

# Analisi del collasso della Feijão Dam I

Guido Musso<sup>(1)</sup>, Gianluca Bella<sup>(1, 2)</sup>, Monica Barbero<sup>(1)</sup>

(1) Politecnico di Torino, (2) Attualmente Pini Swiss



# Intervento basato sulla relazione del Comitato di Esperti Internazionali



## Comitato di Esperti

Peter K. Robertson

(Ph.D., Professor Emeritus, University of Alberta)

Lucas de Melo

(Ph.D., Geosyntec)

David J. Williams

(Ph.D., Prof. University of Queensland, Australia)

G. Ward Wilson

(Ph.D., Prof. University of Alberta)

## Slides di integrazione dalle Tesi di Dottorato

Integrazione

A. Carrera (2008) Mechanical behaviour of Stava Tailings

A. Azizi (2016) Effects of hydraulic repeated load on the hydromechanical response of an unsaturated silty soil

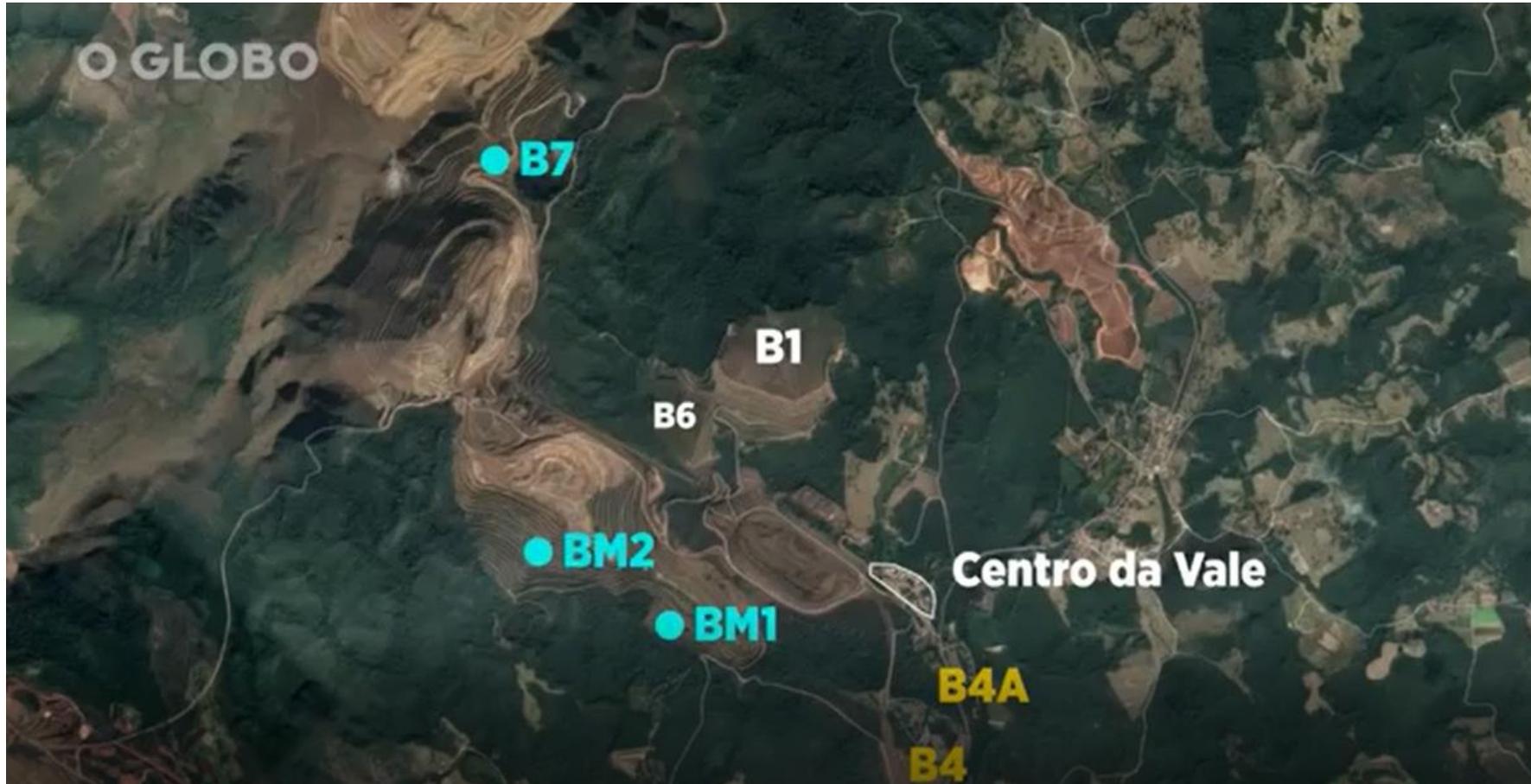
G. Bella (2017) Hydro-Mechanical behaviour of Tailins in Unsaturated conditions



# Minas Gerais



## Il complesso di Córrego do Feijão



## La diga sede del collasso



Vista dall'alto della Diga I (Google Earth, 2018)

# L'incidente

---

25 Gennaio 2019  
12:28 ora locale

The image shows a large red rectangular area. On the right side of this area, the words "The Guardian" are written in a white, serif font. "The" is positioned above "Guardian".

**The  
Guardian**

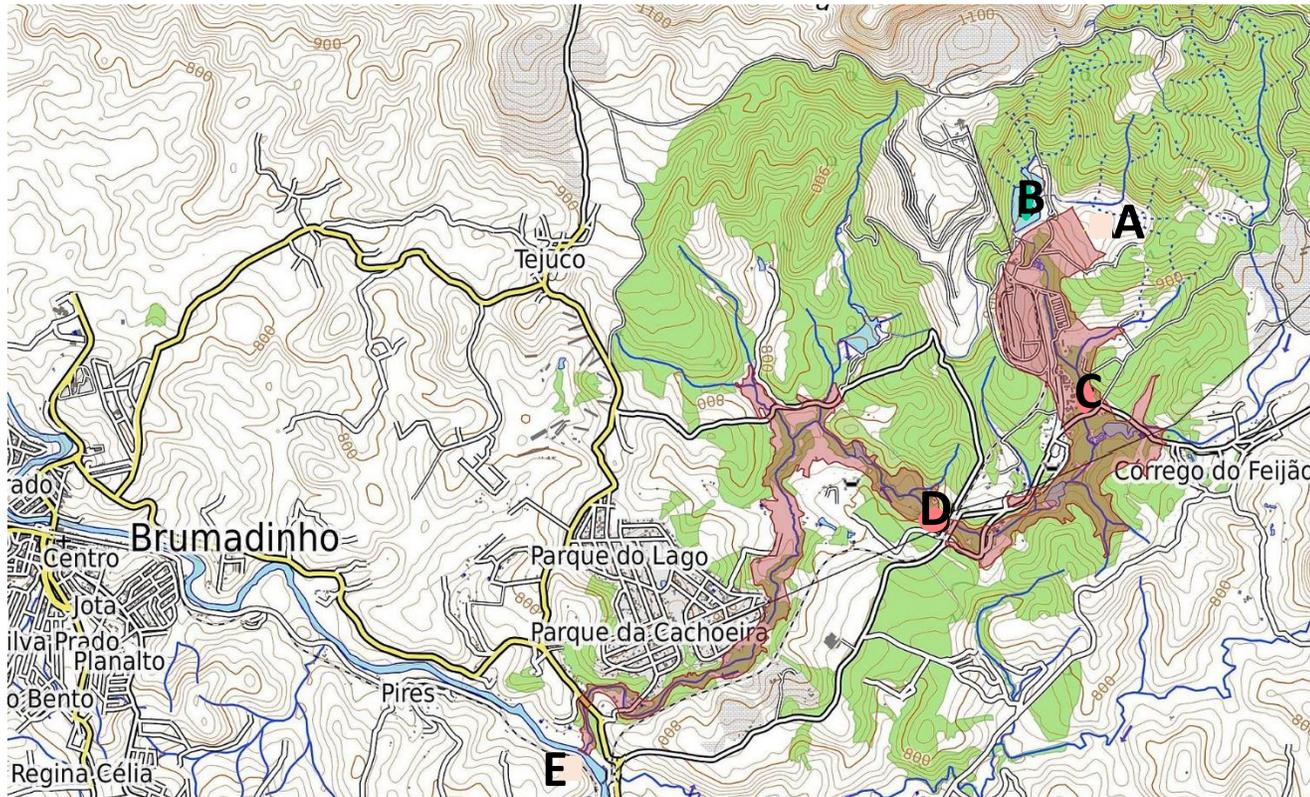
# L'incidente

---



Viste aeree al 28 marzo 2019

# L'incidente



ESA / Copernicus Sentinel-2A-L1C Satellite and OpenStreetMap.org contributors - Map Data: OpenStreetMap.org contributors. Map style: OpenTopoMap.org [\[1\]](#) with SRTM data (Shuttle Radar Topography Mission). Shape of mud flow from dam collapse: Sentinel Satellite S2-L1C 2019-01-27

In rosso l'area investita dal trasporto dei detriti dopo il crollo della diga

- A Diga I
- B "Diga VI" (danneggiata)
- C Uffici e mensa (distrutti)
- D Ponte ferroviario (distrutto)
- E Immissione degli inerti nel Rio Paraopeba.

Fonte Wikipedia

# L'incidente

---

Onda di fango di 9.7 milioni di m<sup>3</sup> e 30 m di altezza

(42 campi da calcio ricoperti da 30 m)

(volume d'acqua pari a circa 2000 piscine olimpioniche)

270 vittime (soprattutto impiegati Vale)

3 locomotive, 132 vagoni, un ponte ferroviario, 100 m di ferrovia

300 km di inquinamento fluviale  
(fonte agenzia nazionale delle acque)



Ponte Ferroviario a 3 km dalla Feijao dam  
Fonte Wikipedia, foto di Guilherme Venaglia

# Struttura della presentazione

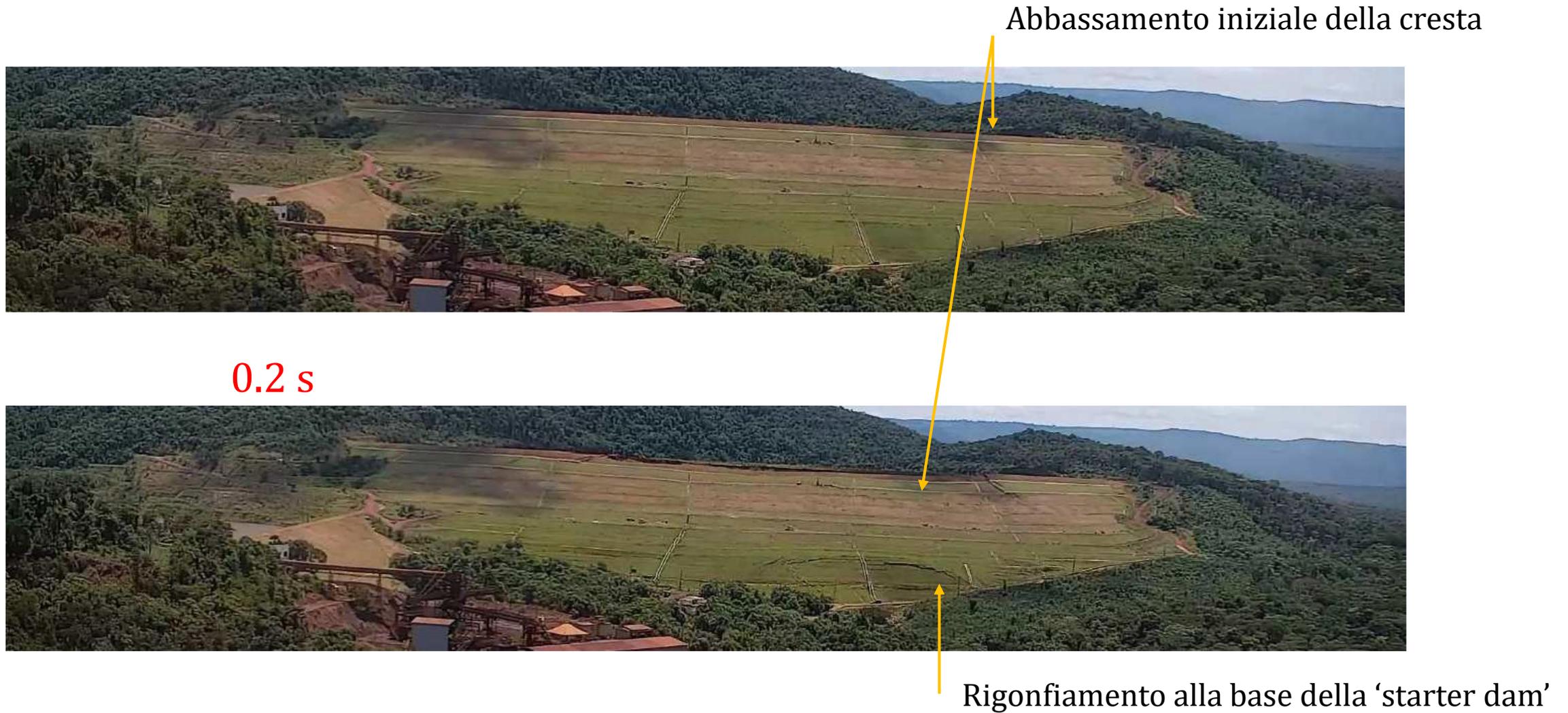
---

- Cinematica del collasso
- Storia costruttiva e verifiche progettuali
- Stratigrafia e prove in sito
- Il modello idraulico
- Il comportamento meccanico
- Il modello numerico e le conclusioni sul collasso

---

## La cinematica

# Cinematica



# Cinematica

---

5.5 s



Esteso collasso della cresta

5.8 s



Eruzione di acqua

Seconda eruzione di acqua alla base

11 s



Regressione della rottura

18 s



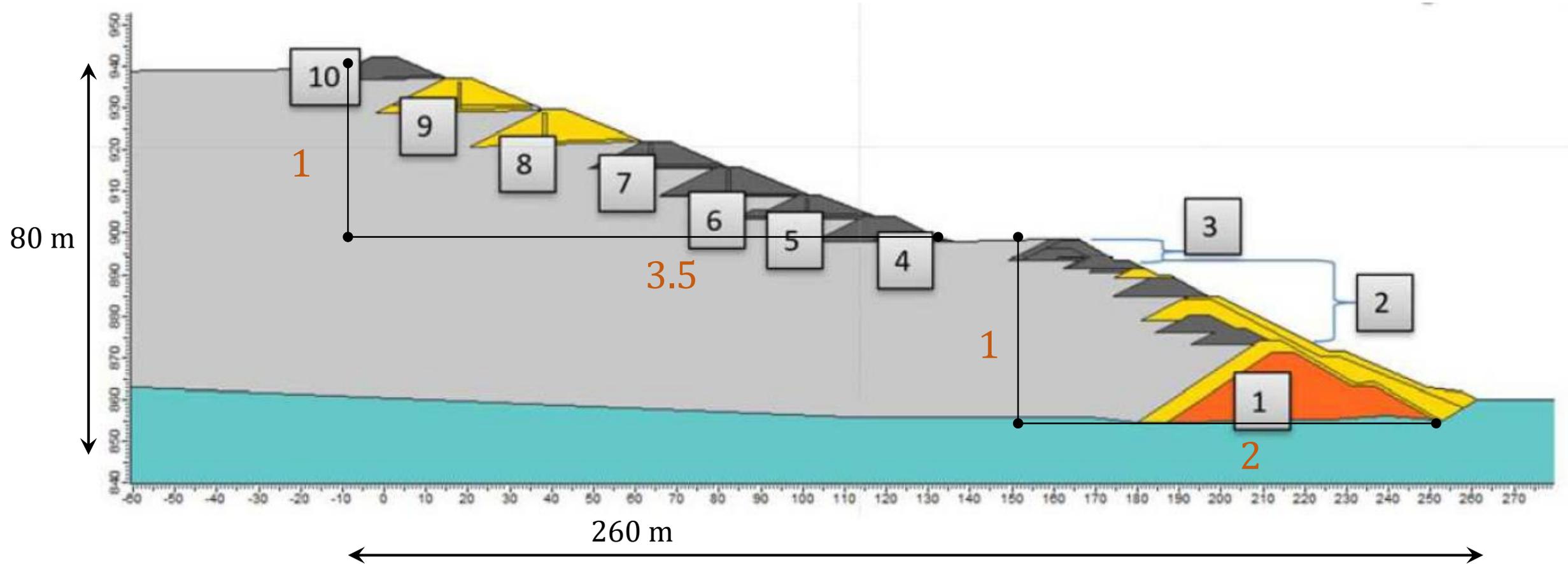
Regressione della rottura

---

## La storia costruttiva e le verifiche progettuali

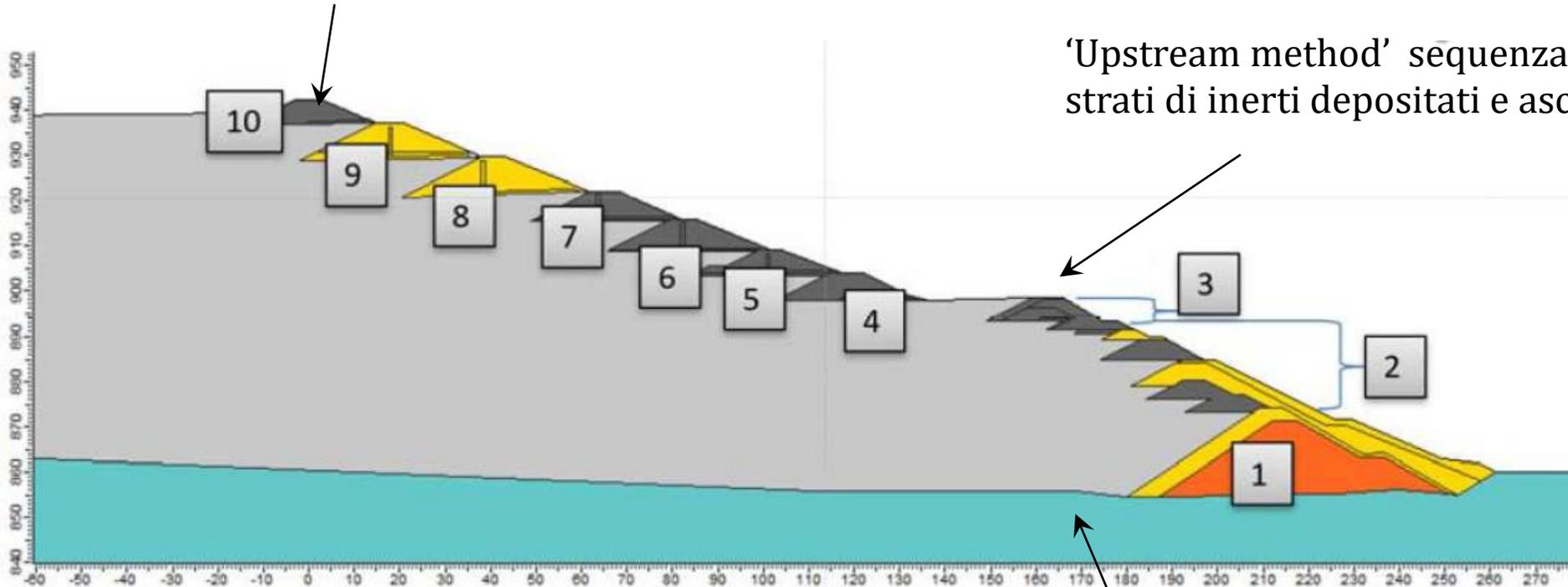
# Costruzione

- Costruzione iniziata nel 1976
- 9 elevazioni successive, fino al 2013



# Costruzione

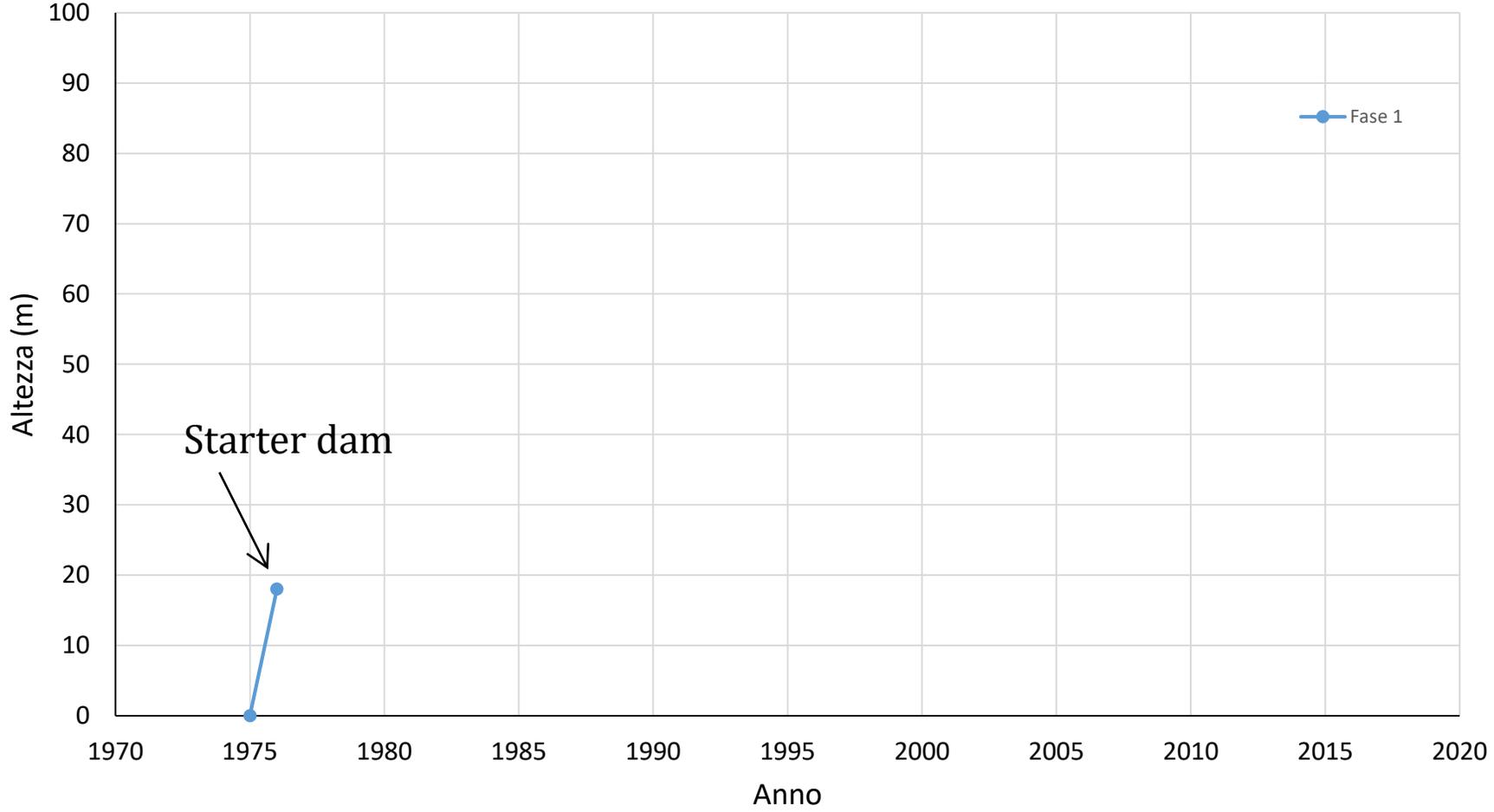
Le berme sono state realizzate prelevando materiale dai tailings (idealmente, dalla frazione più grossolana)



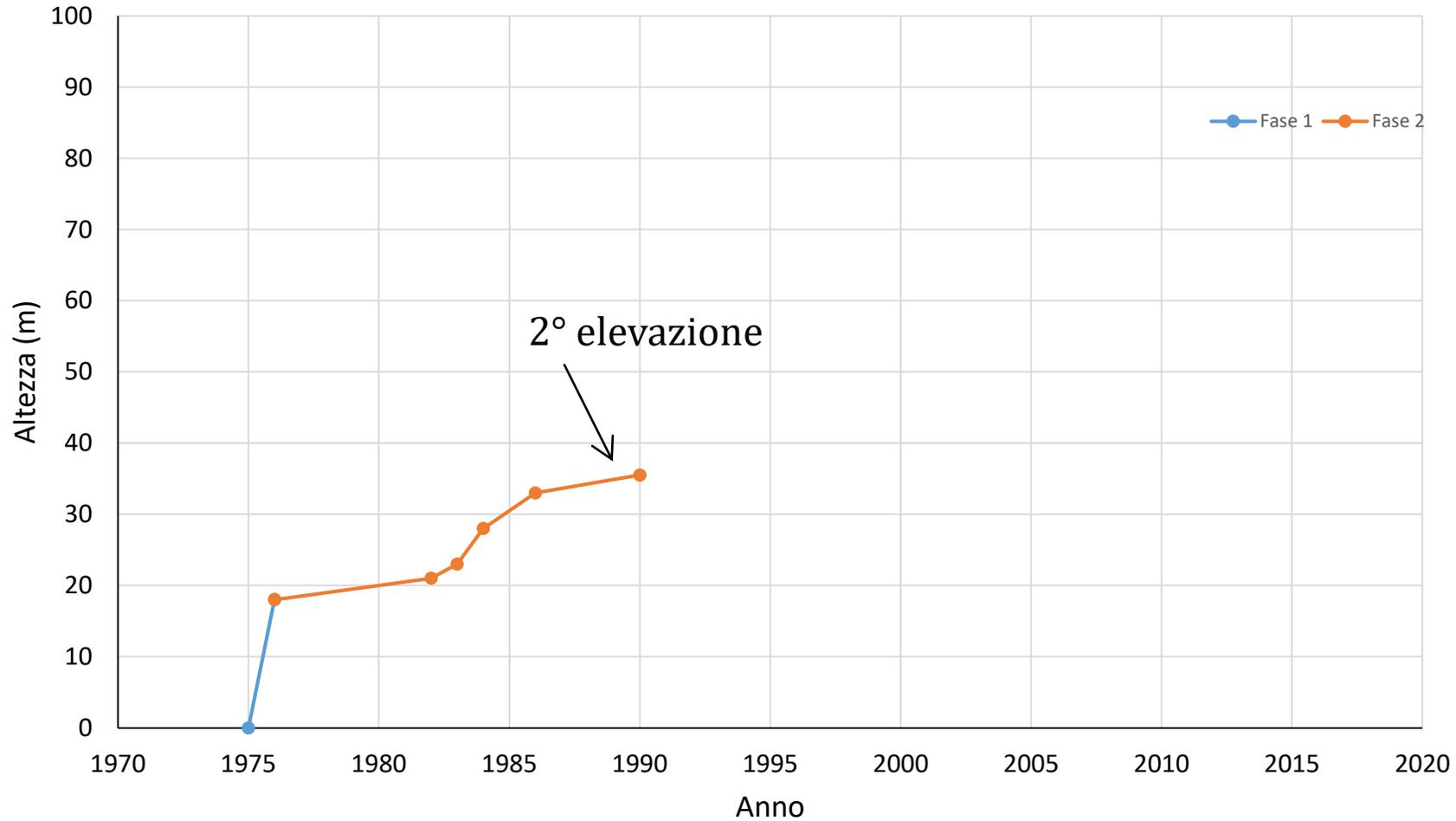
'Upstream method' sequenza di berme realizzate sopra strati di inerti depositati e asciugati in precedenza

