

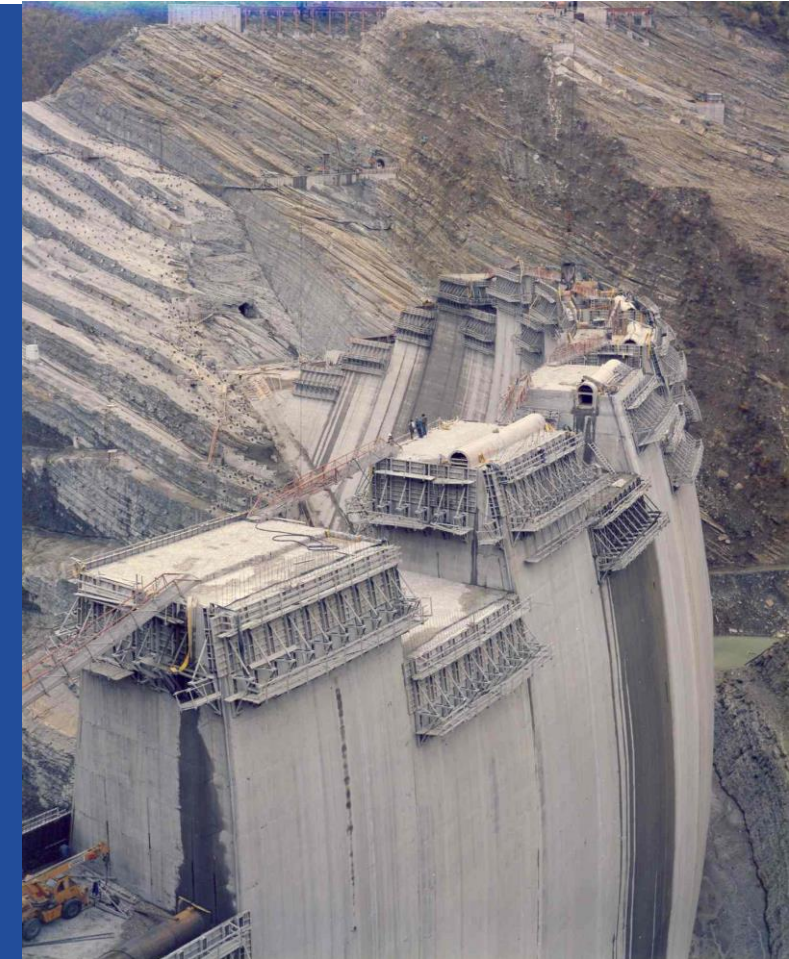
FORMAZIONE DIGHE A VOLTA

ASPETTI DI FONDAZIONE

*L'influenza del comportamento idro-meccanico
dell'ammasso roccioso*

Alessandro Graziani

*Università «Roma Tre»
Dipartimento Ingegneria Civile*



Problemi geomeccanici relativi alle fondazioni di dighe a volta

1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

- Struttura dell'ammasso: giunti, faglie
- Resistenza a taglio

2. Deformabilità

- Influenza sulle condizioni di sforzo nella struttura
- Deformazioni dipendenti dal tempo

3. Permeabilità

- Distribuzione delle pressioni e flussi di filtrazione nell'ammasso
- Accoppiamento permeabilità-sforzo, **diga di Place Moulin**

4. Stabilità delle spalle

- Esempi e problemi, **diga di Ridracoli**
- Sistemi di rinforzo



Introduzione

Collaborazioni, ringraziamenti

- Diga di Place Moulin: **Compagnia Valdostana Acque**

Università di Roma Sapienza (Prof. R. Ribacchi, T. Rotonda)

Tesi di Dottorato (2010): **Alessandro Boldrini**

“ Accoppiamento idromeccanico nella roccia di fondazione di dighe ad arco gravità. Esame di un caso reale ”

- Diga di Ridracoli: **Romagna Acque**

Università di Bologna (Prof. D. Boldini)

Tesi di Dottorato (2023): **Edoardo Lusini**

“ Numerical modelling of rock masses interacting with dams: the case of Ridracoli ”

Tipo arco-gravità

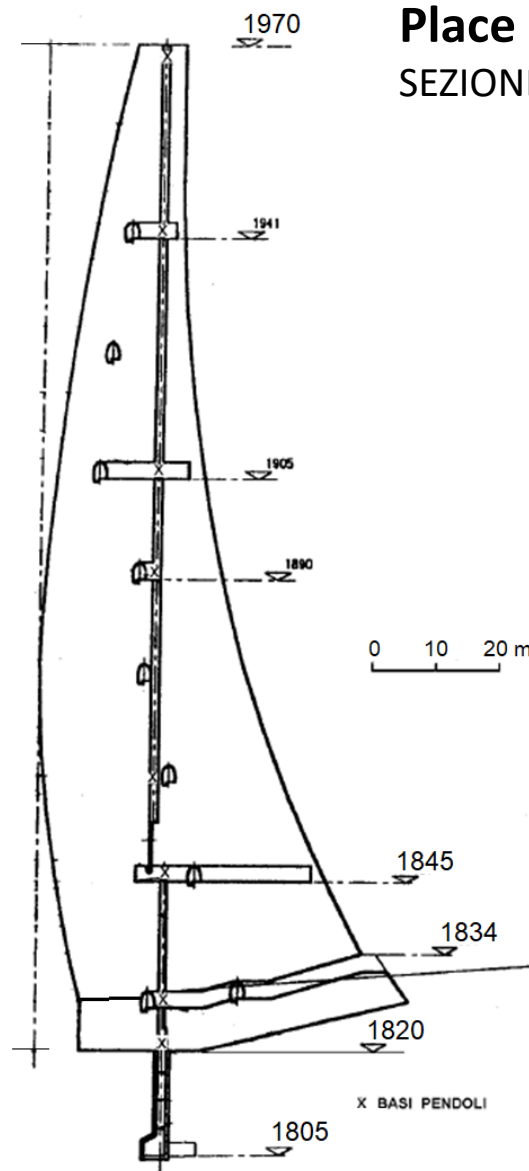
Diga di Place Moulin

Altezza	155	m
Fine costruzione	anno 1965	
Numero di conci	43	
Quota coronamento	1970	m s.m.
Sviluppo del coronamento	678	m
Spessore al coronamento	6.4	m
Spessore alla base (1834 m s.m.)	41.9	m
Spessore max pulvino	51.0	m

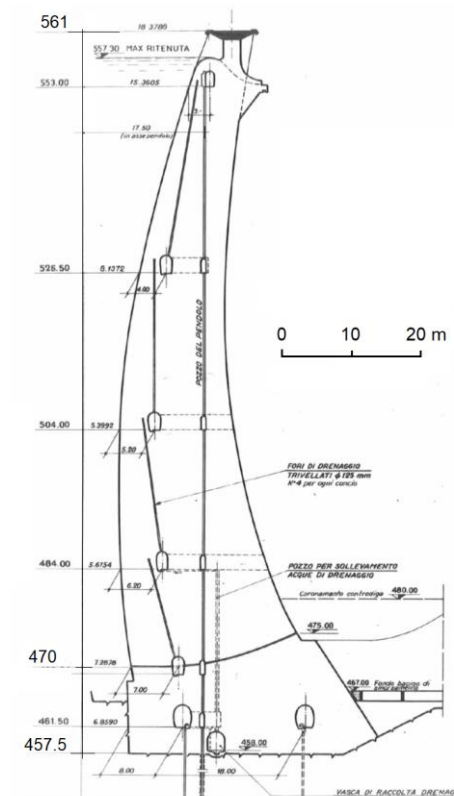
Diga di Ridracoli

Altezza	103.5	m
Fine costruzione	anno 1982	
Numero di conci	27	
Quota coronamento	561	m s.m.
Sviluppo del coronamento	432.5	m
Spessore al coronamento	6.6	m
Spessore alla base (470 m s.m.)	25.2	m
Spessore max pulvino	36.5	m

Place Moulin SEZIONE MAESTRA

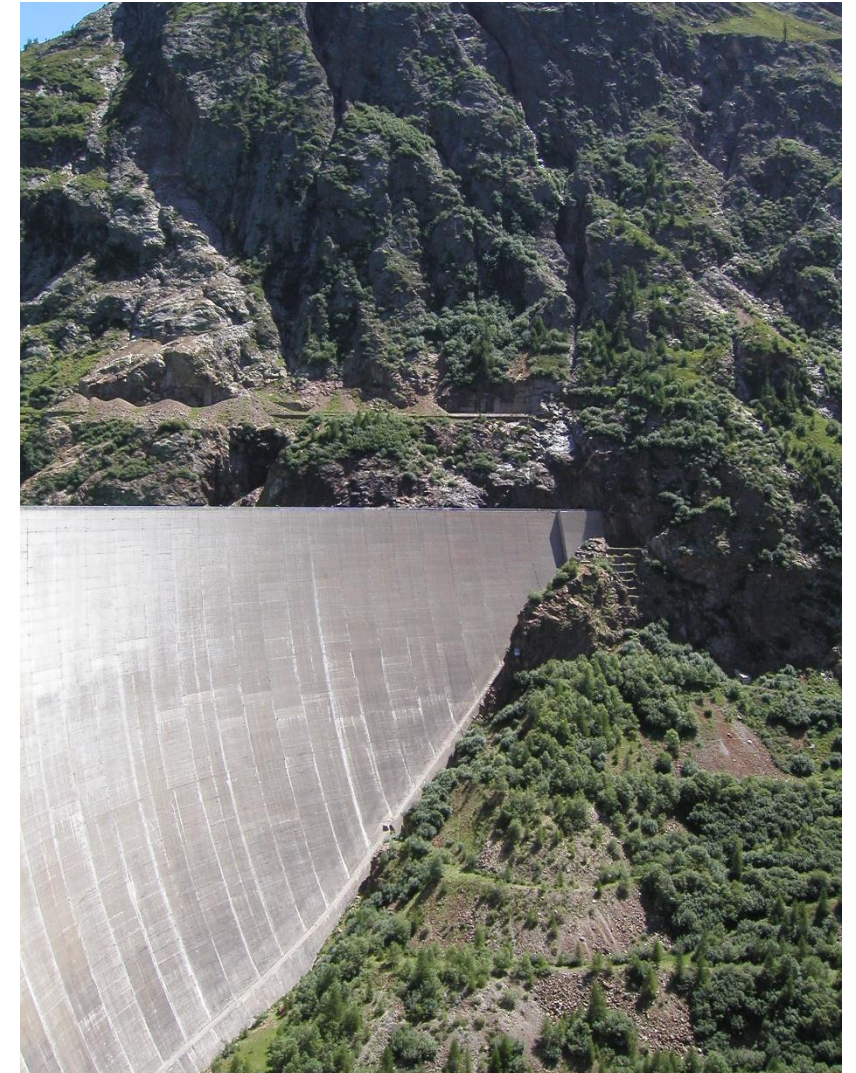


Ridracoli SEZIONE MAESTRA



1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

Caso di studio:
diga di Place Moulin



1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

Situazione geologica

Formazione di **rocce metamorfiche**.

Si può suddividere in **tre unità principali** a seconda del litotipo prevalente:

- **calcefiri** in una fascia con spessore di circa 60 m nella zona centrale della valle (alveo);
- **anfiboliti** nella parte alta della spalla sinistra al di sopra di q. 1840;
- **gneiss** nella restante parte della sezione di imposta.

I livelli carbonatici della formazione originaria hanno dato origine in alcune zone a **marmi**.



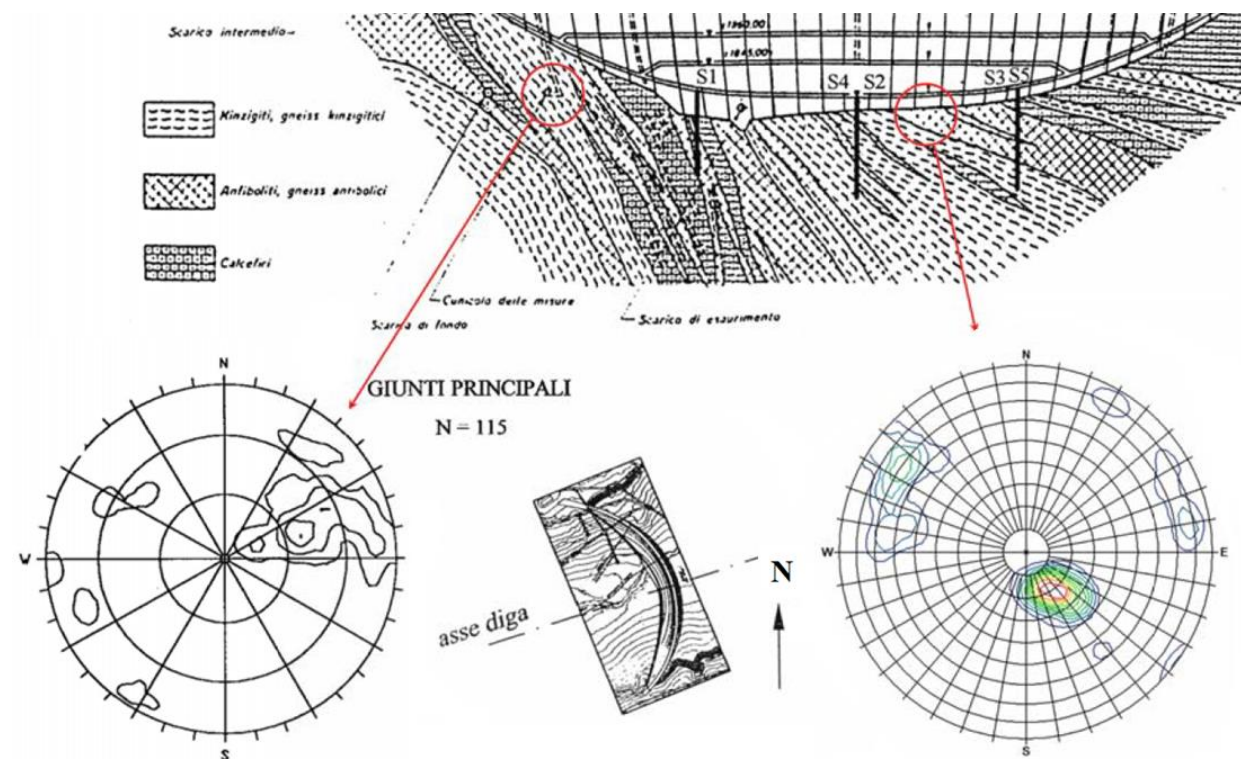
1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

Rilievi delle **caratteristiche delle discontinuità** su affioramenti al piede di valle

Nella zona dell'alveo si osservano alcune **fasce di roccia macinata**, conseguenti a tettonica fragile, in particolare nei calcefiri e marmi.

Giaciture disperse, con 2 sistemi principali:

- J_1 , con direzione NE corrisponde alla giacitura dei banchi nella fondazione;
- J_2 , con direzione da E a ESE.



1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

Rilievi delle discontinuità eseguiti all'interno dei cunicoli che penetrano all'interno delle spalle



- $\sigma_c = 110$ MPa (cataclasiti 3 MPa)
- **RQD** nel campo 64 – 87 %
- **Spaziatura** media 0.15 – 0.2 m
- **Scabri, planari e chiusi**
- **Riempimento cataclastico**
(carbonati 50 - 60%) con cemento friabile di spessore di 2-4 mm (5% dei casi).
- **Estensione** media delle fratture 0.4 - 0.6 m



1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

Caratterizzazione meccanica

Prove di galleria in pressione

effettuate all'epoca del progetto:

Modulo in scarico–ricarico **E = 16 - 25 GPa**

GSI (Hoek, 1998) = 63 - 72.

Caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso secondo le relazioni di Hoek-Brown.

Modulo elastico	E	31.6 GPa
Parametro ammasso	m_a	5.48
Parametro ammasso	s_a	0.0357 kN/m ³
Esponente	a	0.501
Resistenza a compressione	σ_{ca}	20.8 MPa
Resistenza a trazione	σ_{ta}	0.72 MPa
Angolo d'attrito (*)	φ	53.5°
Coesione (*)	c	3.5 MPa

(*) Parametri equivalenti di Mohr-Coulomb determinati nell'intervallo di σ_3 (0 – 5 MPa)

1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

Caso di studio: diga di Ridracoli

Formazione Marnoso-Arenacea

Formazione di origine
turbiditica.

Alternanza di strati arenacei,
più resistenti, e livelli marnosi,
meno resistenti.



