

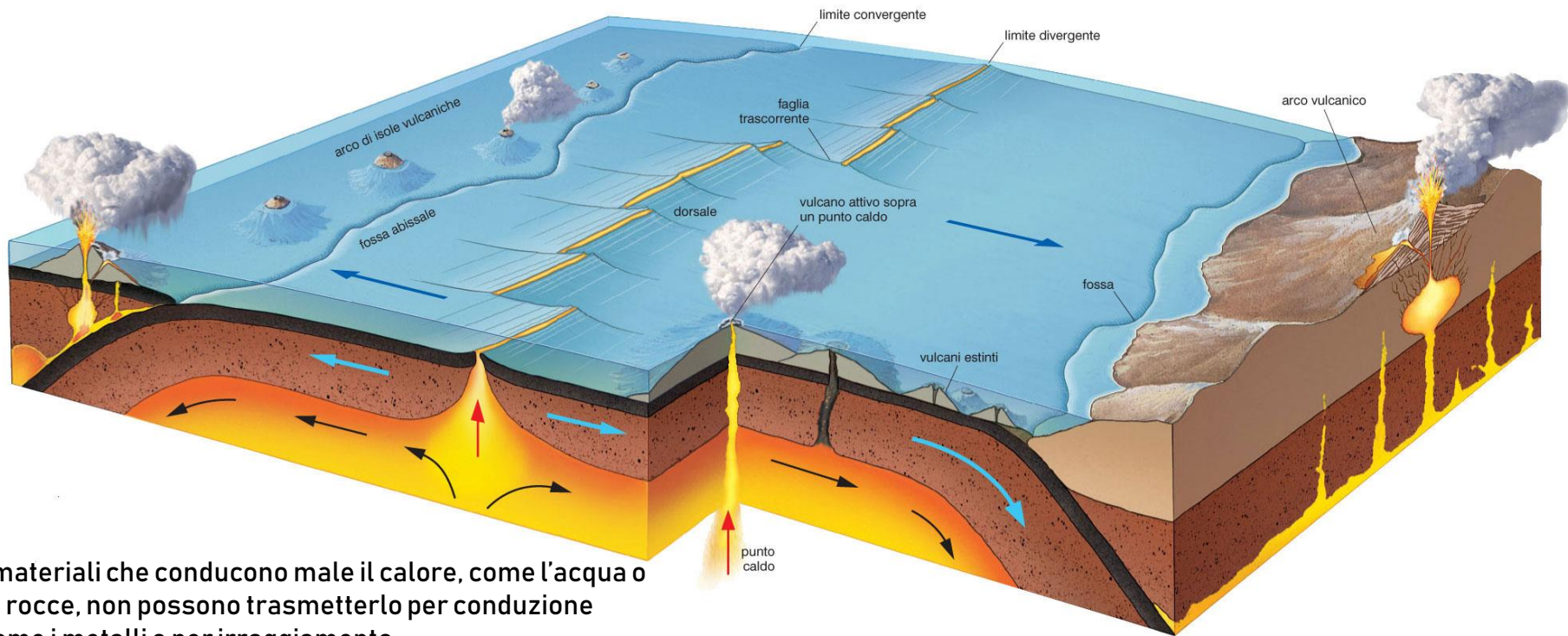


**GENESI DELLA MARNOSO ARENACEA  
GEOLOGIA E GEOMECCANICA DELLA DIGA DI RIDRACOLI  
TECNICHE DI INDAGINE**

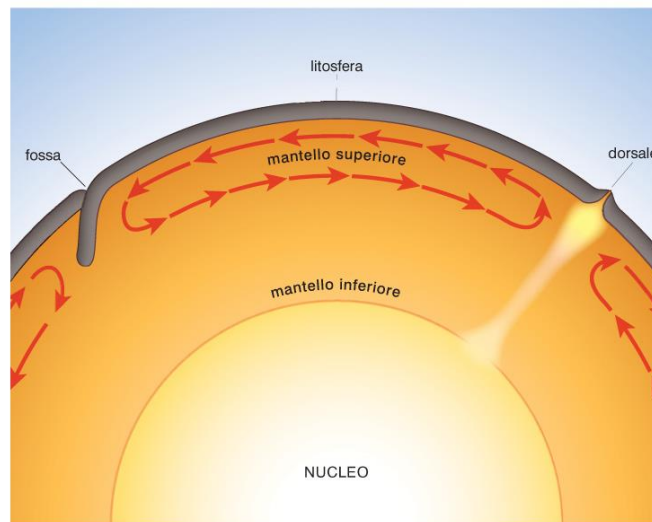
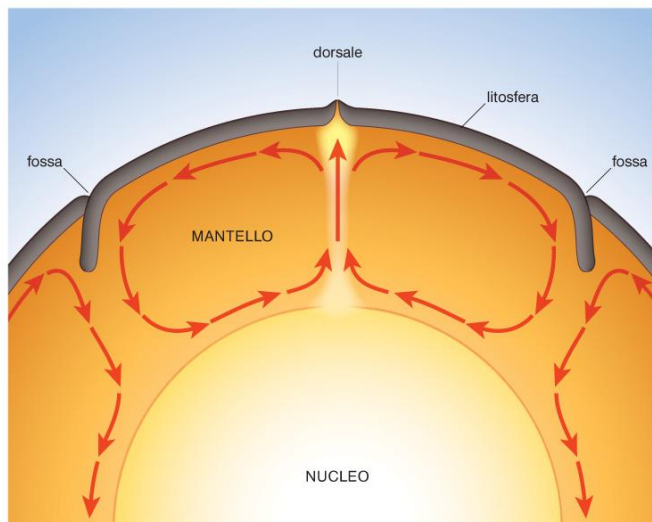
*a cura del Dott. Geologo Carlo Fabbri*



# CELLE CONVETTIVE E PROCESSI OROGENETICI

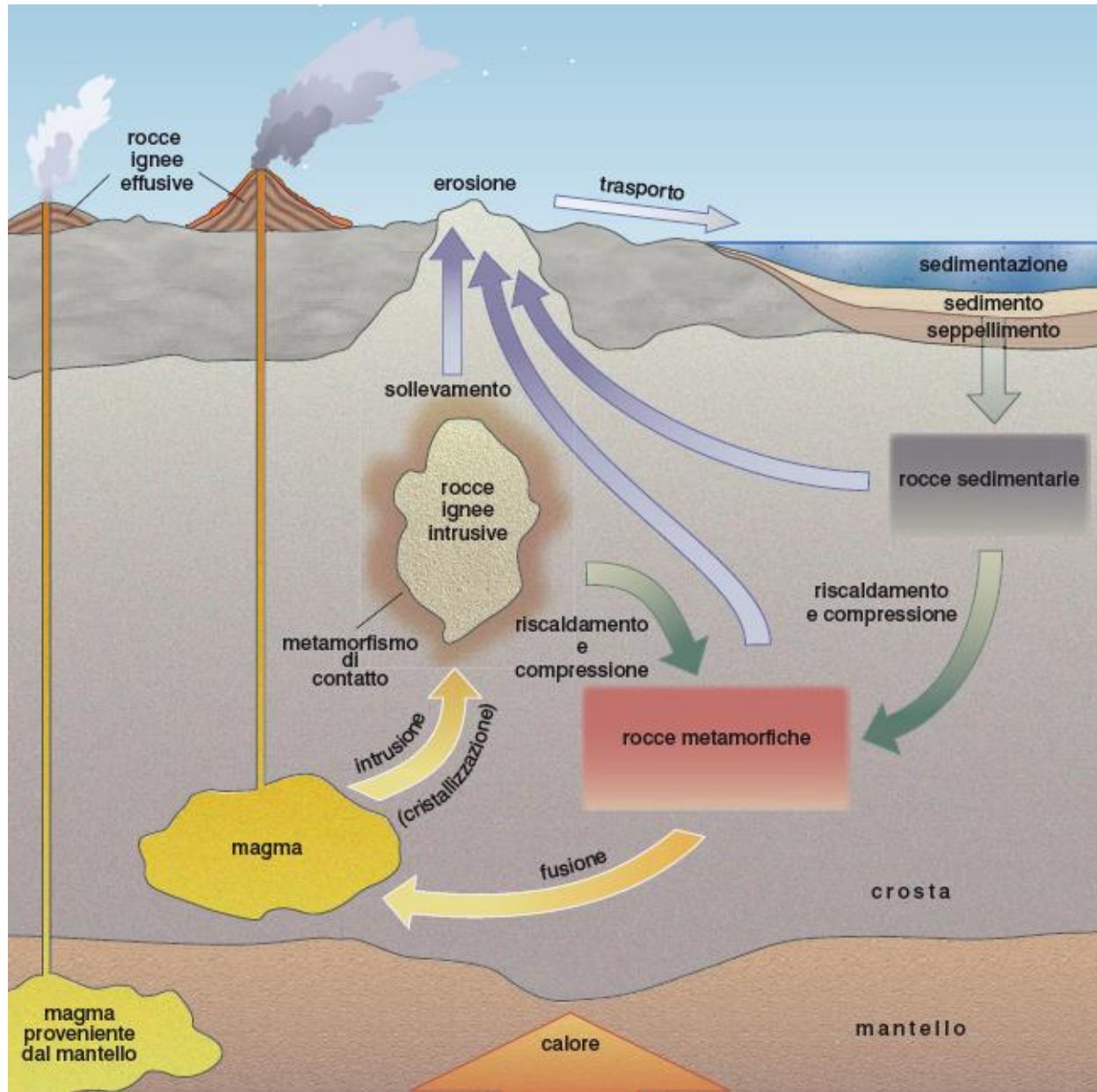


I materiali che conducono male il calore, come l'acqua o le rocce, non possono trasmetterlo per conduzione come i metalli o per irraggiamento.



Per cui, nei punti in cui vengono scaldati, si dilatano, l'aumento di volume fa diminuire la densità e tali porzioni di materiale tendono a risalire al suo interno; le parti più fredde, per motivi opposti, tendono invece a sprofondare. In questo modo il calore viene distribuito attraverso il movimento del materiale detto convezione. Esso è quindi l'unico modo in cui le rocce possono trasmettere il calore su scala planetaria.

# CICLO DELLE ROCCE



Le rocce esposte in superficie agli agenti atmosferici vengono degradate ed erose dando origine ai sedimenti, che vengono poi sepolti e compattati formando le rocce sedimentarie. A profondità crescenti, le rocce sono sottoposte a condizioni di pressione e temperatura sempre più elevate che ne causano la fusione e/o il metamorfismo. Attraverso processi orogenetici e vulcanici, le rocce fuse, i magmi, tornano in superficie solidificandosi in rocce ignee effusive o in cavità ipogee generando rocce ignee intrusive che poi emergono per sollevamento ...