Materiale colluviale + residuale  
Gneiss in profondità

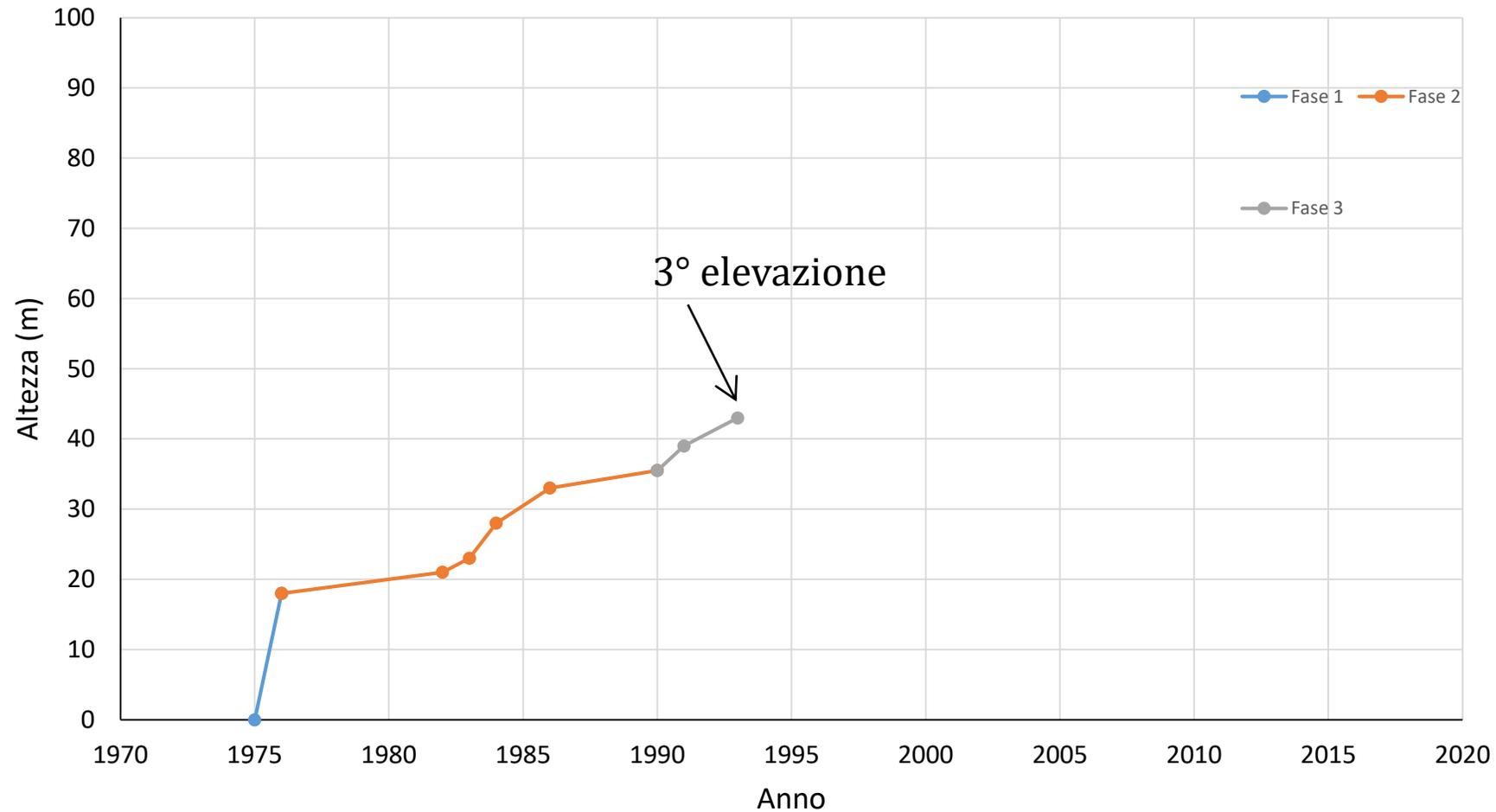
# Costruzione



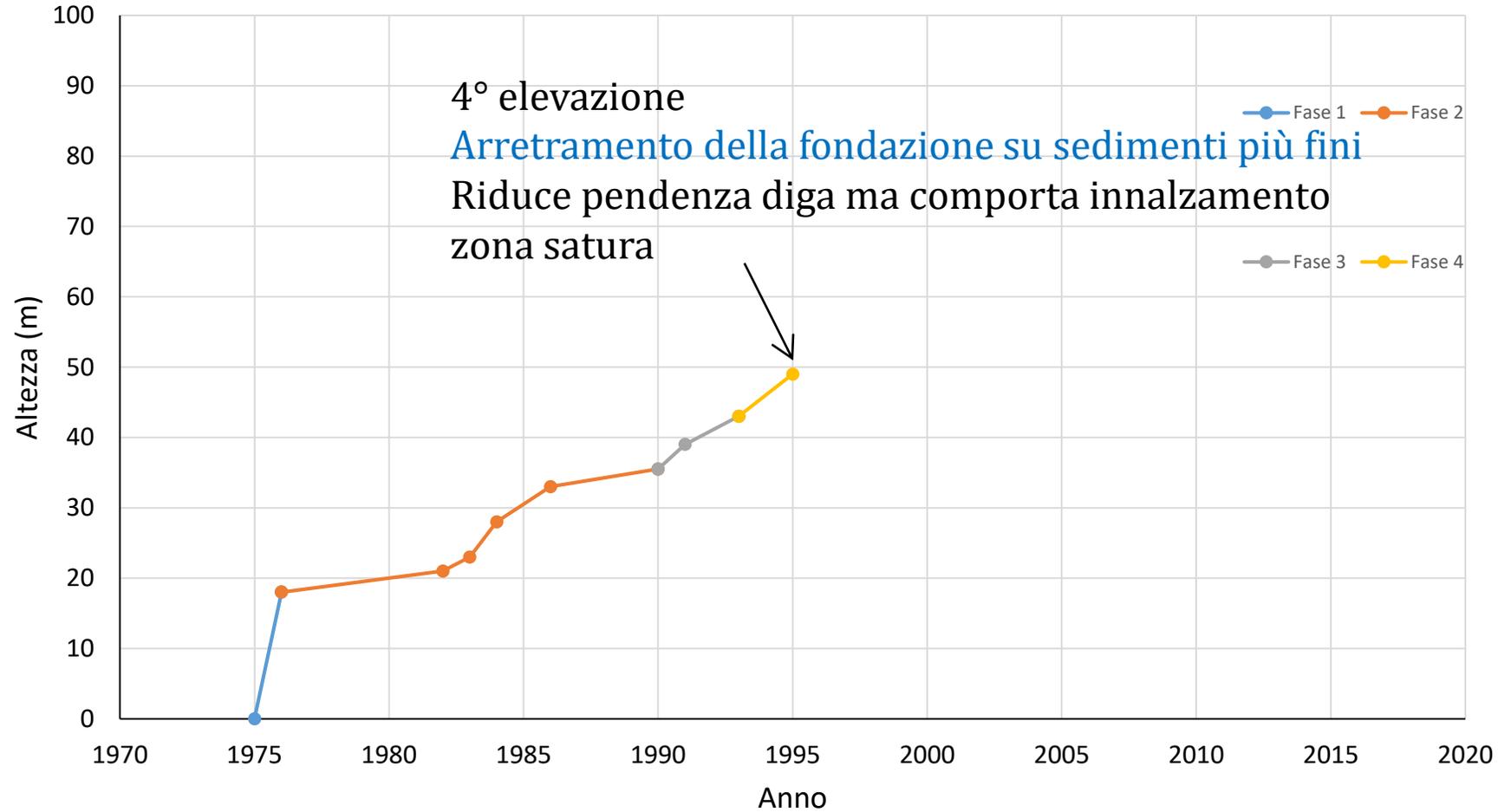
# Costruzione



# Costruzione

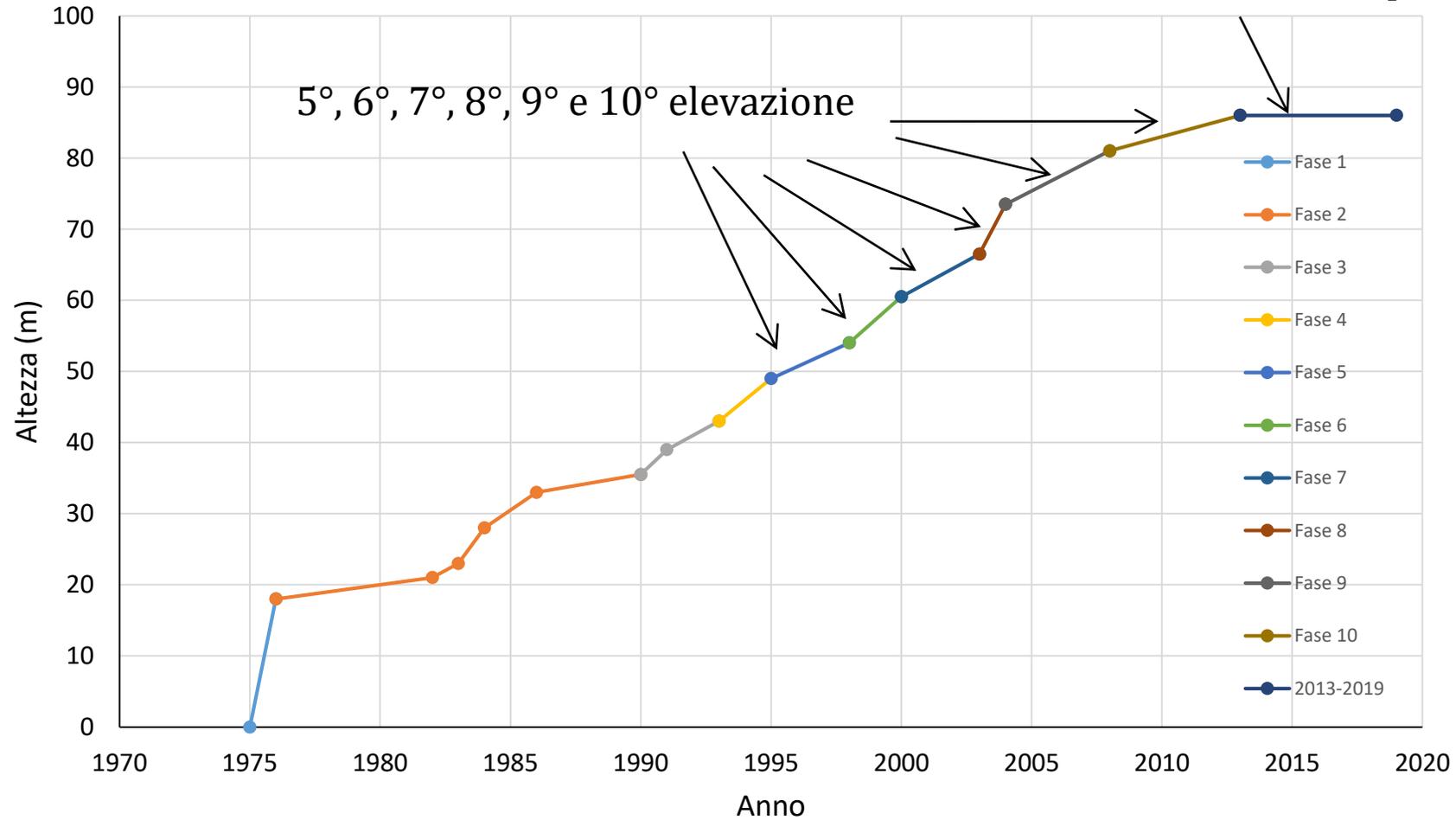


# Costruzione



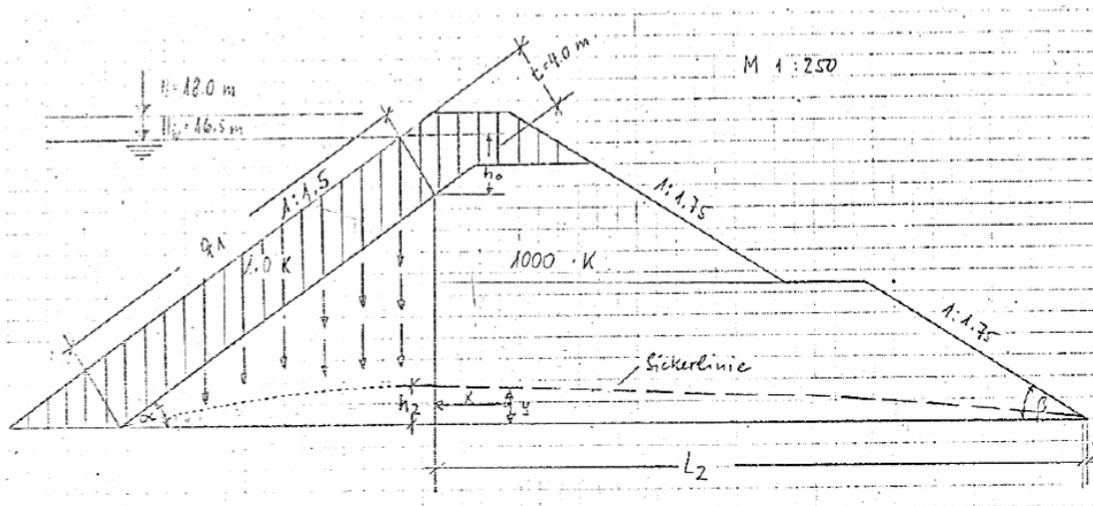
# Costruzione

interruzione della deposizione di tailings



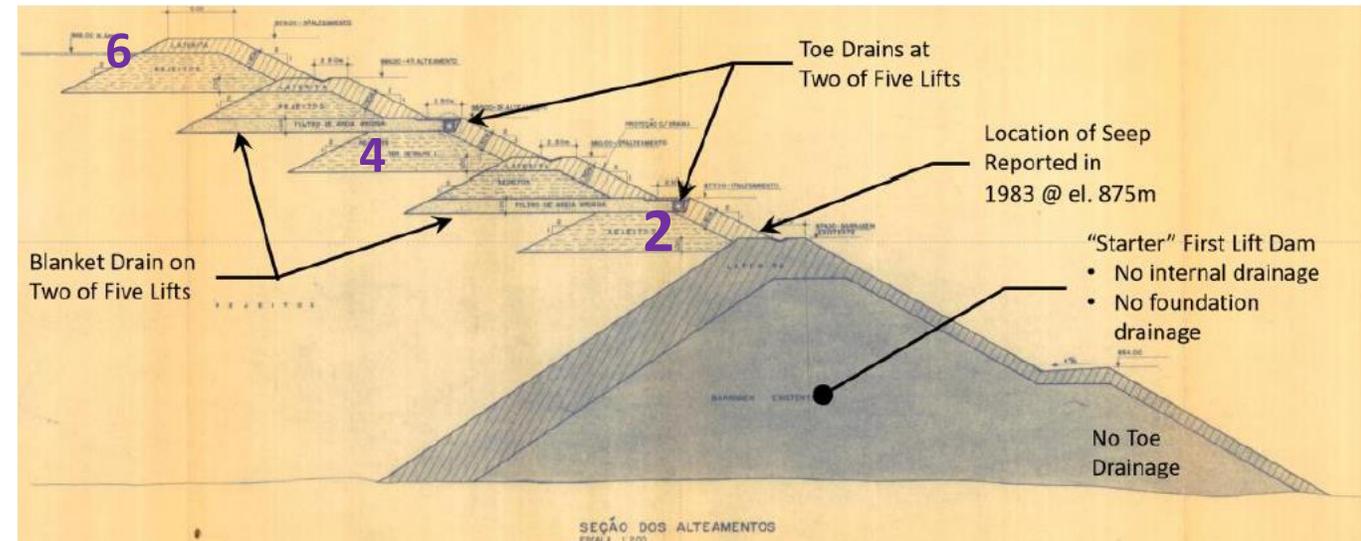
# Costruzione – Berme e drenaggi

## Starter - 1976



- Nessun drenaggio
- Conducibilità idraulica del residuo grossolano costituente la diga  $10^{-6}\text{ m/s}$

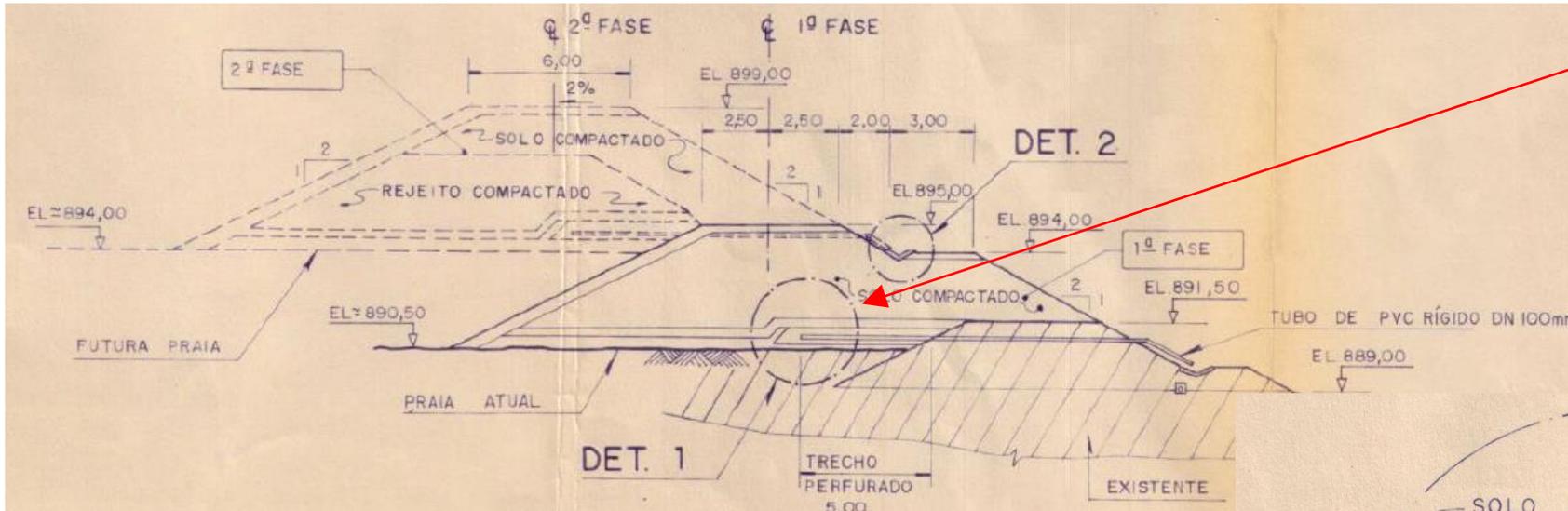
## Seconda Elevazione – 1982-84 e 1986-90



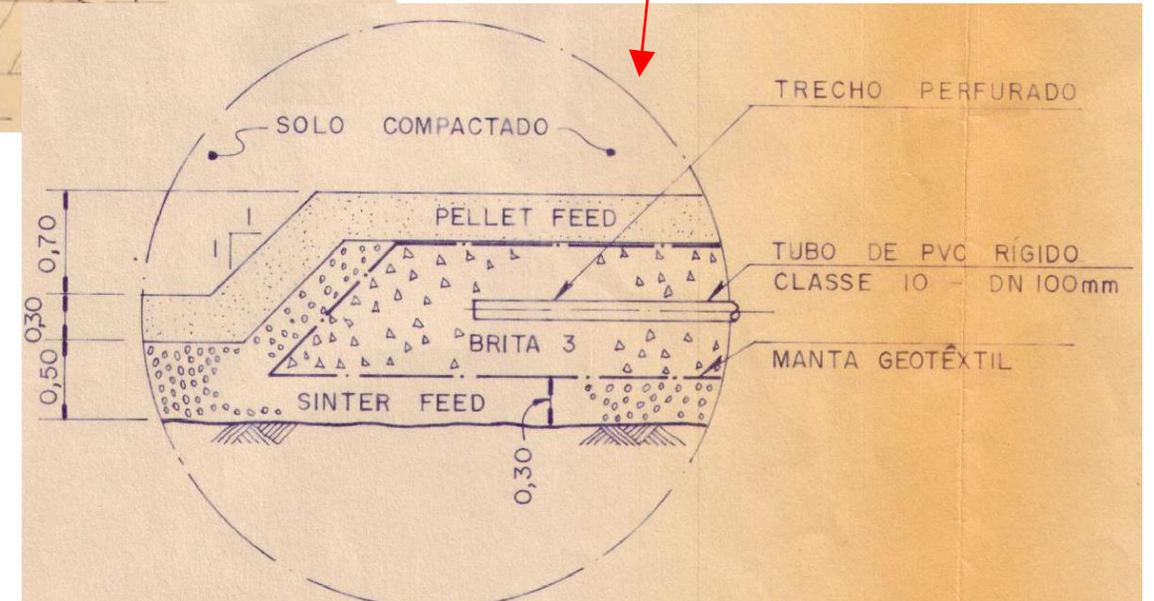
- Progettati dreni alla base di tutte le berme (non realizzati)
- Evidenze di flusso d'acqua in '2'
- Stadi '4 - 6': disposti filtro alla base e tubi drenanti che scaricano sulle spalle della diga

# Costruzione – Berme e drenaggi

## Terza elevazione (1991 – 93)

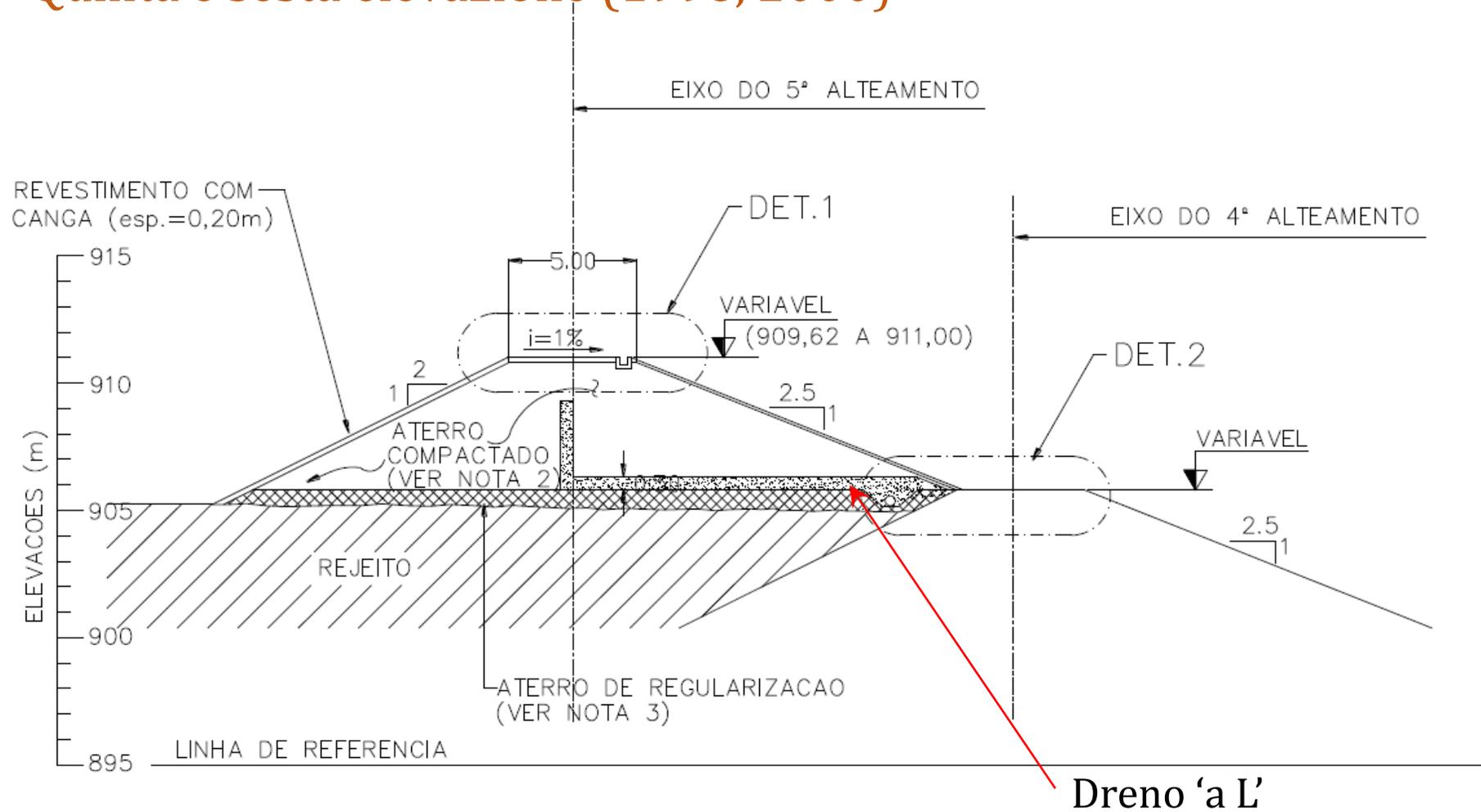


Dreni spessore 1.5 m con sabbia e tubi drenanti



# Costruzione – Berme e drenaggi

## Quinta e sesta elevazione (1998, 2000)



## Verifiche in fase di progetto ed osservazioni

Anno	Raising	FS	Assunzioni di calcolo	Note/Osservazioni
1976	Starter	1.53	Piezometrica molto bassa nella berma	Non si realizzano dreni contando sulla elevata K del compattato
1983	Second	1.7	Berma 1 asciutta, flusso verso dreni Berma 2	Osservate uscite d'acqua dal rilevato 2, i dreni previsti non vengono realizzati
1990	Second	1.44	Assunta assenza acqua nei tailings e diga	Si realizzano dreni alla base delle berme
1993	Third	1.23-1.33	Non specificate	Effettuati SPT e sondaggi
1995	Fourth	1.11	Dati piezometrici	Vengono installati alcuni piezometri e dreni suborizzontali
1995	Fourth	1.93	Innanzitutto, funzionamento nuovi piezometri	Si raccomandano misure urgenti per abbattere la falda
1998	Fifth	1.22-1.40	Analisi breve termine (non drenate) Analisi a lungo termine (drenate, 'cautelative')	Si installano 10 piezometri con lunghezza compresa tra 8 e 20 m
2000	Sixth	1.26-1.49	Analisi breve termine (non drenate) Analisi a lungo termine (drenate, 'cautelative')	Si installano 10 piezometri
2003	Seventh	1.18 1.57	Analisi breve termine (non drenate) Analisi a lungo termine (drenate, 'cautelative')	3 SPT: sequenza 5 m di inerti fini a media densità (sabbia limosa) → argilla limosa → 10 – 20 m di inerti più grossolani (sabbia) medio sciolti nuovi 10 piezometri
2004	Eighth			11 SPT: sequenza str. tailings sabbioso limosi/limo sabbiosi (alternanza resistenze) → materiali compattati delle precedenti berme → terreno di fondazione
2008 e 13	Ninth Tenth	> 1.50	Dati dalla piezometrica attuale	Campagna indagini sito e laboratorio, installazione piezometri e celle piezometriche, 2 inclinometri, CPTU evidenziano limitati livelli non drenati con alte pressioni dell'acqua modesta segregazione materiale (più grossolano vicino alla berma e fine lontano)