1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

Prove in sito

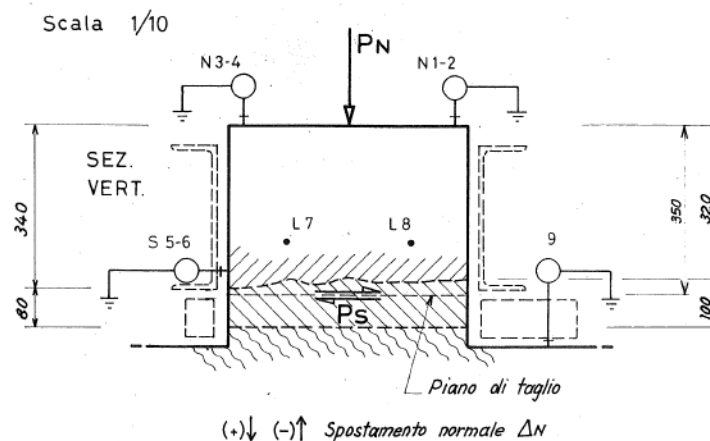
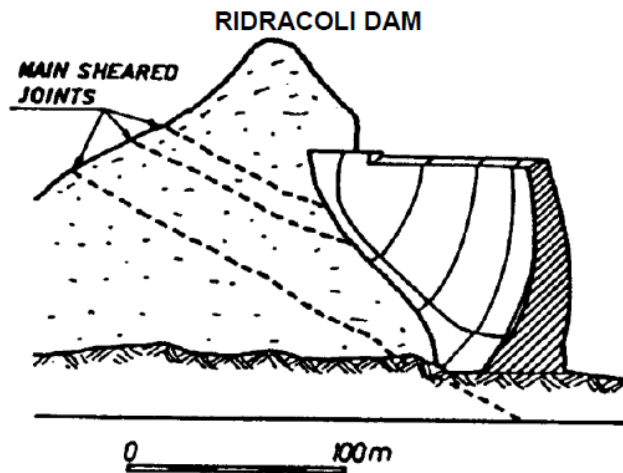
- **Prove di deformabilità:**
 - prove di carico su piastra
 - prove di carico in camera idraulica
- **Prove soniche:**
 - cross-hole
 - carotaggio sonico
- **Prove idrauliche:**
 - permeabilità
 - iniettabilità
- **Prove di taglio diretto sui giunti ST**

Modulo elastico (GPa)	$E_{ } = 6.4 \div 14$	$E_{\perp} = 9.3 \div 11.4$
Velocità sonica V_p (m/s)	$4\,000 \div 5\,000$	
Permeabilità (m/s)	$K_{ } = 5 \cdot 10^{-6}$	$K_v = 4 \cdot 10^{-7}$



1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

Prove di taglio diretto sugli strati laminati



Legenda



Arenaria



Marna siltosa laminata e fogliettata

Resistenza a taglio
su giunti ST laminati

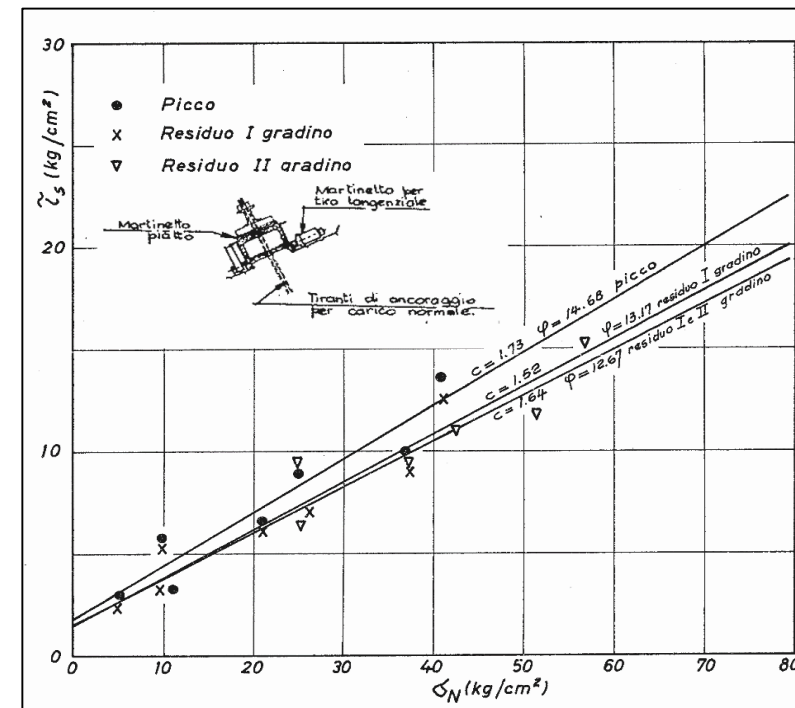
$$\varphi = 13^\circ \div 14^\circ$$

$$c = 0 \div 0.15 \text{ MPa}$$

Resistenza a taglio
giunti di strato

$$\varphi = 33^\circ \div 35^\circ$$

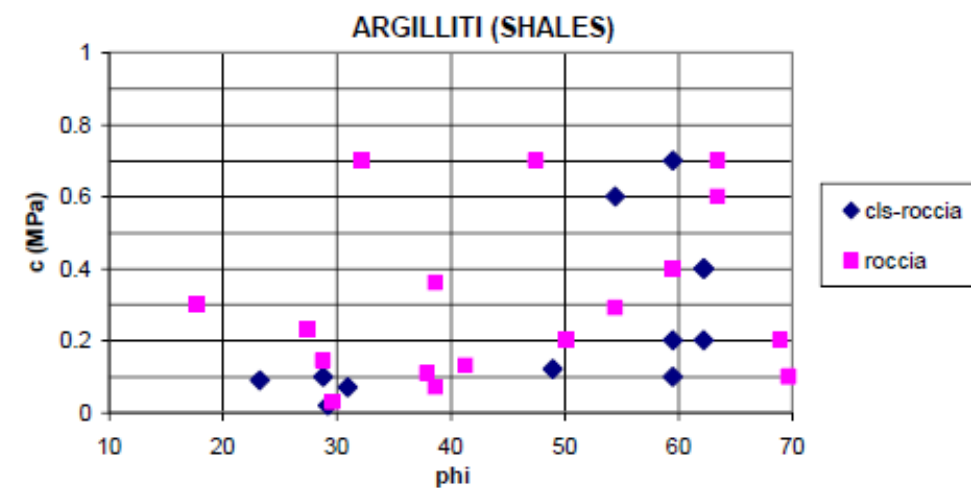
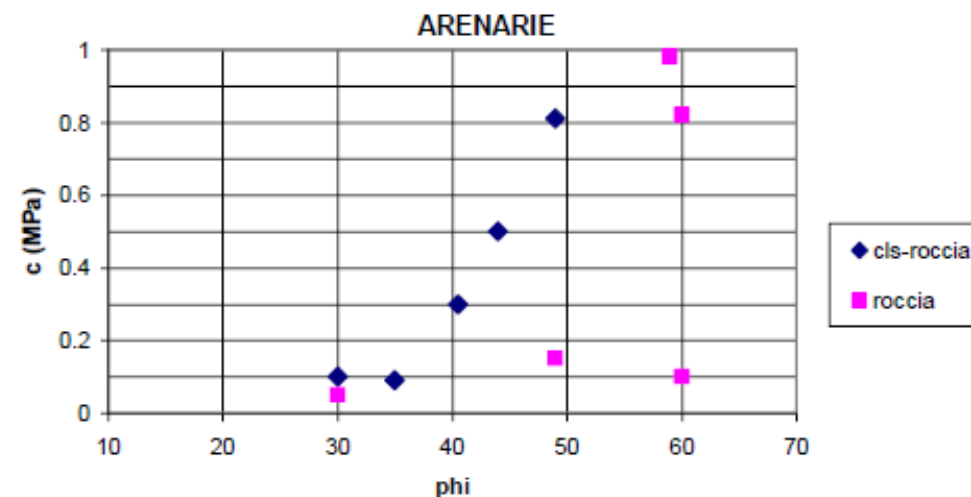
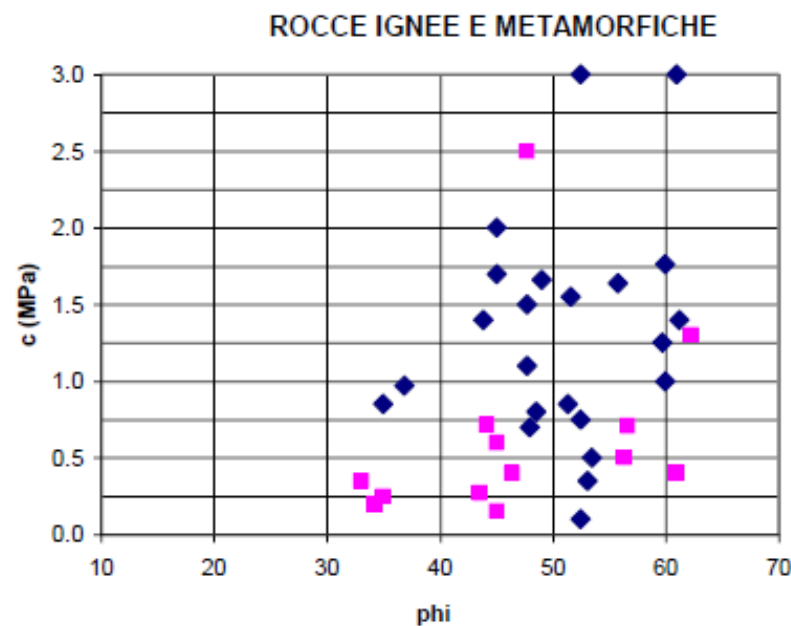
$$c = 0 \div 0.2 \text{ MPa}$$



1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

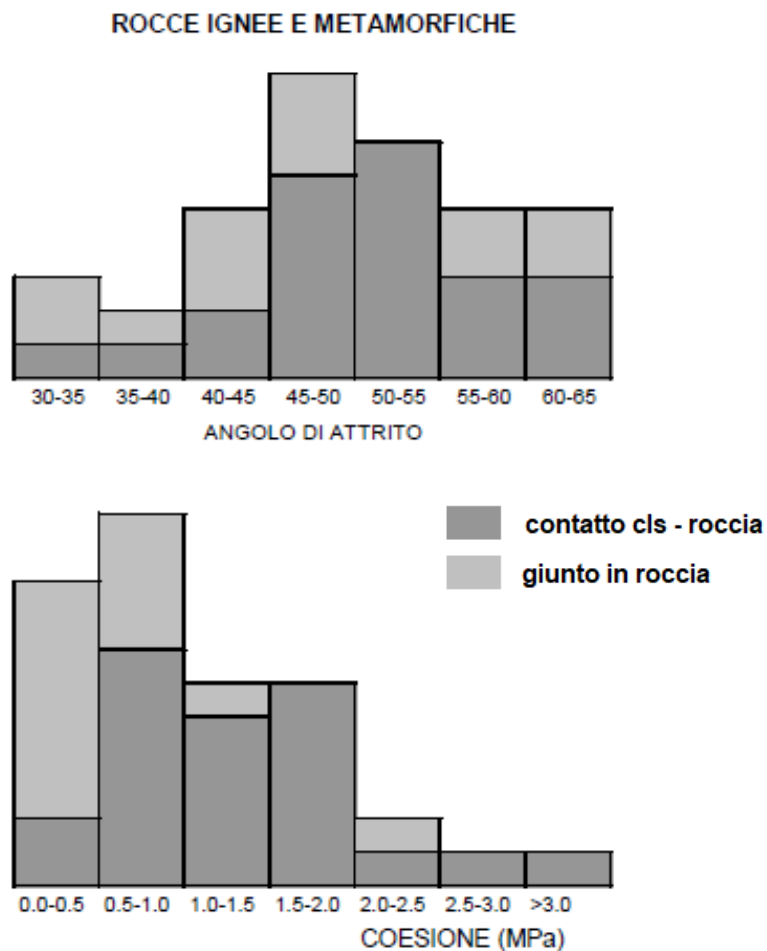
Resistenza a taglio

PROVE DI TAGLIO IN SITU (da LINK, 1969, con integrazioni)



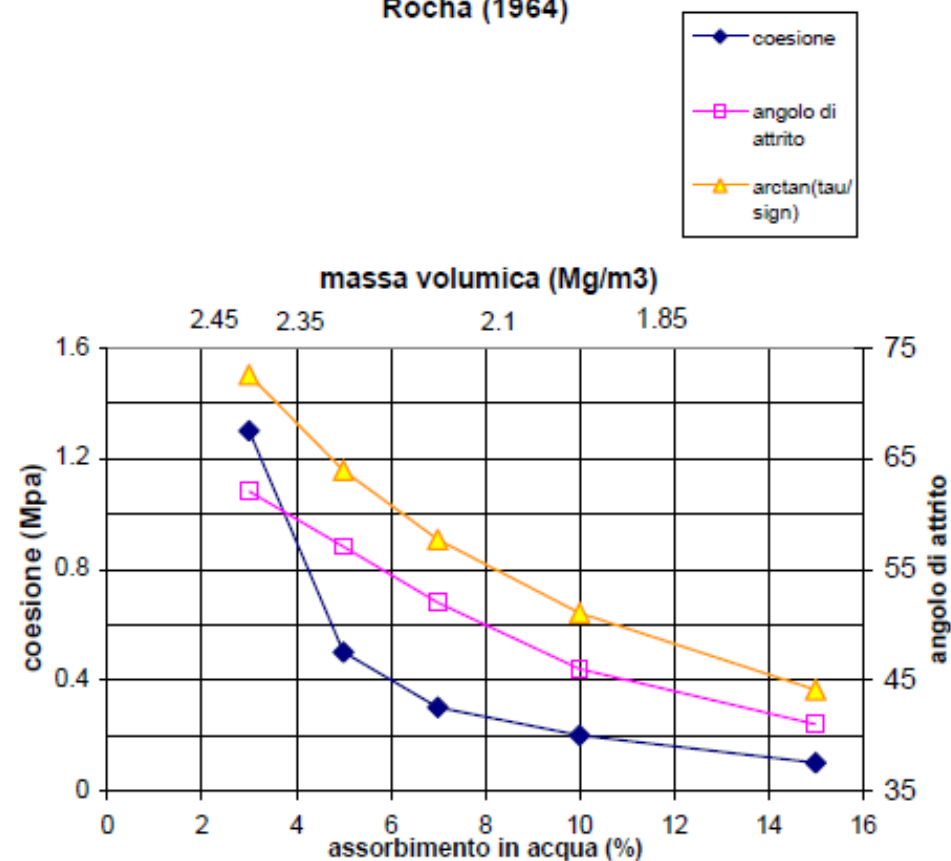
1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

PROVE DI TAGLIO IN SITU (da LINK, 1969, con integrazioni)



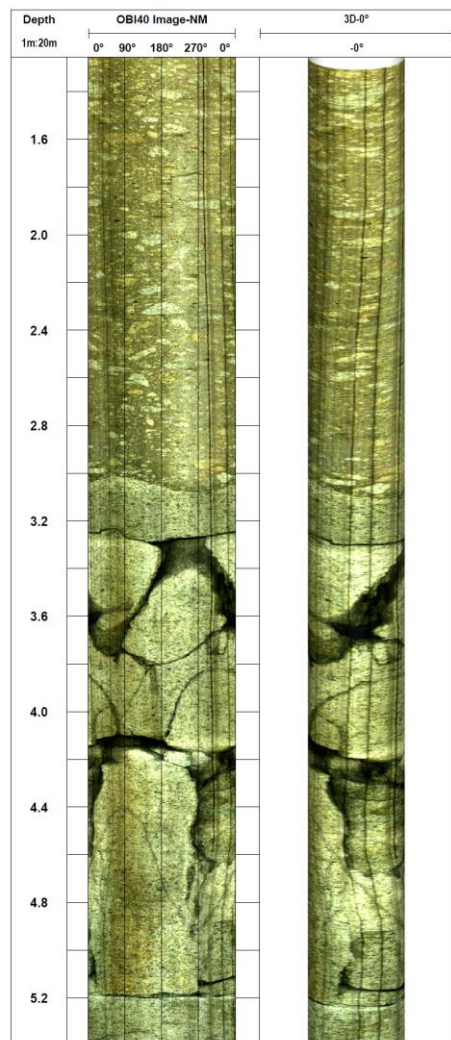
INFLUENZA DELL'ALTERAZIONE
SULLE CARATTERISTICHE DI UN'AMMASSO GRANITICO

Rocha (1964)



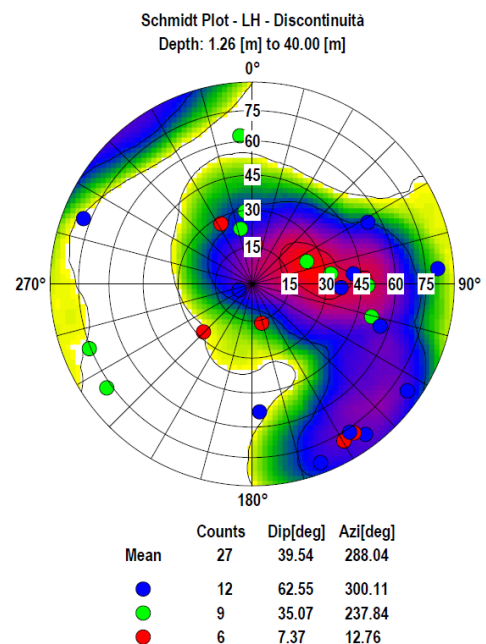
1. Caratterizzazione dell'ammasso di fondazione