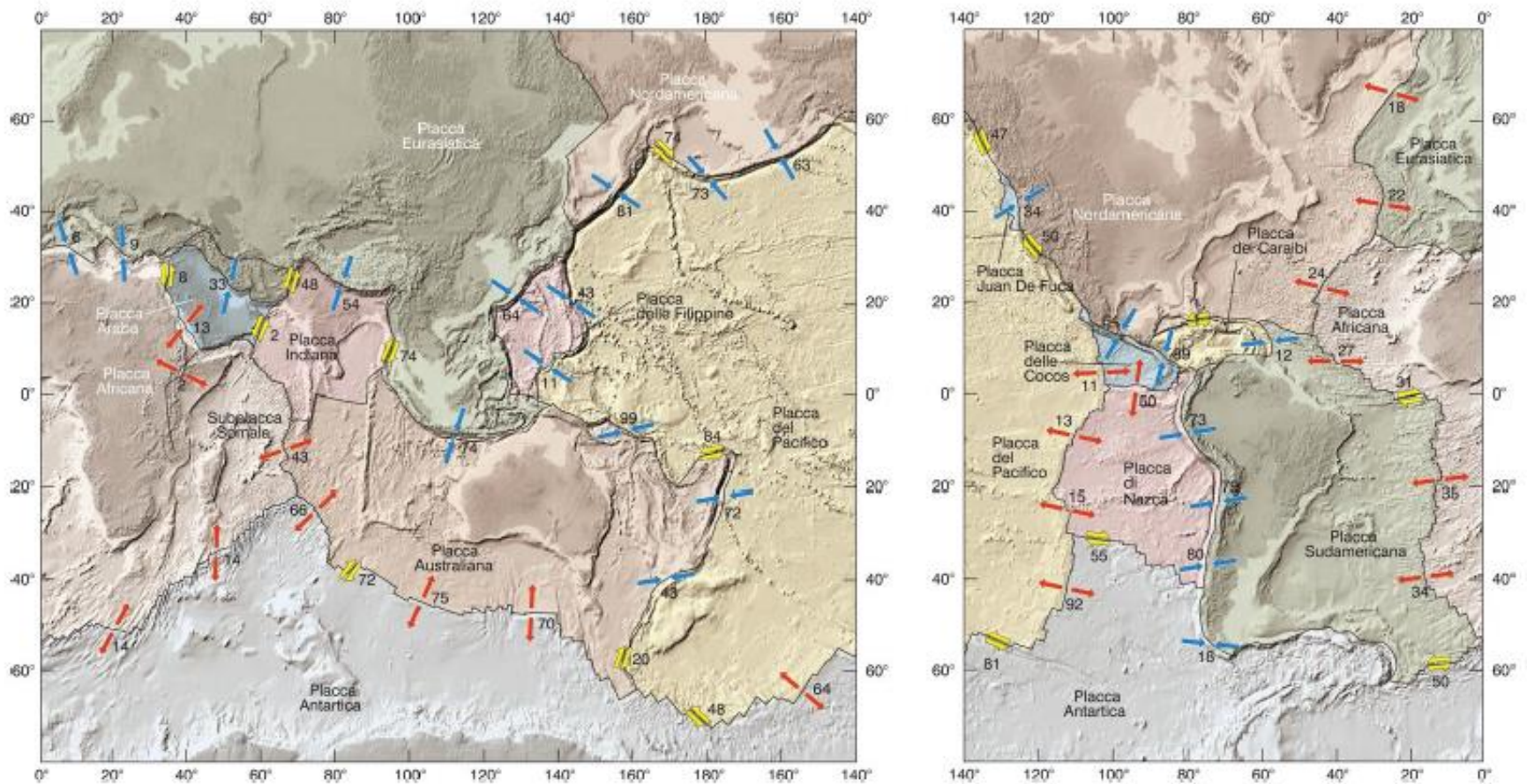
... e il ciclo ricomincia.



# TETTONICA A PLACCHE

## SITUAZIONE ATTUALE

Il mosaico delle placche terrestri è composto da 13 grandi placche più un certo numero di placche minori. Le frecce indicano i movimenti relativi delle placche in corrispondenza dei limiti: le frecce rosse indicano i limiti divergenti, le frecce blu i limiti convergenti e quelle gialle i limiti trascorrenti. I numeri accanto alle frecce indicano la velocità di movimento delle placche espresse in millimetri annui.





180 Ma Giura (Lias)



120 Ma Cretaceo inferiore



60 Ma Paleocene



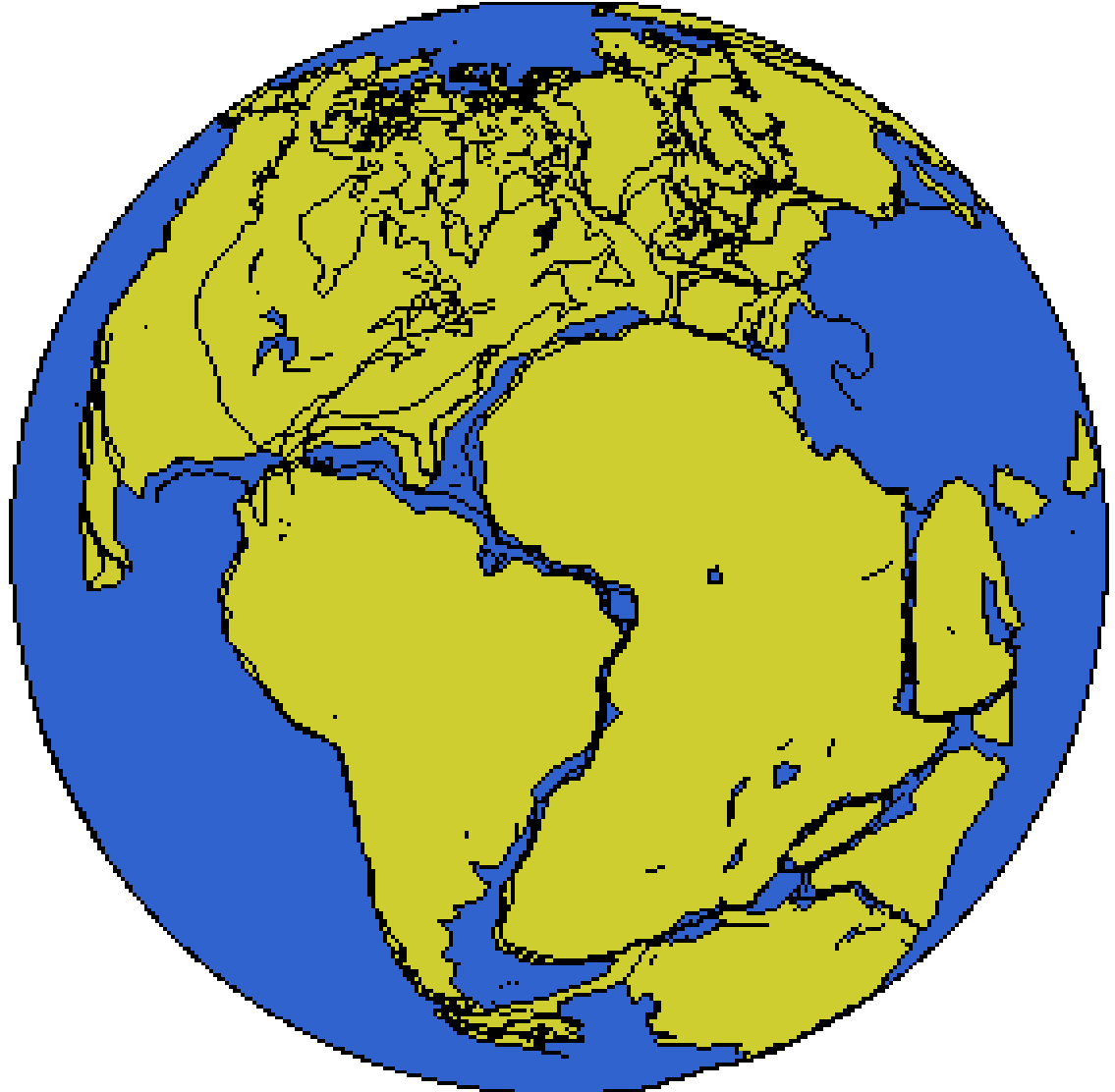
0 Ma Olocene



# TETTONICA A PLACCHE

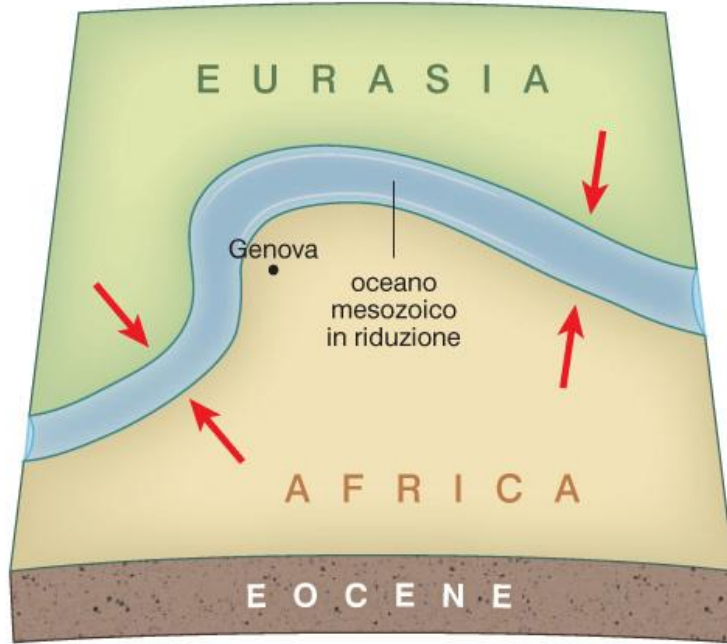
## LA DERIVA DEI CONTINENTI

180 Ma Giura (Lias)



# TETTONICA A PLACCHE

## ADRIA



53 – 33 MA

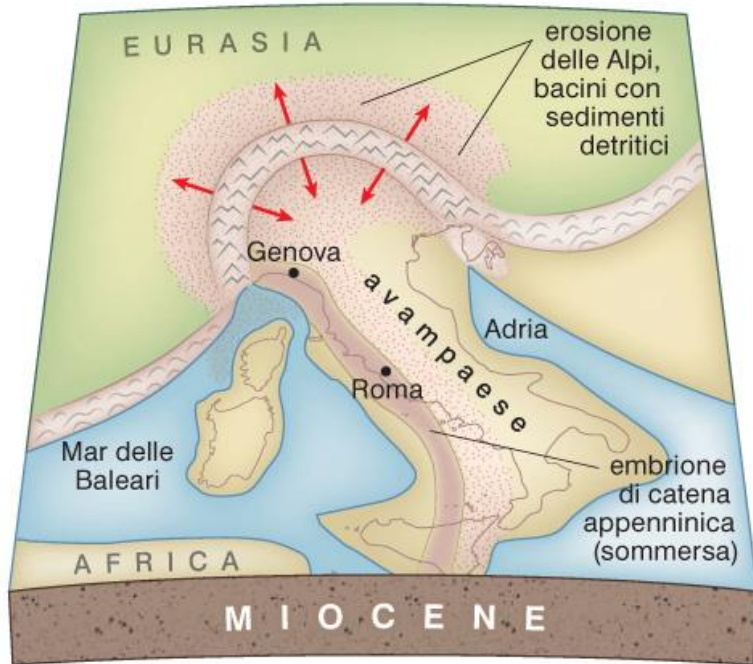
Nell'Eocene, Africa e Eurasia si stavano avvicinando e chiudevano la parte occidentale dell'oceano mesozoico (Tetide). Al margine settentrionale del continente (cratone) africano esisteva una protuberanza, che diventerà poi il promontorio Adria.



33 – 23 MA

La punta di Adria si scontra con il margine sud del cratone europeo, facendo sorgere la catena delle Alpi (e ad est quella dei Carpazi). Più a ovest, uno stiramento della litosfera fa aprire un piccolo bacino oceanico (Mare delle Baleari) e allontanare una «fettina» di continente europeo (che darà vita poi alla Corsica e alla Sardegna).





23 – 5,3 MA

L'erosione della catena alpina in continuo e rapido sollevamento fornisce quantità di sedimenti (ghiaia, sabbie e fanghi) a due bacini sedimentari, uno situato a nord della neo-catena e uno a sud (Avanfossa appenninica). Quest'ultima fiancheggia il primo embrione della catena appenninica, la cui formazione avveniva sotto il livello del mare a seguito delle spinte della «fetta» corso-sarda contro Adria.