## Dopo la fine della costruzione / sistemazione dei tailings

---

### Monitoraggio e sistemazioni idrauliche

Abbassamento del livello della piezometrica superficiale con torre di decantazione (2016-18)

Installazione dreni superficiali sulla faccia della Diga (2016)

Realizzazione di dreni profondi orizzontali (DHP) per abbassare la quota piezometrica di 8 – 12 m in 2 anni (2018)

Installazione basi topografiche sulla cresta, GPR e inclinometri

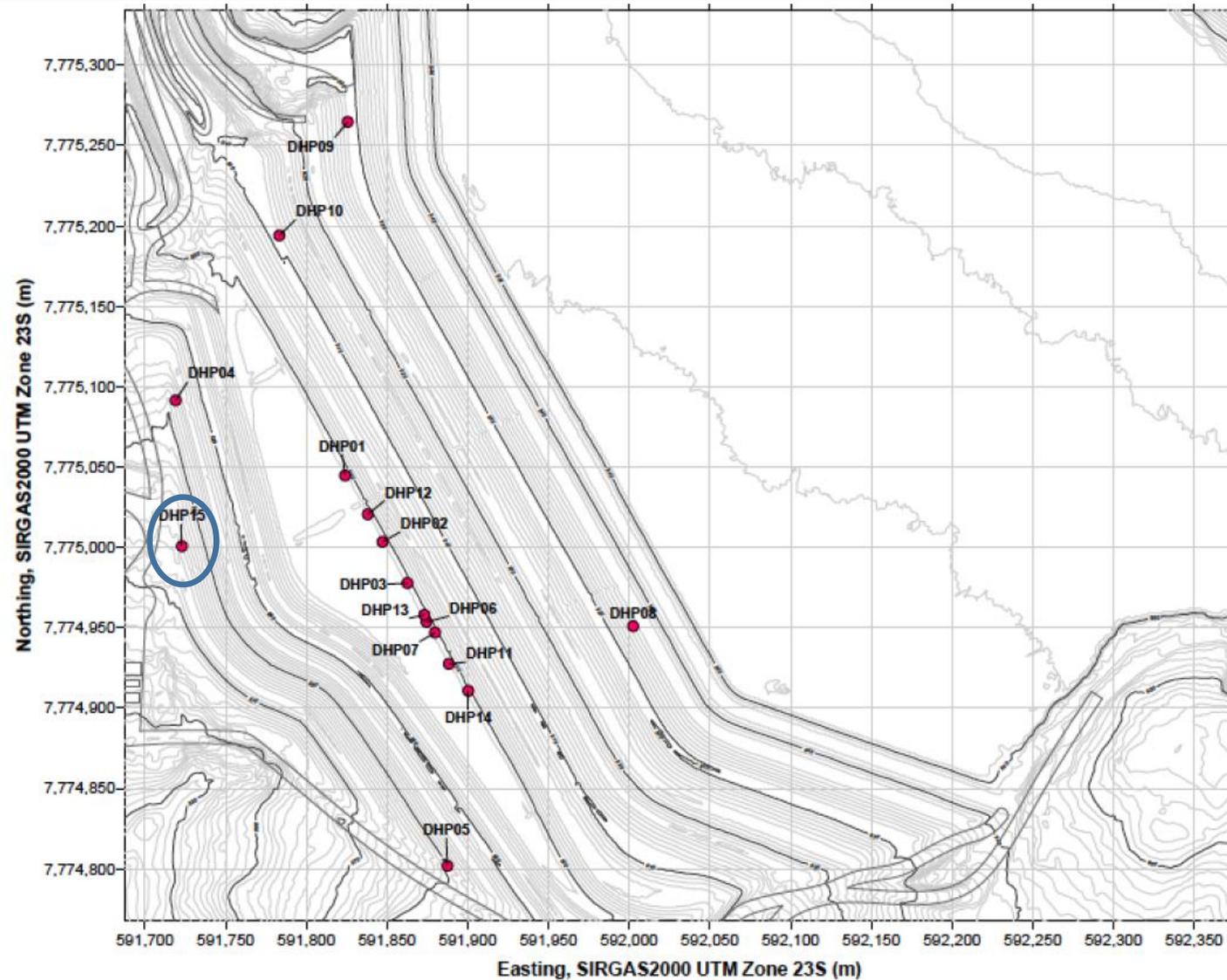
## Dopo la fine della costruzione / sistemazione dei tailings

### Deep Horizontal Drains - DHP

Lunghezza compresa tra 60 e 81 m

Perforazione con aria compressa (600 kPa) nella berma e circolazione d'acqua (400 kPa) negli inerti

Spinta di un tubo in acciaio, perforazione interna per installazione del dreno avente un tappo di cemento bentonite al fondo



## Dopo la fine della costruzione / sistemazione dei tailings

### Incidente del DHP 15 (11 Giugno 2018)

In concomitanza con lo scavo del DHP 15:

- Abbattimento di pressione al passaggio tra berma e tailing, perdita di circolazione, apparente collasso del foro,
- Fuoriuscita di acqua dal paramento della diga e risalita (0.60 – 3.50 m) nei piezometri vicini,
- Interrotta l'installazione del dreno, sbloccati alcuni tubi vicini, disposti materassi di sabbia sul vulcanello

Incidente rientrato



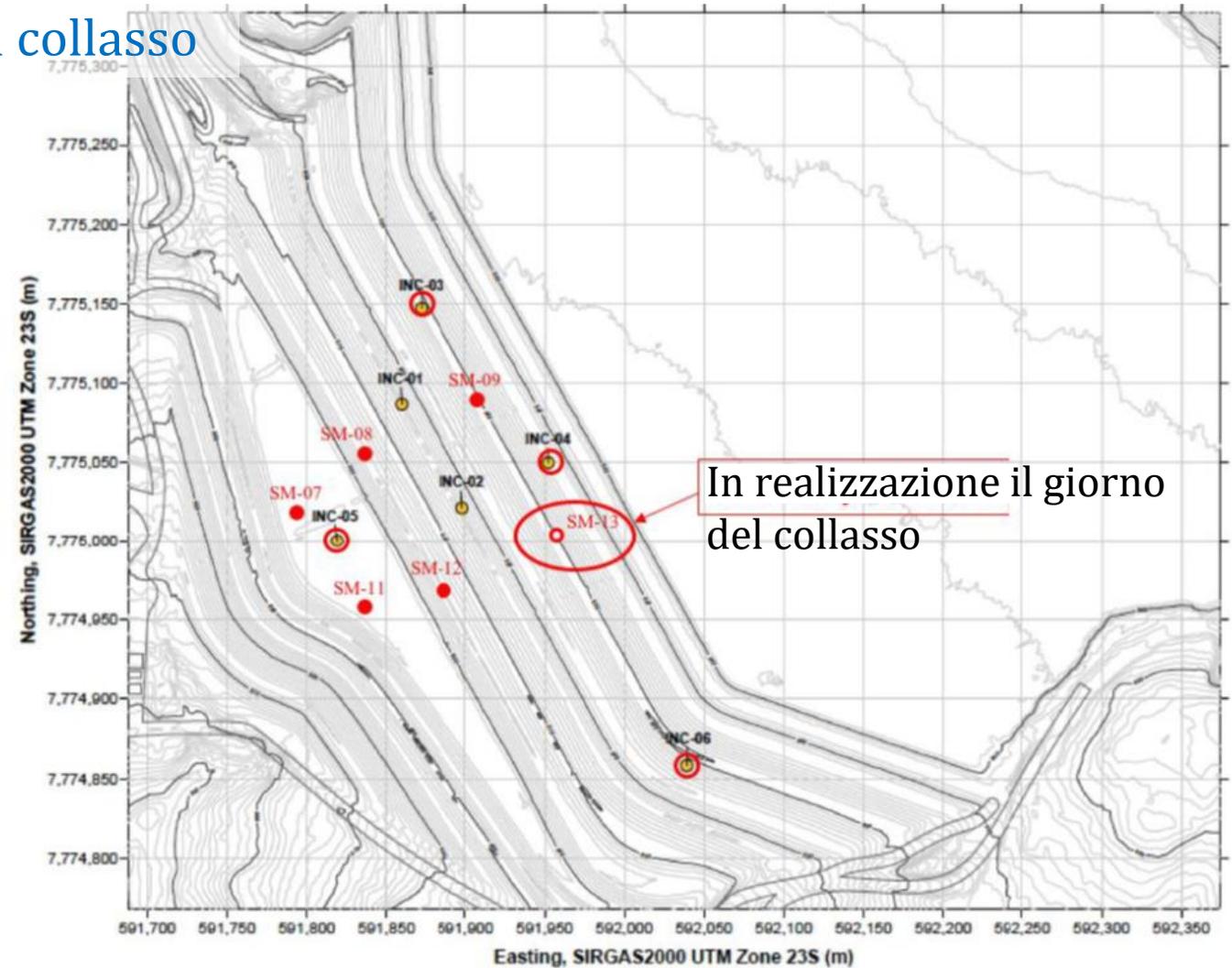
## Dopo la fine della costruzione / sistemazione dei tailings

### Campagna di sondaggi in corso all'epoca del collasso

Novembre 2018 – Gennaio 2019

- 4 dilatometri sismici
- 3 CPTU
- 4 inclinometri verticali
- 8 piezometri a corda vibrante