Indagini «non invasive» per una diga in esercizio



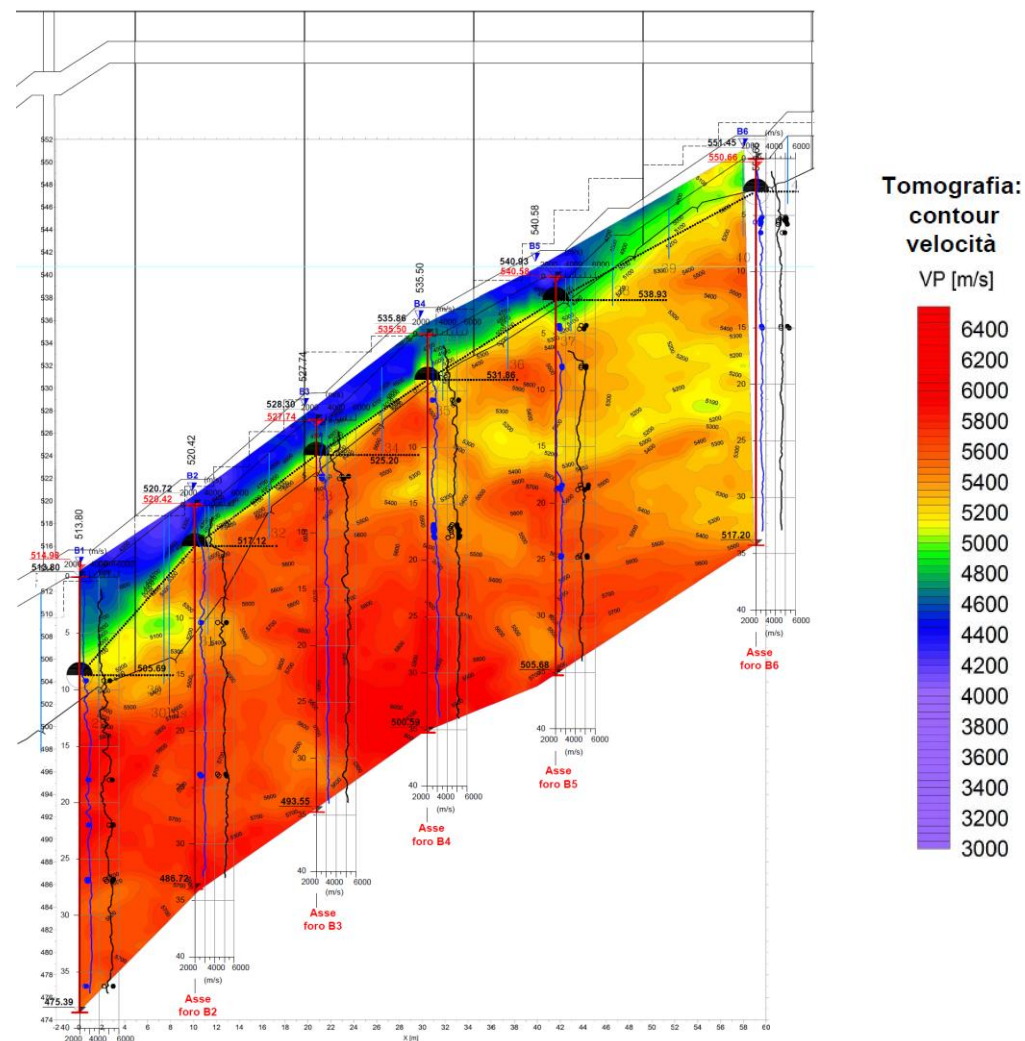
Rilievo televisivo BHTV in foro

Giacitura delle discontinuità



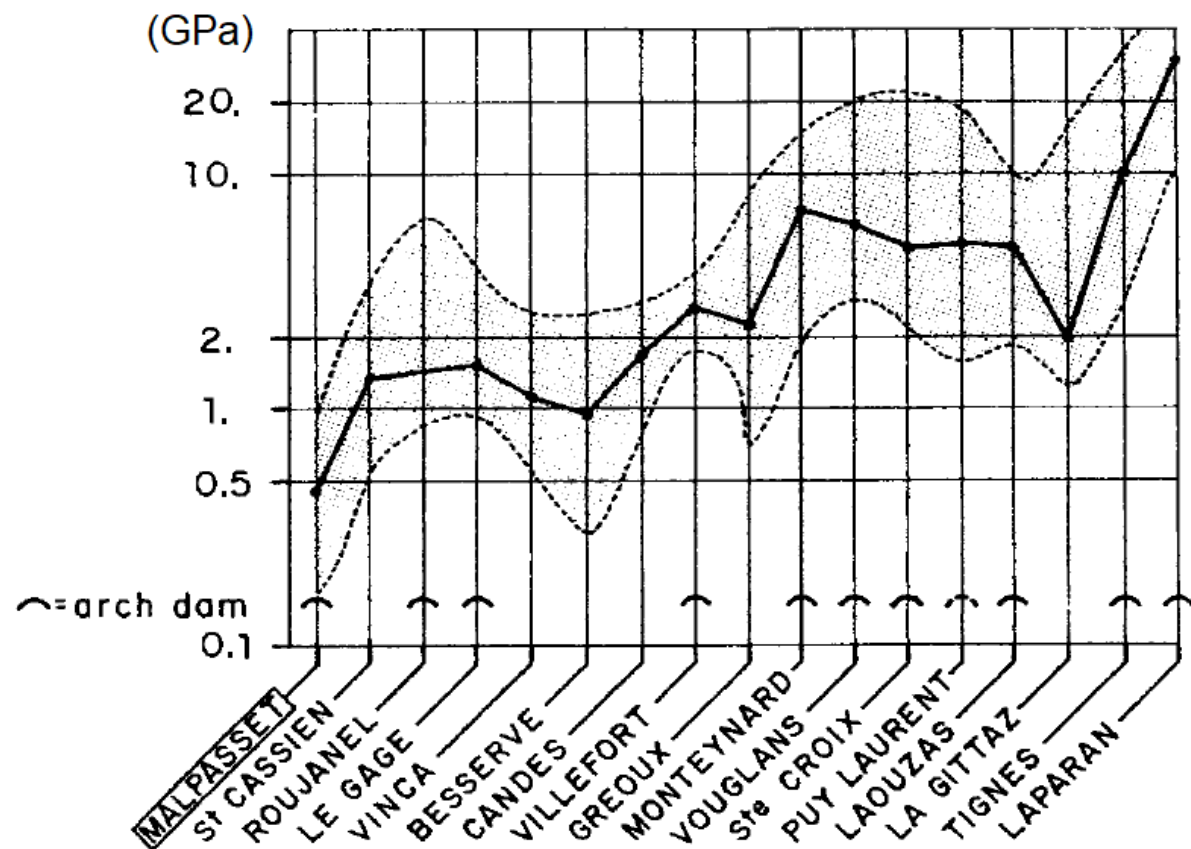
- Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
- Frattura semi-aperta < 5 mm, con riempimento
- Frattura aperta > 5 mm, no riempimento

Tomografia per onde P



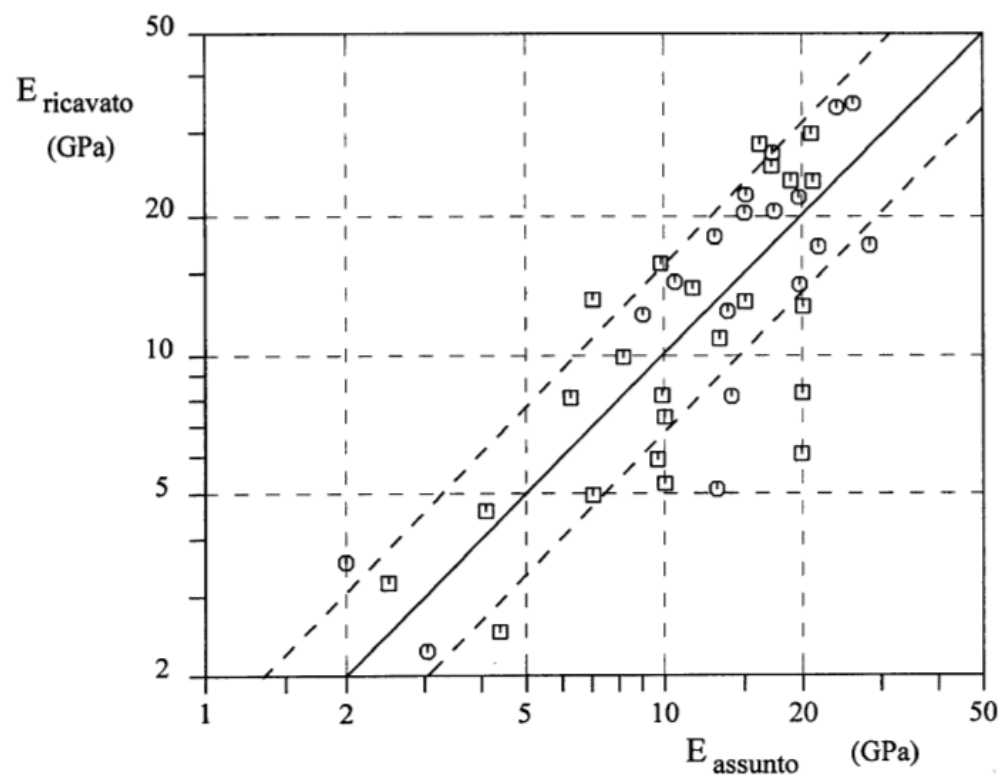
2. Deformabilità

MODULI DI DEFORMAZIONE DELLE FONDAZIONI DI DIGHE IN FRANCIA
(DA PROVE SU PIASTRA IN SITU)
(Post e Bonazzi, 1987)

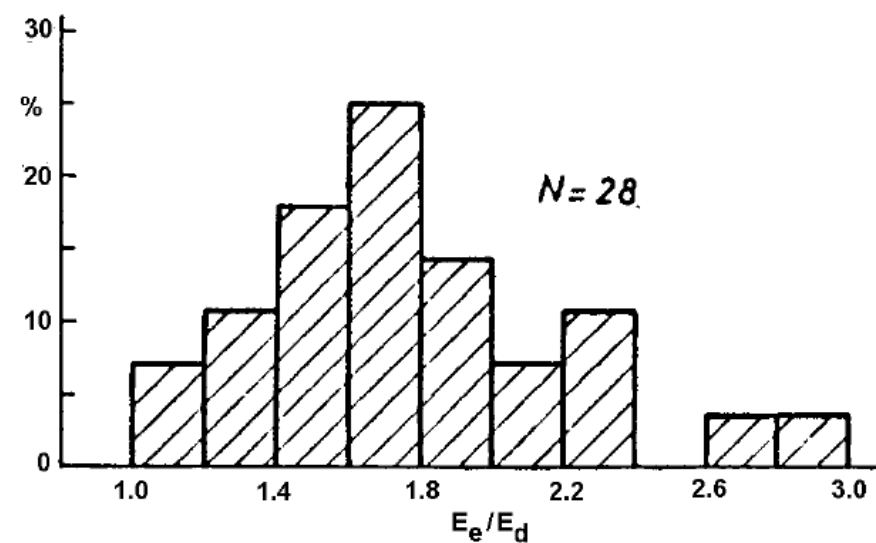


2. Deformabilità

DATI SPERIMENTALI SUI MODULI DI FONDAZIONI DI DIGHE (Ribacchi, 1987)



Valori assunti in progetto e valori ricavati dalle misure di controllo



Rapporti tra i moduli elastici e i moduli di primo carico

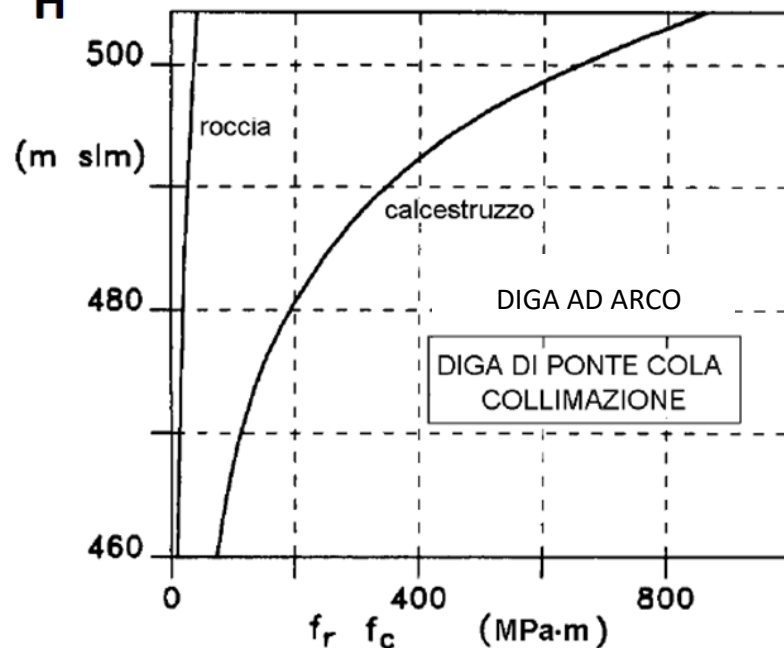
2. Deformabilità

Interpretazione delle misure di monitoraggio spostamenti

FUNZIONI DI INVASO PER MIRE SUL CORONAMENTO
IN DIGHE AD ARCO E DIGHE A GRAVITA'

(Ribacchi, 1987)

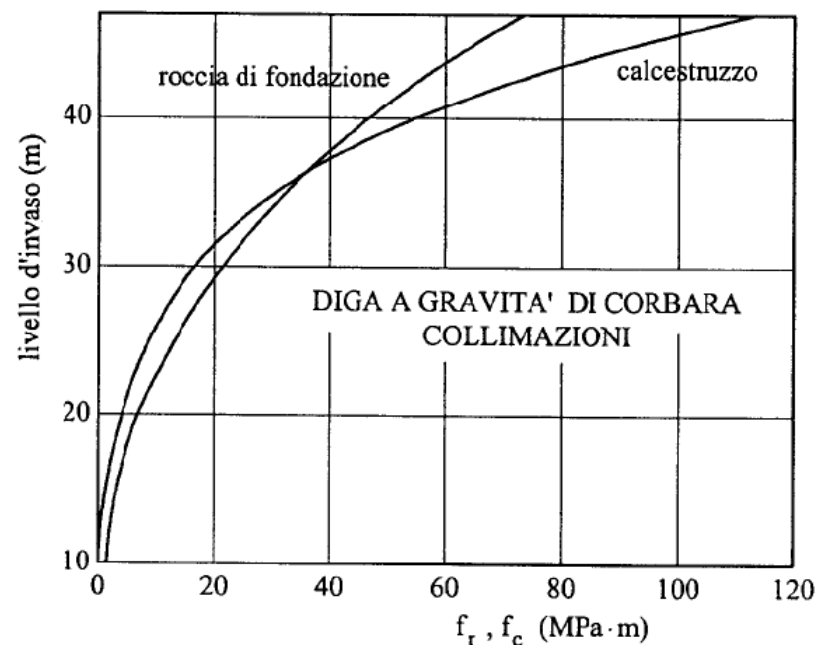
Livello invaso
H



Nell'ipotesi di fondazione elastica l'effetto del livello di invaso sugli spostamenti u_h di punto (o sulle rotazioni) può essere rappresentato in generale dalla relazione:

$$u_h = \frac{1}{E_c} f_c(H, \frac{E_c}{E_r}) + \frac{1}{E_r} f_r(H, \frac{E_c}{E_r})$$

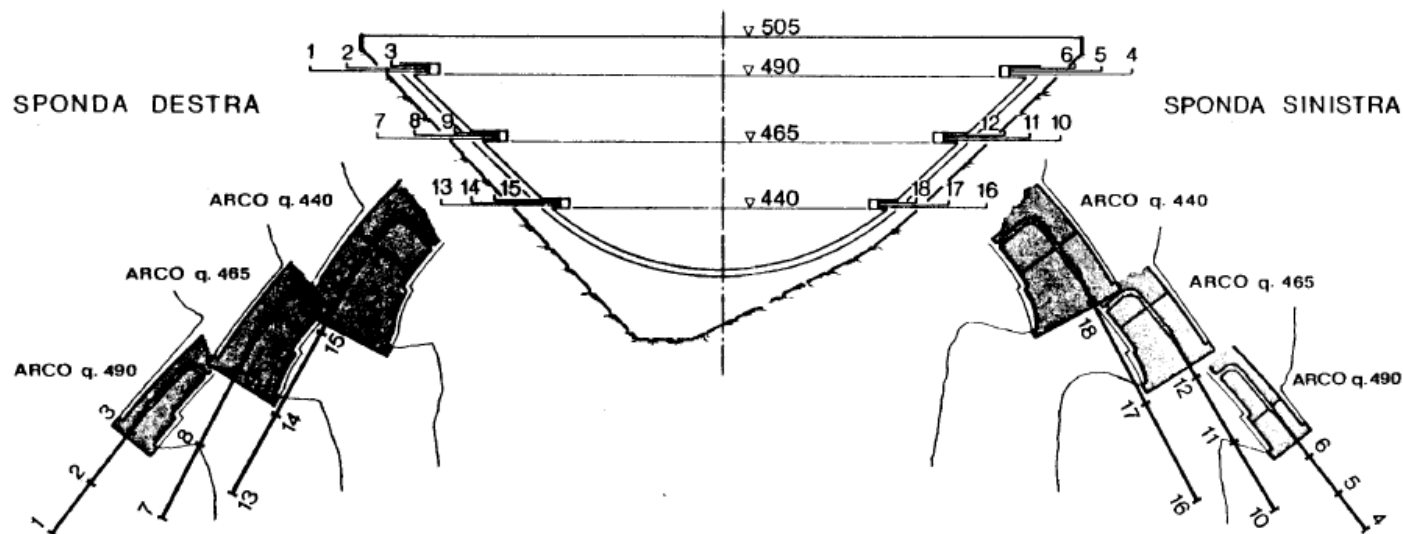
trascurabile



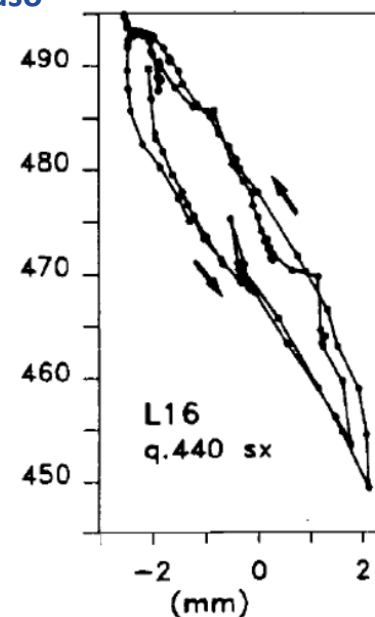
2. Deformabilità

Curve carico – spostamento: cicli di «isteresi»