5,3 – 1,75 MA

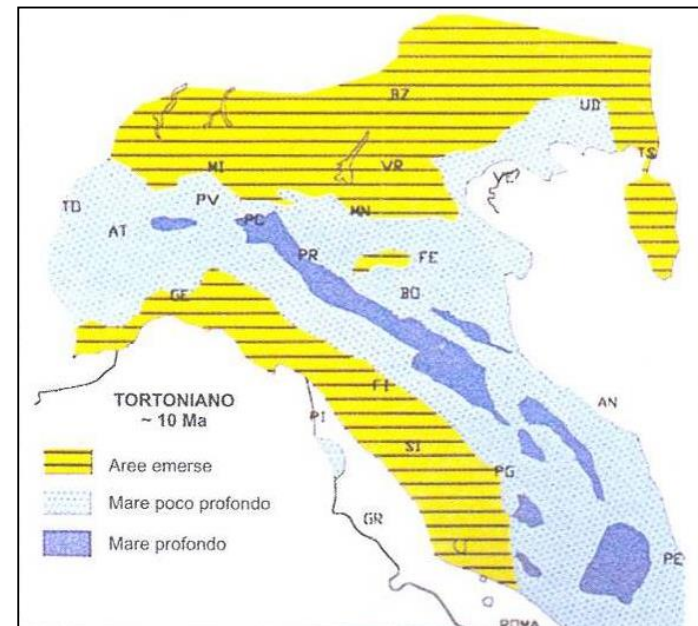
La forte compressione sul margine ovest di Adria fa sorgere dal mare l'Appennino (che si riattacca attraverso la Sicilia alle catene magrebidi del Nordafrica). Ad Ovest dell'Appennino si ferma la spinta della «fetta» corso-sarda e una distensione della litosfera apre un altro piccolo oceano, il Mar Tirreno. Si delinea il bacino Padano, più recente espressione dell'avanfossa appenninica, colmato nel Quaternario da sedimenti prima marini, poi continentali (alluvionali). Tutta questa ricostruzione è semplificata; per esempio, ignora la particolare situazione della Calabria.

# ORIGINE DELLA FORMAZIONE MARNOSO ARENACEA

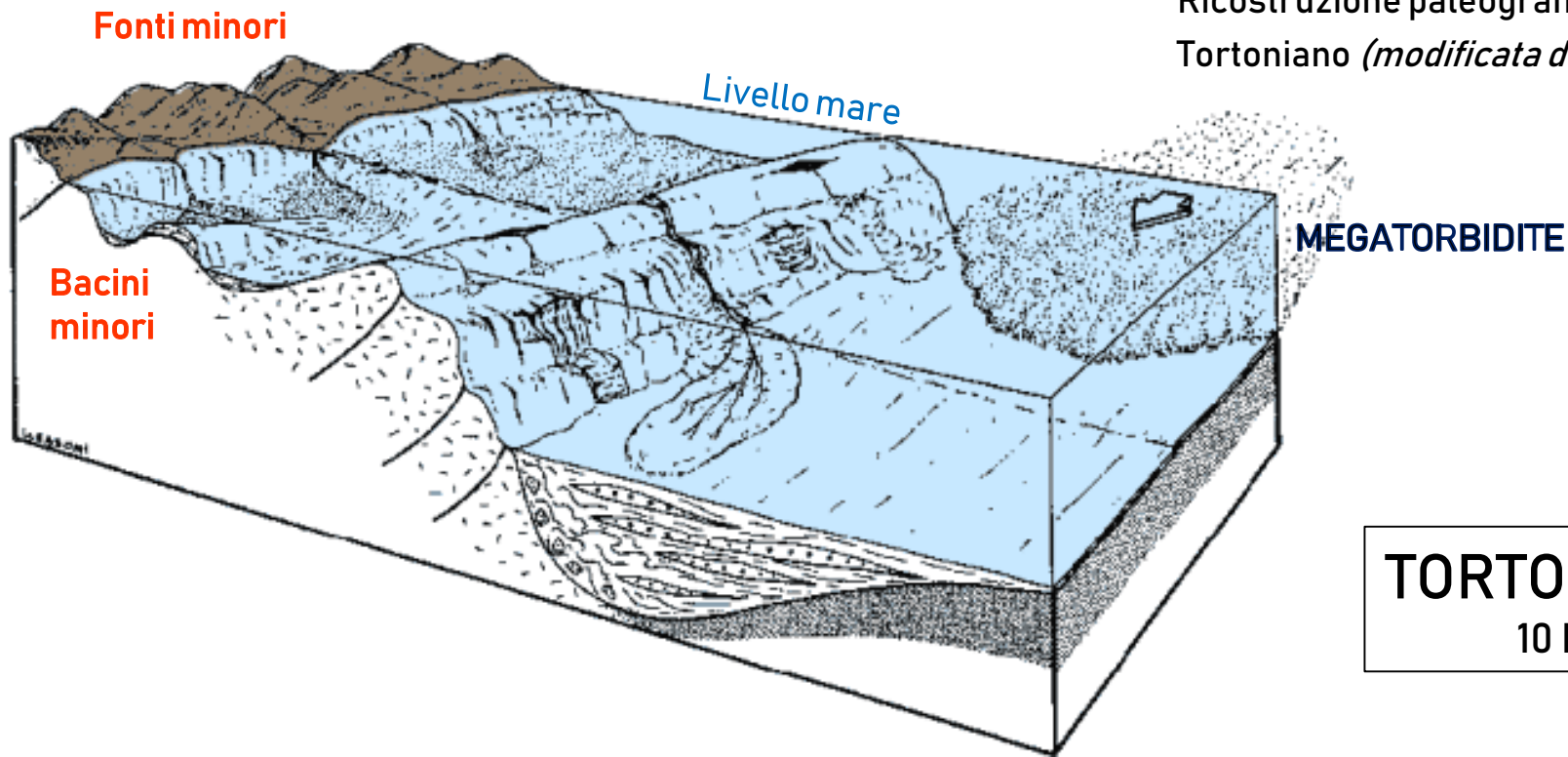
Ricostruzione di un segmento dell'avanfossa appenninica, com'era quando la occupava un mare profondo e la catena era "in costruzione" sott'acqua, una decina di milioni di anni fa.

Dal fianco del bacino e dalle Alpi, più a nord, scendevano impetuose correnti d'acqua torbida che depositavano strati di sabbia e fango sul fondo piatto.

Numerose e frequenti erano anche le frane sottomarine sui pendii (da Ricci Lucchi, 1984)

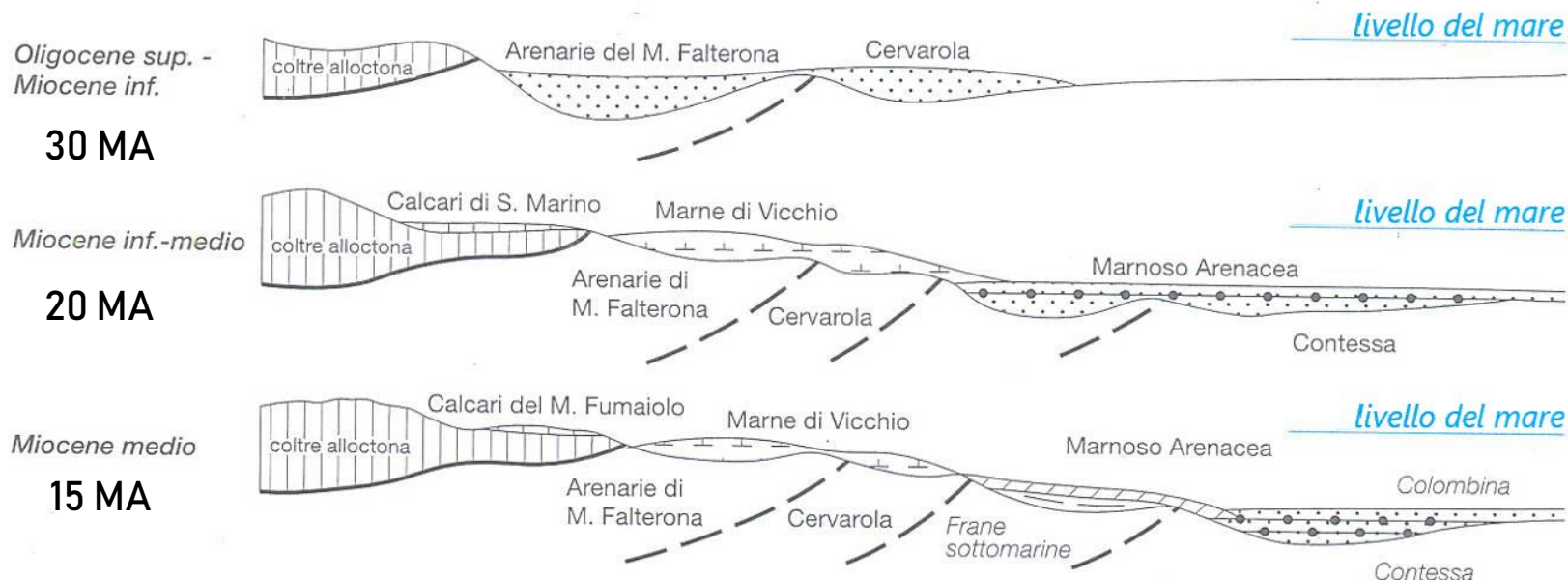


Ricostruzione paleografica durante il  
Tortoniano (modificata dal Prof. G.B. Vai)



**TORTONIANO**  
10 MA





La Carta Geologica Regionale in scala 1:10.000 suddivide la marnoso-arenacea in otto membri:

<b>MEMBRO di BISERNO</b>	Contenente il pregevole Livello di Calanca lavorabile a bozze e lastre. Rapporto arenaria (A) e pelite (P) $A/P < 1/3$
<b>MEMBRO del CORNIOLO</b>	$1/2 > A/P \geq 1/3$
<b>MEMBRO di PREMILCUORE</b>	$2 > A/P \geq 1/2$ contenente lo strato Contessa (Alberese) pregevole per essere lavorato a bozze e lastre
<b>LITOFACIES di CAMPIGNA</b>	$2 \leq A/P < 4$ contenente lo strato di Imolavilla
<b>MEMBRO di GALEATA</b>	$1/2 > A/P \geq 1/3$ contenente lo strato Contessa
<b>MEMBRO di COLLINA</b>	$A/P < 1/3$ contenente Colombine (orizzonti carbonatici)
<b>MEMBRO di VERGHERETO</b>	Prevalgono le marne $A/P \leq 1/6$ fino a $< 1/10$
<b>MEMBRO di CIVITELLA</b>	$1/2 \geq A/P > 1/5$





