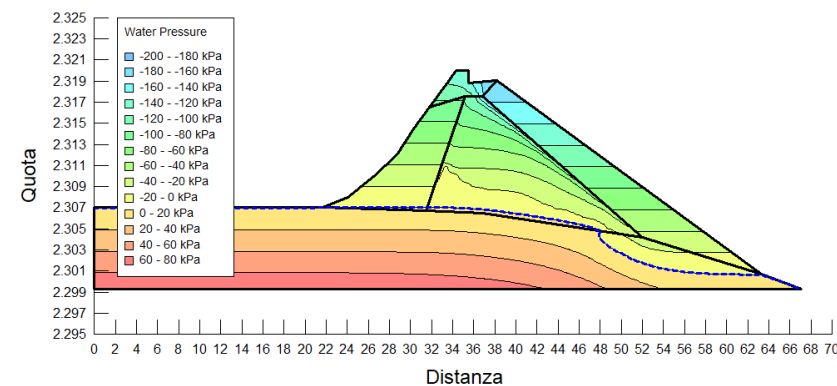
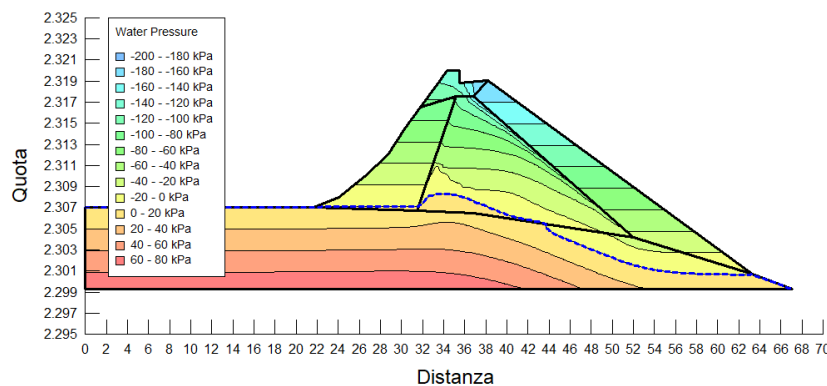
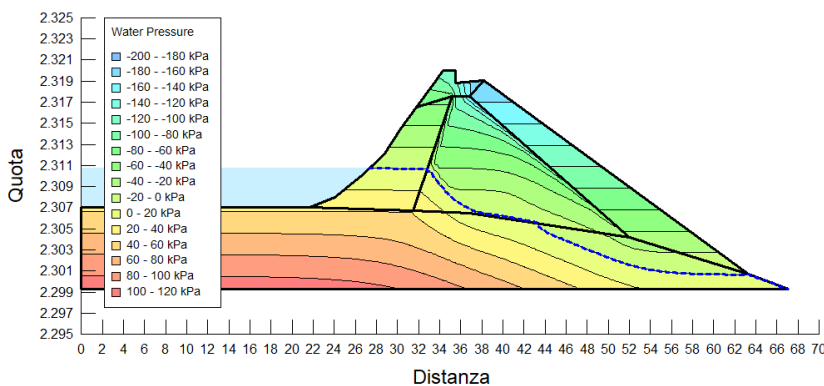


ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE: onda di piena

- Analisi del moto di filtrazione con parziale saturazione

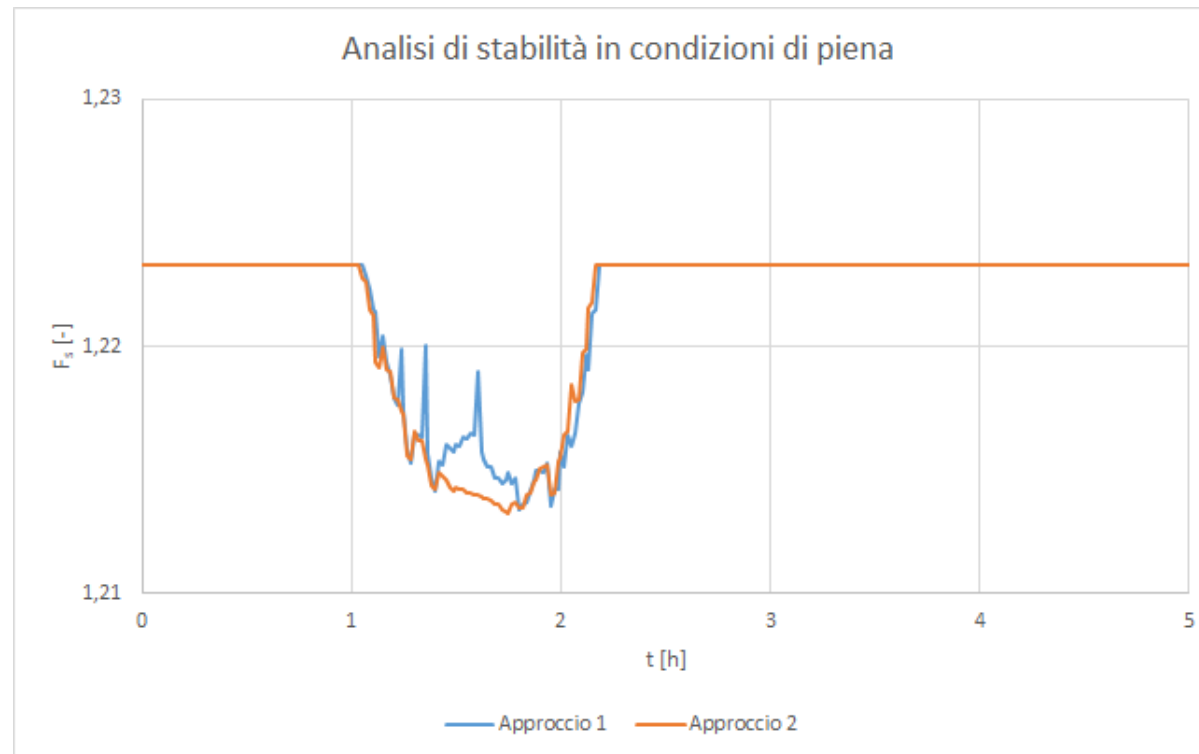


- Analisi del moto di filtrazione con $k = cost$ nel rivestimento



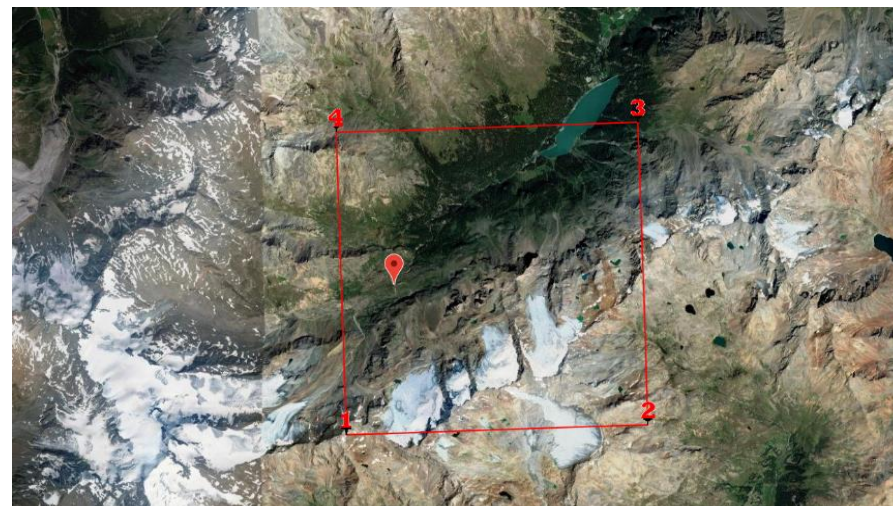
ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE: onda di piena

- Paramento di monte
- Onda di piena con $T_R = 300$ anni



ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE: evento sismico

- Caratterizzazione sismica del sito
- $V_N = 50$ anni; $C_U = 1,5$; $V_R = 75$ anni
- Categoria di sottosuolo: A
- Categoria topografica: T1
- Analisi con approccio semplificato: metodo pseudostatico