Un sondaggio in corso di esecuzione il giorno del collasso

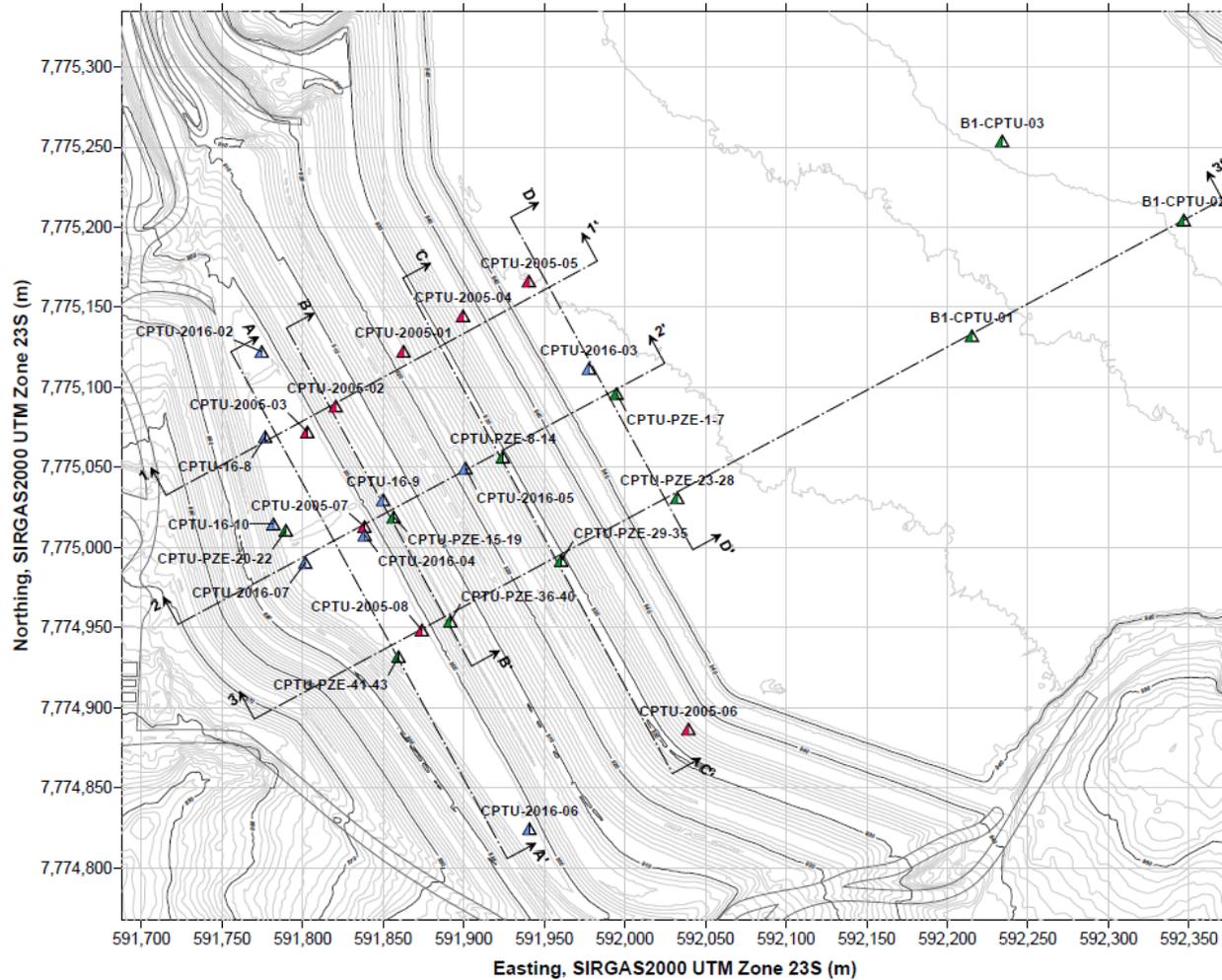


---

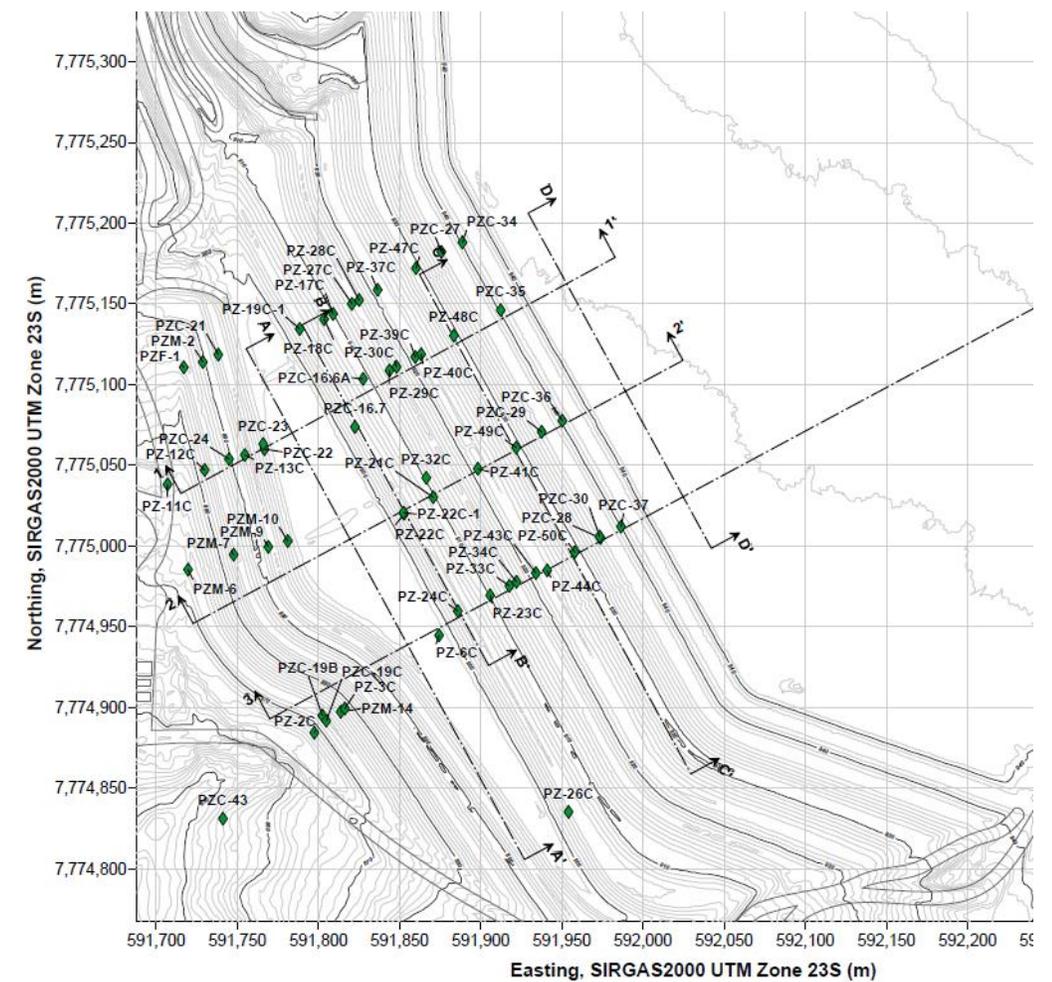
## Stratigrafia e prove in sito

# Ubicazione principali prove in sito

## CPTU

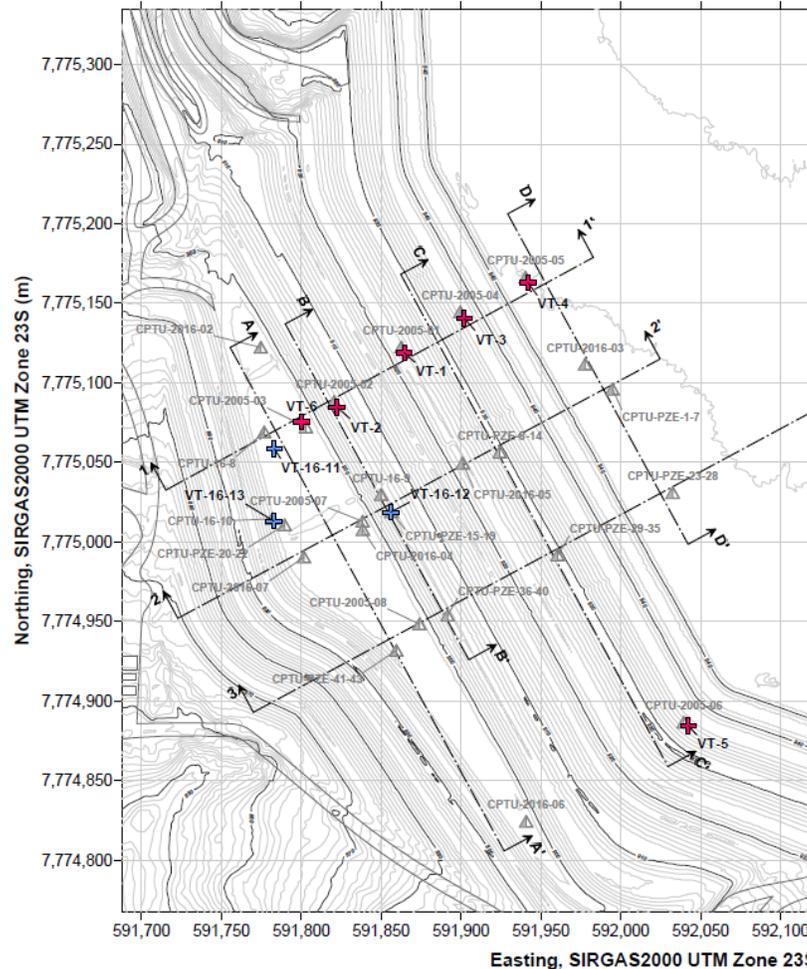


## Prove d'infiltrazione

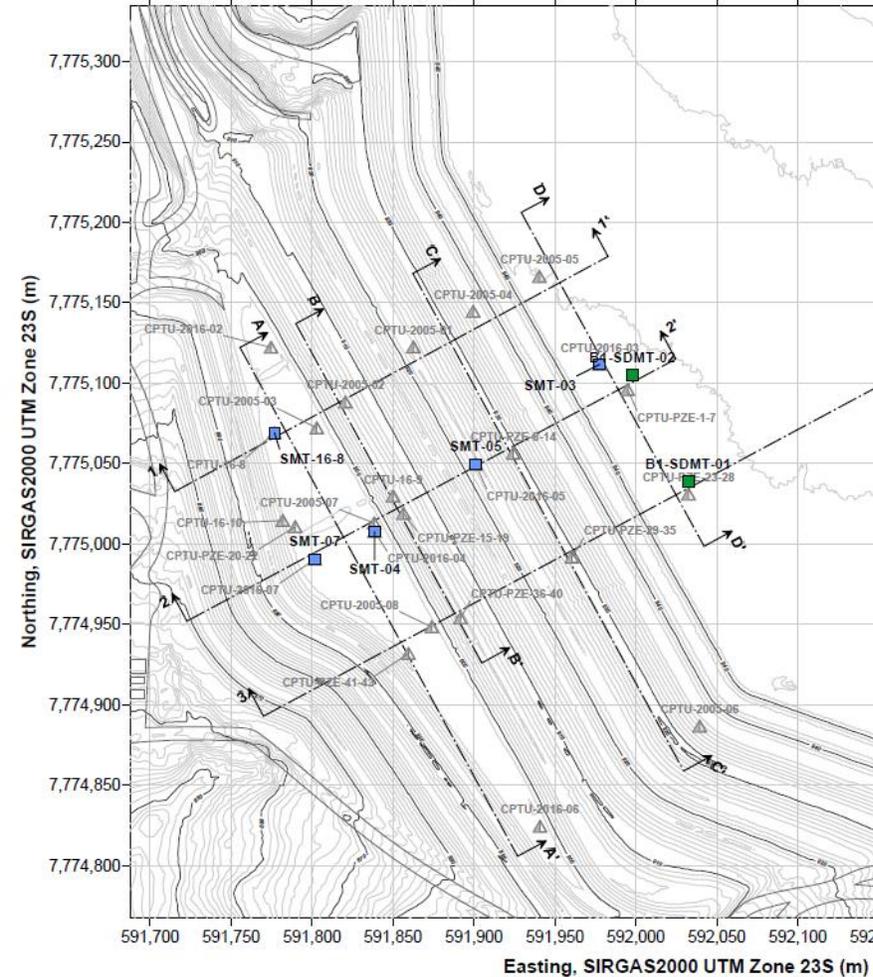


# Ubicazione principali prove in sito

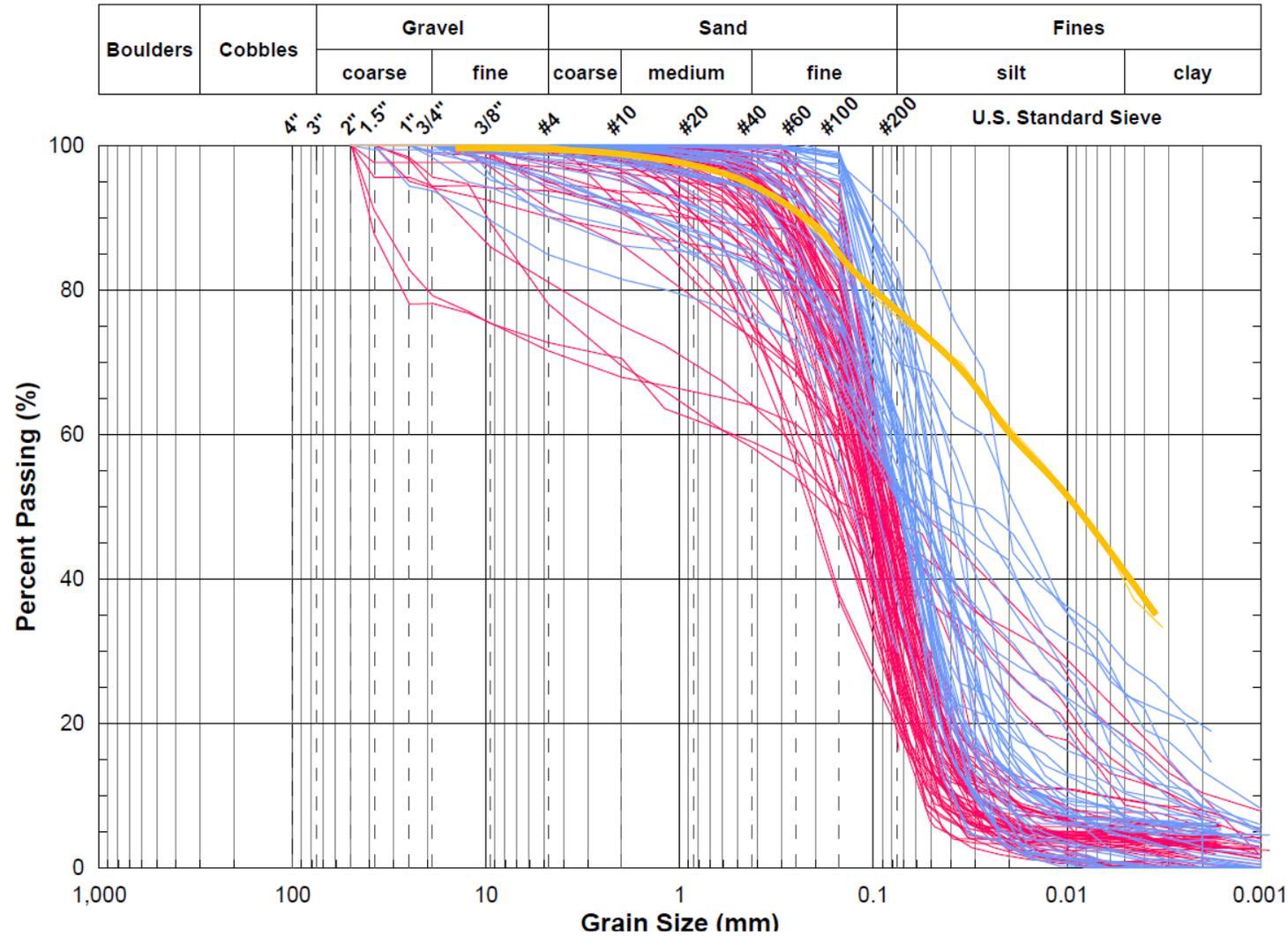
## Prove scissometriche



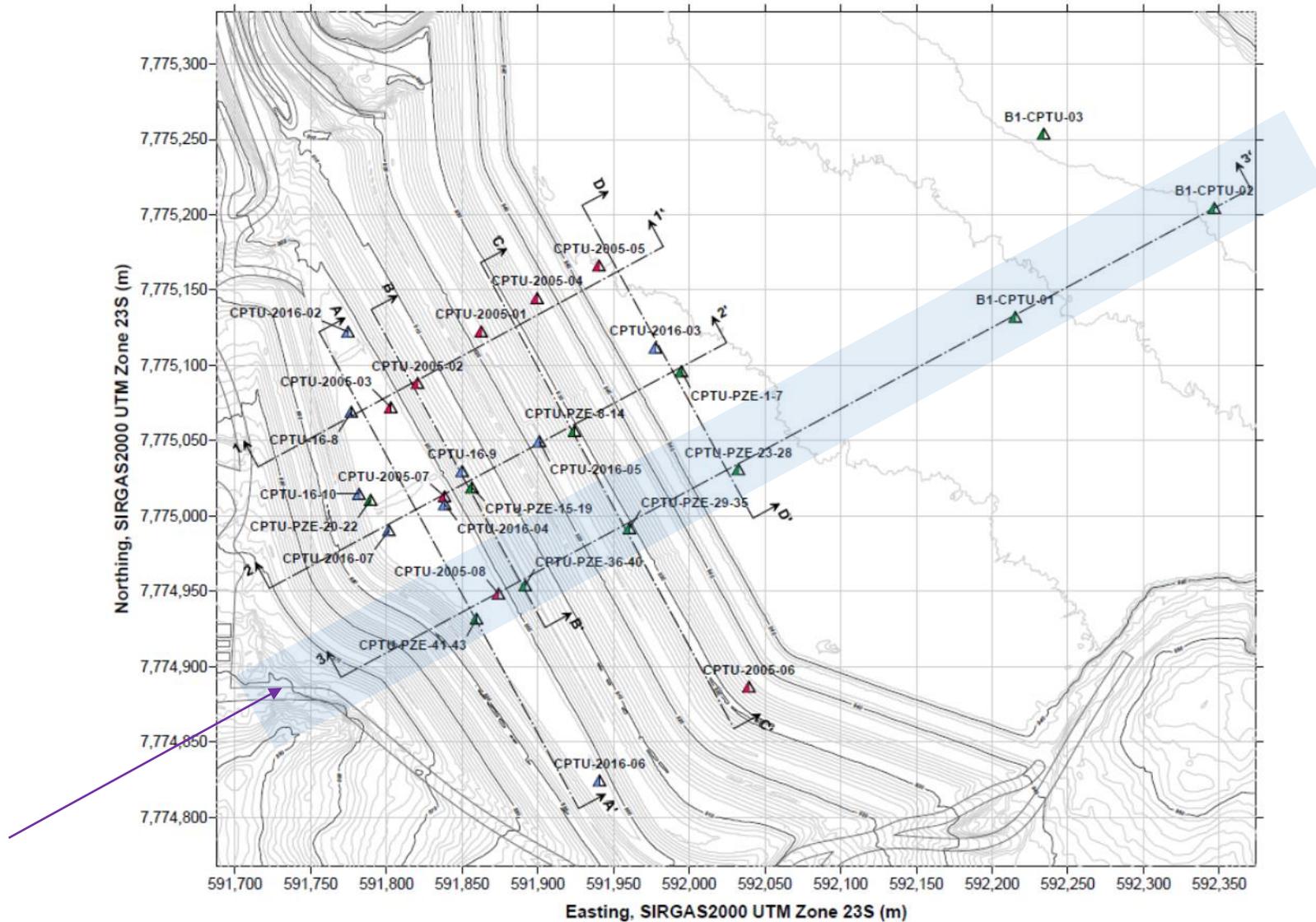
## Onde di taglio (dilatometro sismico)



# Granulometrie

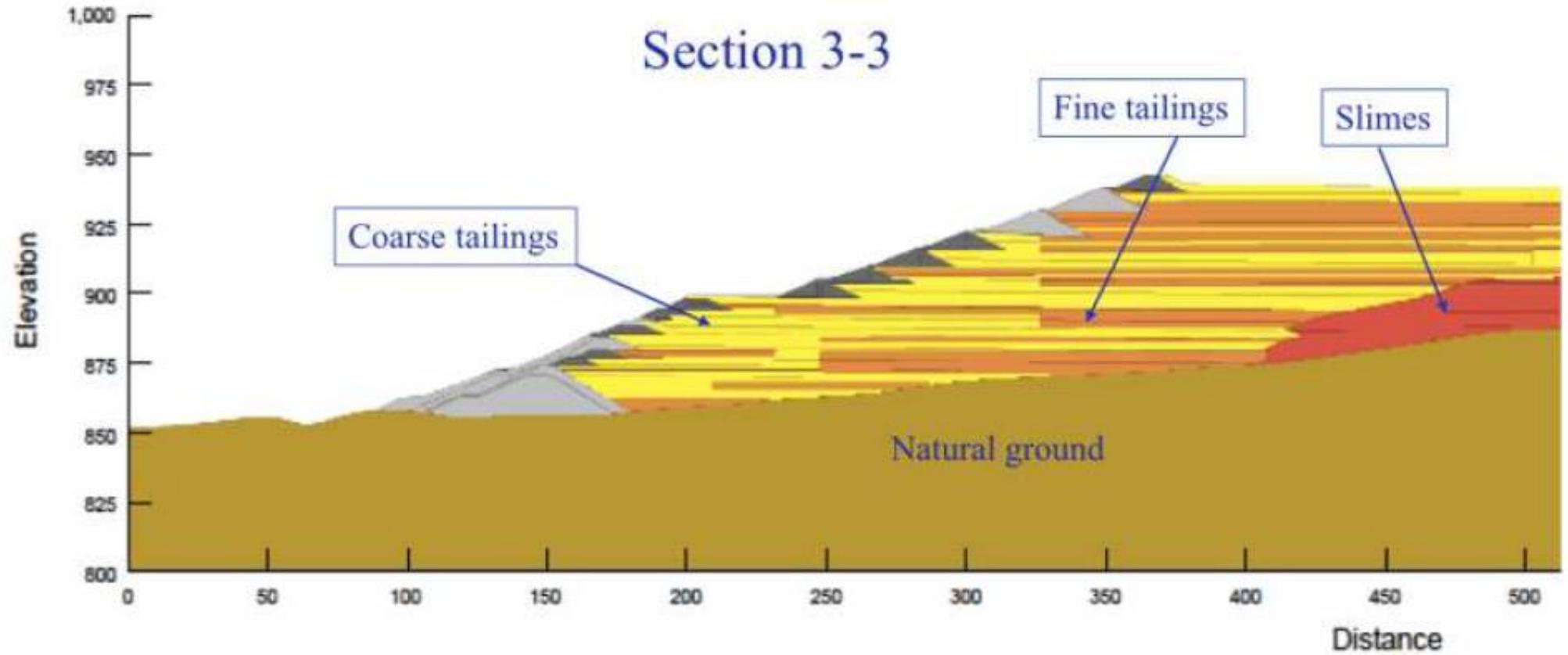


# Interpretazione CPTU



CPTU campagna 2018

# Schema stratigrafico

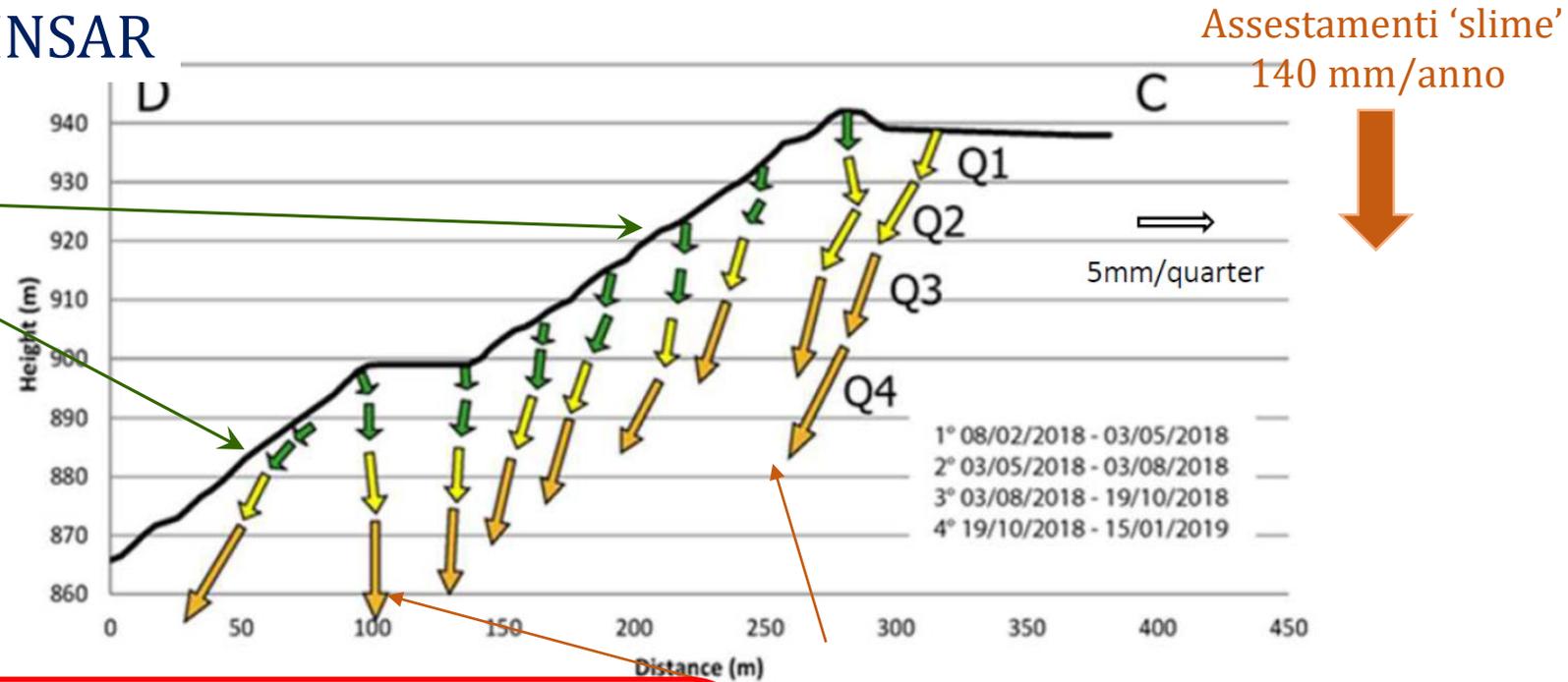




# Movimenti nell'anno precedente il crollo

## Ricostruzione basata su misure INSAR

Spostamenti orizzontali:  
generalmente  $\approx 10$  mm/anno  
aree limitate  $\approx 30$  mm/anno



Spostamenti verticali  $\approx 30$  mm/anno

### Conclusioni Panel:

### spostamenti causati da creep

- le CPTU mostrano inerti consolidati e pressioni idrostatiche
- creep + consolidazione negli slimes

---

## Il modello idraulico

Obiettivo: determinare la distribuzione di pressioni sotto e sopra falda (suzioni) nel momento precedente il collasso

# Modello concettuale

## 'Sistema idraulico' della Feijao Dam

Flussi in ingresso: Basin Runoff, Foundation in, Precipitation – Evaporation

Flussi in uscita : Foundation out, Drain flow

### Variabili note: (sintetizzando)

Parametri idraulici dei materiali

Condizioni al contorno: lago e base diga

### Calibrazione/analisi sensitività:

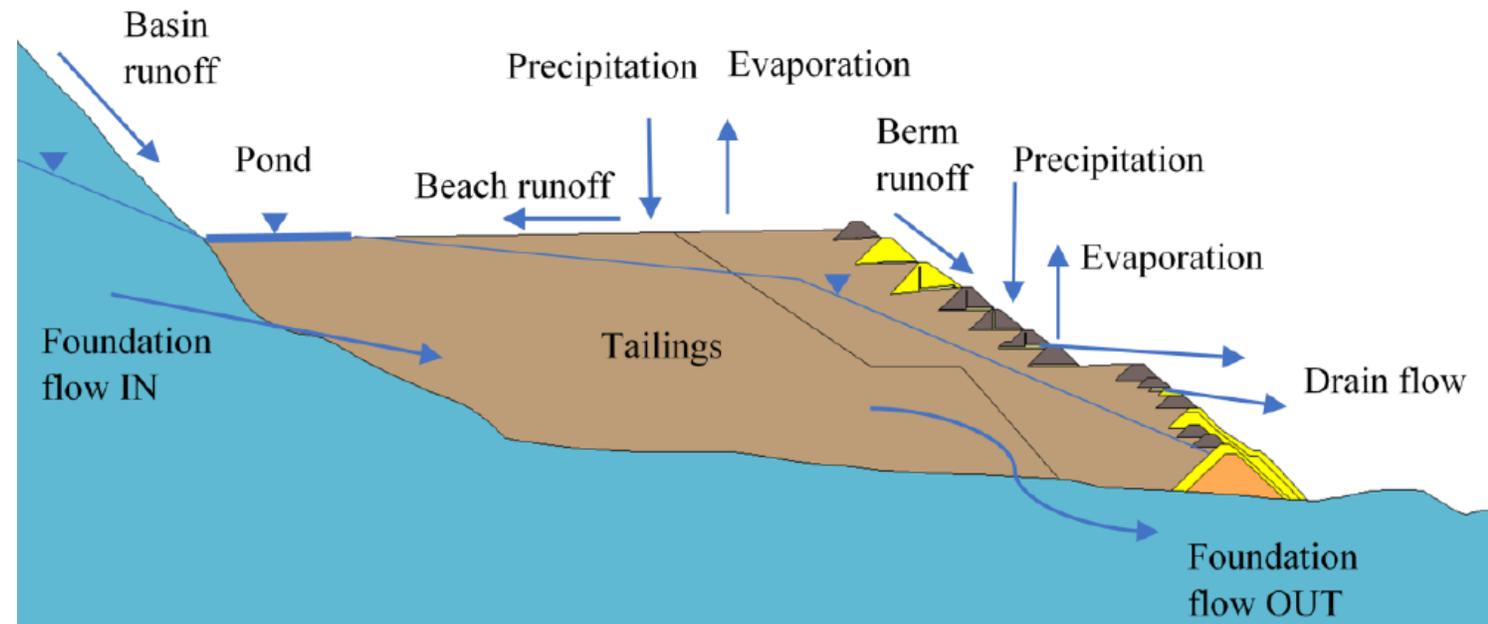
Infiltrazione netta (quanta pioggia si infiltra?)

Anisotropia idraulica

### Basata su:

Lecture pressione (piezometri, CPTU)

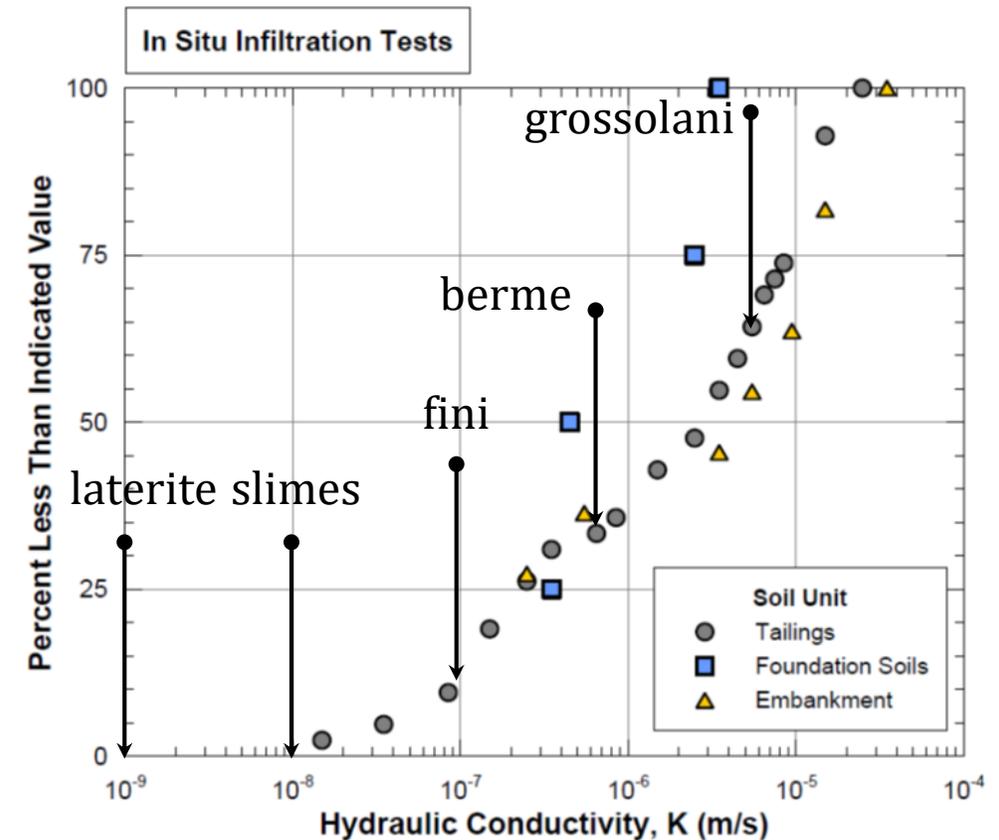
Portate dei dreni



# Le caratteristiche idrauliche dei materiali

## Conducibilità idraulica in condizioni sature

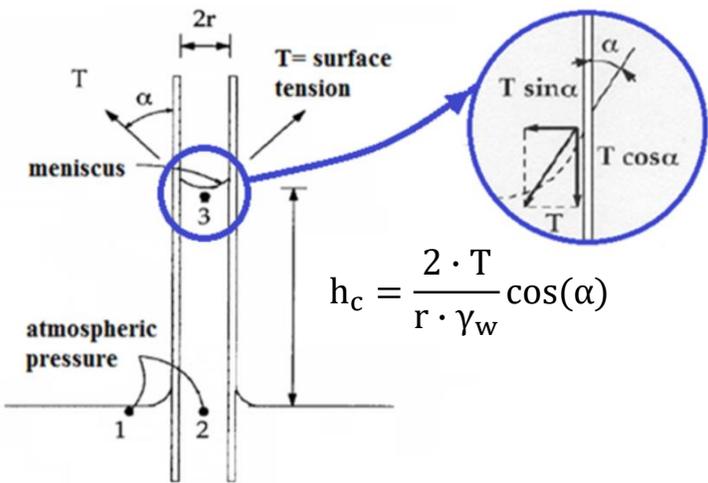
Materiale	$K_{sat}$ (m/s)	Fonte
Inerti fini	1.00E-07	Field testing
Inerti grossolani	5.00E-06	Field testing
Inerti compattati	5.00E-07	Riduzione per compattazione
Slimes	1.00E-08	Field testing
Ultra-fini ferrosi	1.20E-06	Relazioni precedenti
Laterite compattata	1.20E-09	Relazioni precedenti
Terreno di fondazione	9.20E-08	Field testing
Dreni	1.00E-04	Relazioni precedenti



# Le caratteristiche idrauliche dei materiali

## Terreni non saturi

Risalita capillare  $h_c$



$$h_c = \frac{2 \cdot T}{r \cdot \gamma_w} \cos(\alpha)$$

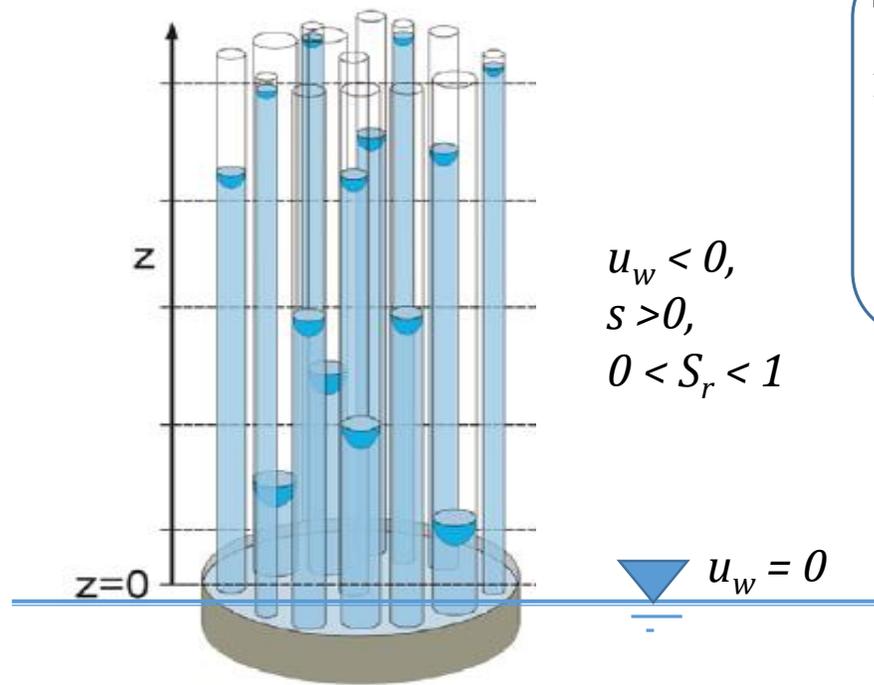
Sopra falda

$$u_w = -\gamma_w \cdot h_c$$

Suzione di matrice

$$s = u_a - u_w$$

Terreno come insieme di tubi capillari di raggi diversi



Fredlund e Rahardjo (1993)

Transitori dei processi di filtrazione dipendono da:

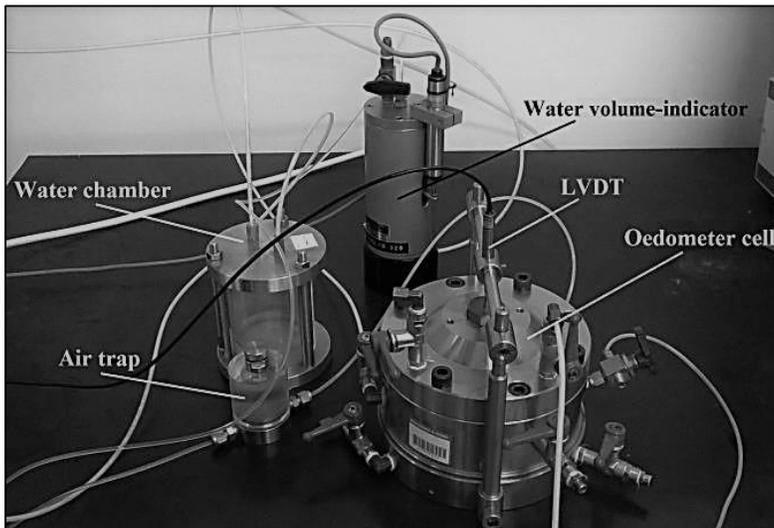
- Curva di ritenzione idrica
- Permeabilità non satura

## Le caratteristiche idrauliche dei materiali

Curva di ritenzione idrica determinata sulla base di :

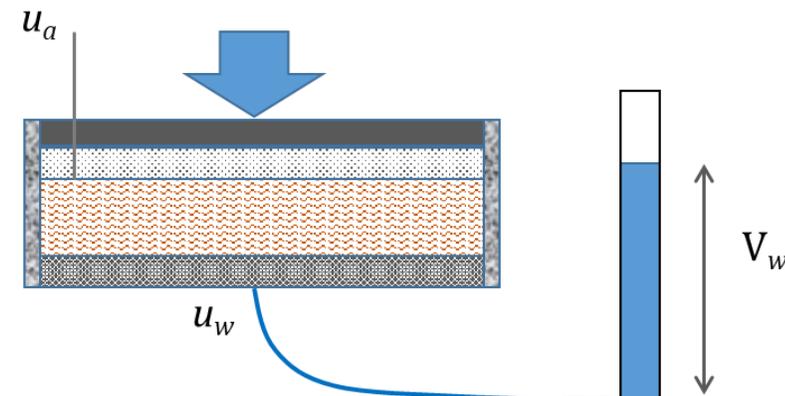
- prove di laboratorio
- relazioni basate sulla curva granulometrica (Fredlund & Xing, 1994; Fredlund & Wilson, 1997; Fredlund et al., 1994)