**FORMAZIONE MARNOSO ARENACEA  
NEI PRESSI DI BAGNO DI ROMAGNA (FC)**





**PARTICOLARE DELLE IMPRONTE BASALI  
NELLA FORMAZIONE M. A.**



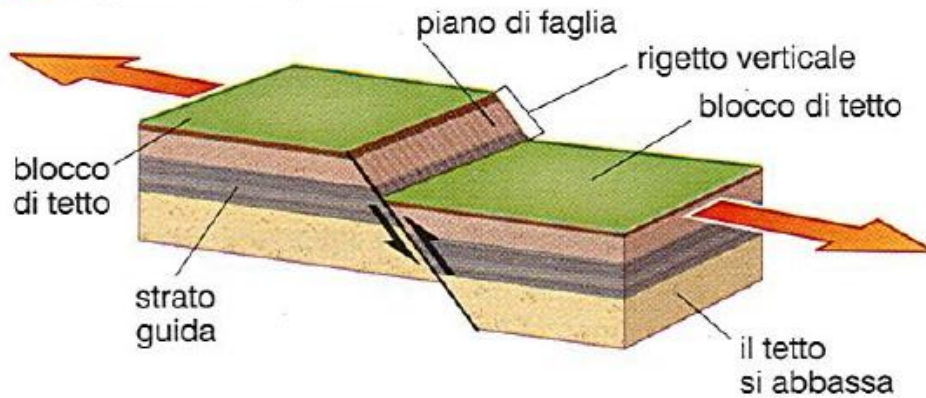


**AFFIORAMENTO DELLA FORMAZIONE M. A. SULLA SPALLA  
DESTRA DELLA DIGA DI RIDRACOLI DURANTE I LAVORI DI SCAVO**

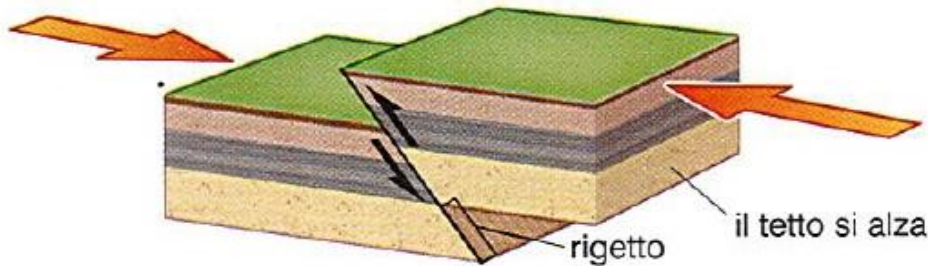


# FAGLIE

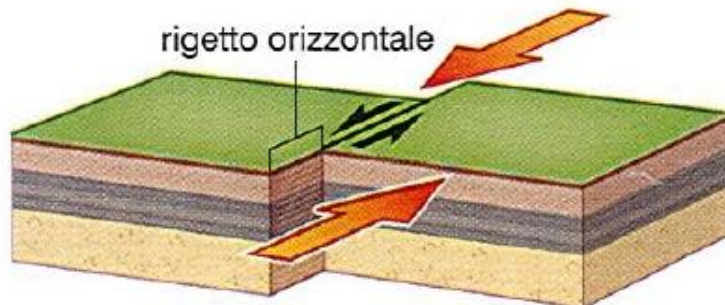
**A** faglia normale (dovuta a distensione)



**B** faglia inversa (dovuta a compressione)



**C** faglia trascorrente (dovuta allo sforzo di taglio)



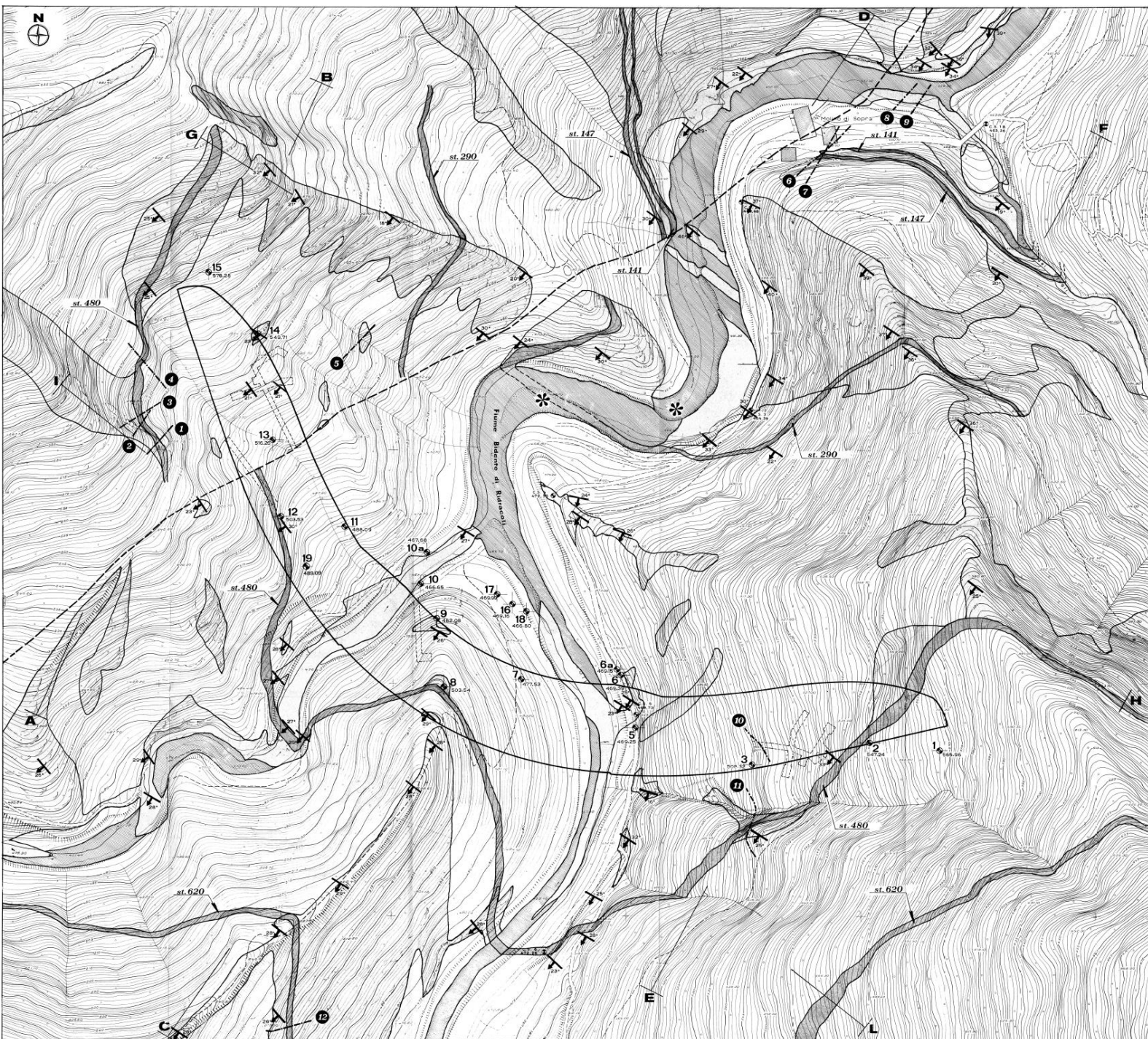
## DEFINIZIONE:

Frattura di una massa rocciosa lungo la quale si verifica lo spostamento relativo dei due blocchi adiacenti.

Lo spostamento relativo può essere molto variabile, da pochi decimetri a centinaia di chilometri.

La superficie su cui avviene il movimento si definisce "piano di faglia" e su di esso possono essere presenti "strie di faglia" che consentono di ricostruire la direzione del movimento. Esistono diverse tipologie di faglie: dirette (o normali), inverse (fra queste un tipo particolare sono i sovrascorrimenti), trascorrenti.











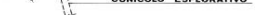




# CARTA GEOLOGICA DELLA ZONA DI SBARRAMENTO

## PROGETTO ESECUTIVO

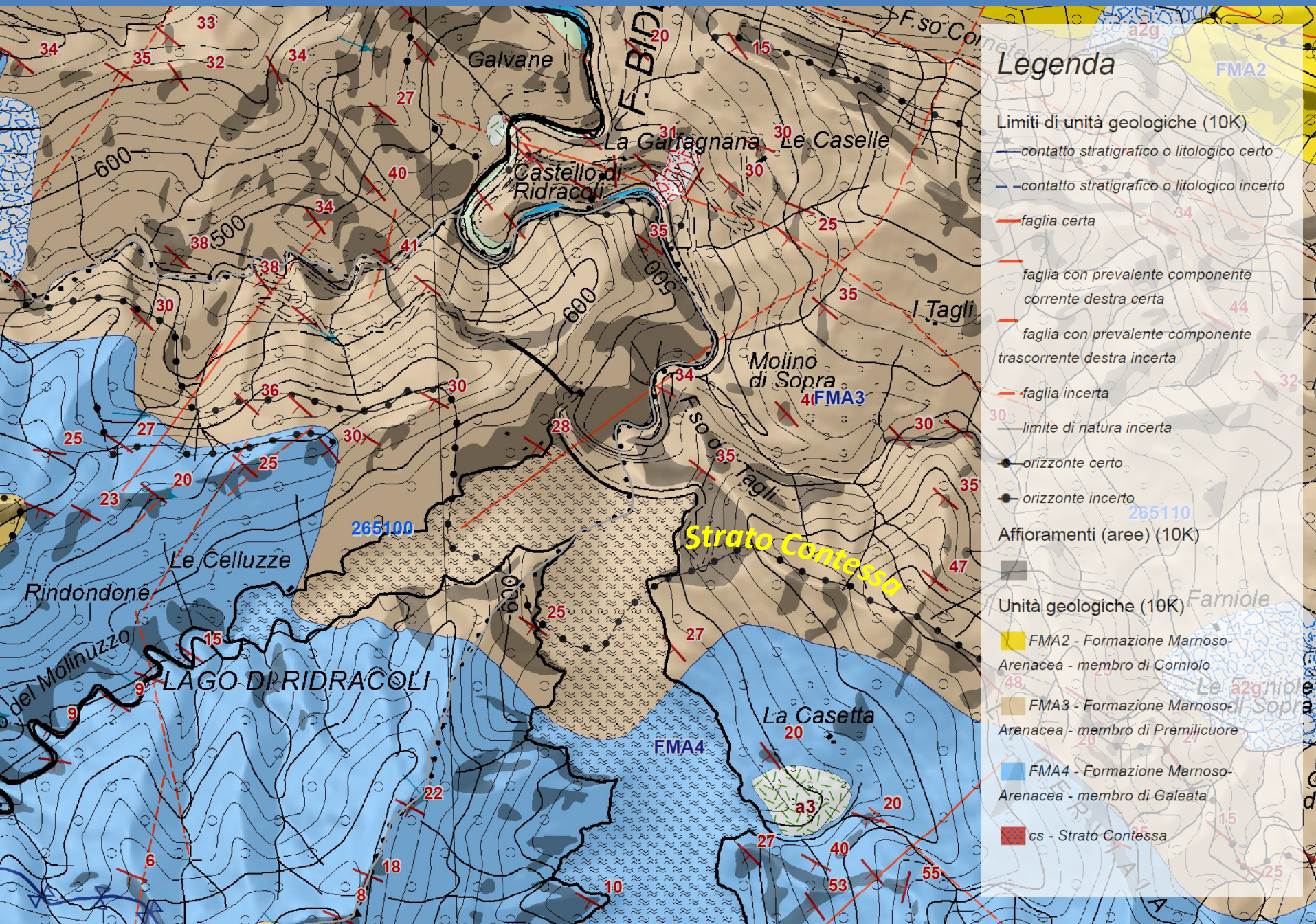
Alpina (1974)

### LEGENDA

-  COPERTURA ELUVIALE
-  DEPOSITO ALLUVIONALE
-  FORMAZIONE "MARNOSO-ARENACEA"
-  STRATO DI RIFERIMENTO  
st. 620 ; st. 480 ; st. 290 ; st. 147 ; st. 141
-  FAGLIA
-  DIACLASI (1) (2)
-  DIREZIONE E PENDENZA STRATO
-  TRACCIA SEZIONE
-  CUNICOLO ESPLORATIVO
-  SONDAGGIO GEOGNOSTICO
-  SORGENTE