DIGA DI PONTE COLA
UBICAZIONE ESTENSIMETRI E TIPICI CICLI INVASO SPOSTAMENTI
(Bonaldi et al., 1980)

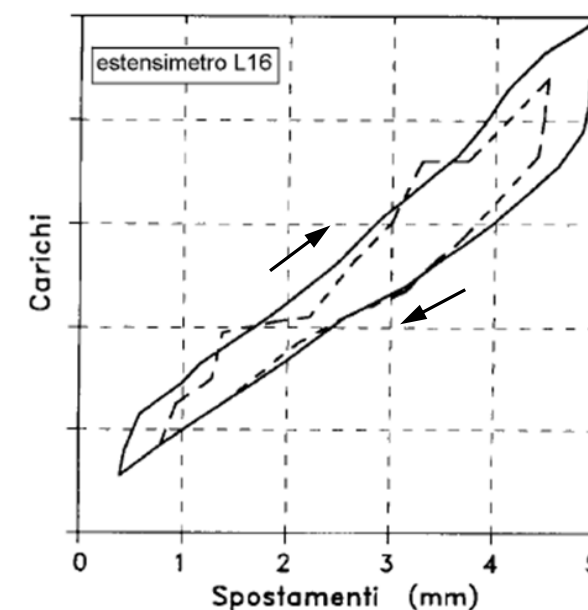


Livello
invaso



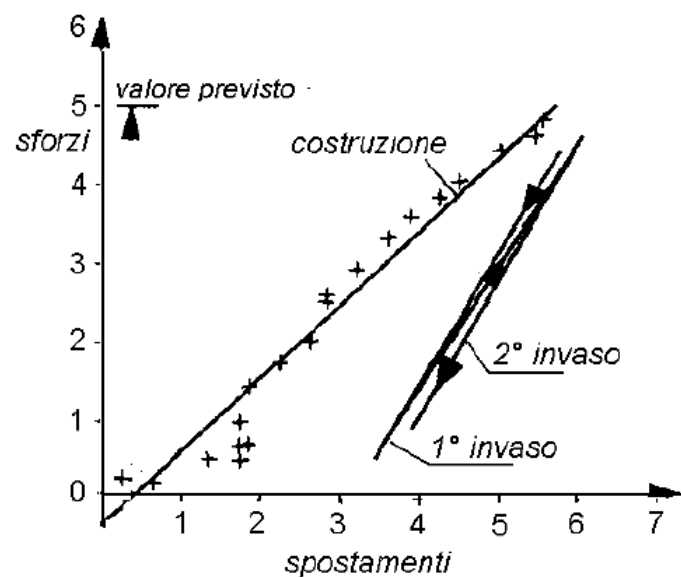
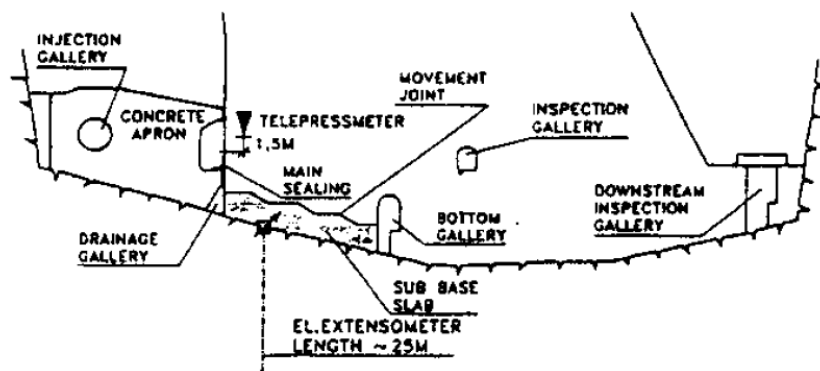
Spostamento

effettivo comportamento isteretico
dell'ammasso roccioso

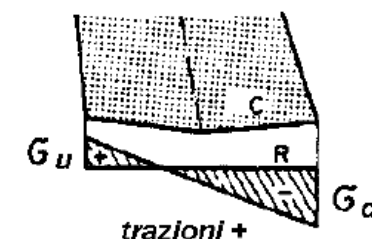
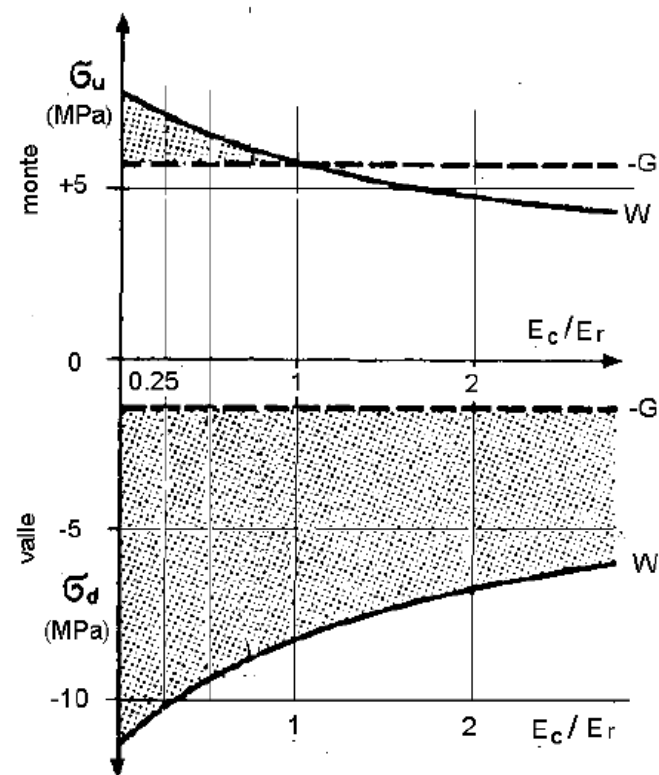


2. Deformabilità

DEFORMAZIONI DELLA ROCCIA PER EFFETTO DEL PESO DELLA DIGA E DEL CARICO IDROSTATICO ALLA DIGA DI ZILLERGRUNDL



INFLUENZA DEL MODULO DELLA ROCCIA SUGLI SFORZI VERTICALI AL PIEDE



E_r MODULO DELLA ROCCIA
 E_c MODULO DEL CLS

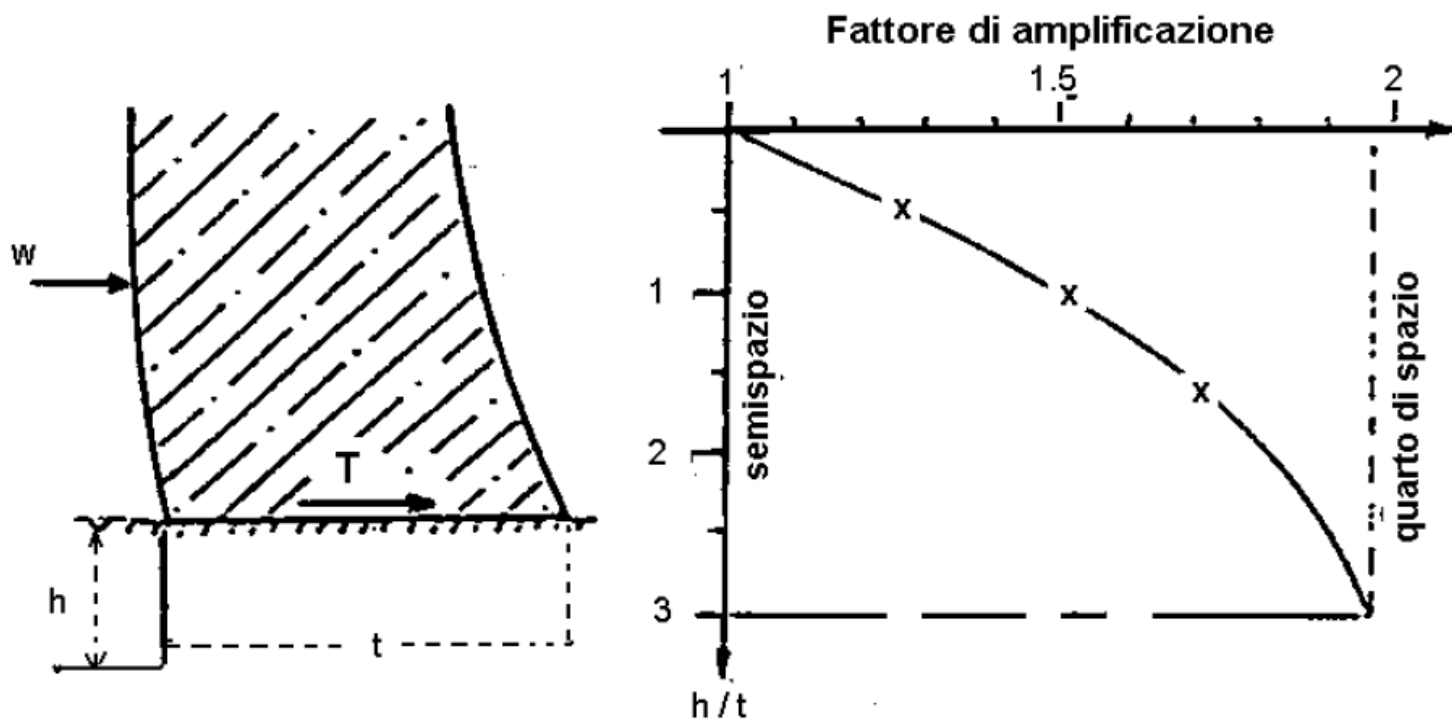
CASI DI CARICO
 G PESO DIGA
 W CARICO INVASO

(Widmann, 1997)

2. Deformabilità

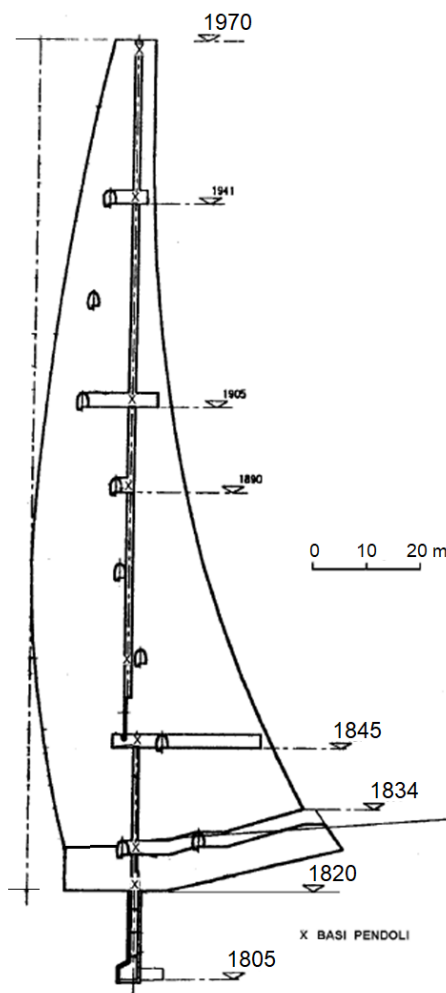
AMPLIFICAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI DELLA BASE PER EFFETTO DI UNA FRATTURA A MONTE

(Widmann, 1998)