Edometro a suzione controllata del Politecnico di Torino  
(foto Bella, 2017)



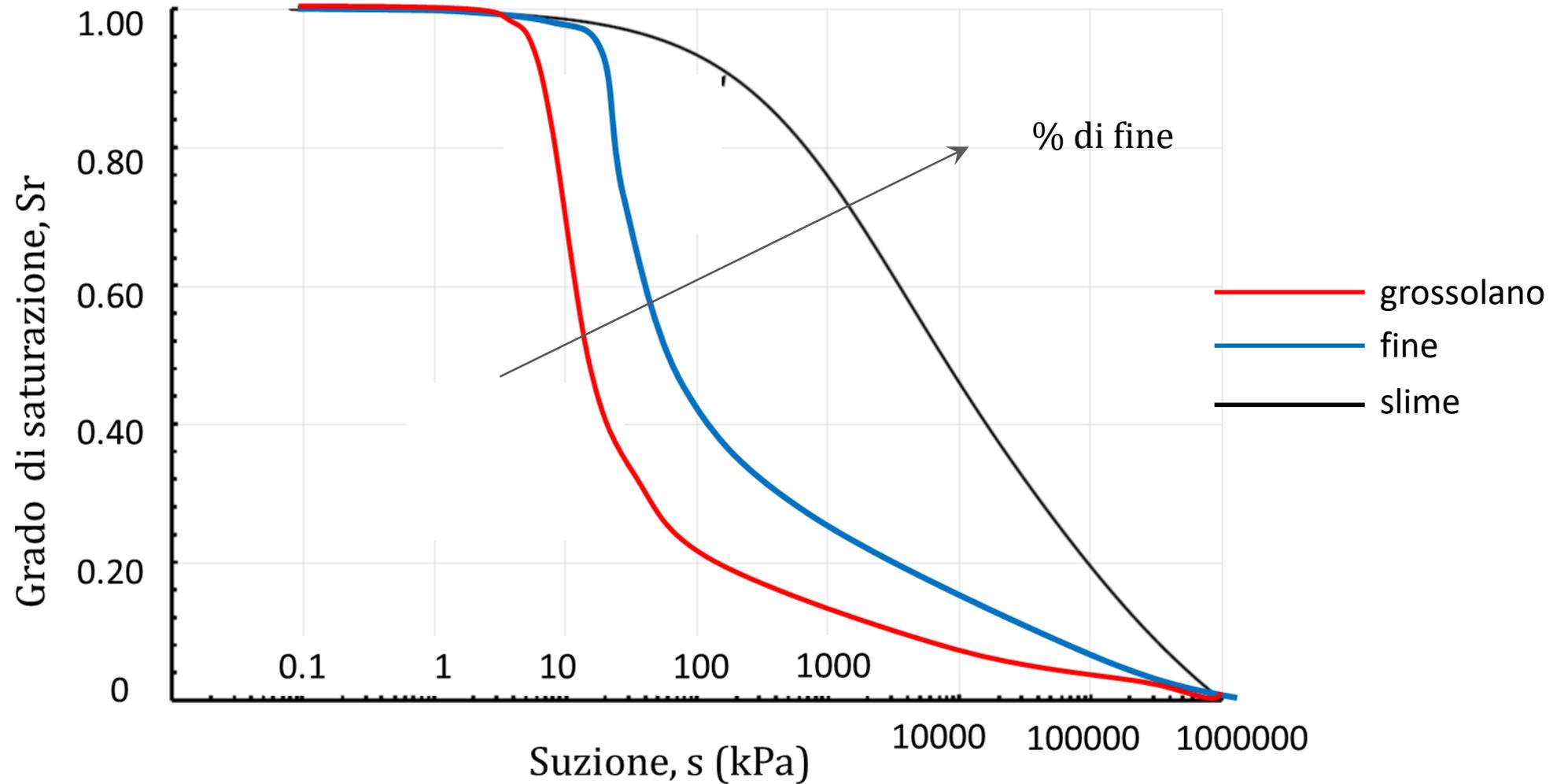
Principio di funzionamento dell'edometro a suzione controllata

Si impone la suzione e si misura il contenuto d'acqua  $w$  o il grado di saturazione  $S_r$  corrispondente



# Le caratteristiche idrauliche dei materiali

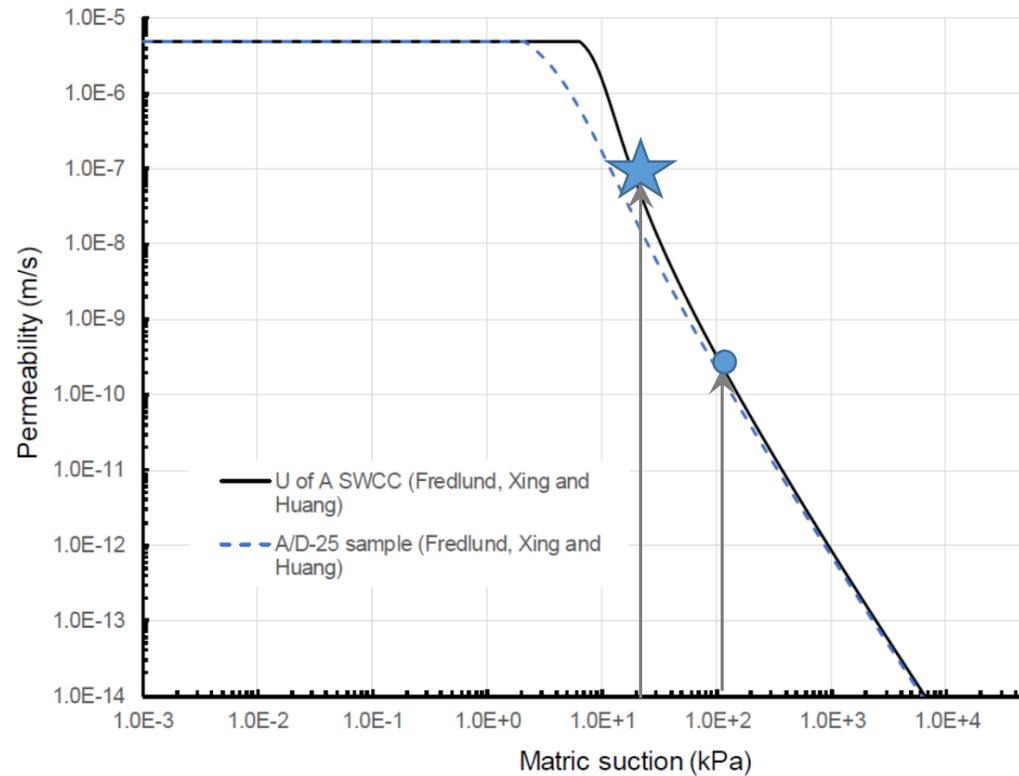
## Curve di ritenzione idrica



# Le caratteristiche idrauliche dei materiali

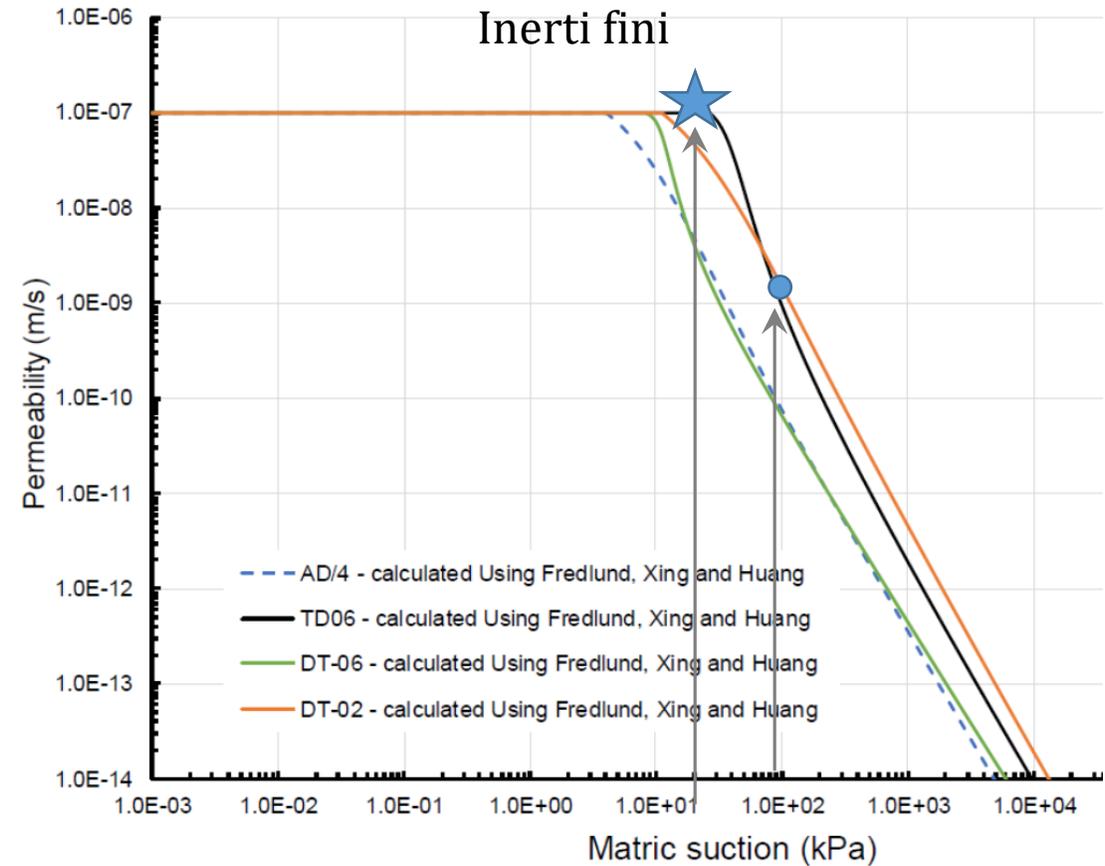
## Curve di permeabilità relativa: abbattimento della conducibilità con la suzione

### Inerti grossolani



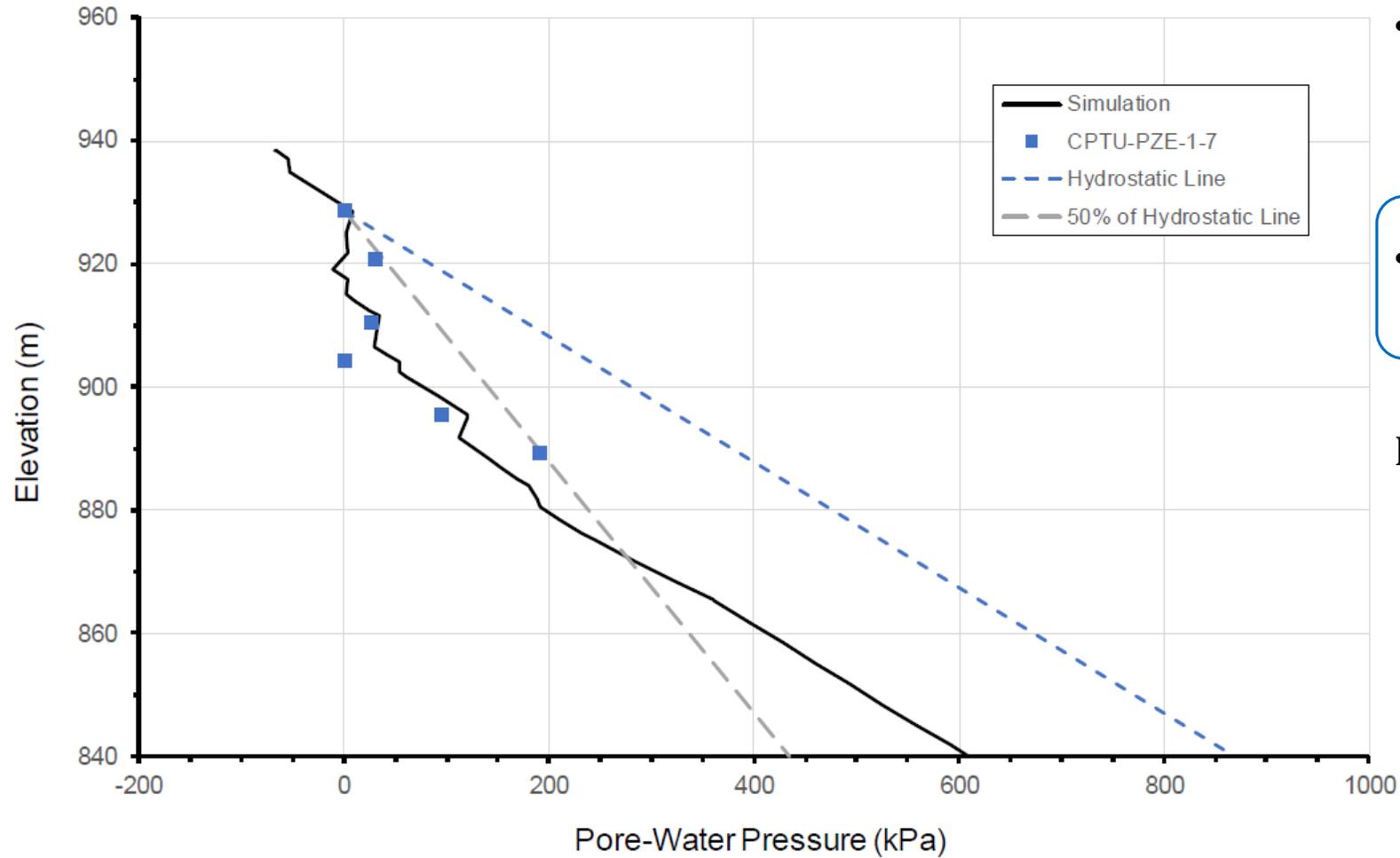
★  $s = 20$  kPa i due inerti hanno la stessa conducibilità

### Inerti fini



●  $s = 100$  kPa conducibilità più bassa per il grossolano

## Risultati calibrazione (confronto con misure CPTU del 2018)



- Anisotropia idraulica

$$\frac{K_h}{K_v} = 5$$

- Tasso di infiltrazione netto:

50% della piovosità

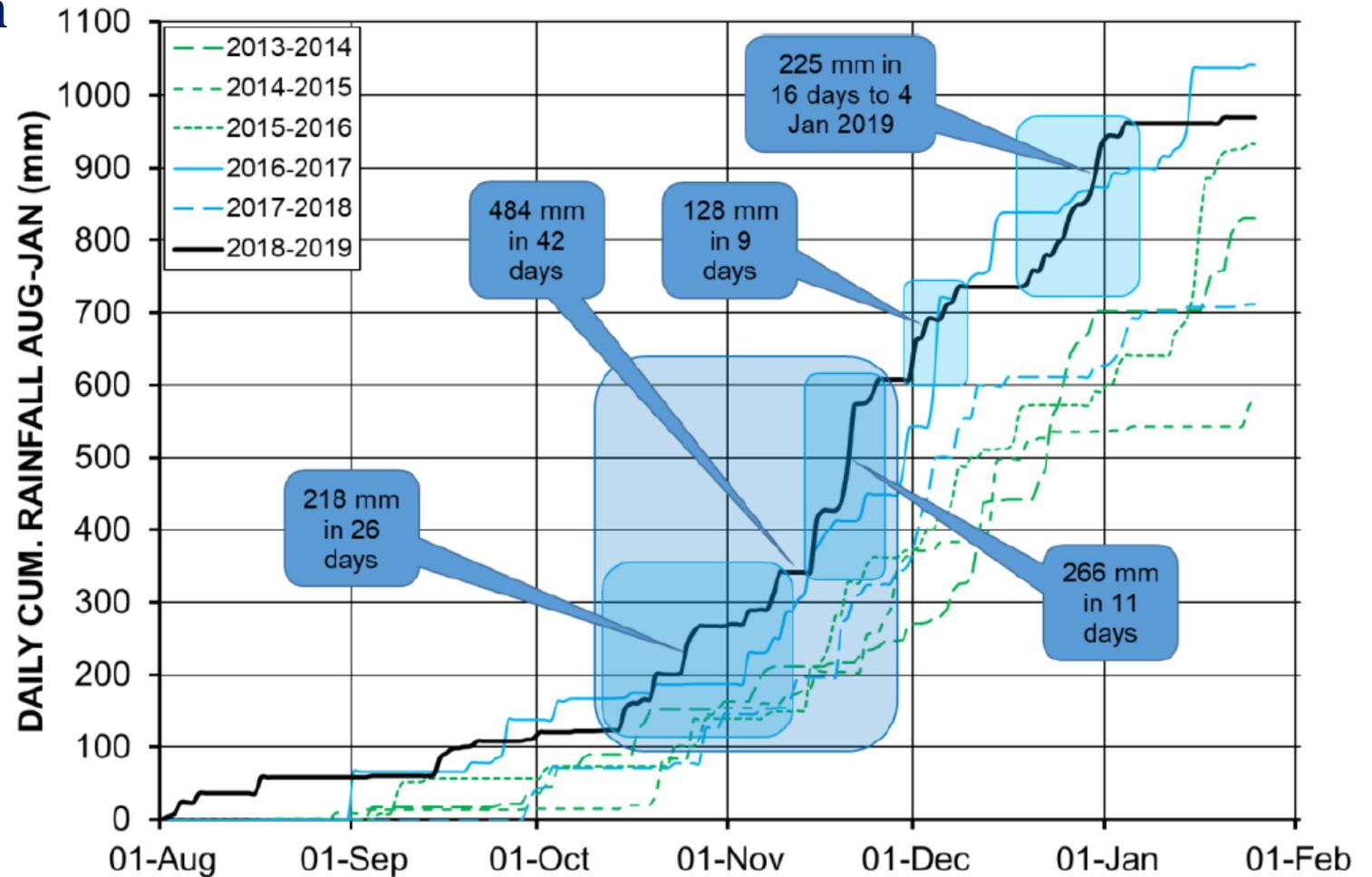
Buon riscontro con le portate dei dreni

# Previsioni modello per la zona non satura nei mesi precedenti il collasso

## Curve di precipitazione cumulata

La stagione umida 2018 - 19 più piovosa di altre precedenti

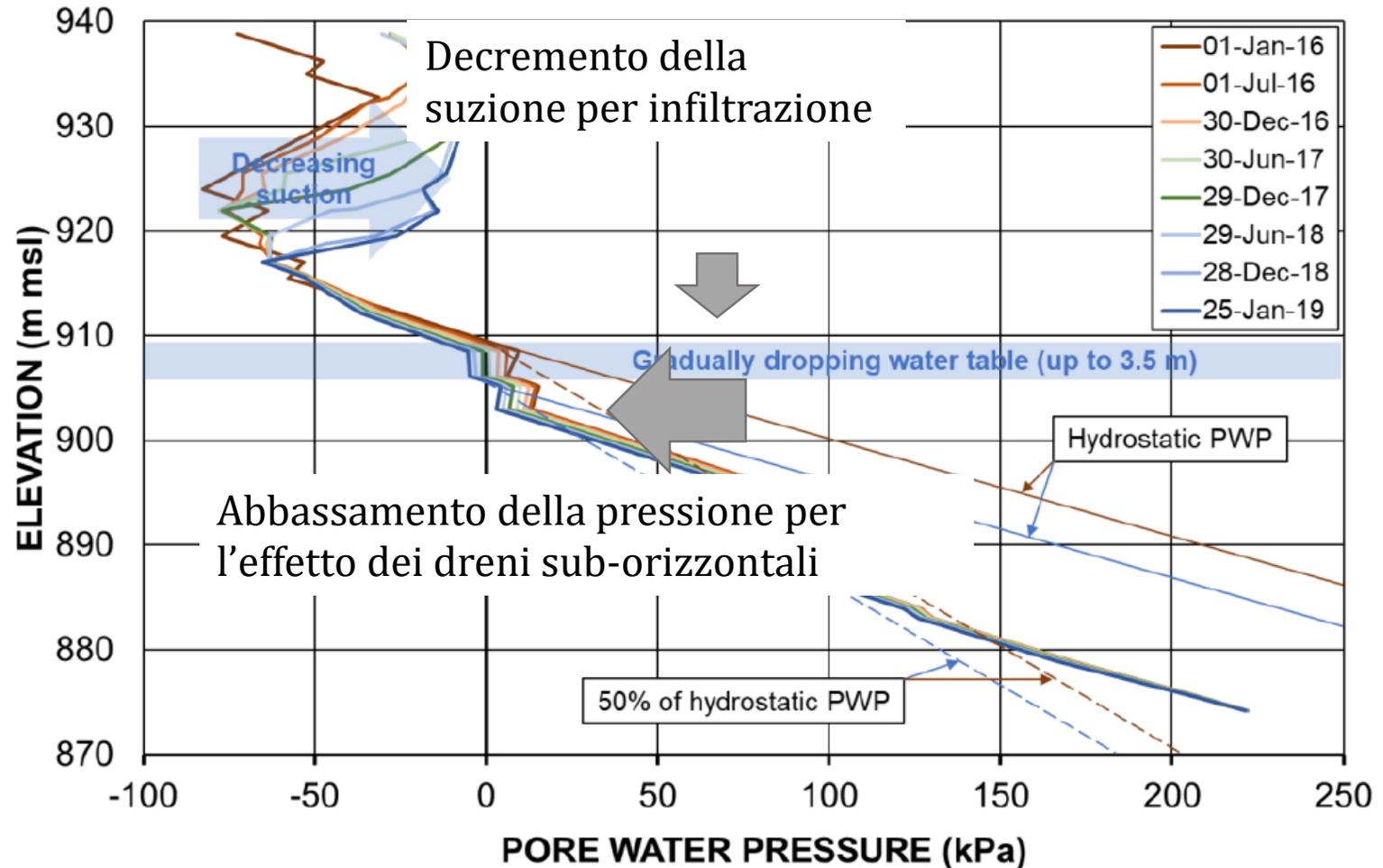
Dati utilizzati per prevedere la variazione dei profili di pressione fino al momento di collasso



# Simulazioni relative ai mesi precedenti il collasso

## Osservazioni principali

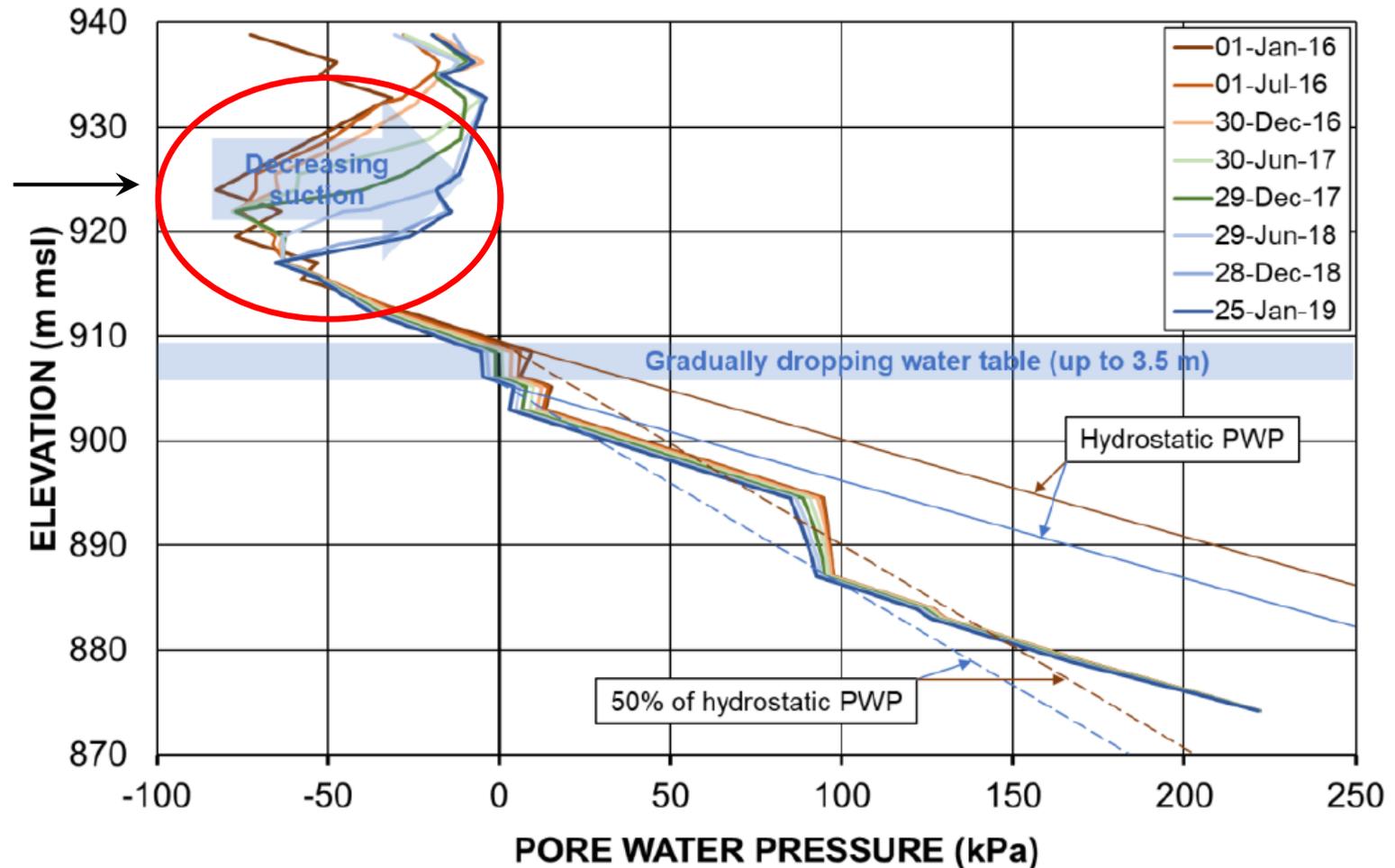
- La zona non satura ritarda il movimento dell'acqua (i piezometri non registrano variazioni significative a seguito degli eventi recenti)
- Lento decremento delle pressioni nei piezometri nei tre anni precedenti il collasso
- Assenza di variazioni significative delle letture nella settimana prima del collasso