# CARTA GEOLOGICA REGIONALE







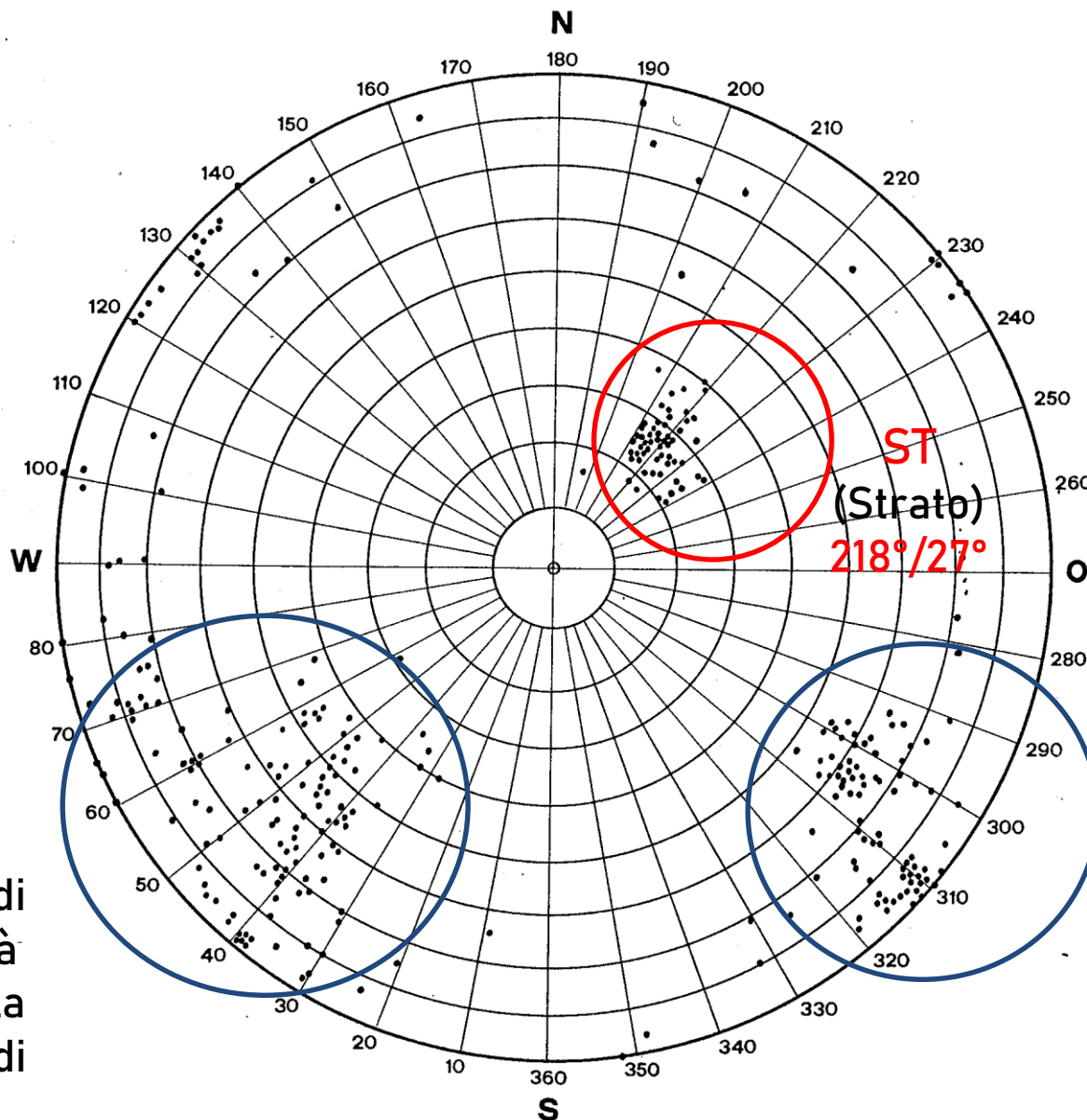
STRATO CONTESSA





# DIAGRAMMA POLARE DI SCHMIDT-LAMBERT

riassuntivo delle superfici di discontinuità geologica relativa agli strati di arenaria



**KKD**

50°/70°

Famiglia  
principale di  
discontinuità  
lungo la  
direzione di  
strato

**KKI**

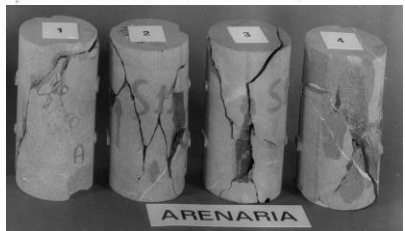
304°/70°

famiglia  
secondaria di  
discontinuità  
lungo  
l'immersione



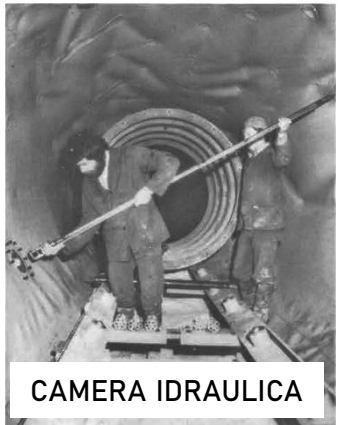
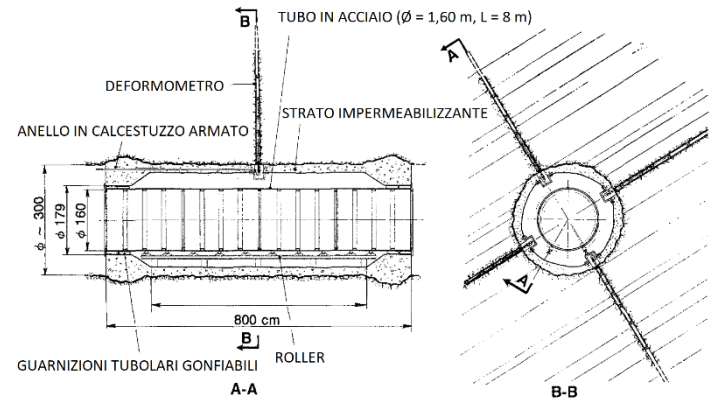
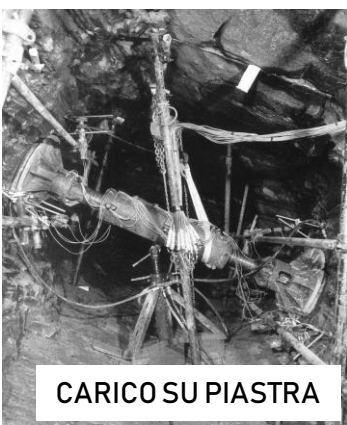
# PROVE IN SITO E IN LABORATORIO

## DIGA DI RIDRACOLI



**PROVINI CILINDRICI PER PROVE A COMPRESSIONE**

**DIGA DI RIDRACOLI**  
 PLANIMETRIA DEGLI SCAVI (Schema)  
 INDAGINI GEOGNOSTICHE DI I° e II° FASE  
 (ALL. REL. n° 6250)  
 SCALA 1:1'000



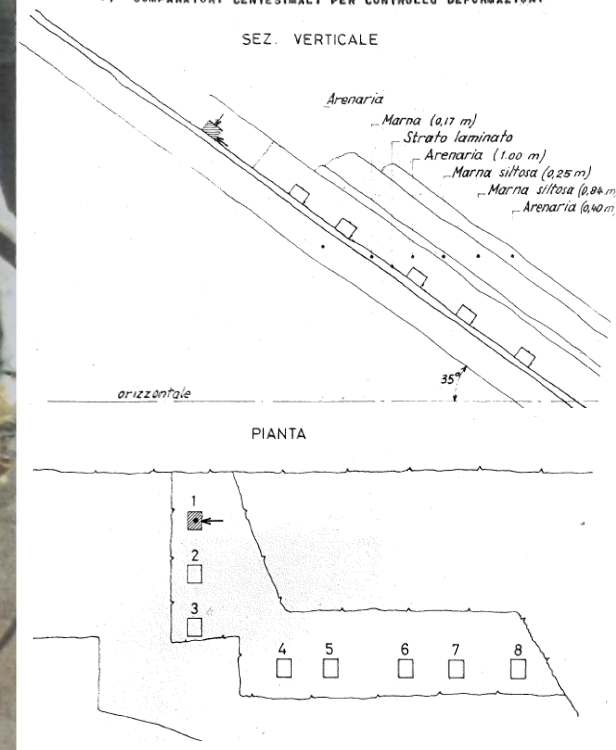
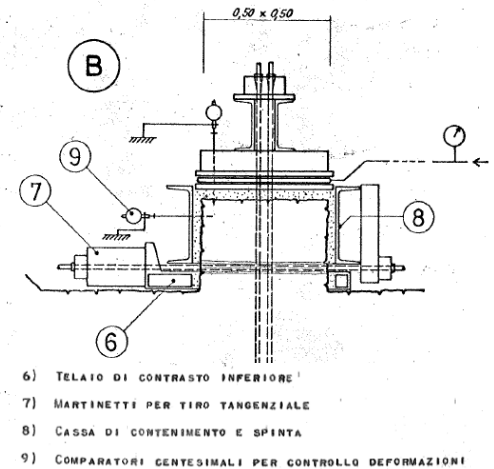