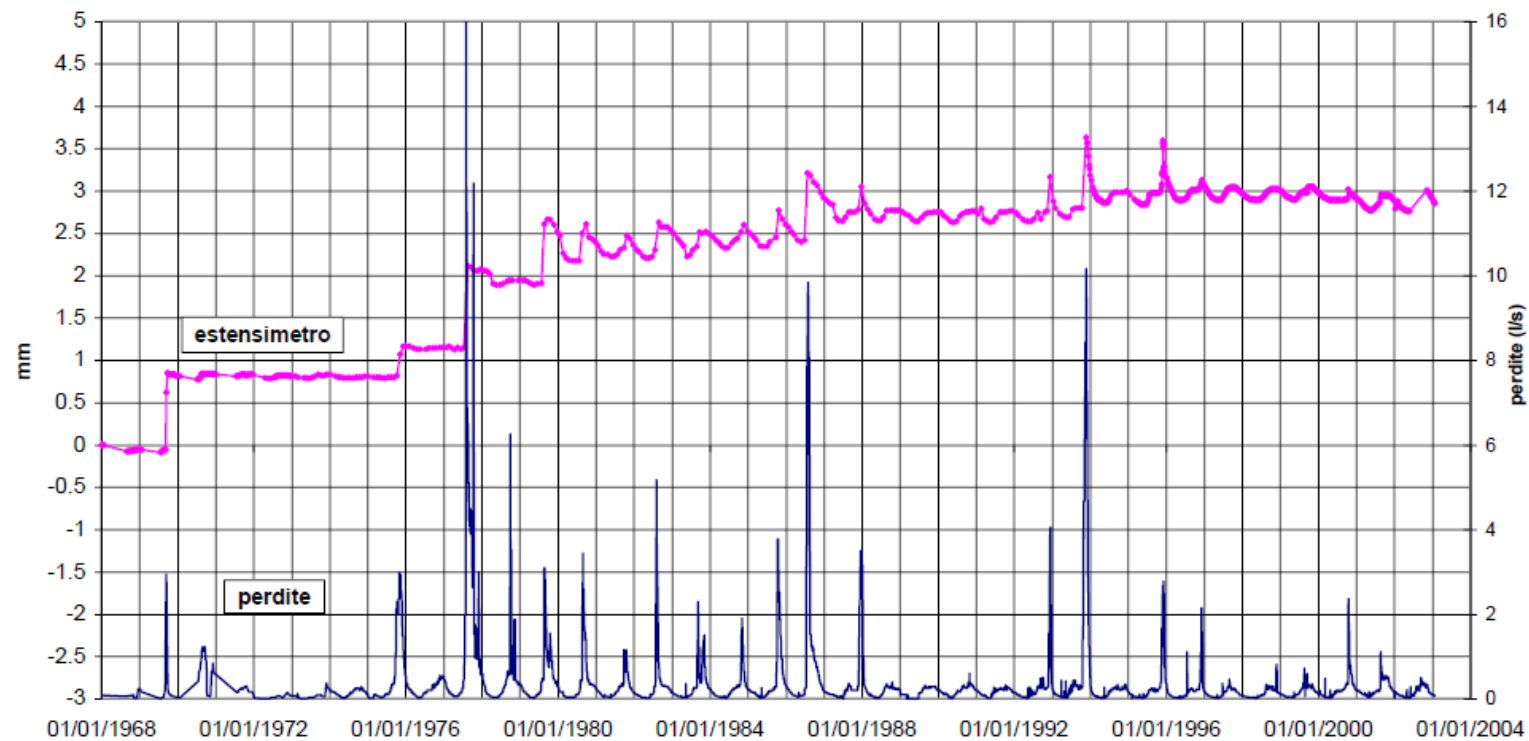


2. Deformabilità

Diga di Place Moulin

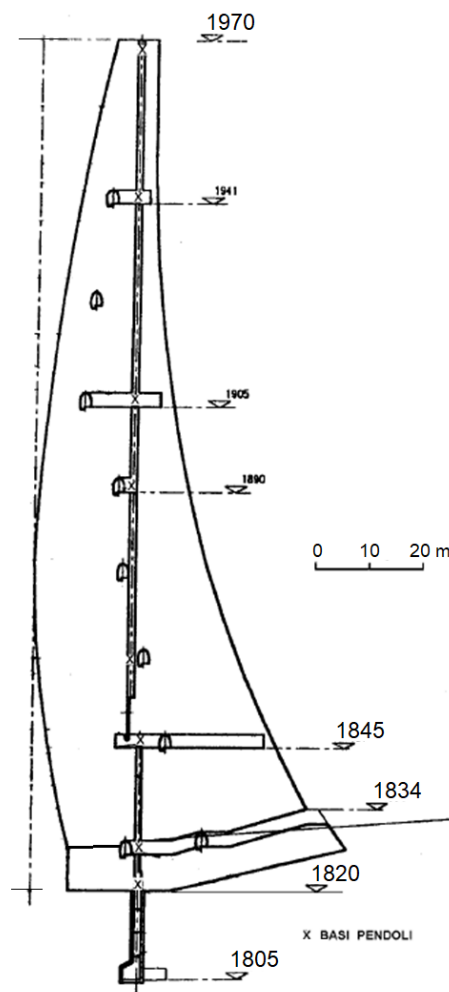


SPOSTAMENTI MISURATI CON ESTENSIMETRO CORTO
PRESSO IL PARAMENTO DIMONTE



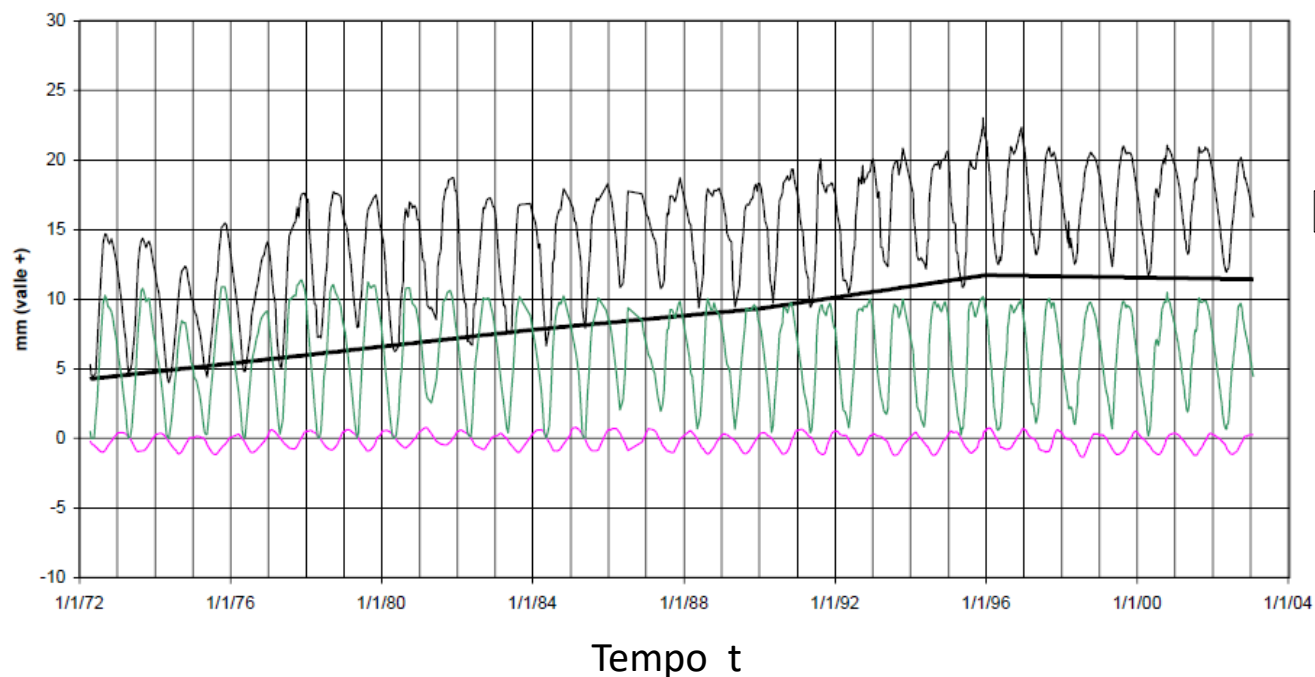
2. Deformabilità

Interpretazione delle misure con «modelli statistici» di regressione multipla



DIGA DI PLACE MOULIN

SPOSTAMENTI MONTE-VALLE RILEVATI CON IL PENDOLO ROVESCIO



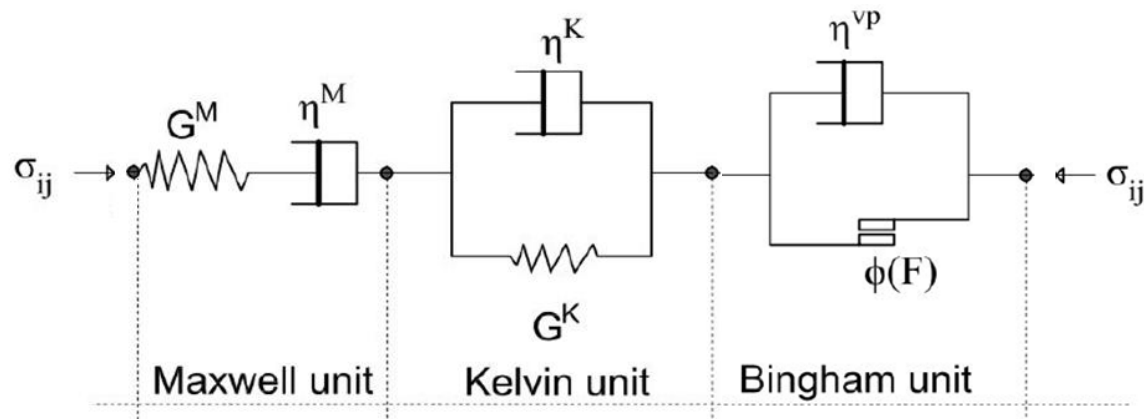
$$u = f_i(H) + f_T(T) + f_{d\text{irr}}(t)$$

- misure $f_d = c \cdot t$
- deriva (EFFETTO DERIVA)
- idrostatica $f_i = m_1 \cdot H + m_2 \cdot H^2 + m_3 \cdot H^3$ (EFFETTO INVASO)
- termica $f_T = a_1 \cdot \sin 2\pi \cdot t + a_2 \cdot \cos 2\pi \cdot t + a_3 \cdot \sin 4\pi \cdot t + a_4 \cdot \cos 4\pi \cdot t$ (EFFETTO TEMPERATURA)

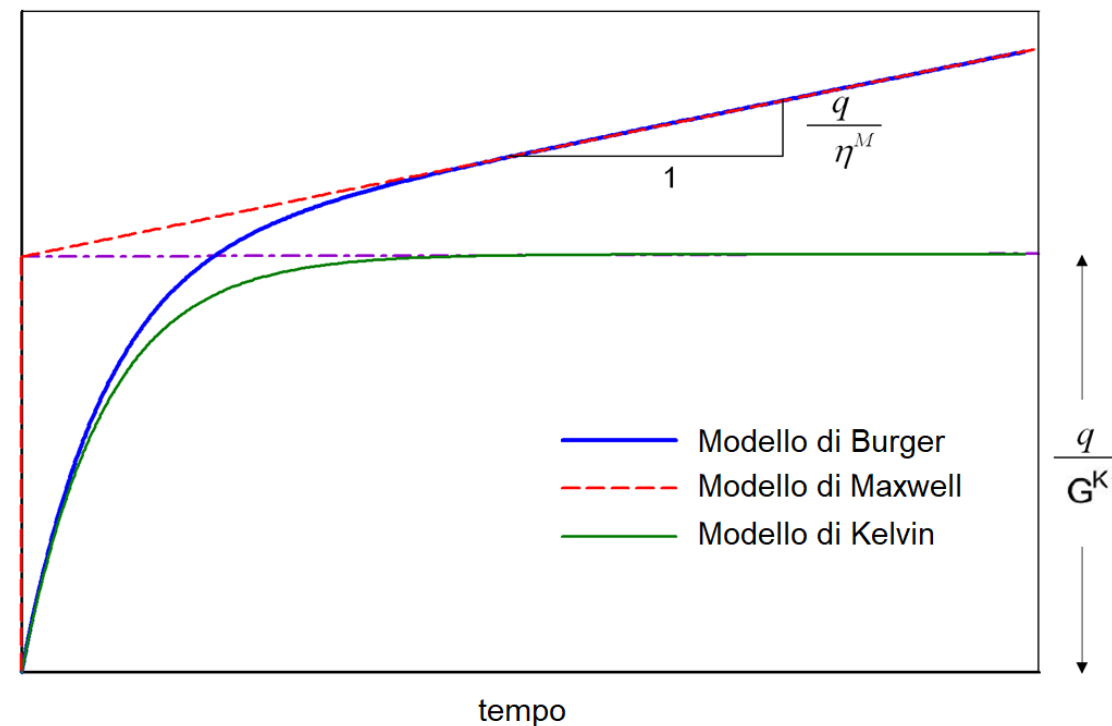
Deformazioni dipendenti dal tempo

Effetto deriva ($f_{d\text{ irr}}$), modelli di «creep»

- Modelli lineari visco-elastici
- Modelli non-lineari visco-elasto-plastici



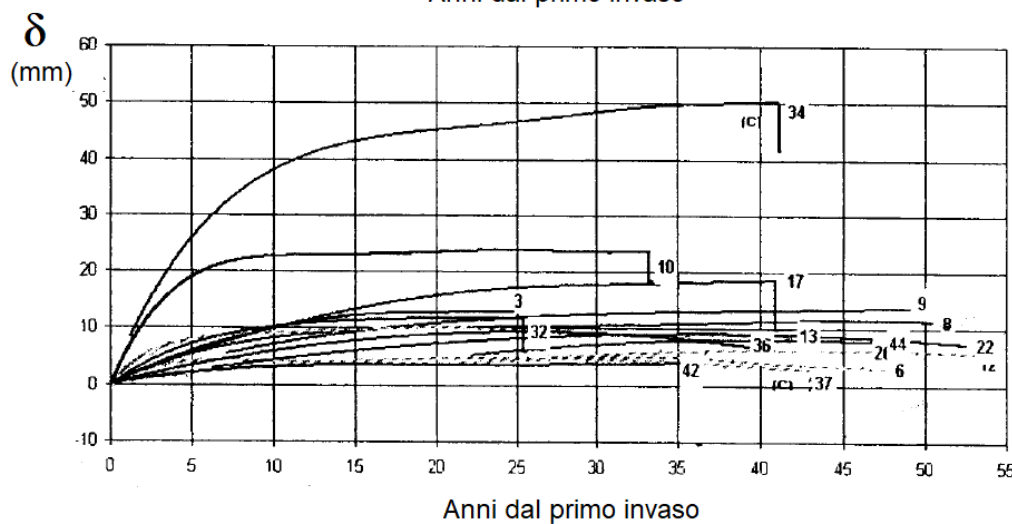
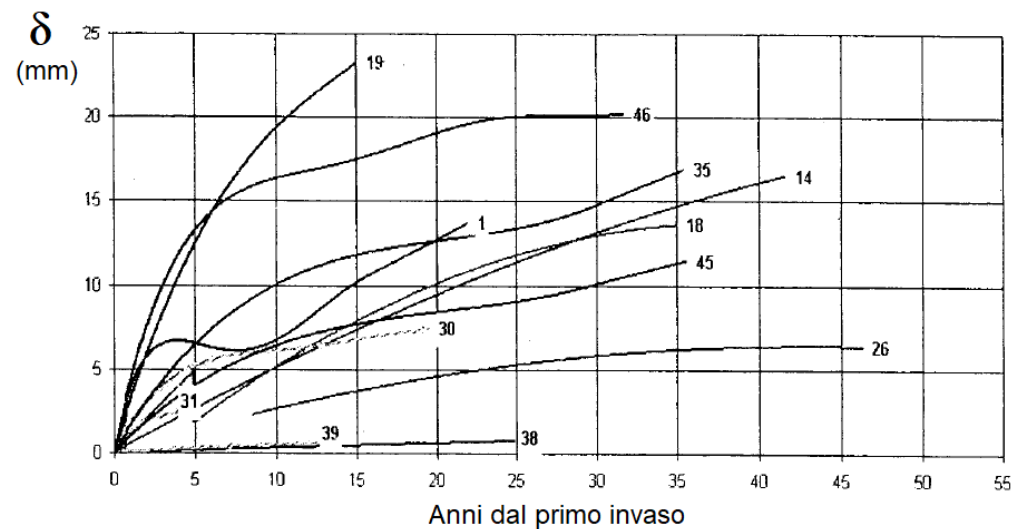
Deformazione
(a carico costante)



2. Deformabilità

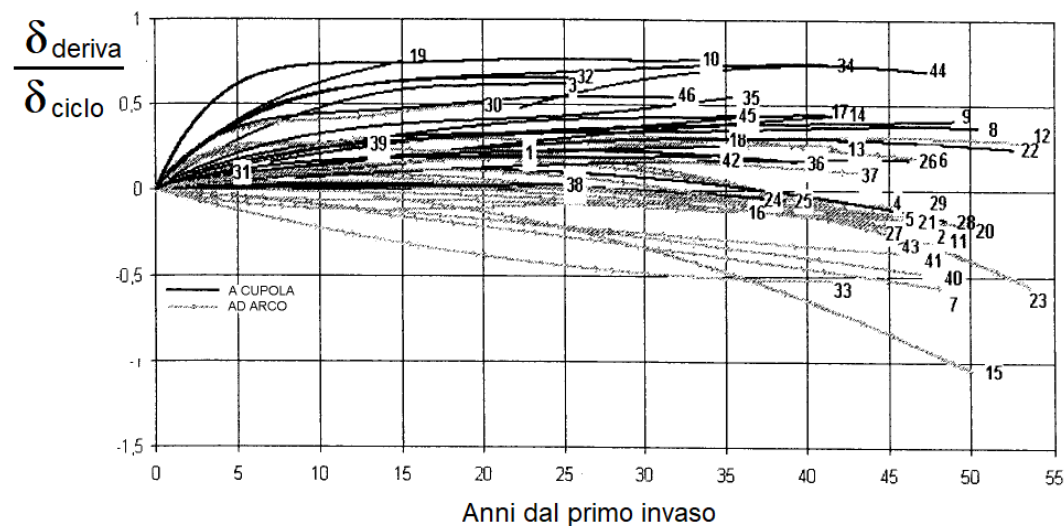
FENOMENI DI DERIVA VERSO VALLE ANCORA IN ATTO O STABILIZZATI

(Fabre e Bourdarot, 2003)



ENTITA' DELLA DERIVA RISPETTO ALL'AMPIEZZA DEL CICLO ANNUALE TIPICO

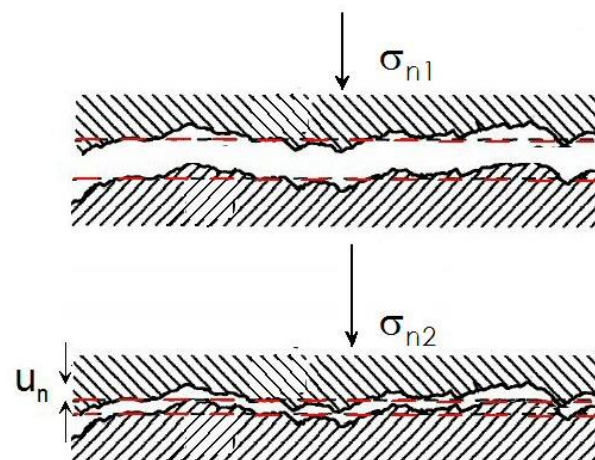
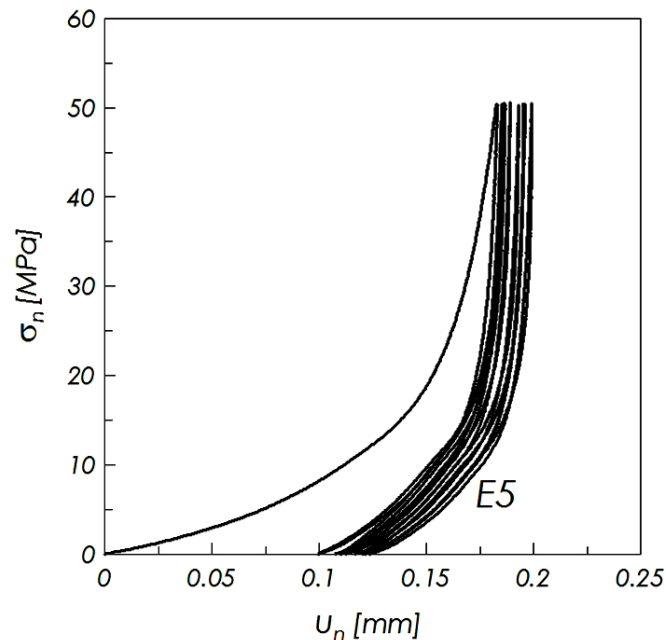
(Fabre e Bourdarot, 2003)



3. Permeabilità

Diga di Place Moulin

Caratterizzazione delle **discontinuità** presenti nella roccia di fondazione dal punto di vista della **rigidezza normale**



Caratteristiche di **trasmissività idraulica** delle discontinuità

flusso apertura

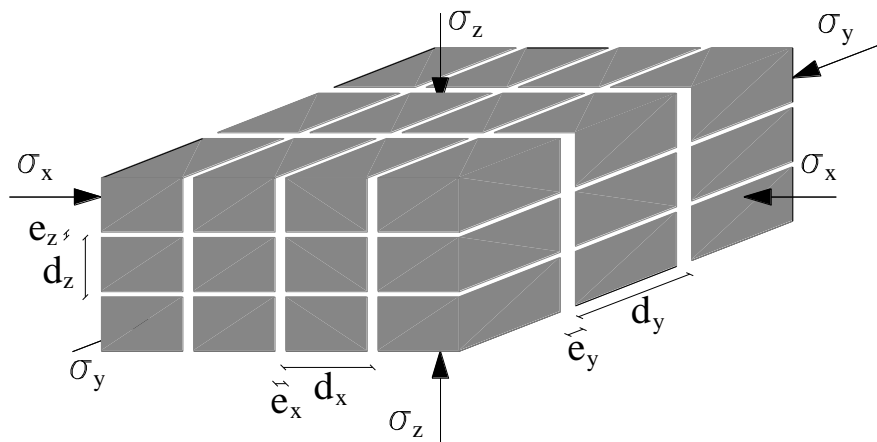
$$\vec{q} = - \frac{\gamma_w}{12 \cdot \mu_w} a_h^3 \text{ grad } H$$

$$a_h = a_0 + u_n$$

3. Permeabilità

Caratteristiche di permeabilità nel modello di calcolo

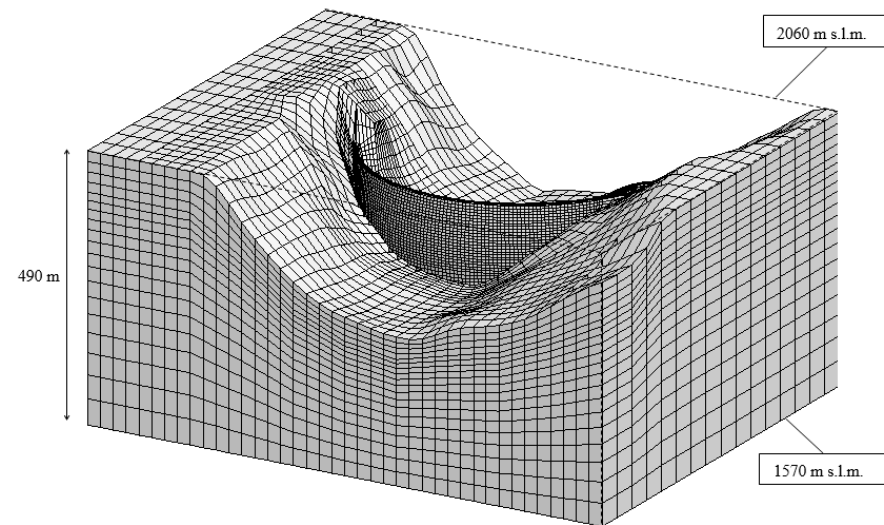
		Terreno	Schermo
Permeabilità iniziale isotropa	k_0	10^{-7} m/s	10^{-8} m/s
Spaziatura delle fratture	d	0.5, 1.5 m	0.5, 1.5 m