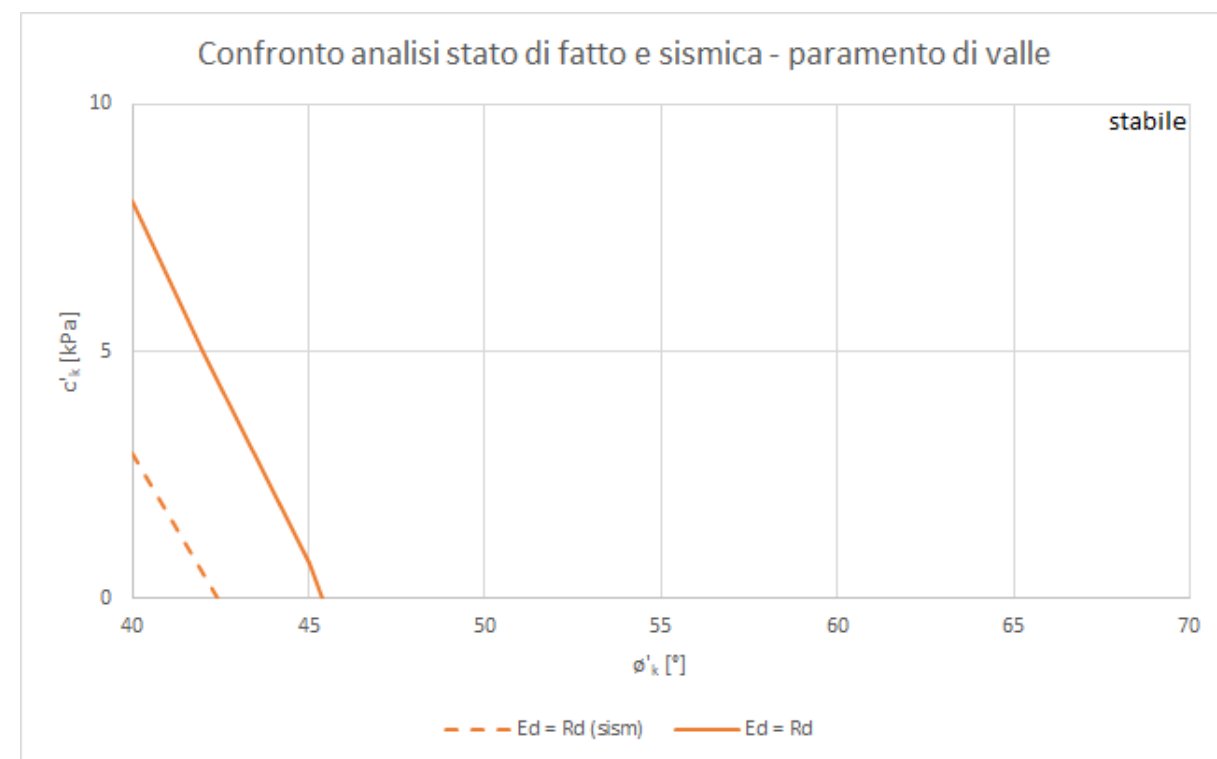
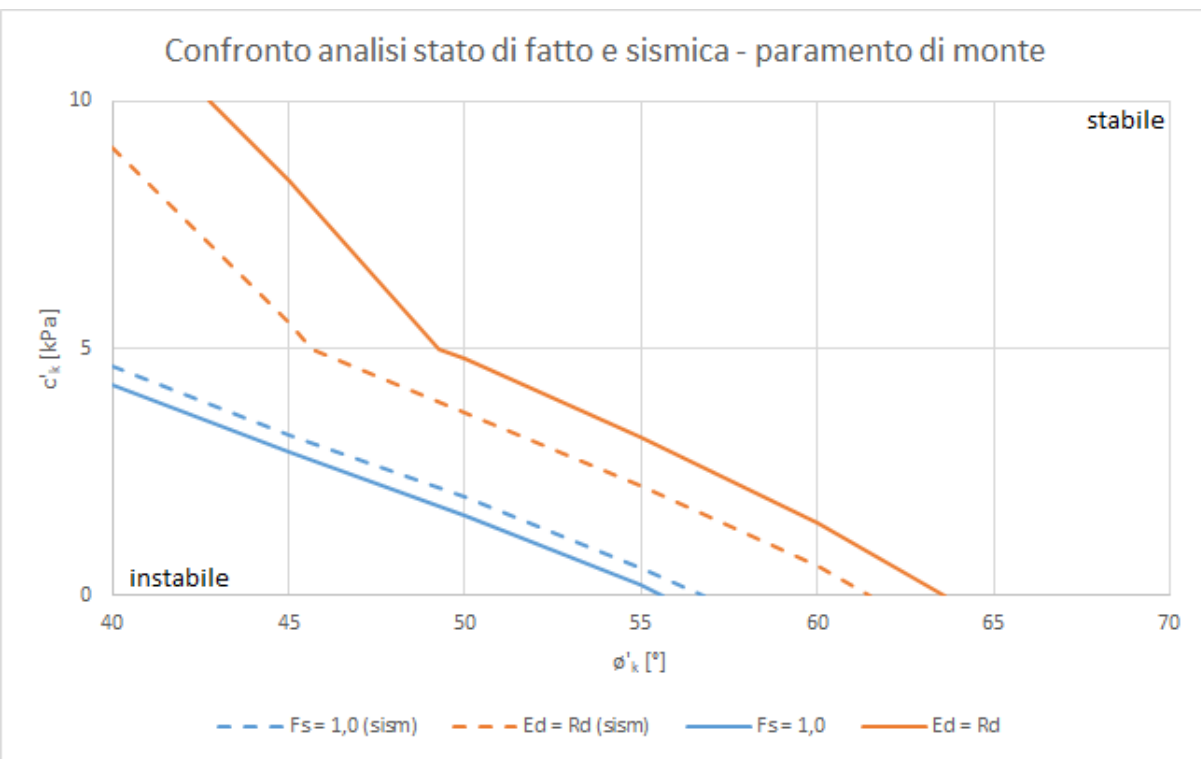
	a_{max}	β_s	k_h	k_v
SLD	0,033	0,47	0,016	0,008
SLV	0,066	0,38	0,025	0,013

	T_R	a_g	F_0	T_c^*
SLO	45	0,026	2,569	0,191
SLD	75	0,033	2,596	0,211
SLV	712	0,066	2,729	0,298
SLC	1462	0,080	2,795	0,313

ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE: evento sismico

- Paramento di monte

- Paramento di valle



CONCLUSIONI

- L'analisi della distribuzione granulometrica ha caratterizzato il materiale di riempimento come **internamente instabile**: risulta necessario procedere alla riduzione delle infiltrazioni in corrispondenza della sezione maestra
- L'analisi di stabilità del paramento di valle non ha riscontrato problematiche particolari
- L'analisi di **stabilità del paramento di monte** verifica il livello di sicurezza richiesto dalla normativa solo se è garantita una elevata resistenza del materiale costituente il rivestimento; i fattori di sicurezza modesti sono coerenti con gli spostamenti rilevati

GRAZIE PER L'ATTENZIONE