# PROVE DI TAGLIO IN SITU SULLE «BANCHE» Cogecom (1977)

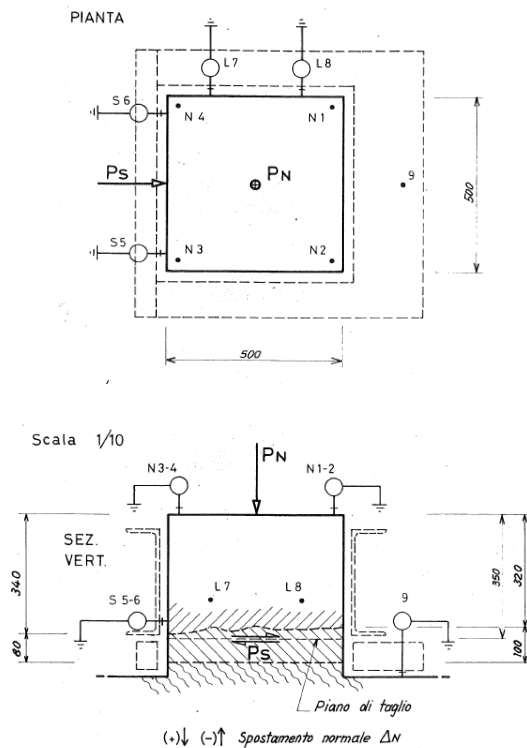


# PROVE DI TAGLIO IN SITU SULLE «BANCHE»

DIAGRAMMA DELLO SPOSTAMENTO IN FUNZIONE DELLA TENSIONE TANGENZIALE APPLICATA

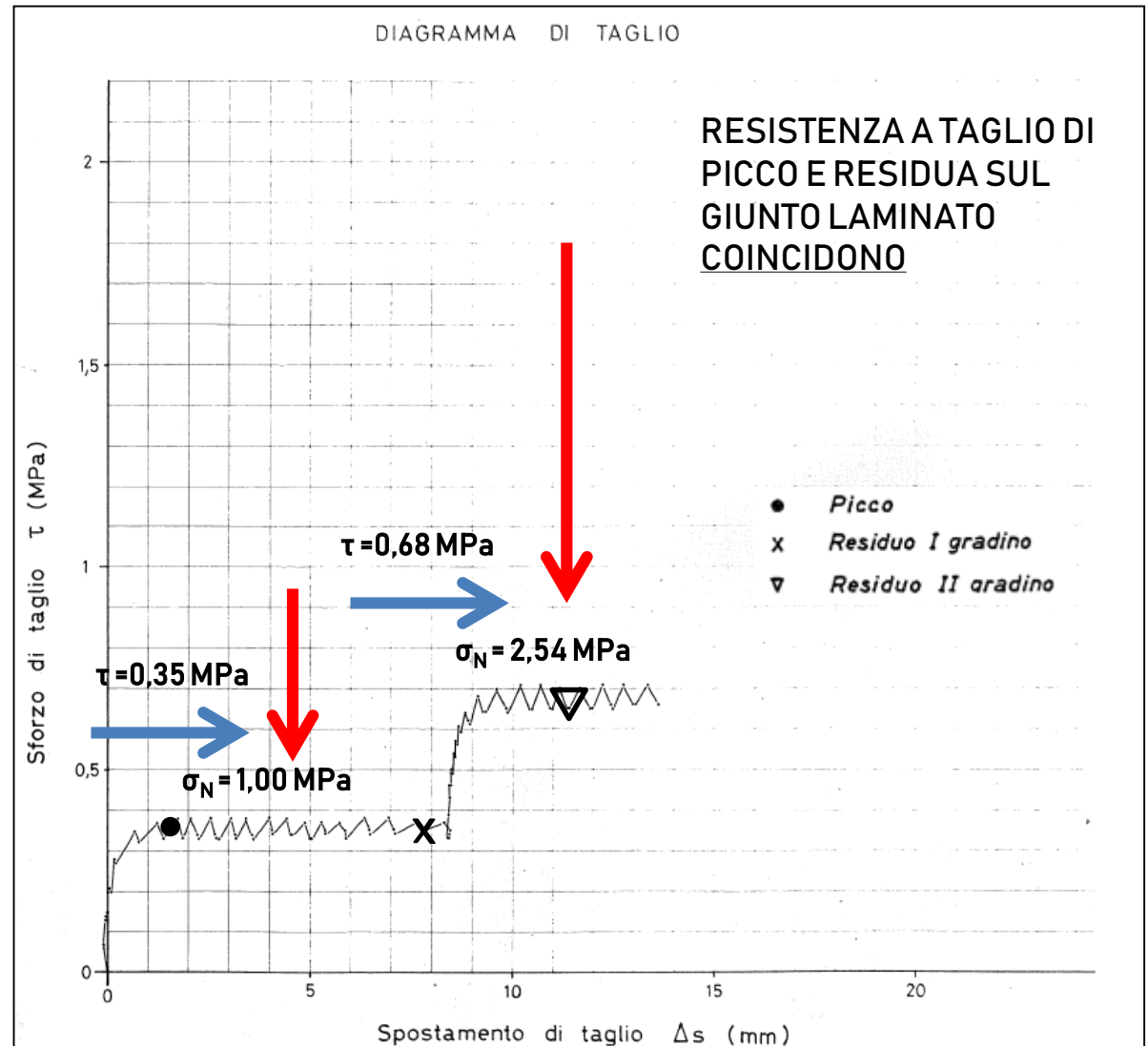
Cogecom (1977)

SCHEMA DI PROVA E STRUMENTAZIONE



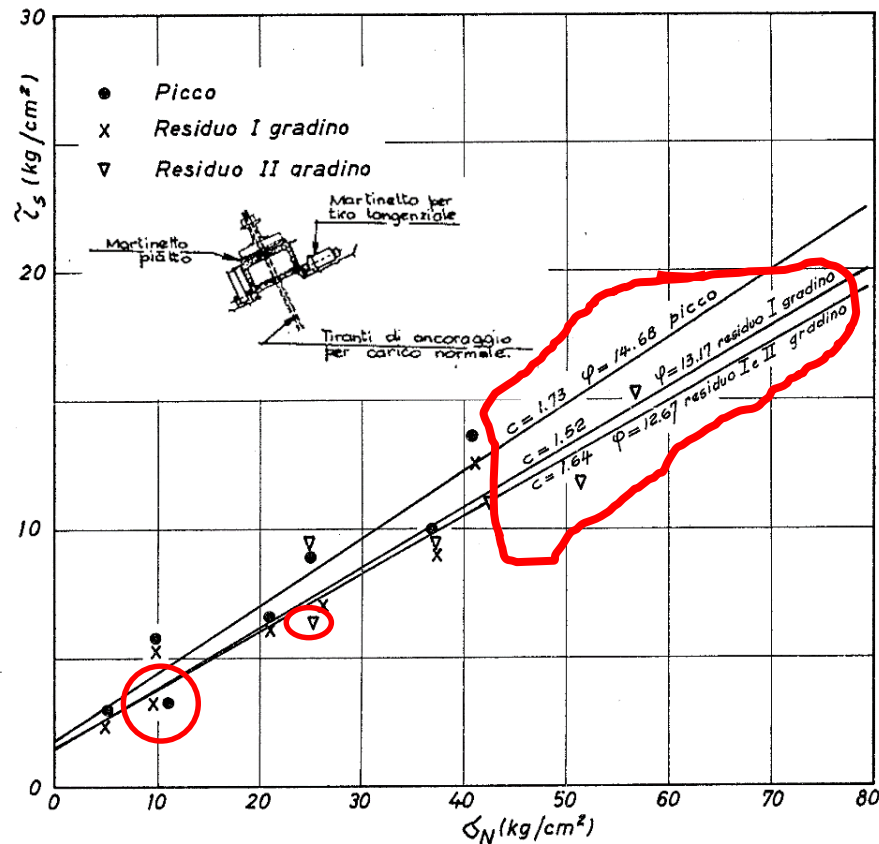
Legenda

- Arenaria
- Marna siltosa laminata e fogliettata





# PARAMETRI DI RESISTENZA DELL'AMMASSO ROCCIOSO



SISTEMI DI DISCONTINUITÀ	ANGOLO DI ATTRITO	COESIONE
Contatto arenaria-marna con intercalazione di marna laminata	13°	0,16 MPa
Contatto arenaria-marna	21°	0.06 MPa
Contatto marna arenaria	26°	0,0 MPa

I PARAMETRI ALLA MOHR-COULOMB DI PROGETTO ASSUNTI SONO STATI:

ST:  $\phi = 13^\circ$   $c = 0$  MPa

KKI:  $\phi = 36^\circ$   $c = 0$  MPa



**Politecnico di Torino (1970,1974)**

POLITECNICO DI TORINO

ISTITUTO DI TECNICA DELLE COSTRUZIONI  
10121 TORINO - CORSO DUCA DEGLI ABRUZZI, 24 - TEL. 51.27.10 - 54.50.20

| Cert. n° 262

Serie n° 34

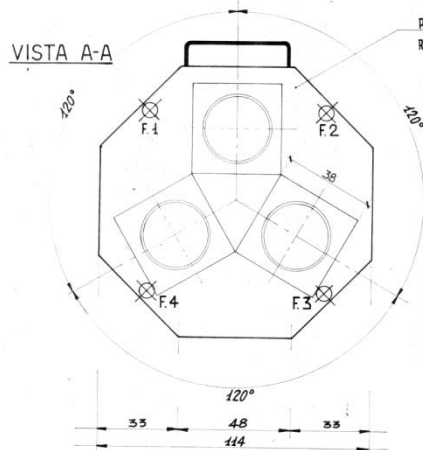
Pag. n° 8

- TAVOLA n° 2 -

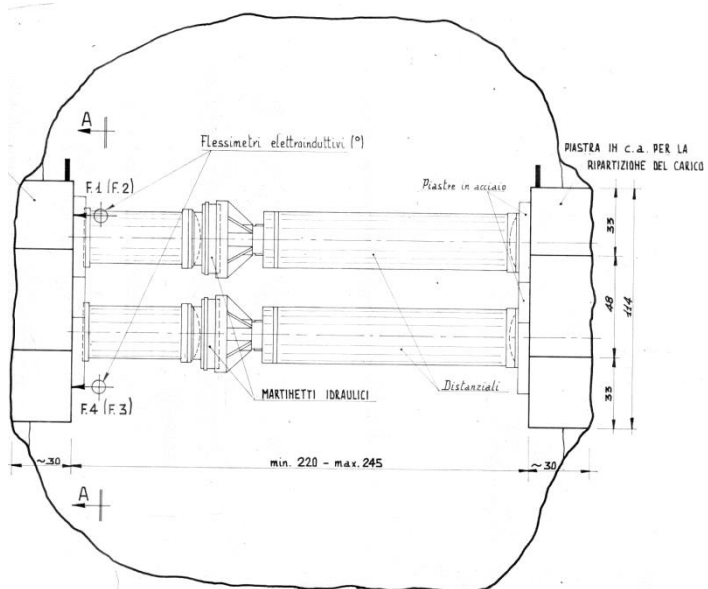
- PROVE DI DEFORMABILITA' -

-SCHEMA DELL'ATTREZZATURA DI CARICO-

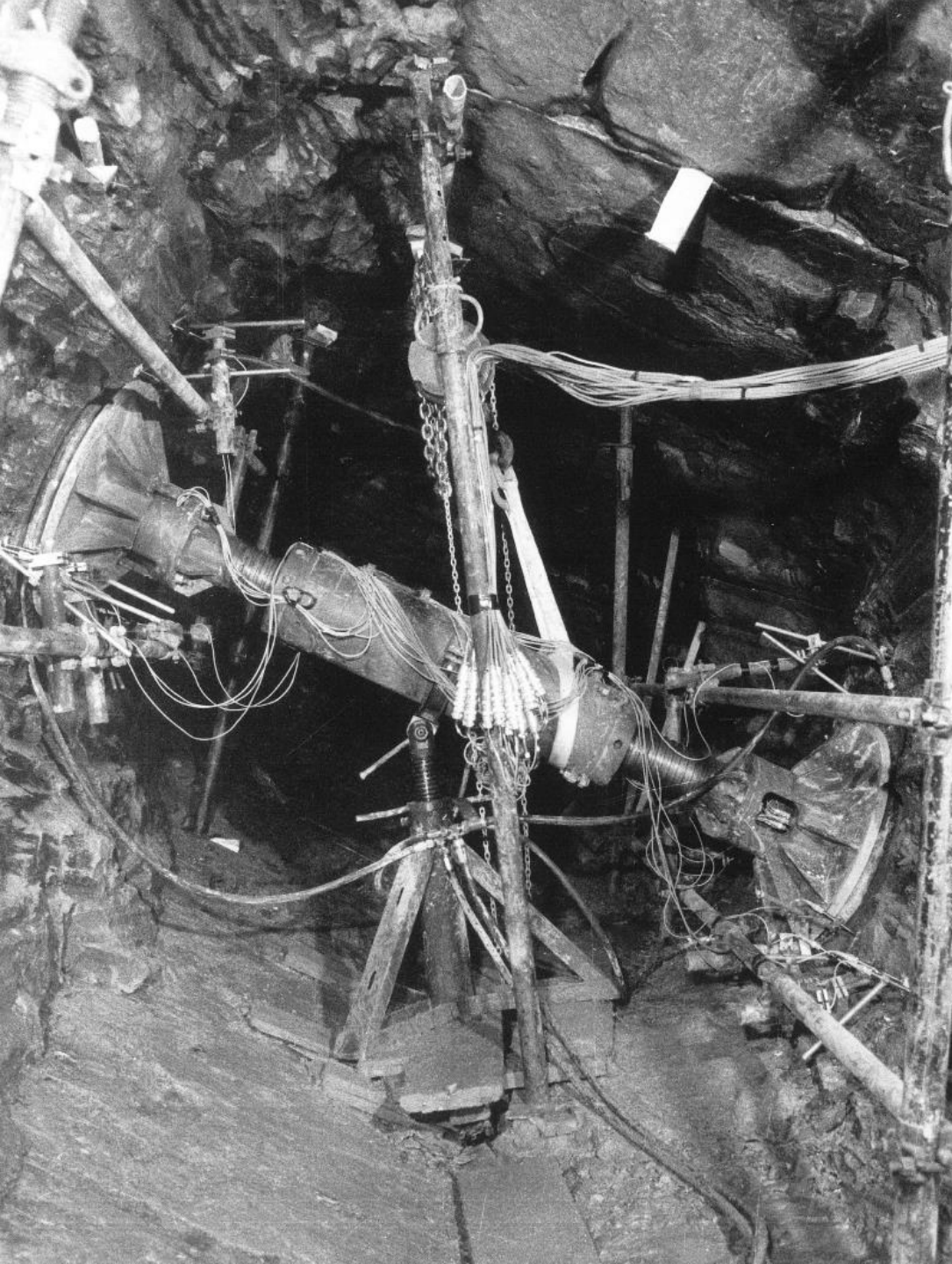
VISTA A-A

PIASTRA IN C.A. PER LA  
RIPARTIZIONE DEL CARICO

PIASTRA IN C.A. PER LA  
RIPARTIZIONE DEL CARICO

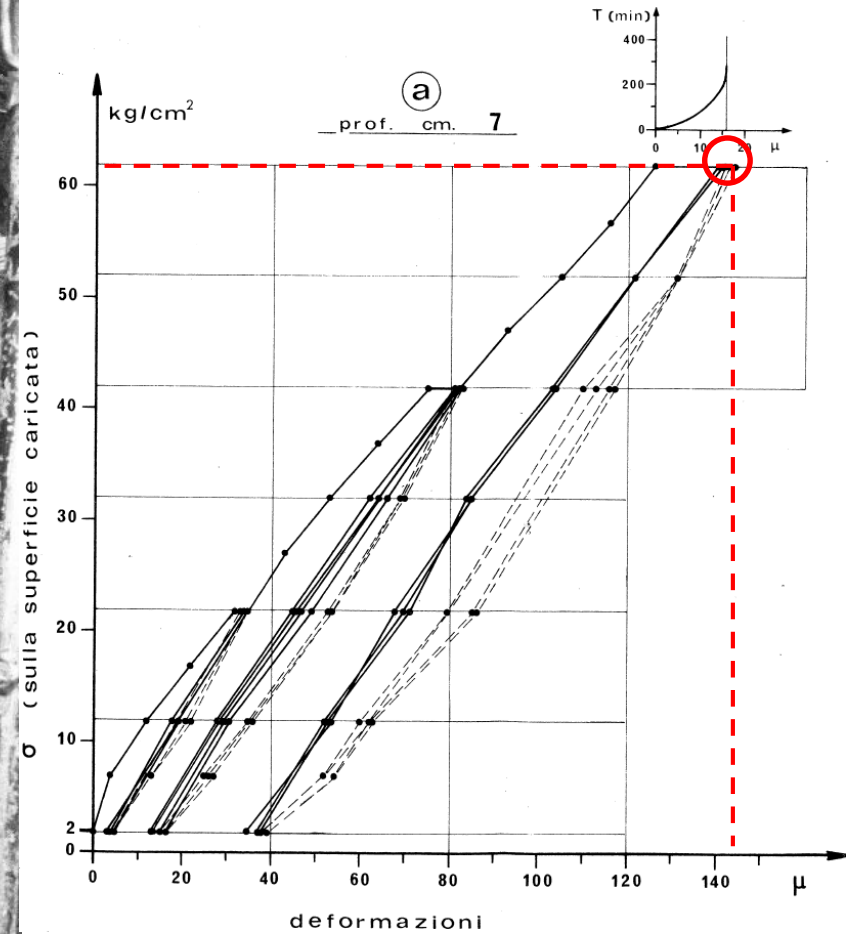






# PROVE DI CARICO SU PIASTRA

Politecnico di Torino (1977, 1981)





## Ismes (1977, 1981)

Per la misura delle deformazioni sono stati predisposti n. 4 fori radiali ( $\varnothing = 76 \text{ mm}$ ) della lunghezza di 350 cm, coassiali con l'asse del martinetto, per l'installazione al loro interno di un deformometro da foro, che consente la misura delle deformazioni a differenti profondità dalla superficie caricata.

Per ognuno di tali valori sono stati eseguiti tre o quattro cicli di carico, al valore più alto si è effettuata un'applicazione prolungata del carico per avere indicazioni su un eventuale comportamento reologico della formazione.





# PARAMETRI DI DEFORMABILITÀ DELL'AMMASSO ROCCIOSO

Modulo	Livello di carico ( kg/ cm <sup>2</sup> )	Riferim. esterni vicini		Intervallo di profondità ( cm )							
				7 - 350		25 - 350		50 - 350		100 - 350	
		AB //	CD ⊥	AB //	CD ⊥	AB //	CD ⊥	AB //	CD ⊥	AB //	CD ⊥
$\bar{E}_d$	2 - 22	-	125	199	98	275	138	211	152		
$\bar{E}_e$		-	317	217	108	325	158	241	180		
$\bar{E}_d$	2 - 42	-	121	155	77	210	117	200	130	189	134
$\bar{E}_e$		-	259	177	101	265	142	256	186	280	230
$\bar{E}_d$	2 - 62	-	118	145	78	200	118	213	130	172	136
$\bar{E}_d^*$		-	116	133	66	190	105	213	114	197	117
$\bar{E}_e$		-	256	164	102	230	142	237	171	231	182

\* I moduli in tabella sono espressi in kg/cm<sup>2</sup>

$E_d$  = modulo di deformabilità totale

$E_e$  = modulo elastico di Young

Per l'interpretazione si utilizza la teoria elastica di Boussinesq:

$$w = k_z a p \frac{1 - \nu^2}{E}$$

$w$  = cedimento [mm]

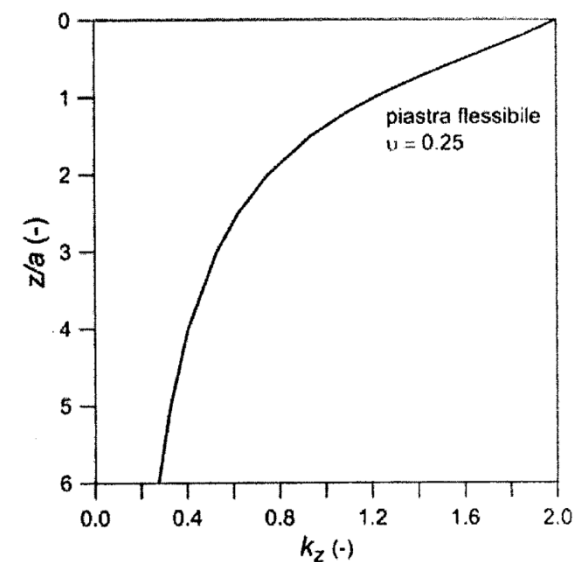
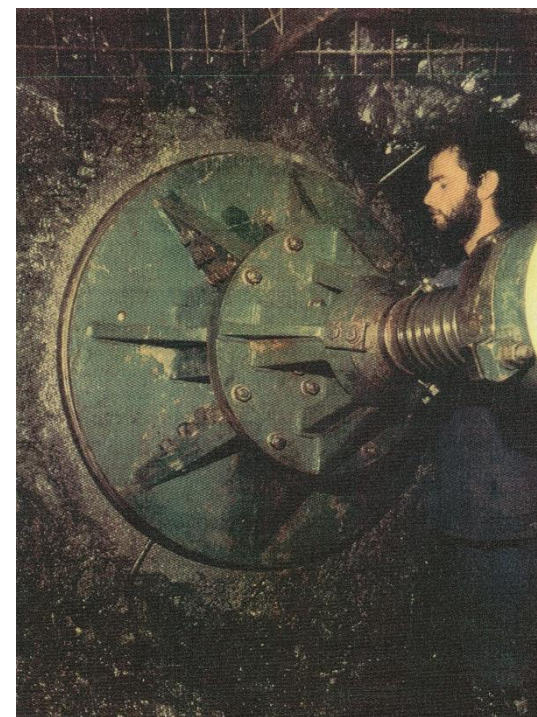
$k_z$  = coefficiente adimensionale

$a$  = raggio piastra [mm]

$p$  = pressione media sulla piastra [MPa]

$\nu$  = coefficiente di Poisson

$E$  = modulo elastico [MPa]



da Ribacchi (2018)



# PROVE DI CARICO IN CAMERA IDRAULICA

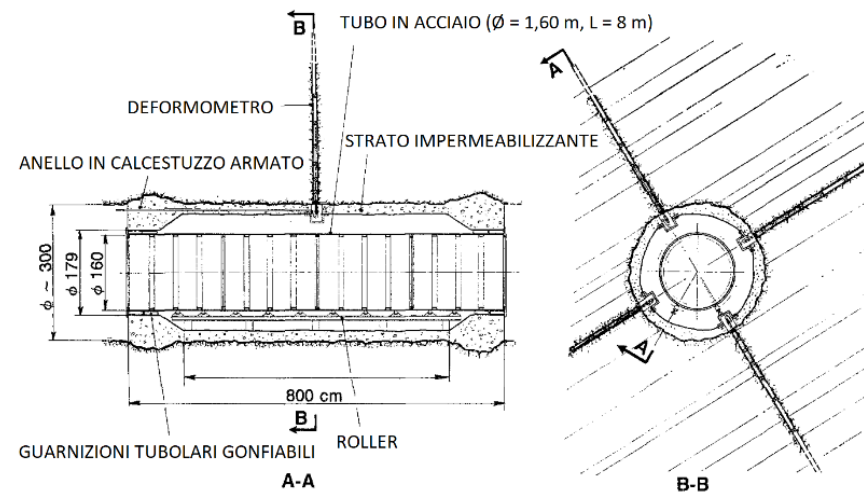
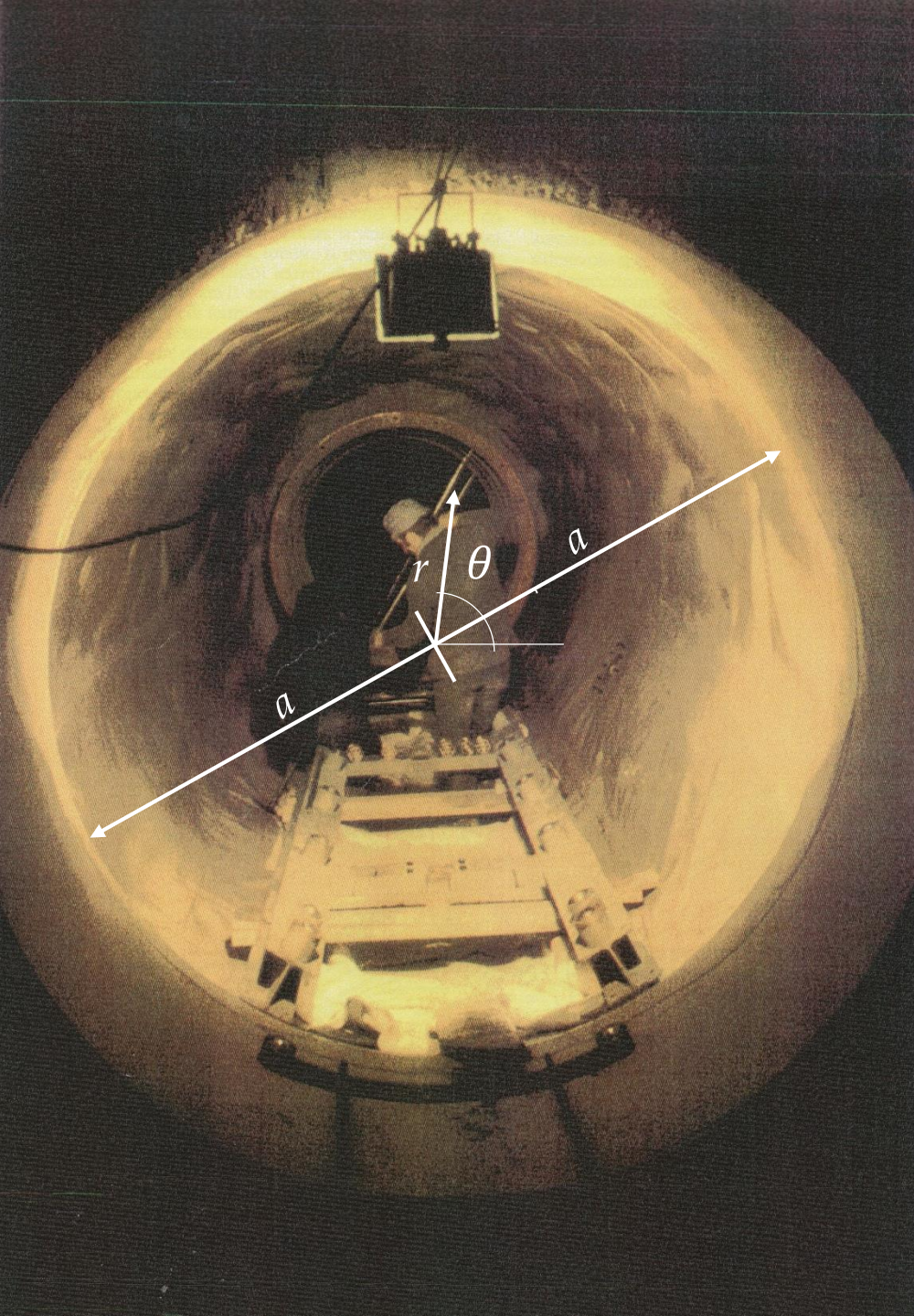
ISMES (1981)