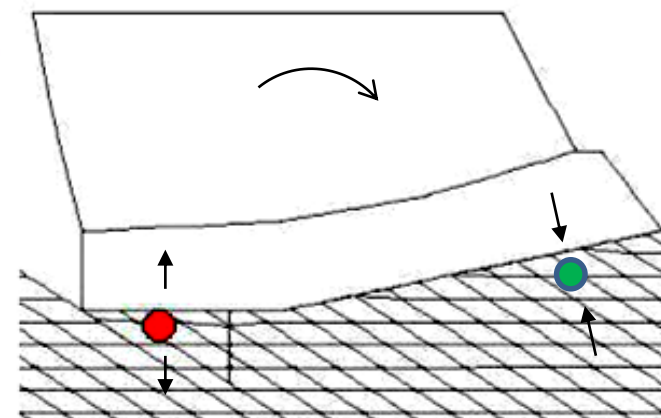
$$k_1 = \frac{1}{12} \cdot \frac{\gamma_w \cdot \zeta}{\mu_w \cdot d} \cdot \left[(e_{02} + \Delta e_2)^3 + (e_{03} + \Delta e_3)^3 \right]$$

$$\Delta e_i = d \cdot \Delta \varepsilon_{ti}^{pl} \quad i = 1, 2, 3$$

Modello 3D Place Moulin



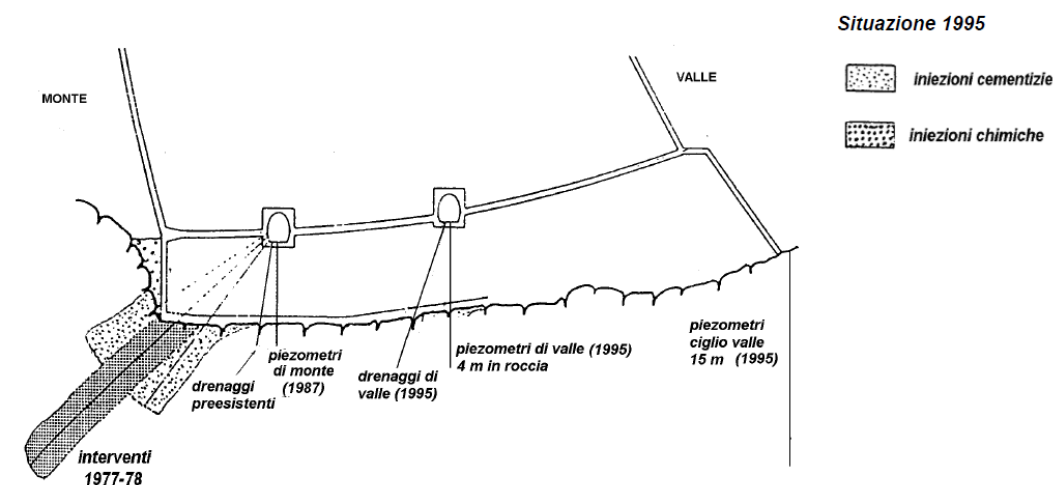
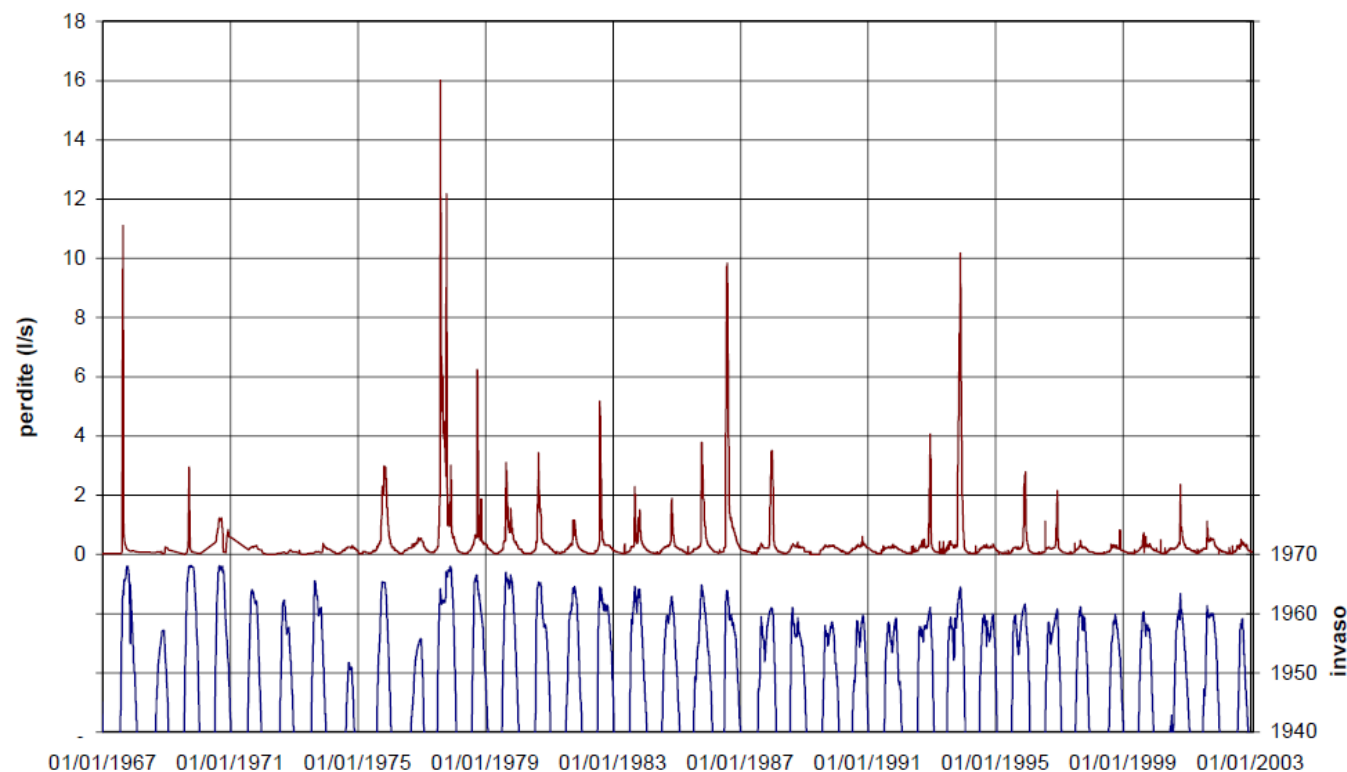
effetto invaso



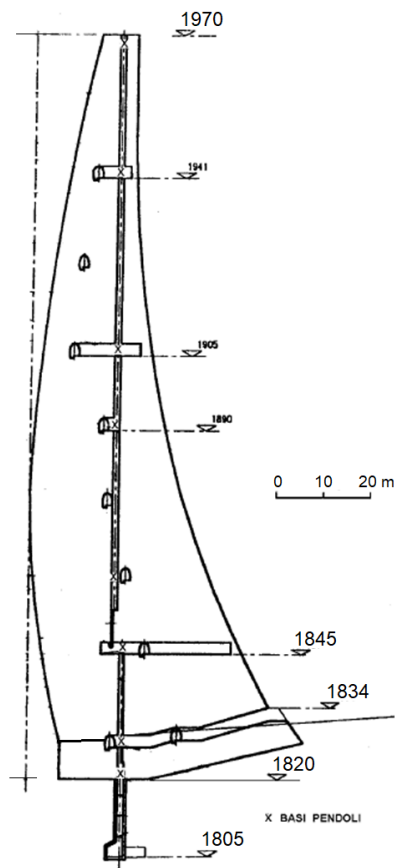
3. Permeabilità

DIGA DI PLACE MOULIN

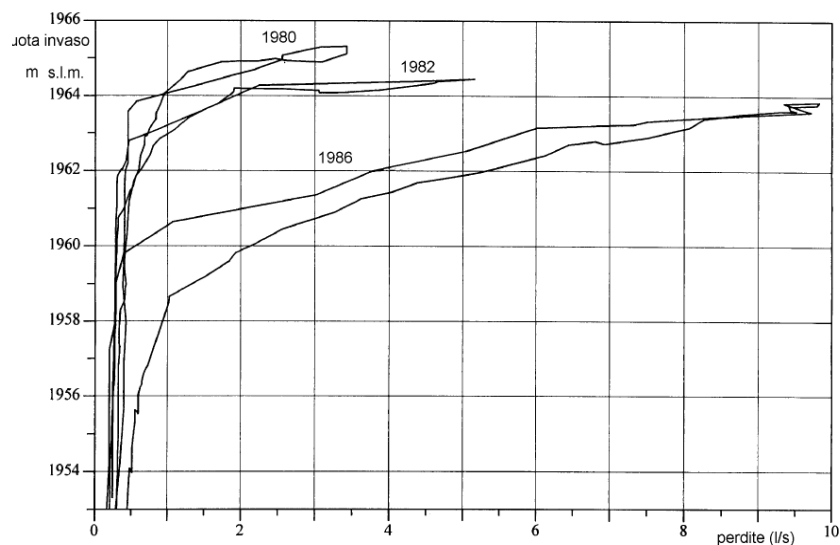
PERDITE IN FUNZIONE DELLE QUOTE D'INVASO



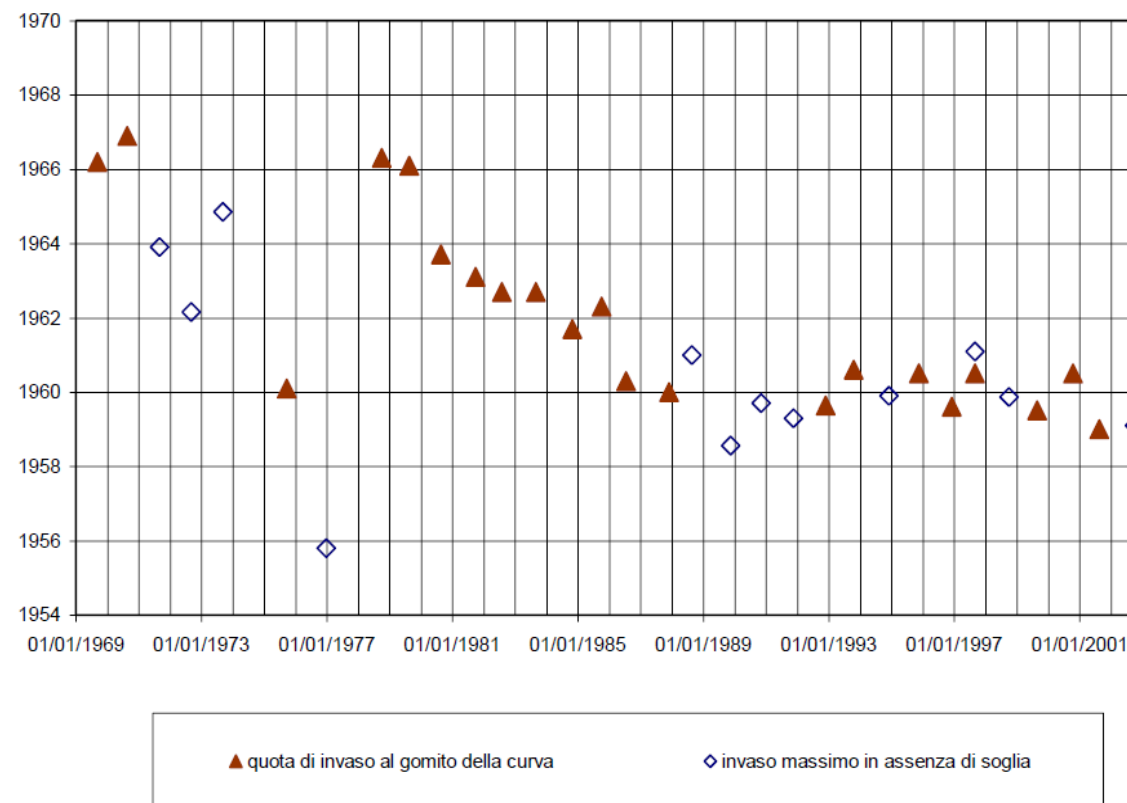
3. Permeabilità



TIPICI ANDAMENTI DELLE PERDITE IN FUNZIONE DELLA QUOTA DI INVASO



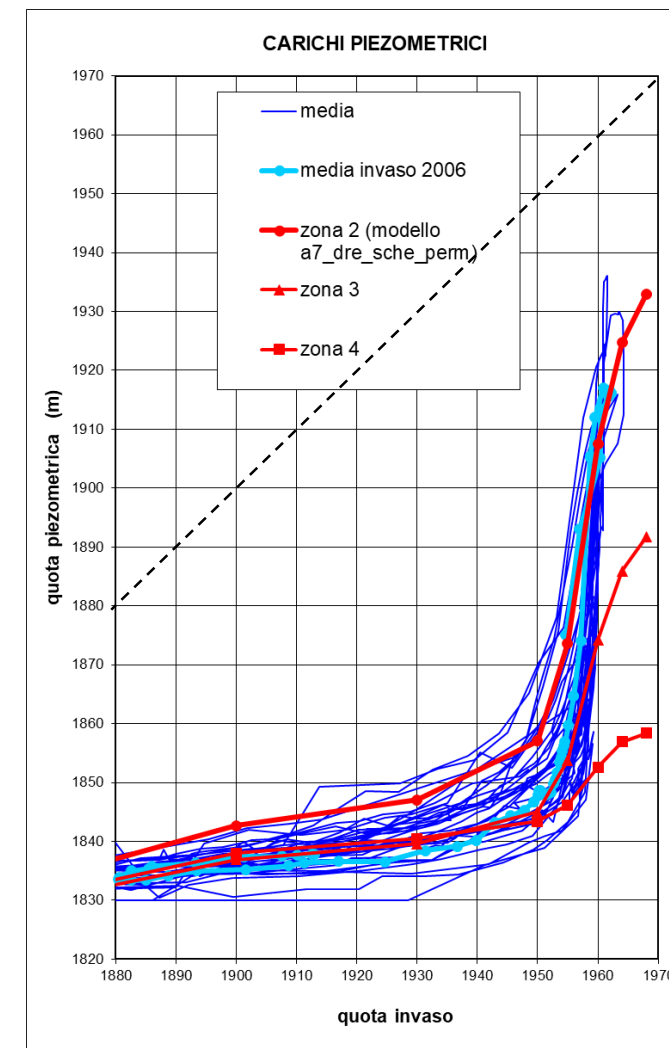
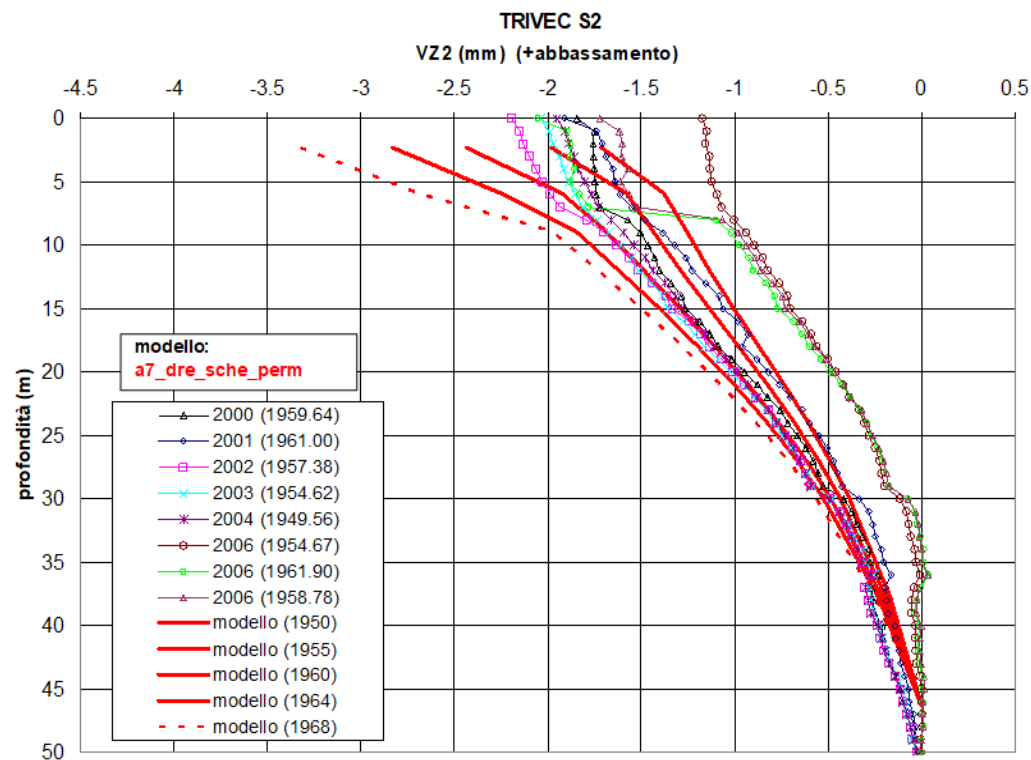
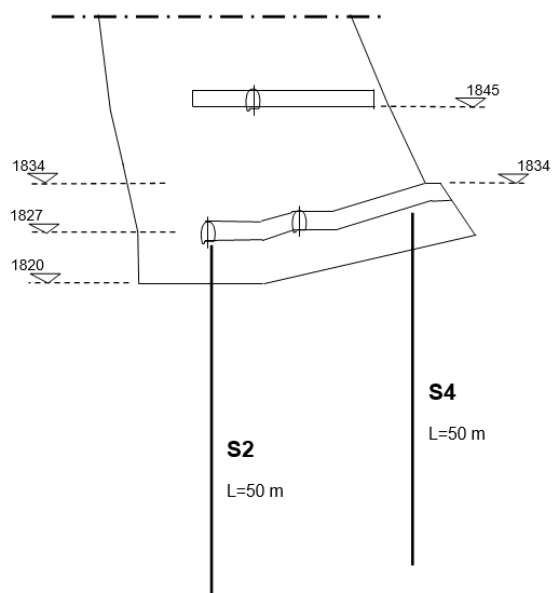
INNESCO DEI FENOMENI DI INCREMENTO DELLE PERDITE