# Simulazioni relative ai mesi precedenti il collasso

## Considerazioni sulla resistenza

Applicando la relazione di Fredlund et al.(1996) il panel ritiene che **la riduzione di resistenza negli strati non saturi superficiali pari a 15 kPa**

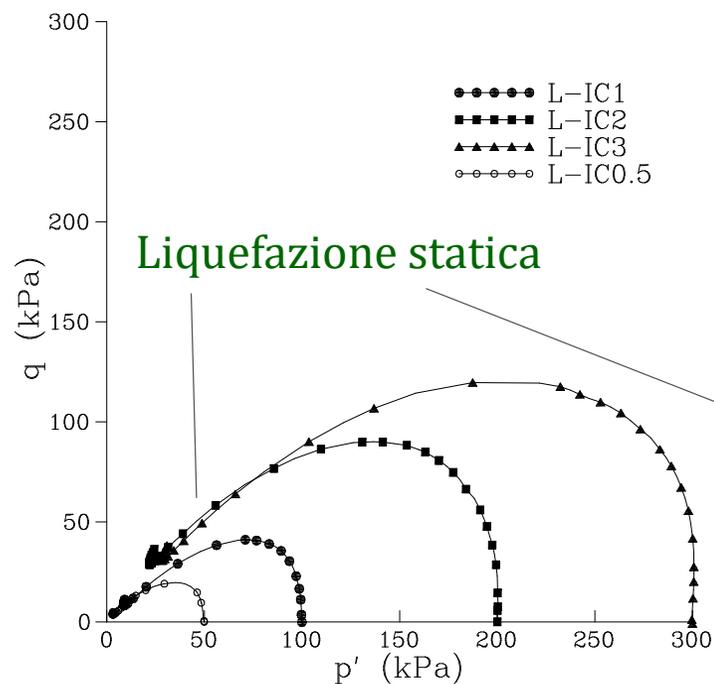


---

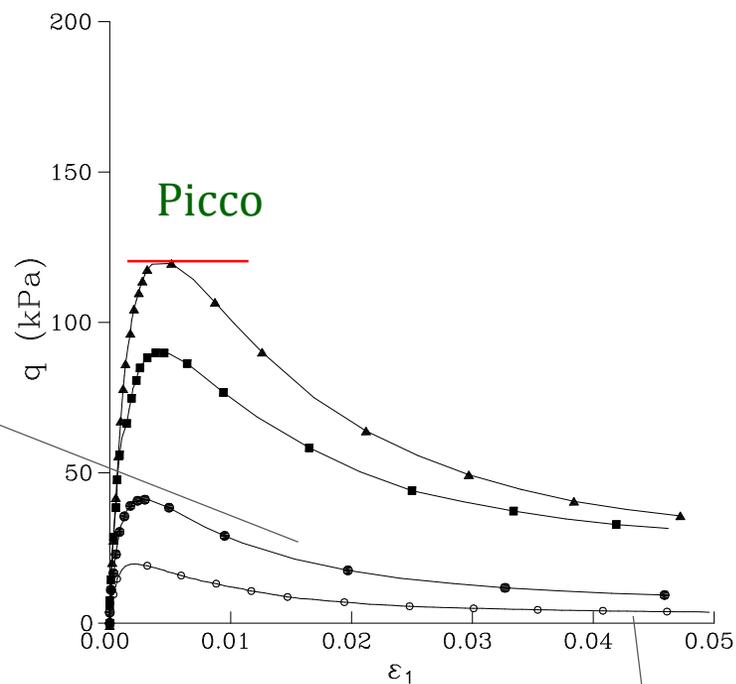
## Il comportamento meccanico

# Critical State Soil Mechanics

## Comportamento non drenato delle sabbie sciolte

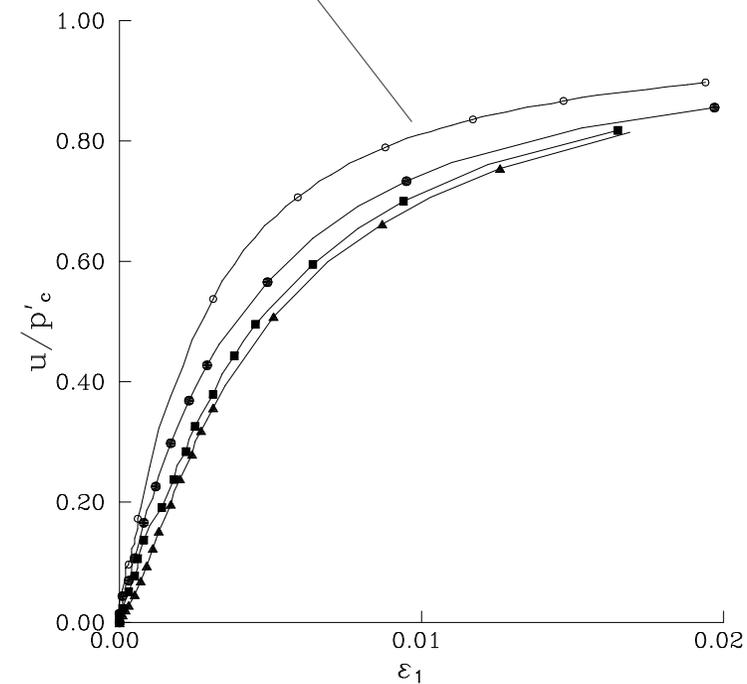


Nova, 2002



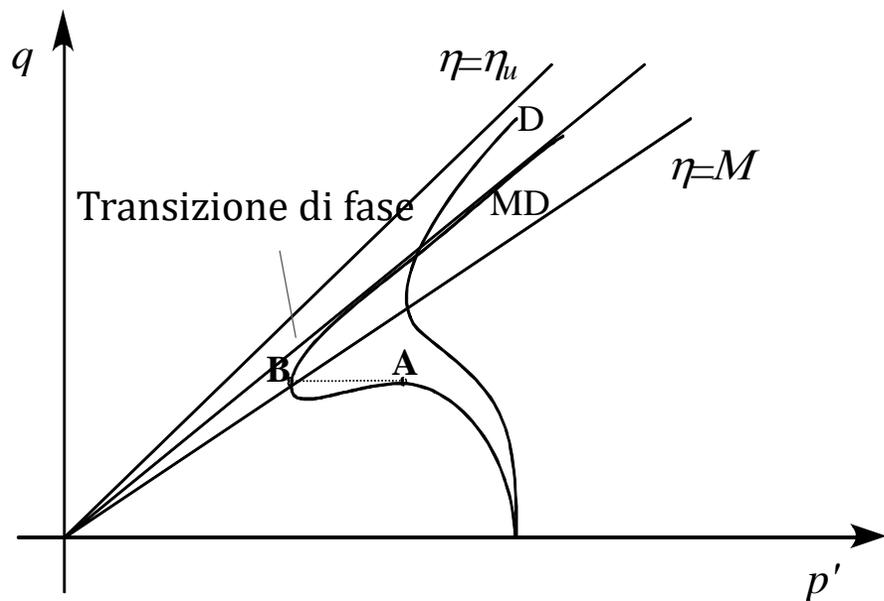
Annullamento della resistenza

Incremento della pressione dovuto al comportamento contraente

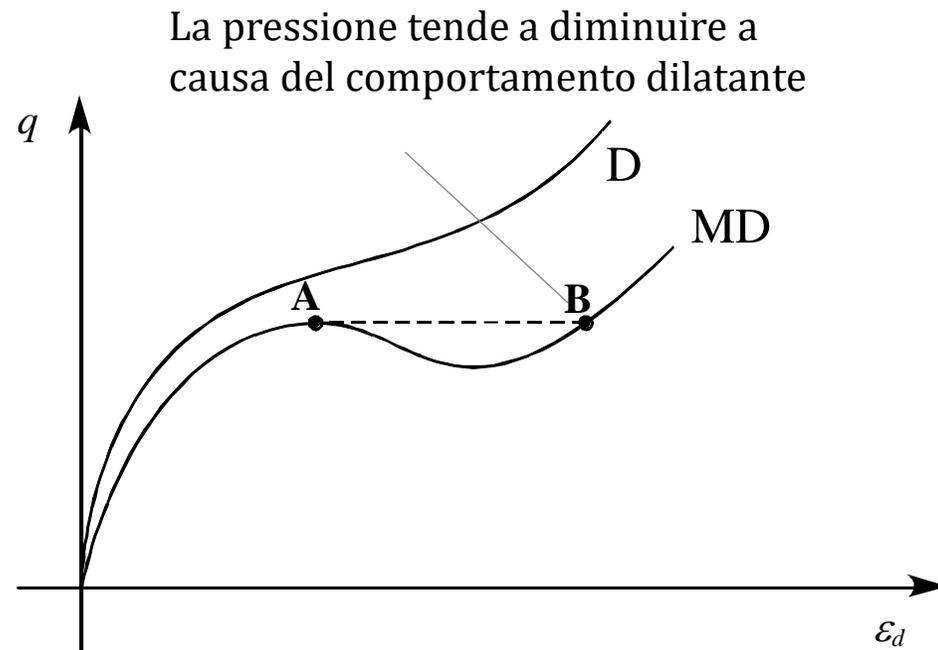


# Critical State Soil Mechanics

## Comportamento non drenato delle sabbie mediamente dense e dense

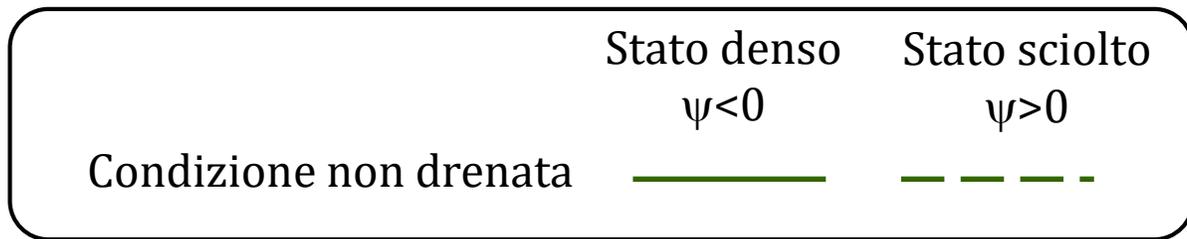


Nova, 2002



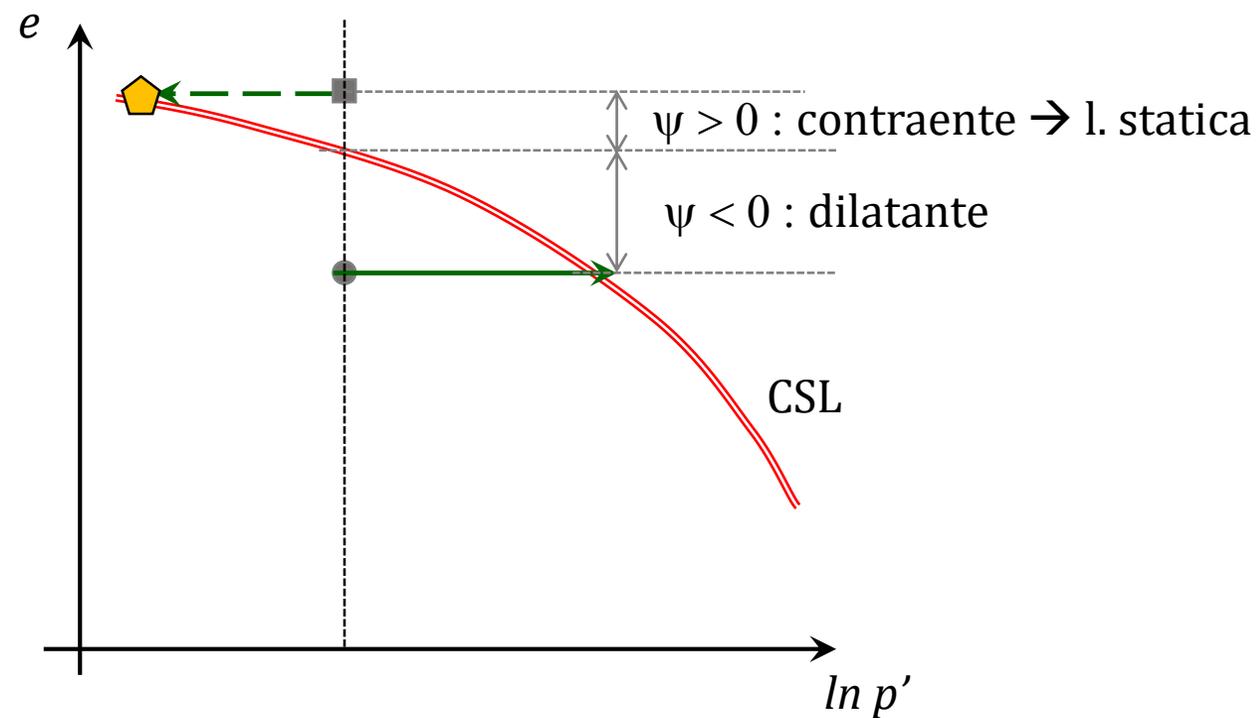
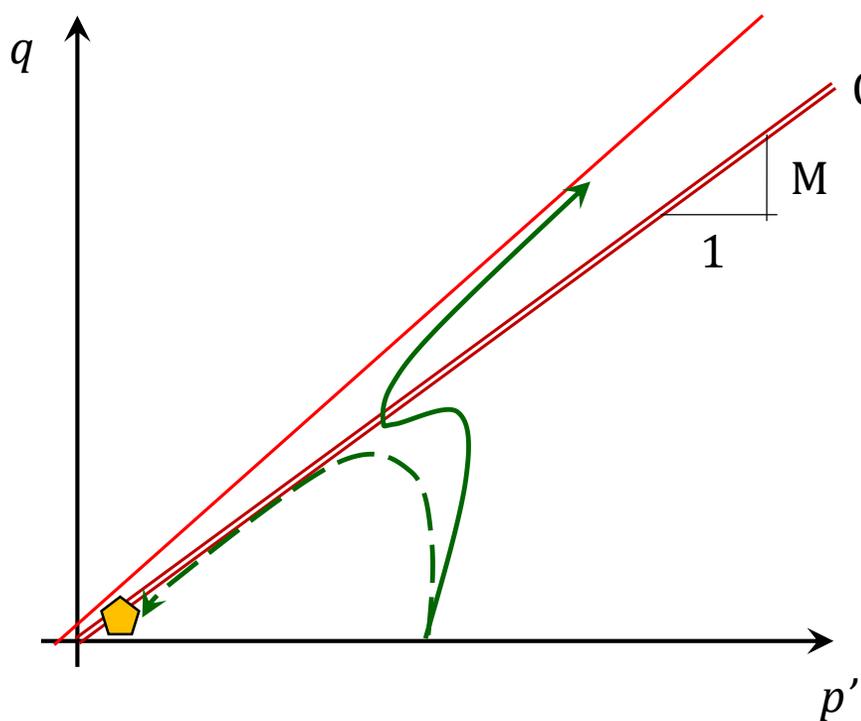
D: campione denso  
MD: campione di media densità

# Critical State Soil Mechanics



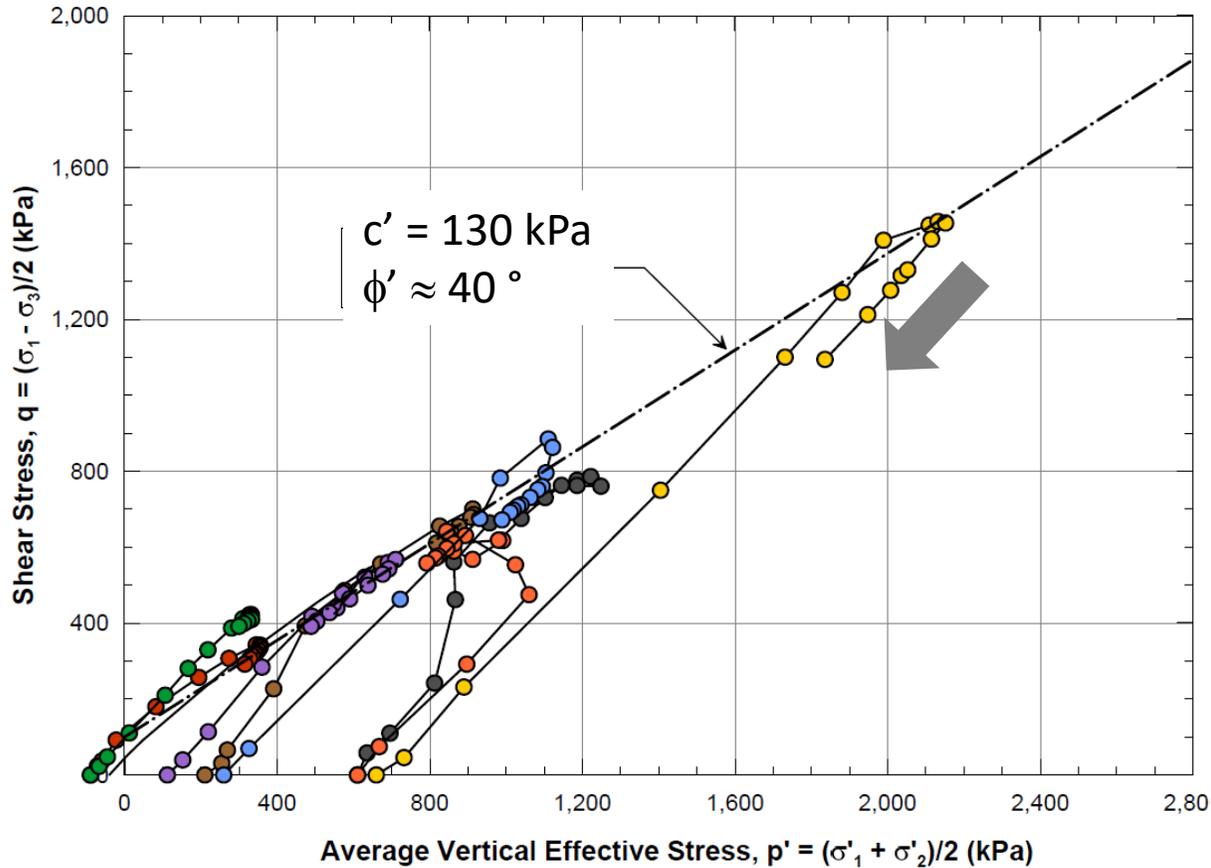
Parametro di stato  $\psi = e - e_{cs}$

(Been & Jefferies, 1985)