Modello con accoppiamento idro-meccanico

Confronto misure - modello

TRIVEC S2, S4 NELLA SEZIONE CENTRALE

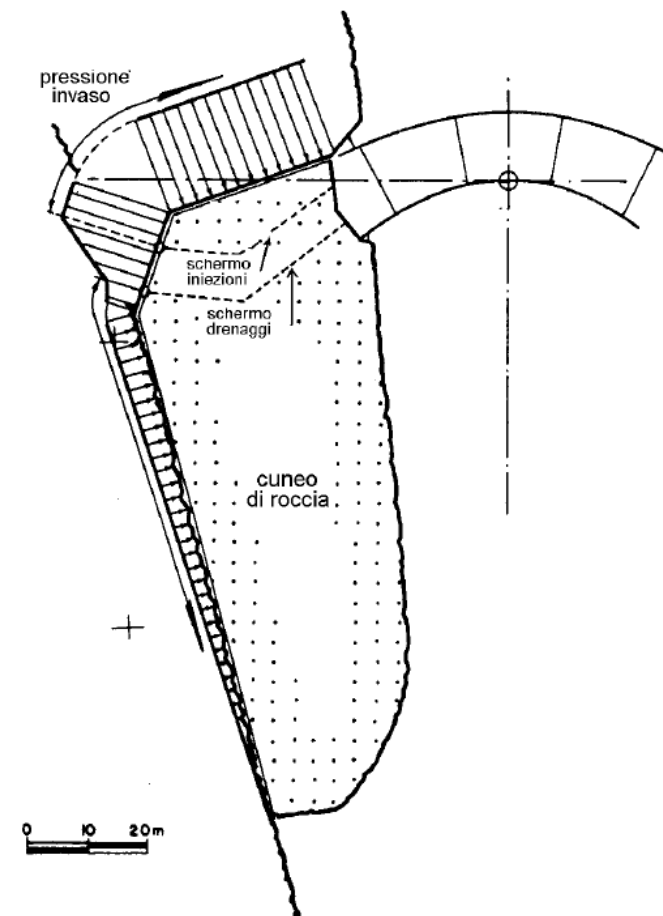
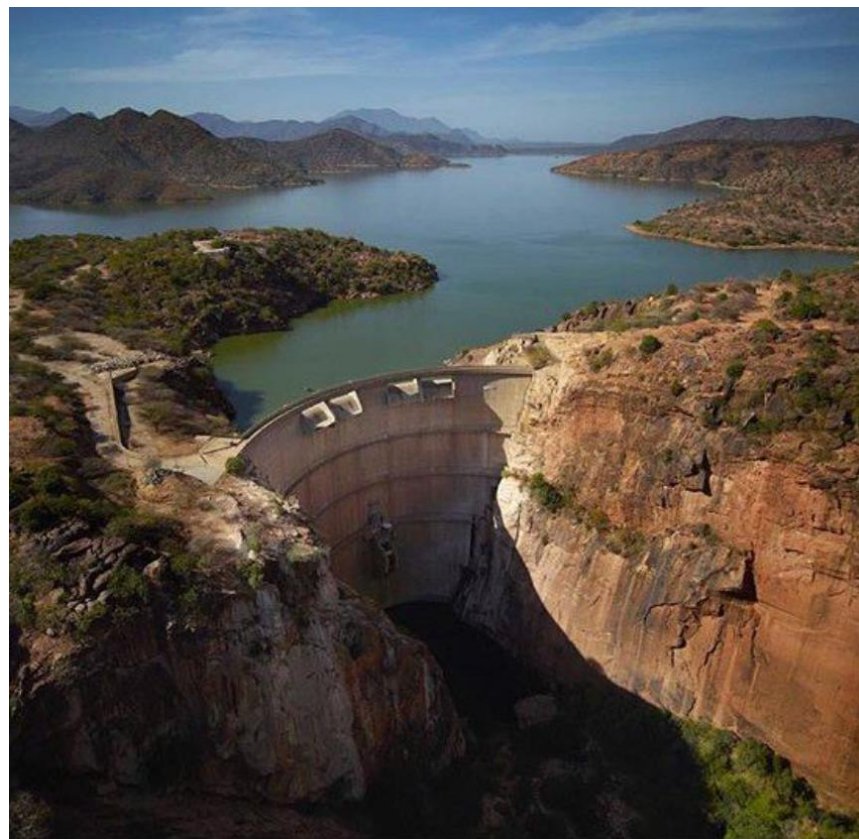
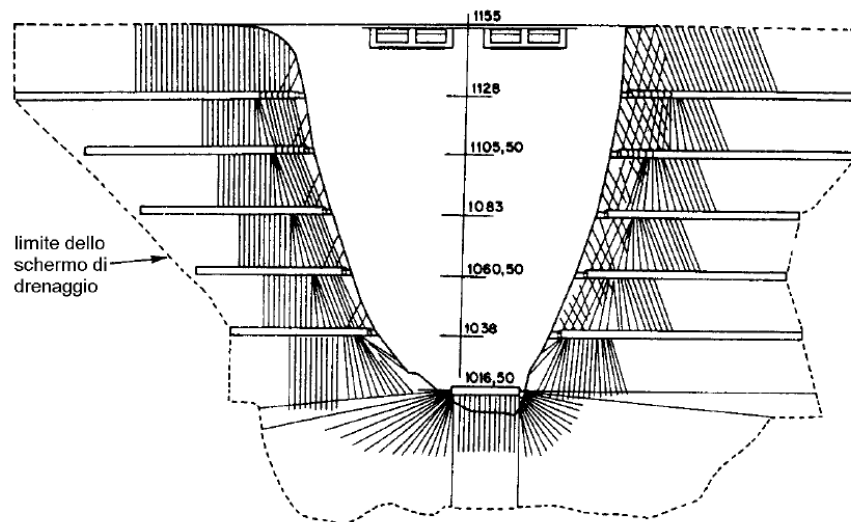


4. Stabilità delle spalle

Scivolamenti piani: cunei 2D

DIGA DI TURKWEL

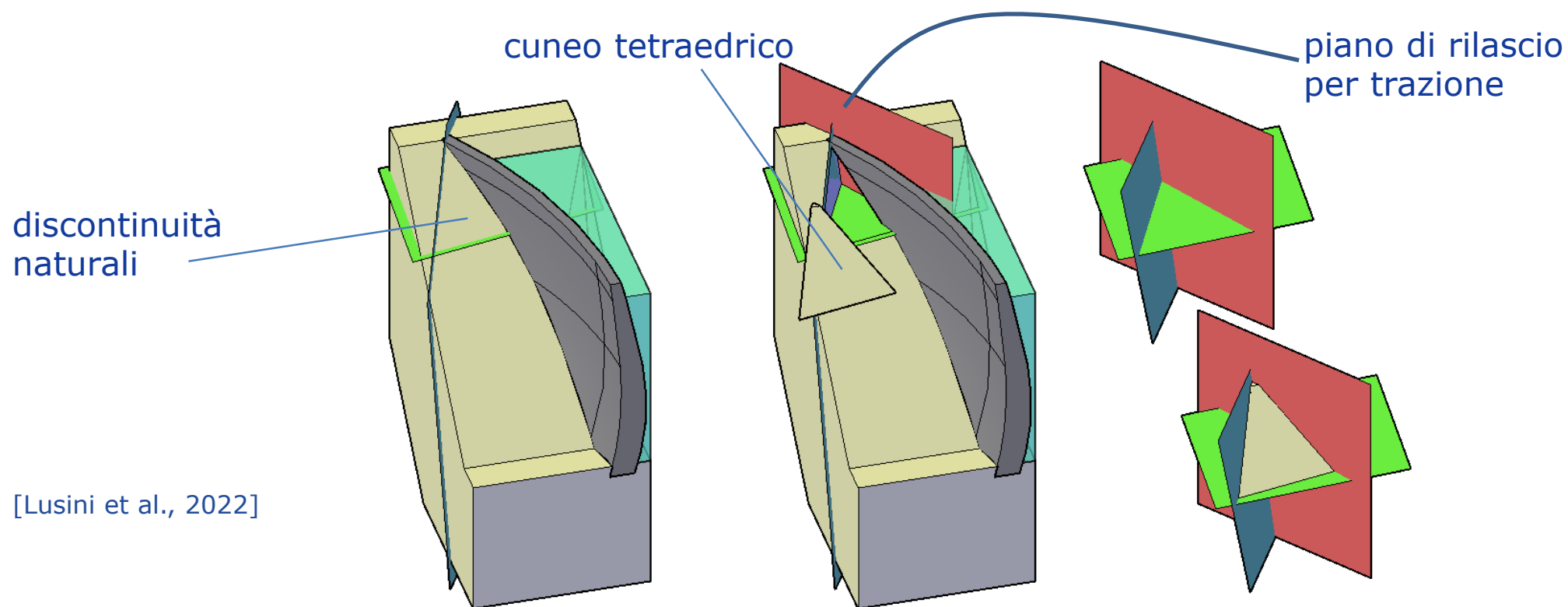
(Cochet et al., 1991)



4. Stabilità delle spalle

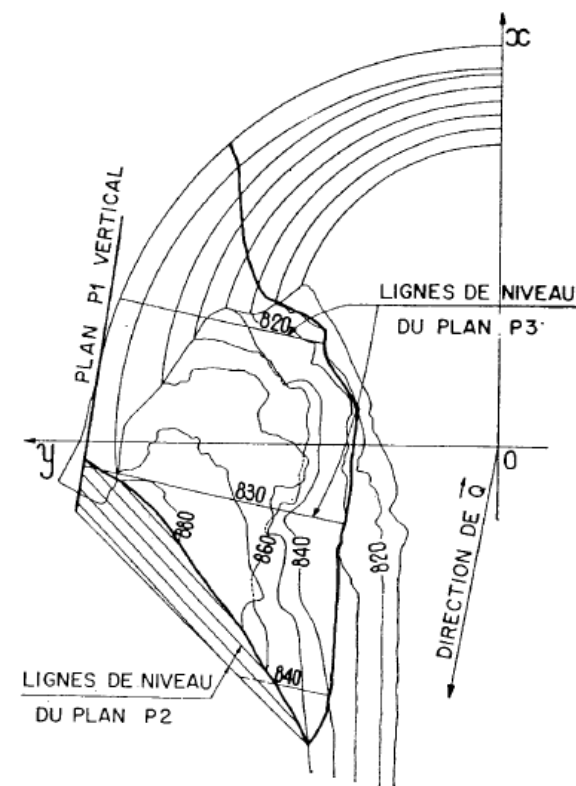
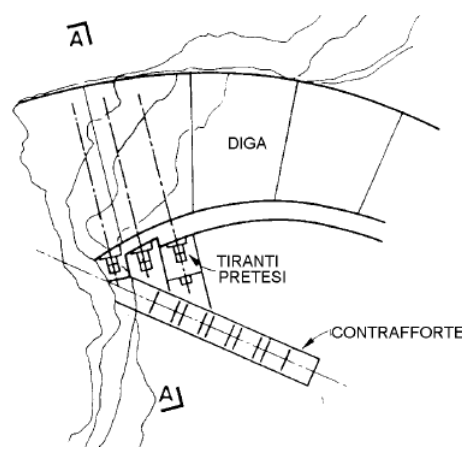
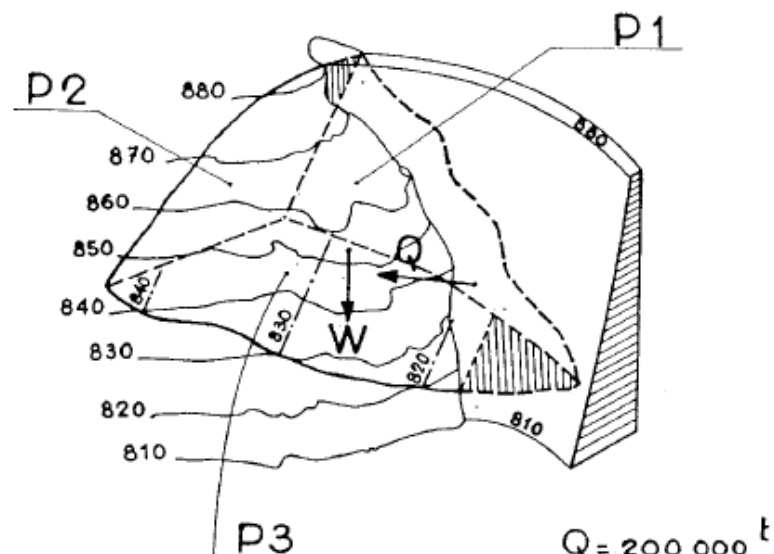
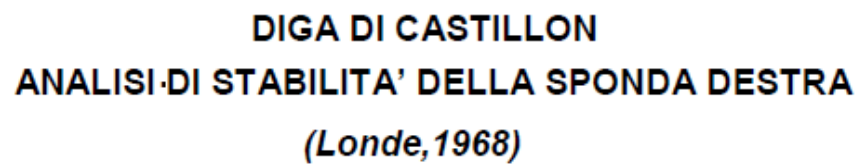
Geometria tipica dei cunei 3D sulle spalle

- cunei tetraedrici con superfici piane
- superfici definite da discontinuità naturali
- possibilità di ipotizzare convenientemente un piano di rilascio per trazione ove non presente





Stabilizzazione con tiranti pretesi

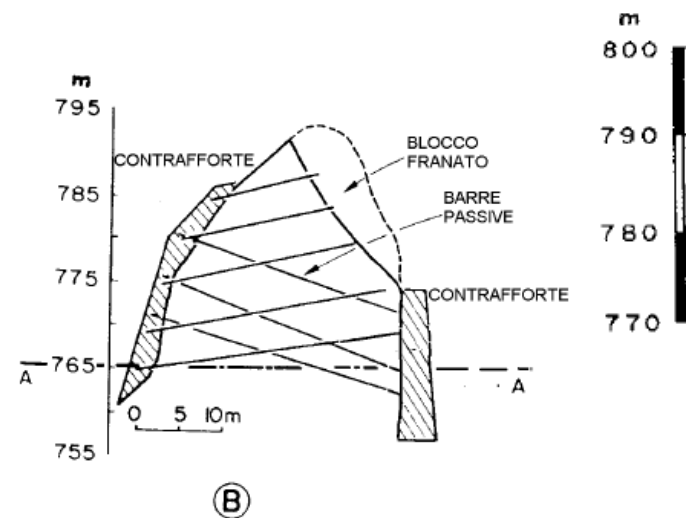
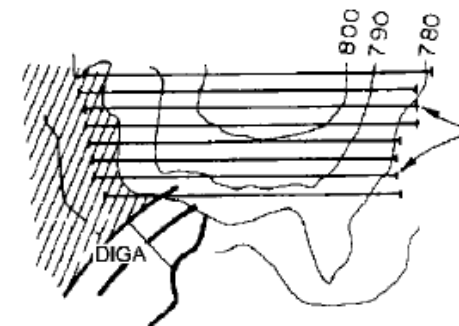
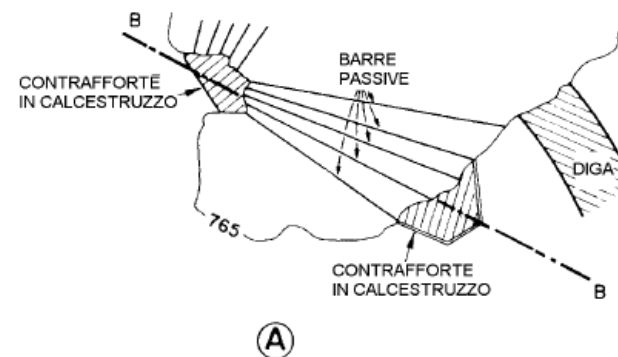


4. Stabilità delle spalle

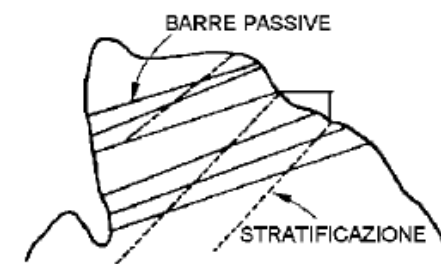
Sistema di rinforzo mediante barre passive



DIGA DI CHAUDANNE
(Londe e Le May, 1993)



Sponda sinistra

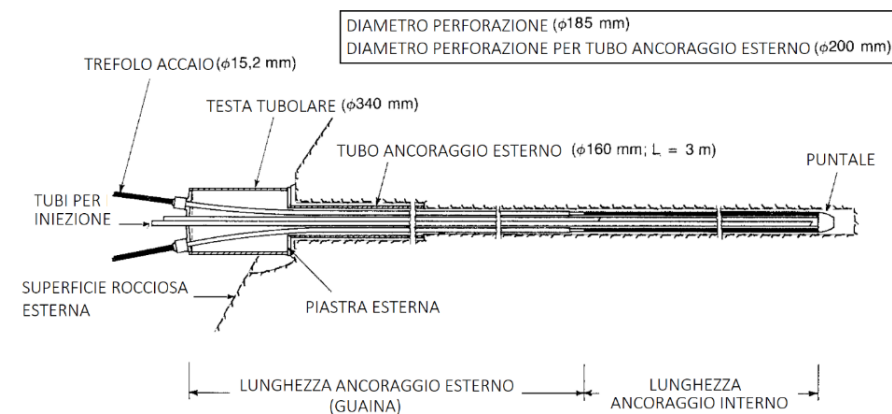
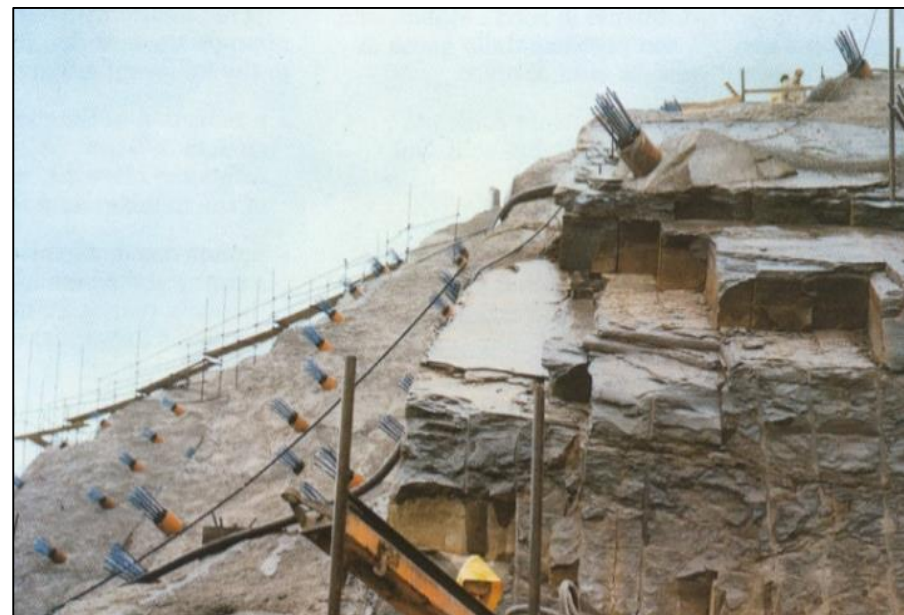


Sponda destra

4. Stabilità delle spalle

Diga di Ridracoli

Stabilizzazione delle spalle mediante tiranti



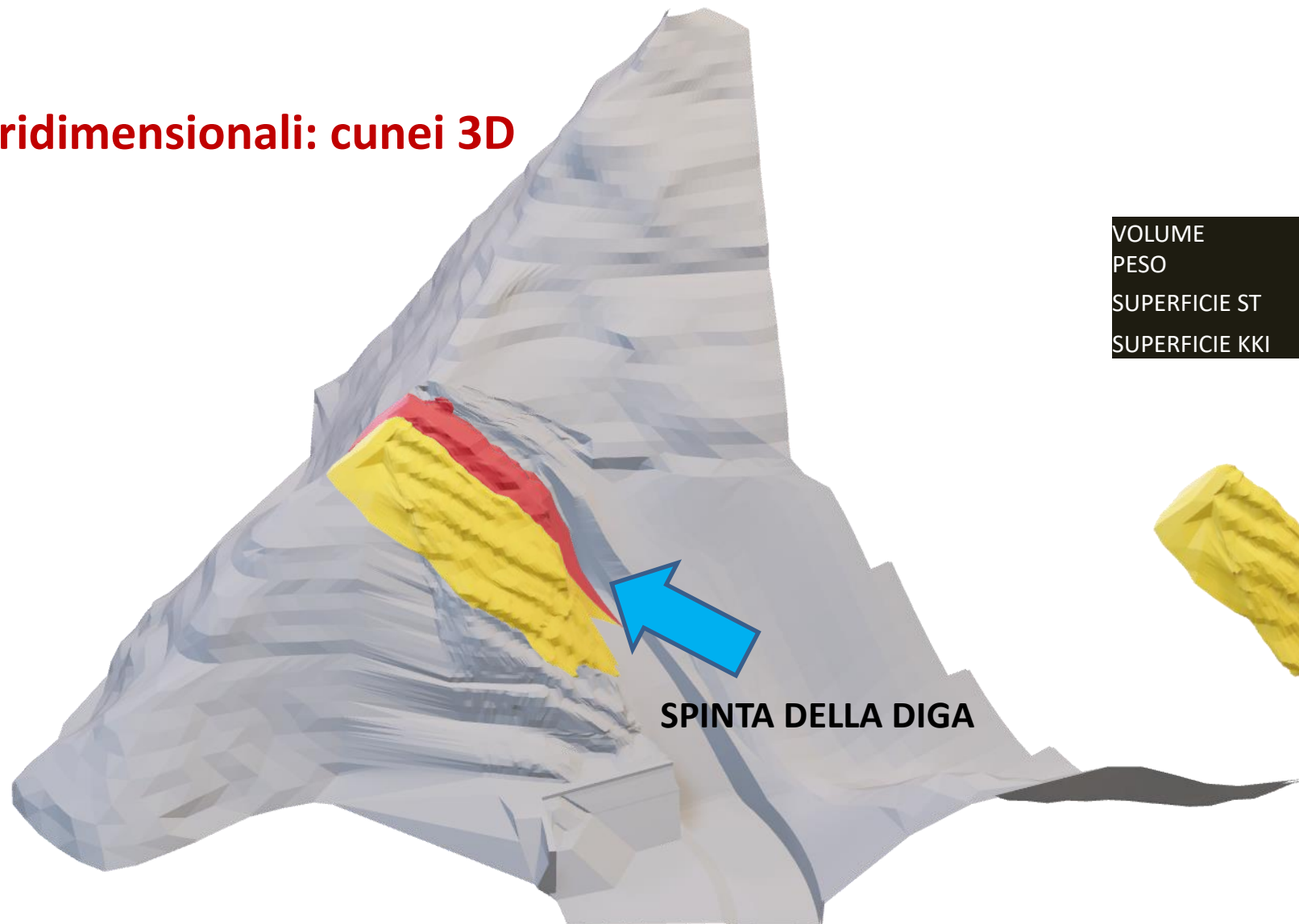


4. Stabilità delle spalle

Elementi tridimensionali: cunei 3D



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



VOLUME	36492 m ³
PESO	948792 kN
SUPERFICIE ST	4235 m ²
SUPERFICIE KKI	1860 m ²



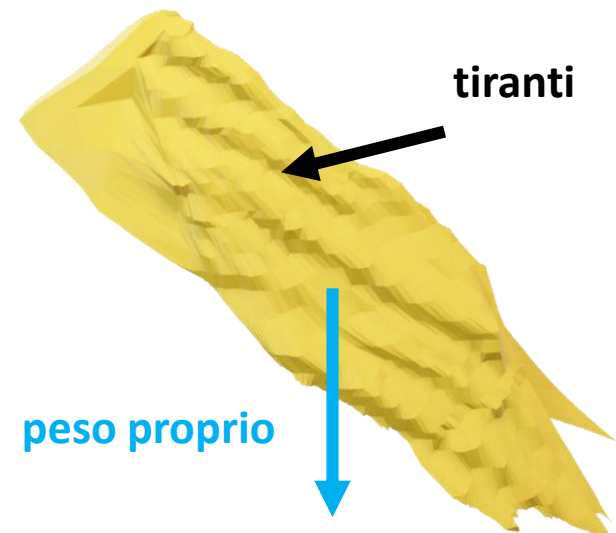
4. Stabilità delle spalle

Scivolamento di cunei 3D

- Condizioni di scavo aperto:**

- peso proprio, forza trasmessa dai tiranti
- parametri di resistenza di progetto

Superficie di Strato ST	
angolo di attrito lungo strato [°]	13 °
coesione lungo strato [c]	0 kPa
Giunti KKI	
angolo di attrito lungo giunto [°]	30 °
coesione lungo giunto [c]	0 kPa



COEFFICIENTE DI SICUREZZA

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

4. Stabilità delle spalle

Scivolamento di cunei 3D

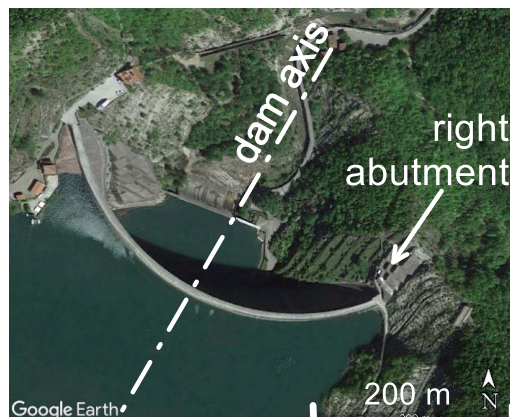
• Spinta della diga:



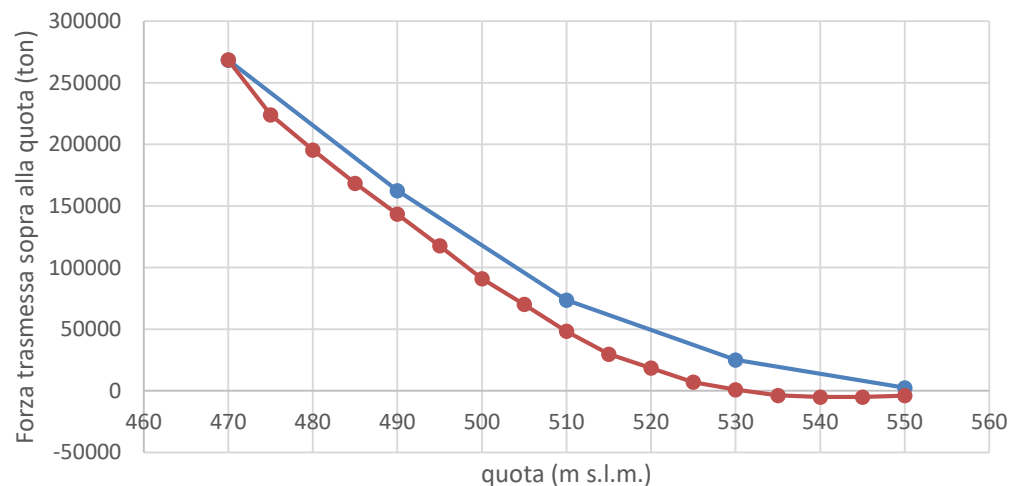
**Spinta con
metodo di Tölke
(PE)**



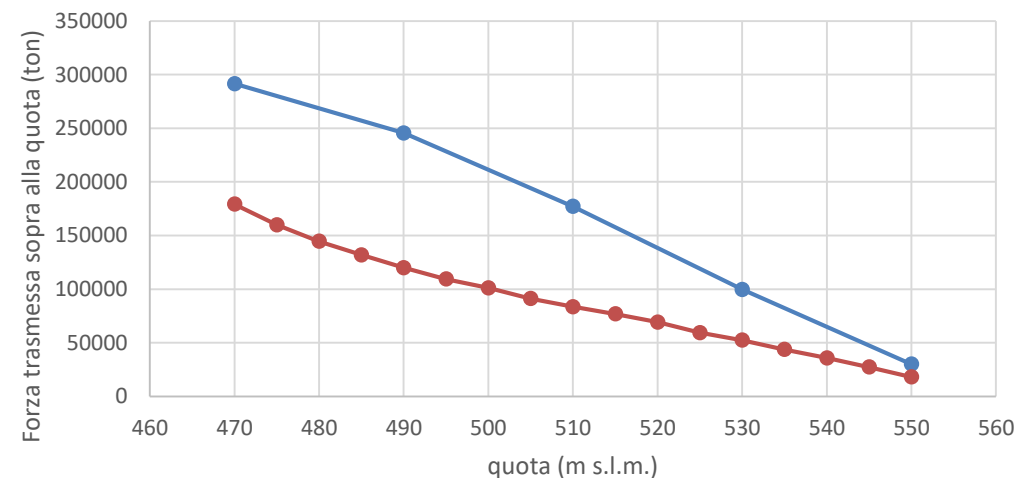
**Spinta calcolata
numericamente
(FEM)**



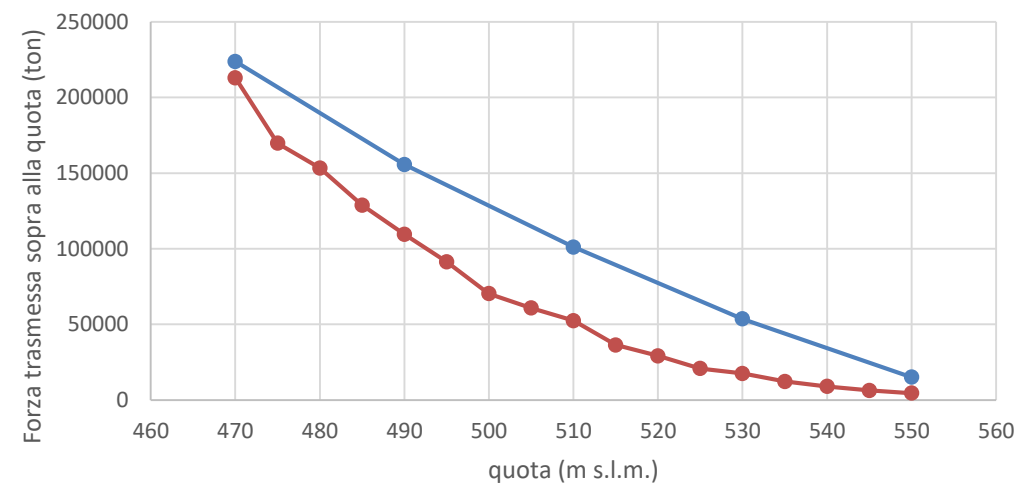
componente verticale



componente orizzontale verso Est



componente orizzontale verso Nord



4. Stabilità delle spalle

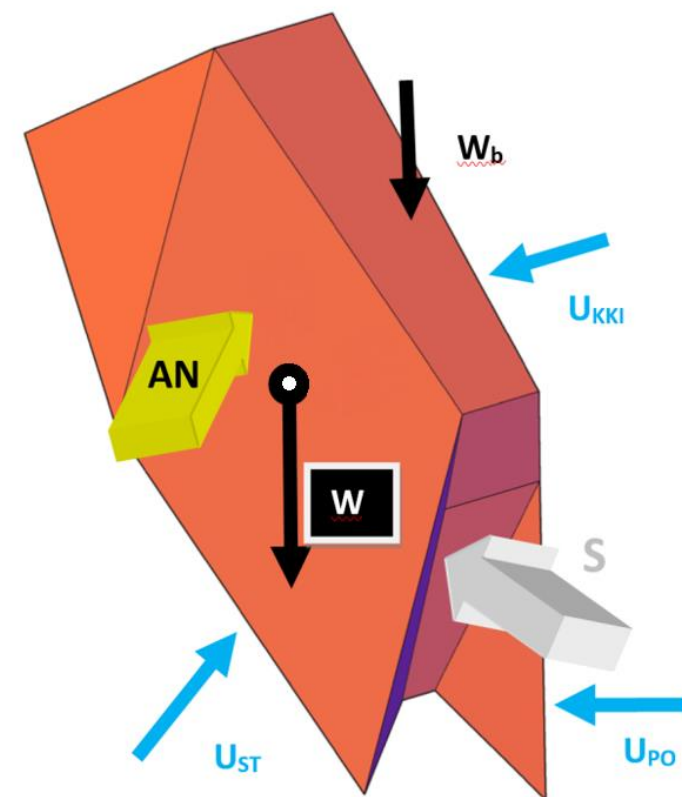
Scivolamento di cunei 3D

- Condizioni statiche:
 - peso proprio, forza dei tiranti, spinta della diga, spinte idrauliche
 - spinta calcolata con il metodo di Tölke
 - parametri di resistenza di progetto ($c = 0$)

FATTORE DI SICUREZZA CON NORMATIVA (CUNEO 2)

	attrito	coes.	area	componenti normali piani		tangenziali	F_{RES}	
				Nst	Nkki	T	ϕ	c
	°	kPa	m ²	kN	kN	kN	kN	kN
ST	10.4	0	6339.9	2471538.5			456479.7	0
KKI	30.2	0	2346.0		565132.3		328474.1	0
Int ST-KKI						-371135.9	784953.8	0
Totale						-371135.9	682568.5	

FS
1.84



Grazie dell'attenzione !

ASPETTI DI FONDAZIONE

*L'influenza del comportamento idro-meccanico
dell'ammasso roccioso*

Alessandro Graziani

Università «Roma Tre»
alessandro.graziani@uniroma3.it