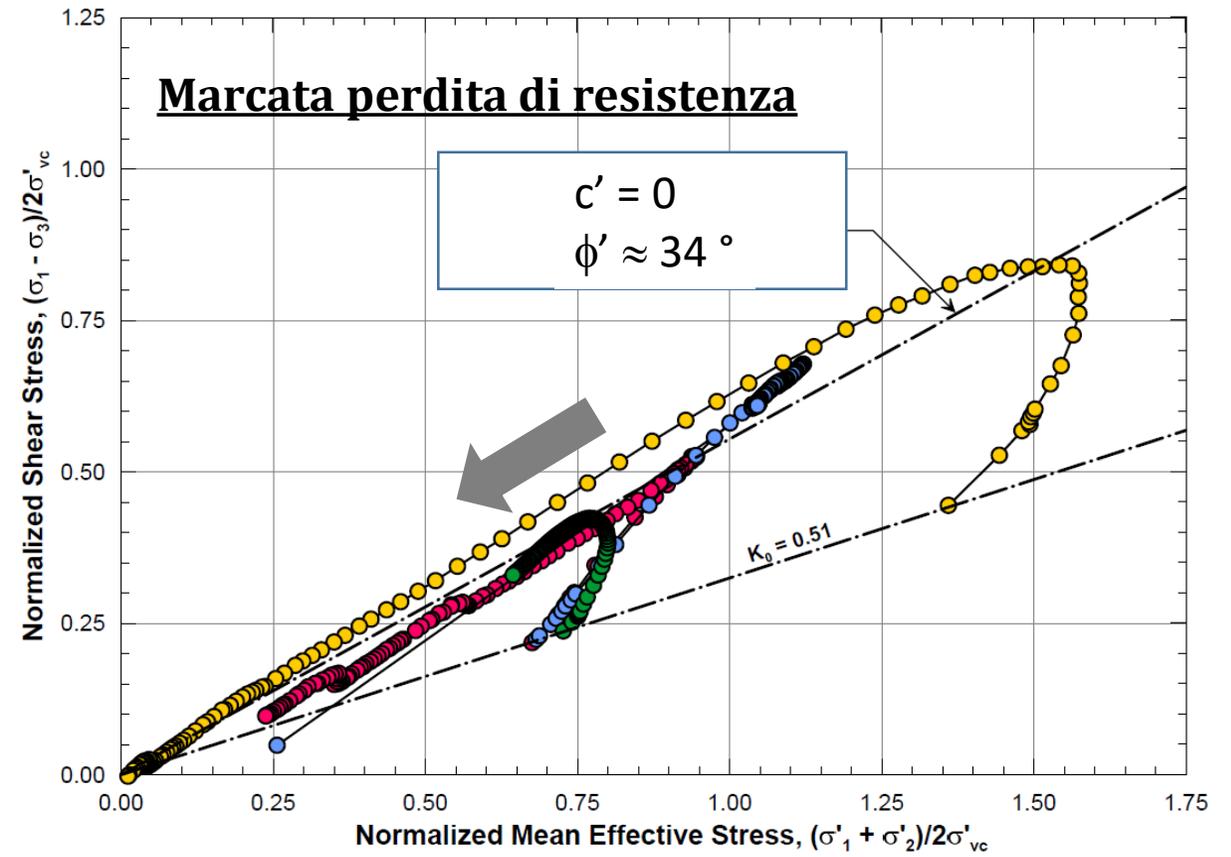


# Campagna pre collasso: resistenza di campioni intatti

## Prove CIU Materiale grossolano 'denso'

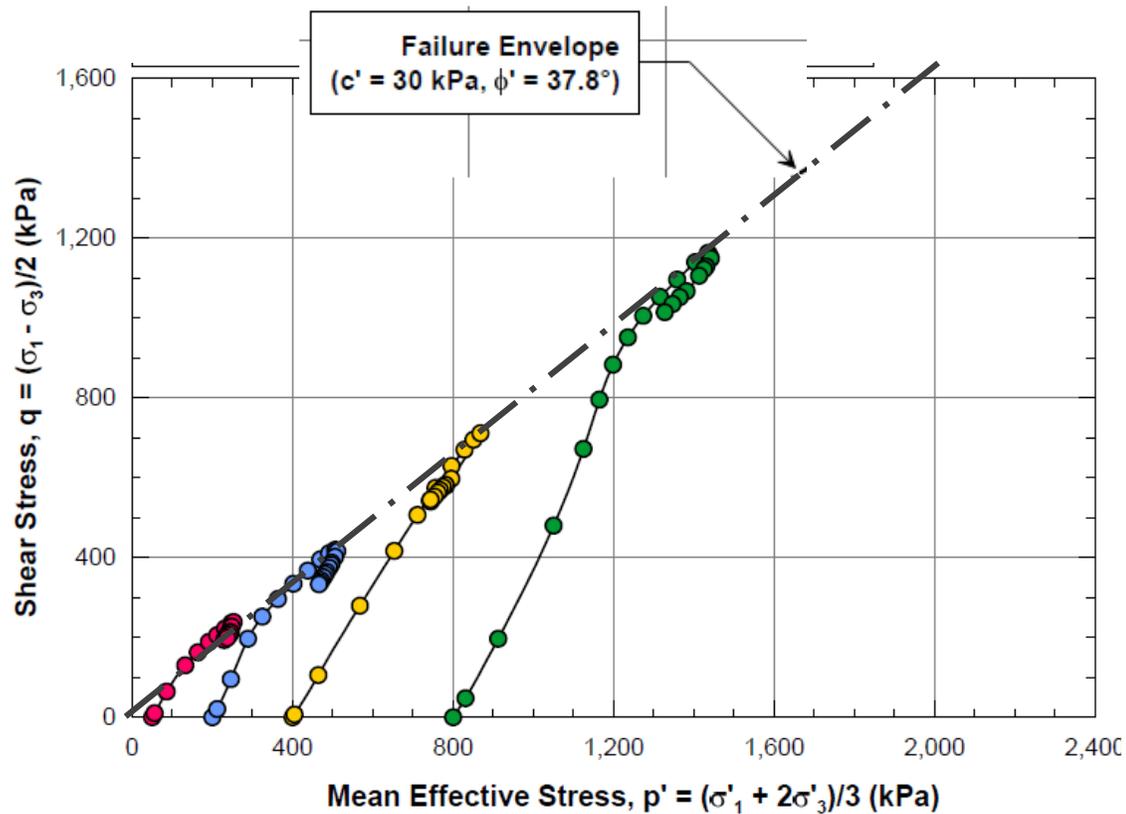


## Prove $CK_0U$ Materiale grossolano 'sciolto'

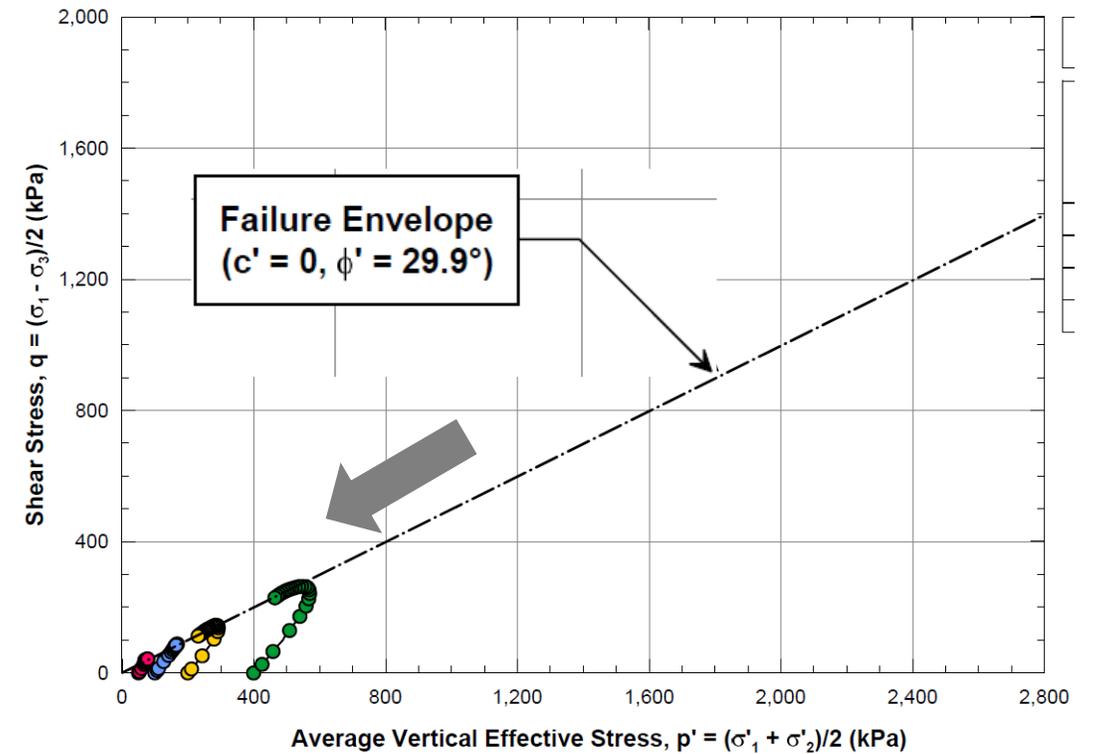


# Campagna pre collasso: resistenza di campioni intatti

## Prove CIU Materiale fine 'denso'



## Prove $CK_0U$ Materiale fine 'sciolto'



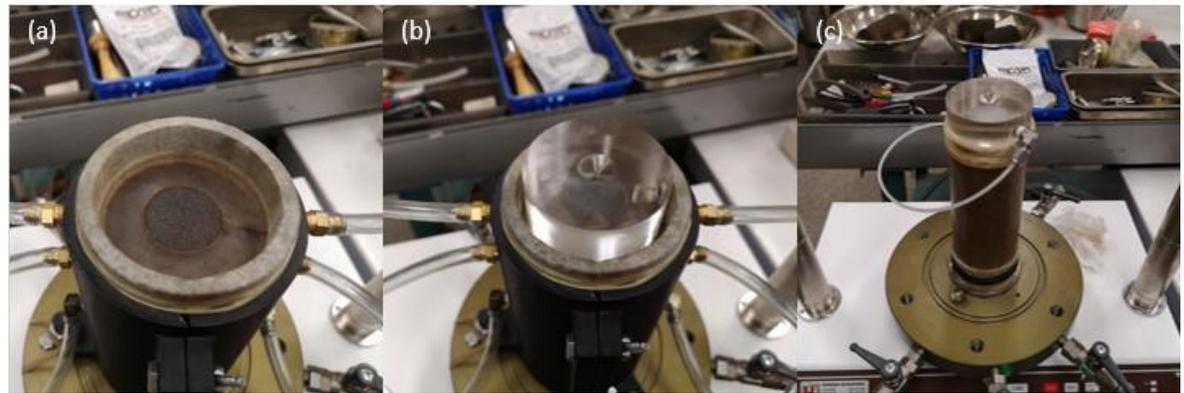
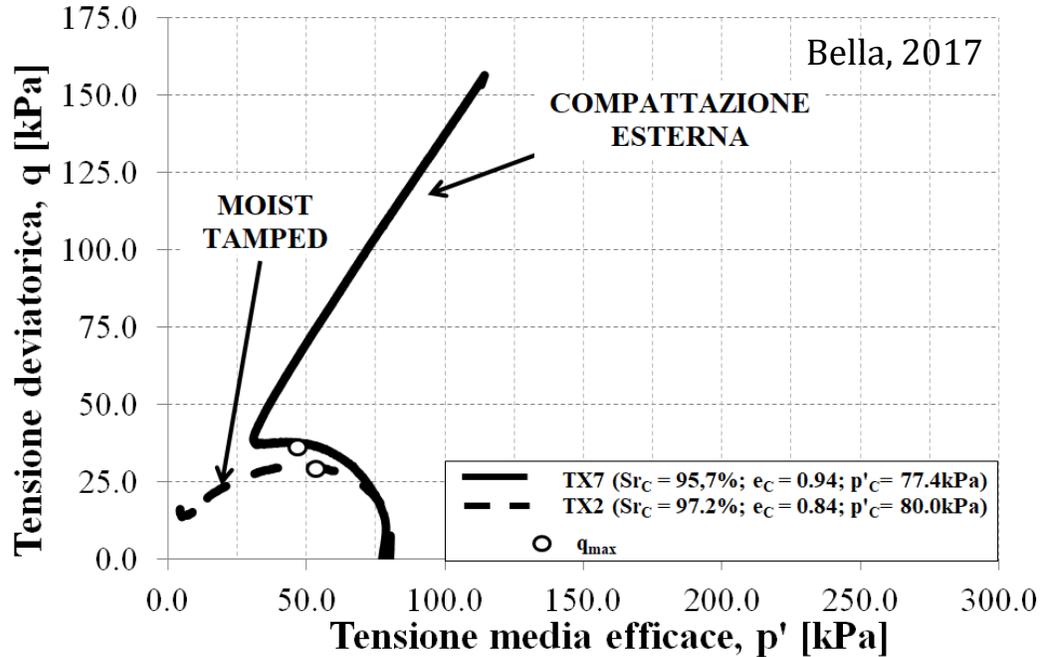
# Campagna post collasso – preparazione dei campioni

## Tecnica di Moist Tamping

Compattazione per strati all'interno della cella triassiale



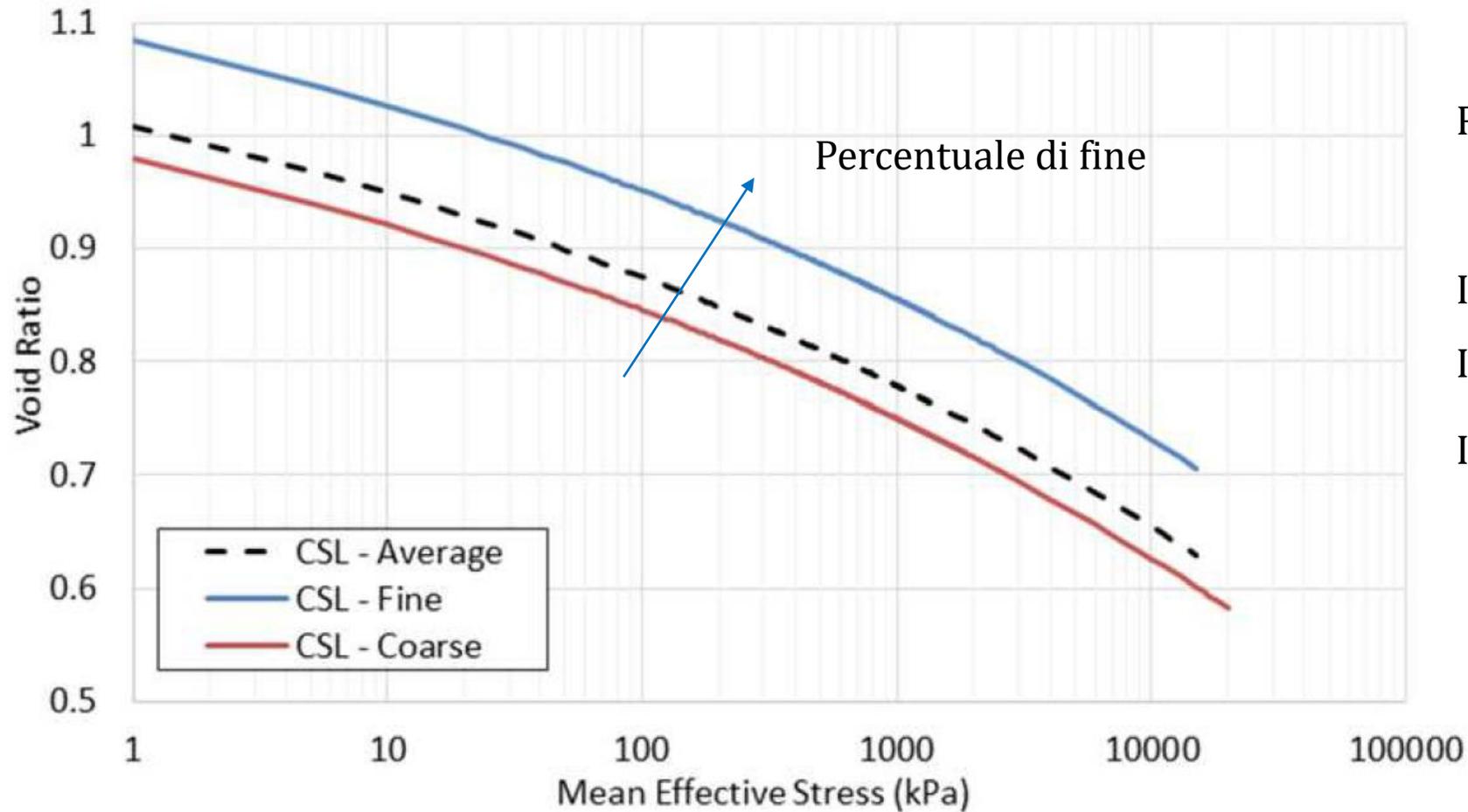
Bella, 2017



Panel, 2019

## Campagna post collasso – linea di stato critico

### Linee di stato critico determinata dalle prove sperimentali



Resistenza di stato critico

	M	$\phi'_{cs}$
Inerte grossolano	1.38	34°
Inerte 'medio'	1.38	34°
Inerte 'fine'	1.35	33°

# Dipendenza della linea di stato critico dalla pezzatura: Stava

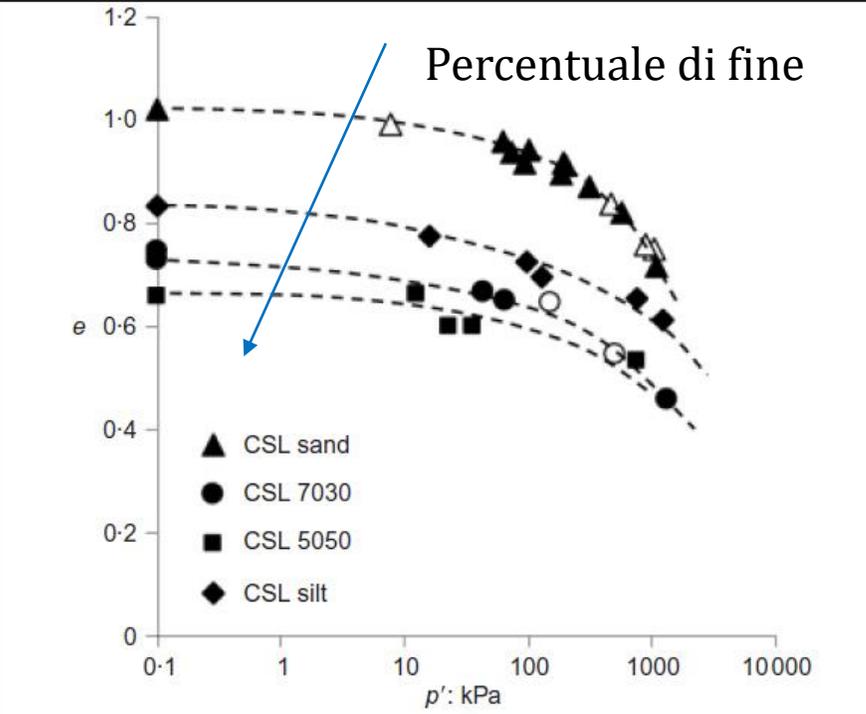


Fig. 10. Critical state data from all the tests. The empty dots correspond to those tests prepared with methods different from moist tamping

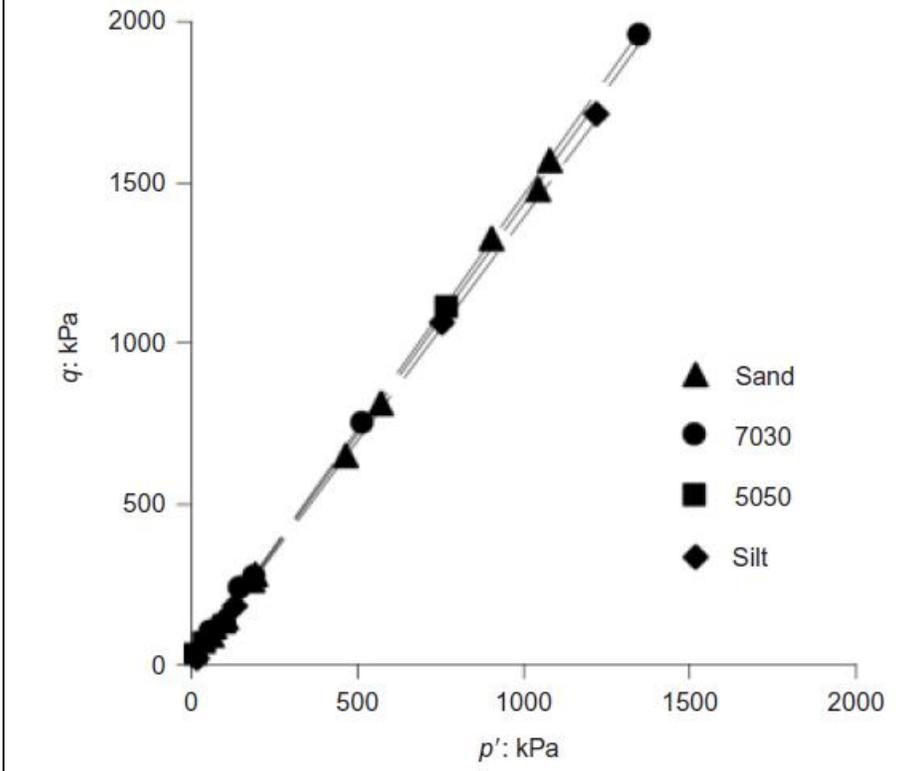
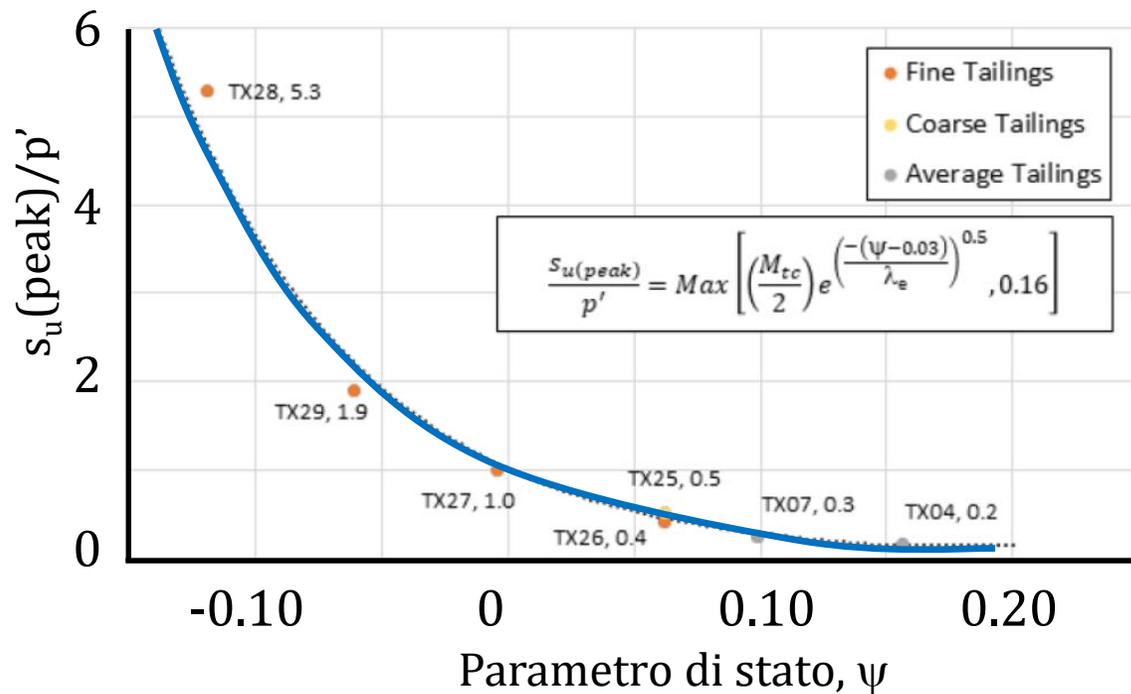


Fig. 8. Critical state points of the soil mixtures tested

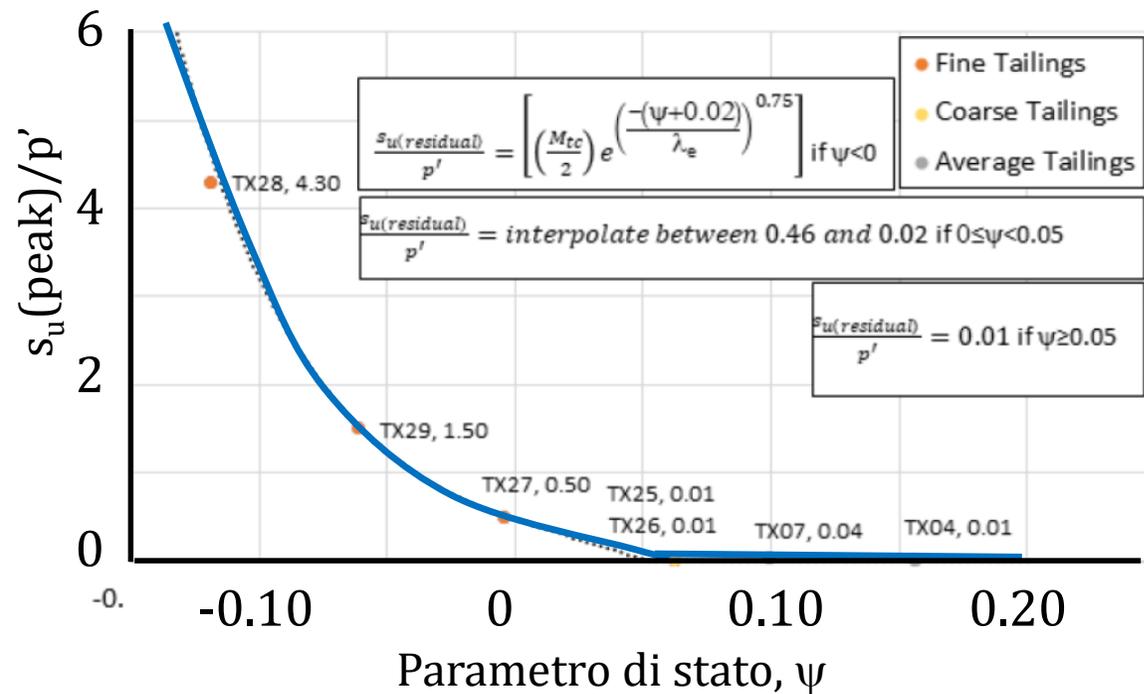
Alessandra Carrera (2008), Politecnico di Torino

# Dipendenza della resistenza non drenata dal parametro di stato

Resistenza non drenata di picco  $s_{u(\text{peak})}$

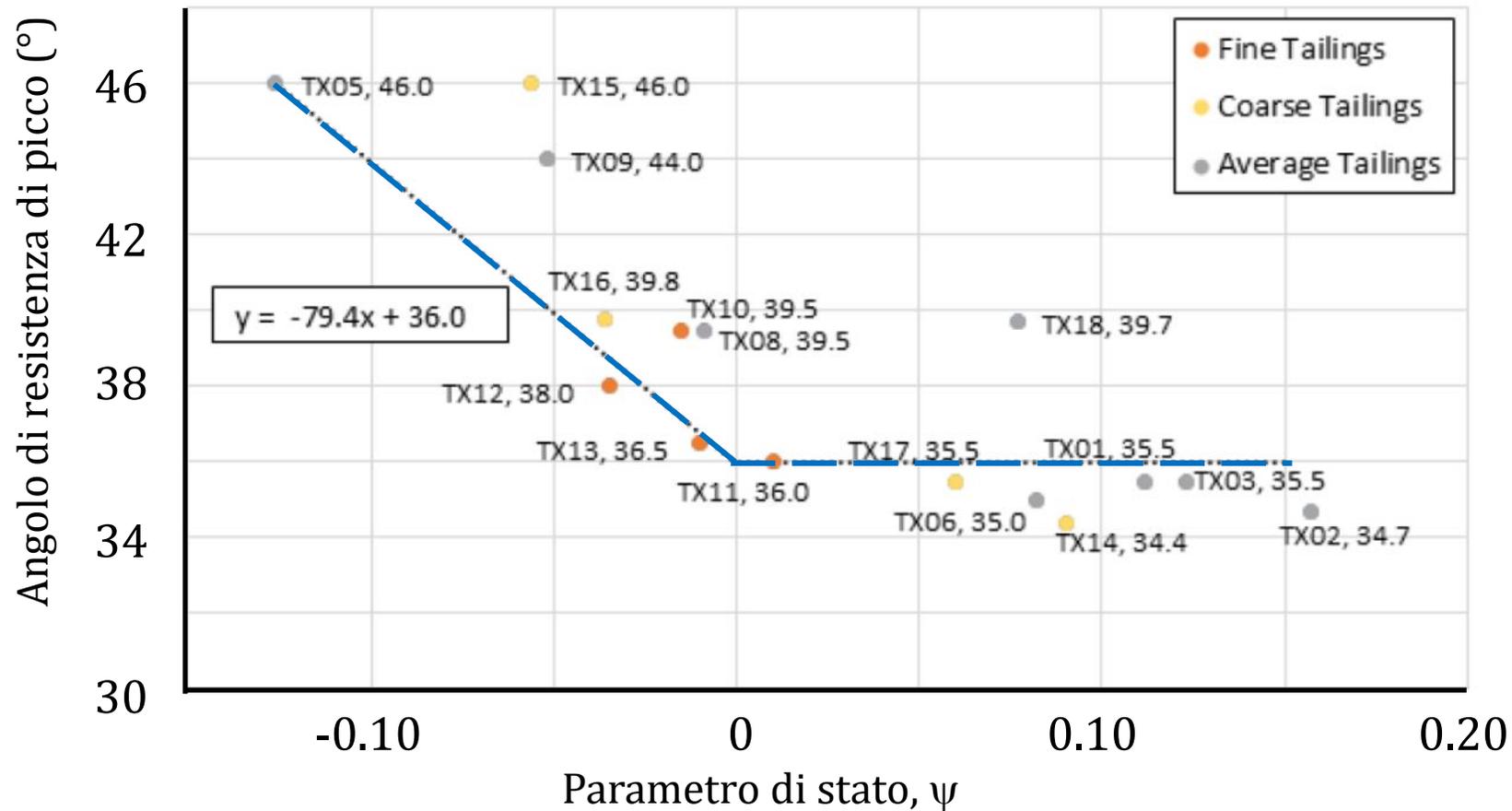


Resistenza non drenata residua  $s_{u(\text{res})}$



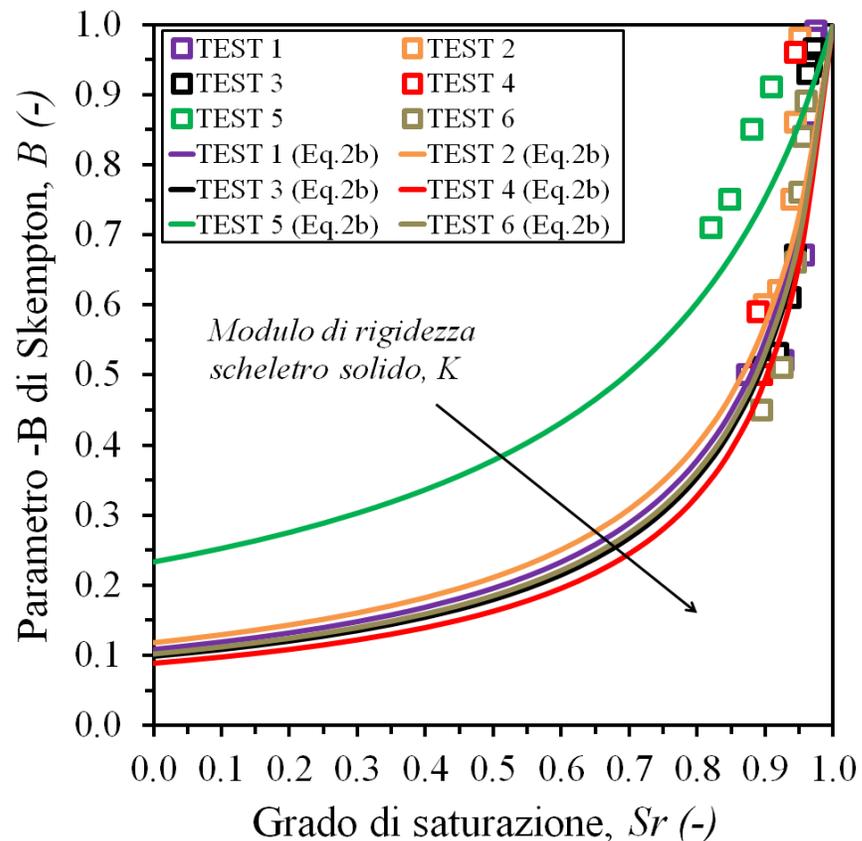
# Dipendenza della resistenza di picco drenata dal parametro di stato

Angolo di resistenza di picco



# Cosa aspettarsi da condizioni non sature

Incremento di pressione per sollecitazione non drenata in prossimità di saturazione



Gianluca Bella (2017)

Parametro B di Skempton

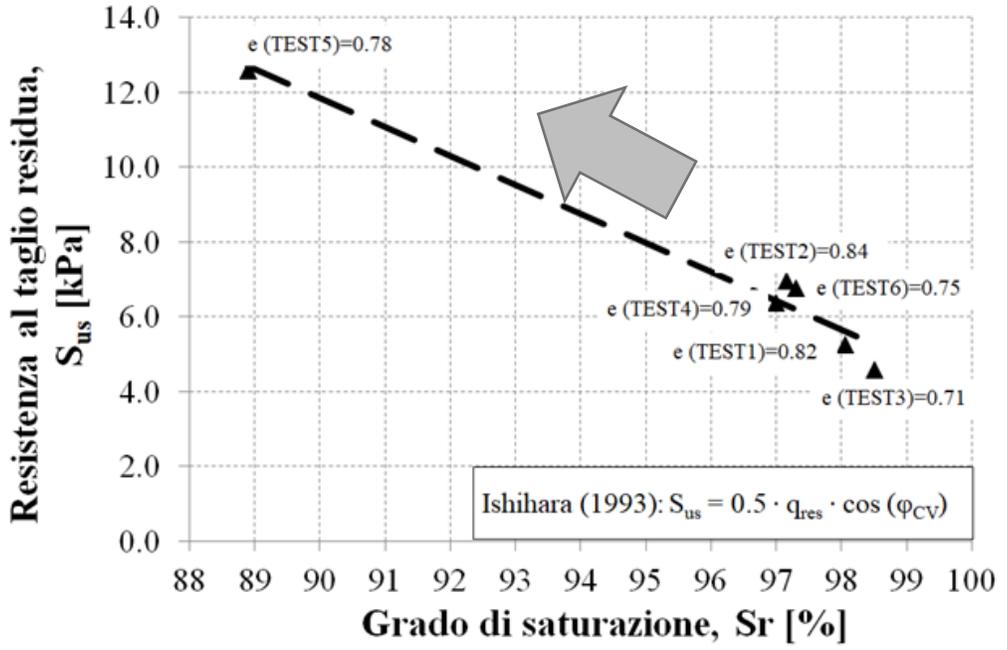
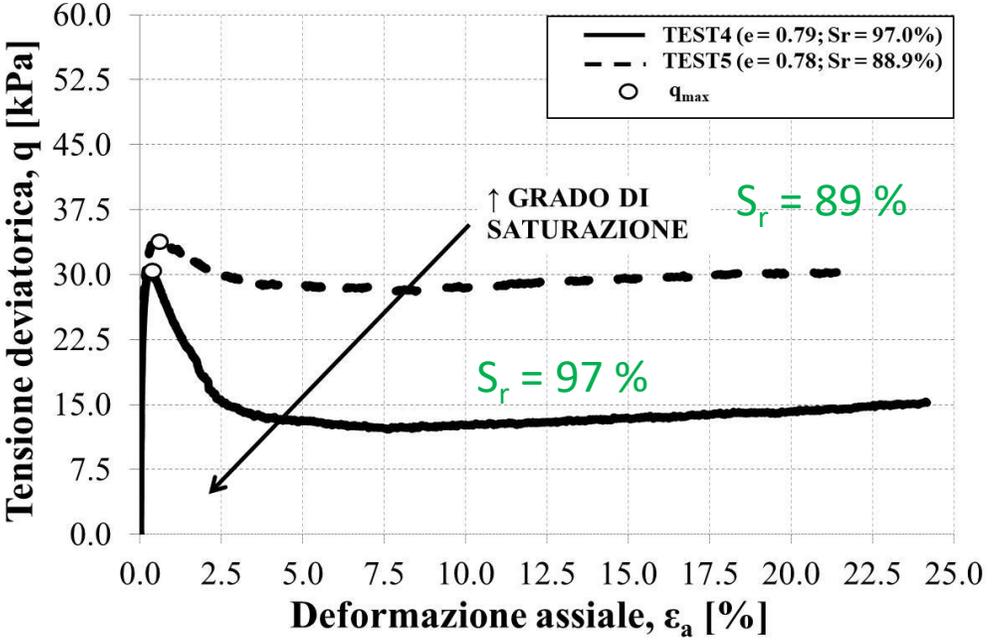
$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma}$$

$$B = f(S_r, K, n)$$

Al diminuire di  $S_r$  significativa diminuzione della sovrappressione indotta dal carico non drenato

# Cosa aspettarsi da condizioni non sature

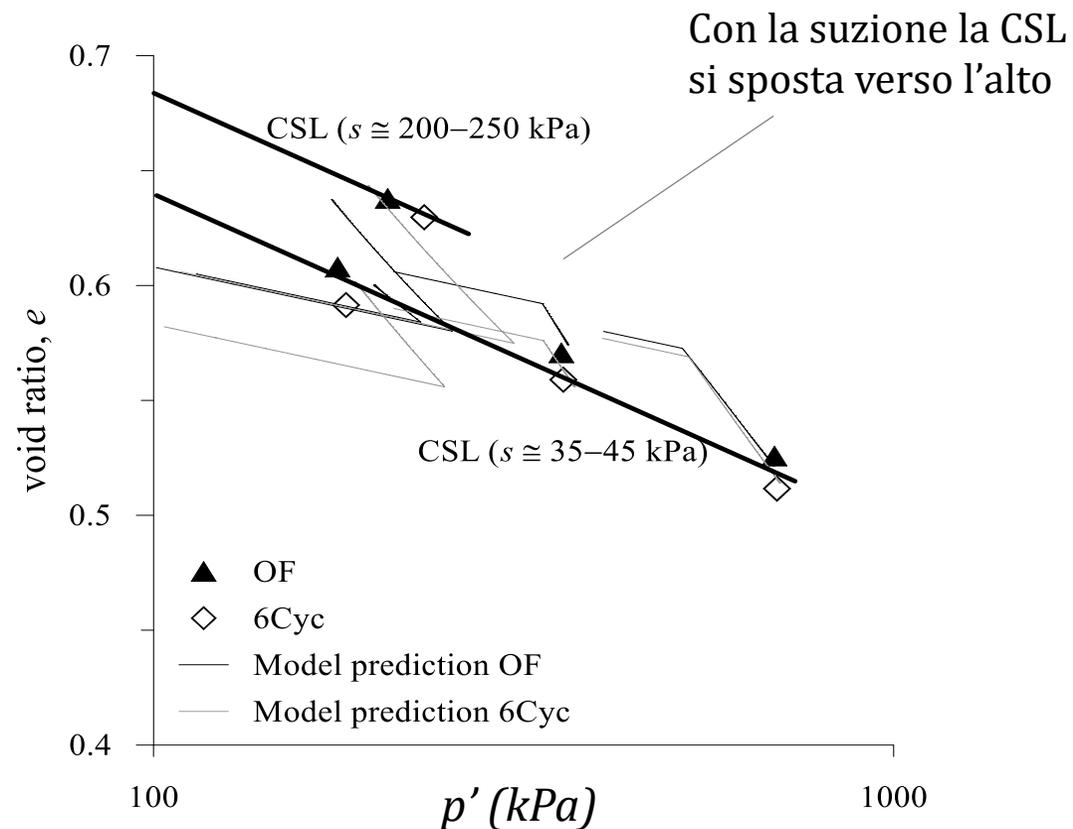
## Liquefazione statica in prossimità di saturazione



Gianluca Bella (2017), Politecnico di Torino – prove su limo di Stava

# Cosa aspettarsi da condizioni non sature

## Cella triassiale a controllo di suzione (Polito)



Arash Azizi (2016) – prove su limo di Viadana

---

## Il modello numerico e conclusioni sul collasso

# Formulazione del modello meccanico per l'analisi di stabilità

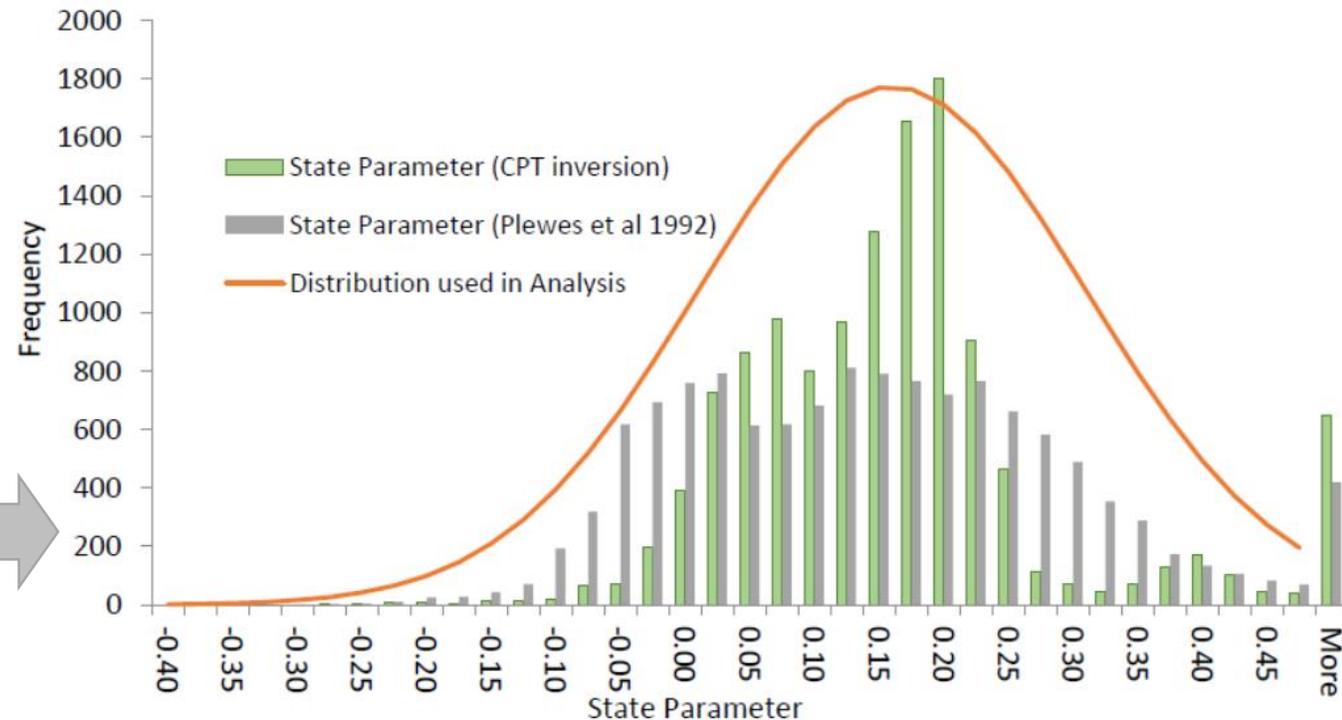
Ricorso a modelli:

Equilibrio Limite (preliminare)

Differenze Finite 2D e 3D (FLAC)

Material Point Method

CPTU interpretate per determinare valori locali del parametro di stato, da cui creare una distribuzione statistica introdotta nelle simulazioni



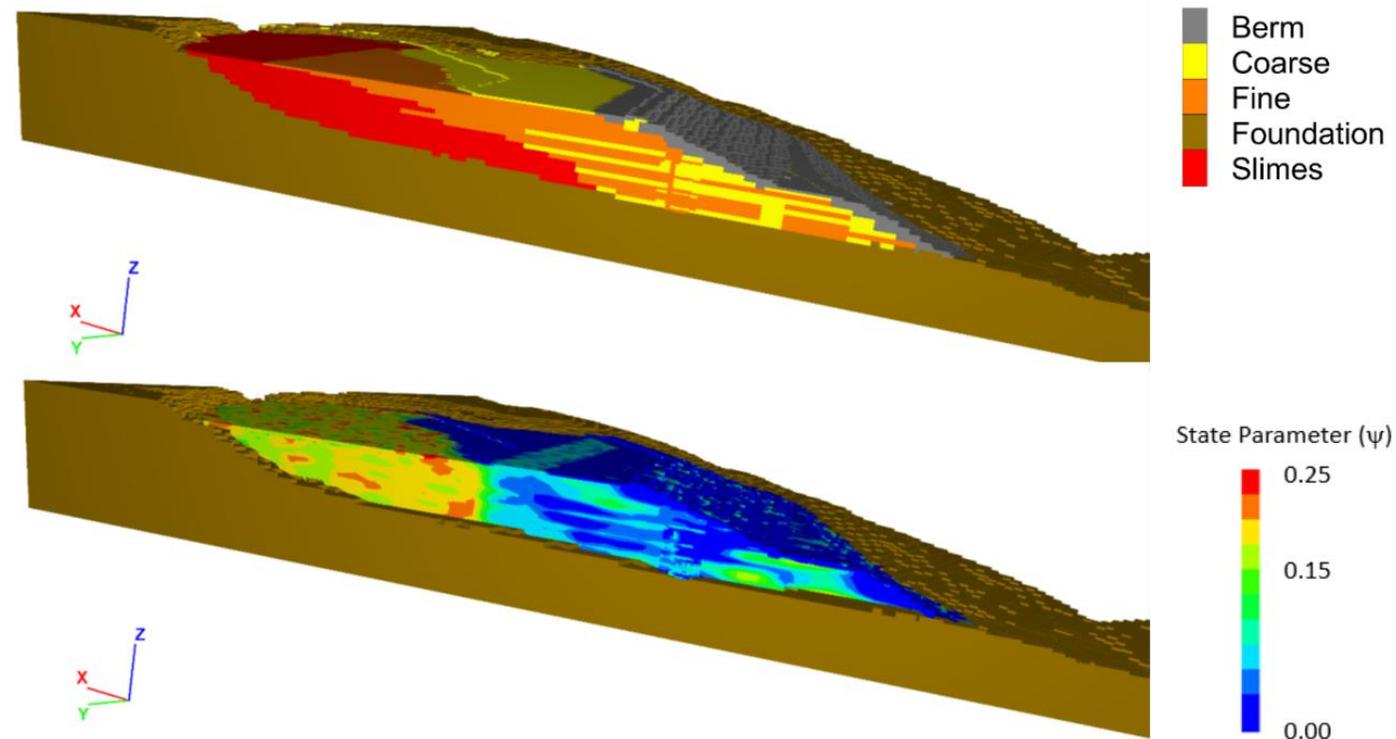
# Analisi di stabilità

## Fase 1 – analisi pre-collasso ('Geostatica')

Obiettivo: distribuzione di proprietà tale da favorire l'instabilità, selezione degli scenari più critici

Analisi stocastica, 40 modelli con diverse distribuzione del parametro di stato. Per ciascuna di esse:

- Determinazione delle condizioni 'geostatiche' (analisi drenata)
- Determinazione FS mediante metodo Strength Reduction Factor (analisi non drenata)



## Analisi di stabilità

### Fase 2 – analisi di stabilità per determinare la causa del collasso

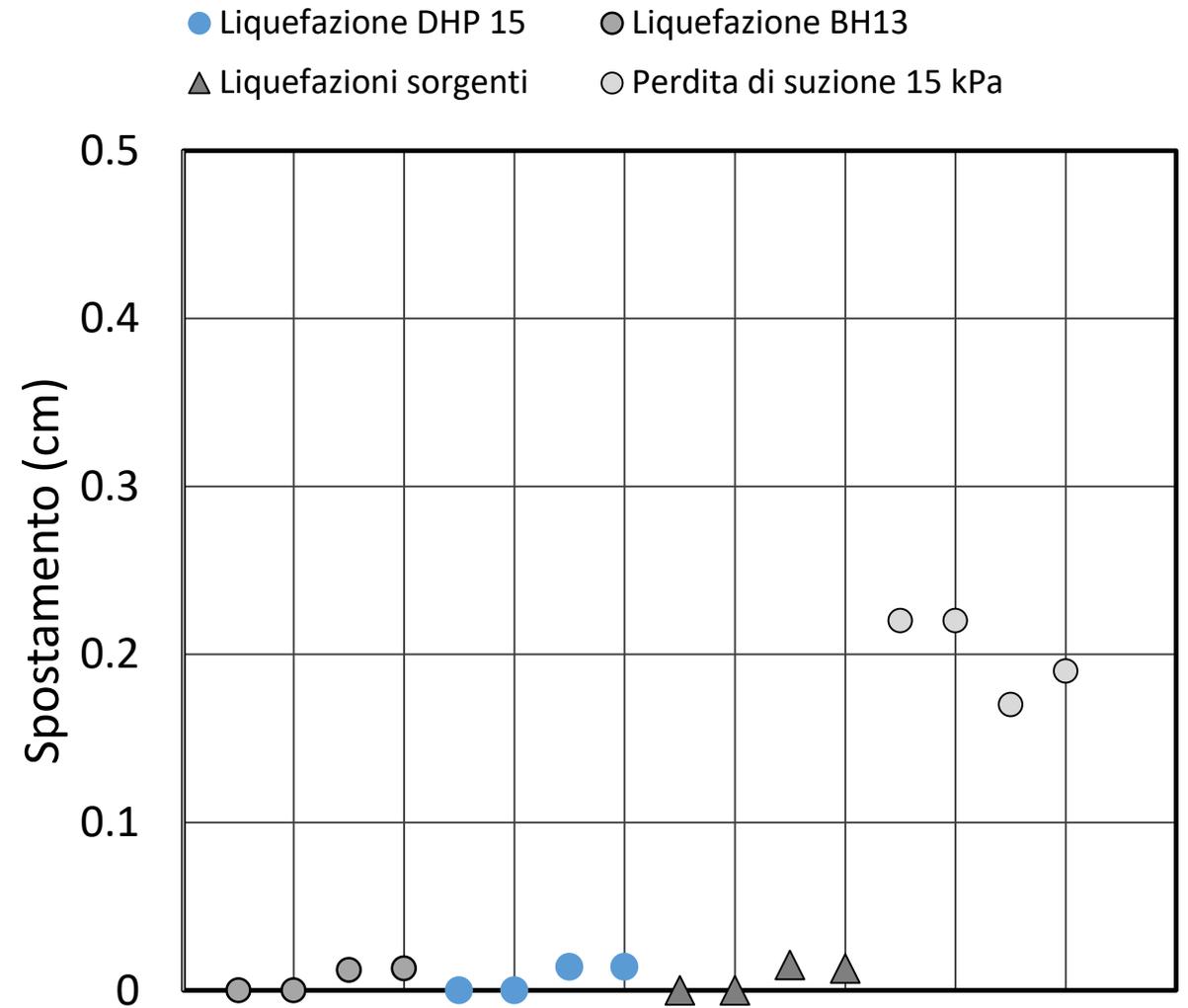
Limitata ai 4 modelli geostatici con  $1 < FS < 1.20$

Analisi di stabilità in condizioni **non drenate** :

Potenziale causa	Come	Effetti
Liquefazione attorno al sondaggio in scavo il giorno del collasso (BH-13)	$s_{u\_liq} = 0.01 p'$ raggio 1 m attorno il foro	assenza deformazioni significative
Liquefazione attorno al dreno dell'incidente del giugno 2018 (DHP-15)		no collasso
Liquefazione attorno a sorgenti note alle spalle dell'invaso	$s_{u\_liq} = 0.01 p'$ 50 m attorno sorgenti	no collasso, deformazioni nel materiale invasato (non 'paramento')
Riduzione della resistenza nella zona sopra falda	fino a 15 kPa	no collasso, ma induce deformazioni diga 'sensate'

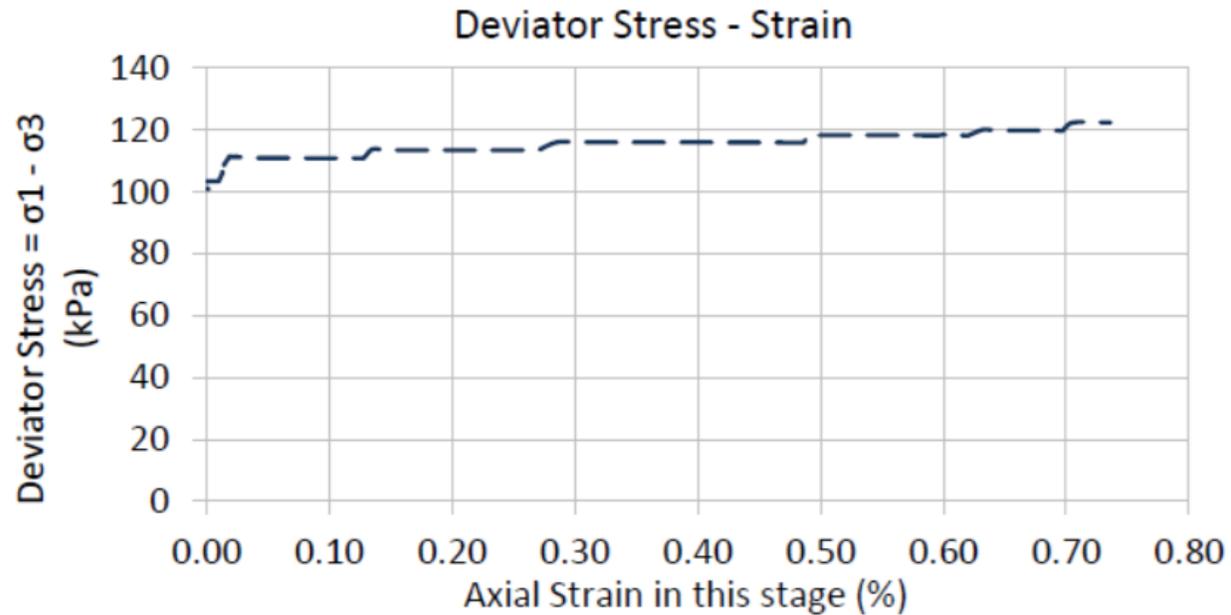
# Analisi di stabilità - senza creep

Spostamenti comportati dalle  
differenti ipotesi



# Considerazioni sul creep

Prova di creep drenata a  $K_0 = 0.40$



Deformazioni accumulate in 2.5 giorni



# Analisi di stabilità - con creep

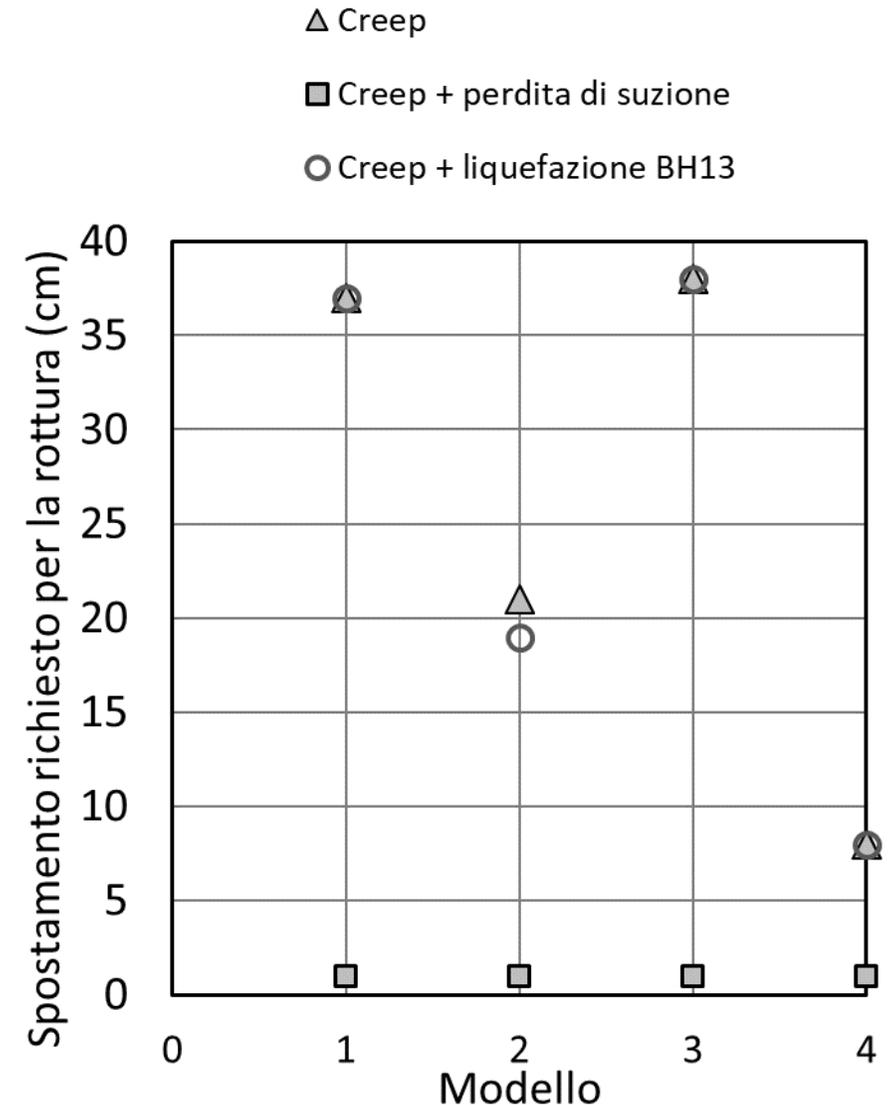
## Fase 3 – analisi di stabilità - CREEP

Analisi di stabilità ripetute ogni cm di spostamento aggiuntivo dovuto al creep

Ipotesi:

- 1) solo creep
- 2) creep + perdita di resistenza per riduzione della suzione
- 3) creep + liquefazione intorno al BH 13

Rottura causata da creep + perdita di suzione



## Conclusioni del panel

---

### Fattori predisponenti l'instabilità

Pendenza della diga

Deposizione di materiale fine vicino alle berme

Insufficienza del sistema di drenaggio

Pesi elevati per l'alto contenuto di minerali ferrosi

### Cause del collasso

Concomitanza di deformazioni lente dovute al creep e riduzione della suzione per l'elevata piovosità

### Altre osservazioni

Il monitoraggio dei movimenti non lasciava presagire la rottura perché non vi erano evidenti deformazioni localizzate

Il collasso non è spiegato dall'incidente del DHP 15 o dallo scavo del BH13