Per l'interpretazione si utilizza l'ipotesi di galleria infinita a sezione circolare in mezzo elastico elastica

$$\sigma_r = p \left( \frac{a^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_\theta = -p \left( \frac{a^2}{r^2} \right)$$

$$u_r = \frac{p}{2G} \frac{a^2}{r} = (1 + \nu) \frac{p}{E} \frac{a^2}{r}$$





DIGA DI RIDRACOLI  
CUNICOLO SPONDA DESTRA  
PROVA CAMERA IDRAULICA

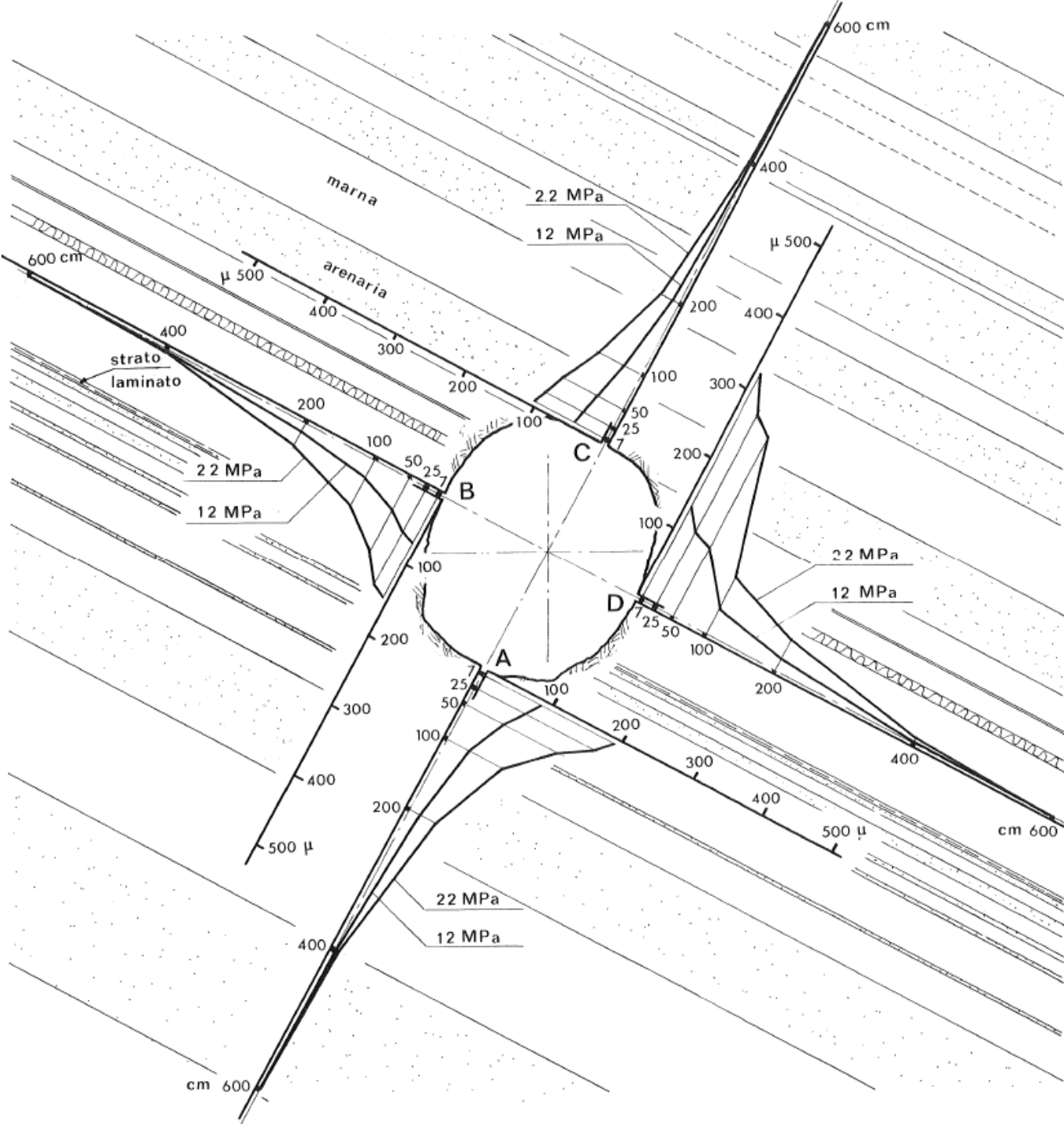
DEFORMAZIONI GLOBALI  
IN FUNZIONE DELLA  
PROFONDITÀ DALLA  
SUPERFICIE DI CARICO

PROVE DI CARICO  
IN CAMERA  
IDRAULICA

ISMES (1981)

ISMES  
BERGAMO

TAV. 60



# SINTESI DELLE PRINCIPALI RISULTANZE DELLE ANALISI GEOMECCANICHE SVOLTE A RODRACOLI

## PARAMETRI DI RESISTENZA E DEFORMABILITÀ DEL MATERIALE ROCCIOSO (LABORATORIO)

	MARNA	SILTITE	ARENARIA
c	8,0 – 15,6 MPa	11,5 – 17,6 MPa	
$\phi$	27,6° - 35,5°	31,4° - 32,5°	
$\sigma_r$	20 - 73 MPa	14 - 73 MPa	73 - 143 MPa
E	7,6 – 12,3 MPa	7,6 – 19,3 MPa	18 - 22 GPa

## PARAMETRI DI RESISTENZA DEI GIUNTI

### STRATO LAMINATO

c	0 – 0,15 MPa
$\phi$	13 °

## PARAMETRI DI DEFORMABILITÀ DELL'AMMASSO

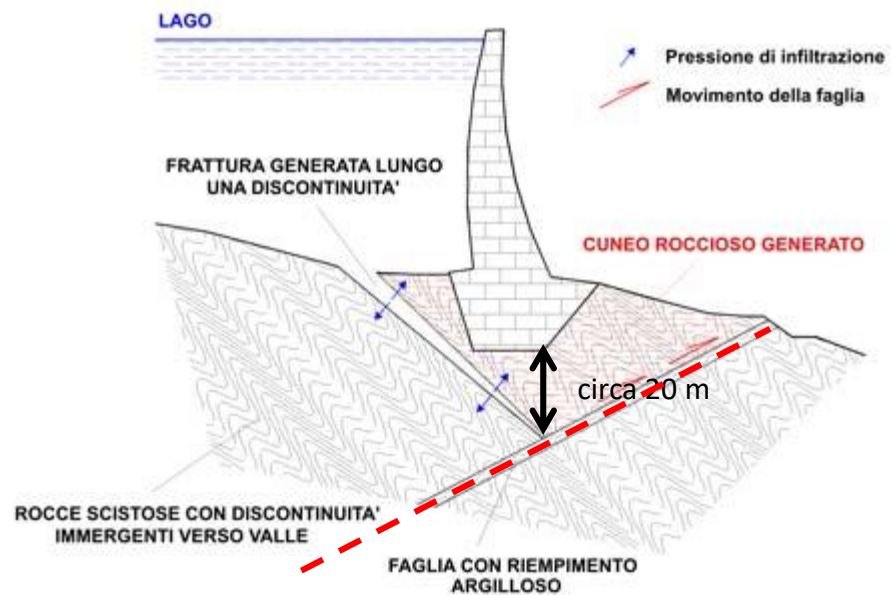
E	parallelo strati	6.400 – 14.000 MPa
E	perpendicolare strati	9.300 – 11.400 MPa

## PARAMETRI DI PERMEABILITÀ DELL'AMMASSO

K	$4 \times 10^{-7}$ m/s	sino alla profondità di 30 m dal piano campagna	prove Lugeon in fori di sondaggio verticali
K	$2 \times 10^{-7}$ m/s	sino alla profondità di 55 m dal piano campagna	prove Lugeon in fori di sondaggio verticali
K	$1 \times 10^{-7}$ m/s	per profondità maggiori	prove Lugeon in fori di sondaggio verticali
K	$5 \times 10^{-6}$ m/s	nei sistemi di discontinuità degli strati di arenaria	prove Lugeon in fori di sondaggio verticali



# IL DISASTRO DI MALPASSET e FREJUS (1959)



$H = 66 \text{ m}$

Lunghezza coronamento = 223 m

Volume invaso = 48 milioni  $\text{m}^3$

**421 morti**

PRIMA



DOPO



# PROGRAMMA DI INDAGINI PER IL PROGETTO DI UNA DIGA CON FONDAZIONI IN ROCCIA

con riferimento alla normativa tecnica vigente (NTC 2018), alla normativa specifica in materia di grandi dighe (DTM 2014) e alle raccomandazioni delle associazioni nazionali (A.G.I.: raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche-giugno 1985) e internazionale (I.S.R.M.: basic geotechnical description of rock masses-1980) di riferimento.

## METODOLOGIA DI INDAGINE GEOGNOSTICA

1. RILIEVO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DI DETTAGLIO
2. RILIEVI GEOMECCANICI IN AFFIORAMENTO
3. CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO



# PROVE IN SITO

## SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO CON DOPPIO CAROTIERE

### REGISTRAZIONE LUNGO IL SONDAGGIO DEI SOTTOINDICATI DATI:

- ❖ indicazione simbolica dei tipi di roccia (con legenda geologica);
- ❖ indice di resistenza al carico puntuale ( $I_s$ );
- ❖ recupero totale di carota (R);
- ❖ recupero di carota intera;
- ❖ frequenza (F);
- ❖ recupero percentuale modificato (RQD);
- ❖ indicazione dell'inclinazione delle principali discontinuità.

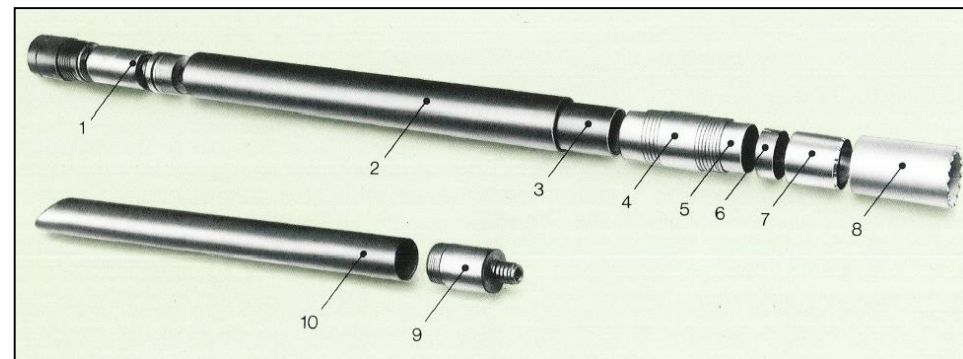
### DATI SUPPLEMENTARI:

- ❖ spaziatura (valutando il numero dei sistemi);
- ❖ rugosità;
- ❖ grado di alterazione;
- ❖ prove col martello di Schmidt (resistenza di parete, JCS)
- ❖ apertura;
- ❖ riempimento e ossidazioni ferrose.



### PROVE NEI FORI DI SONDAGGIO:

- ❖ prova pressiometrica con pressimetro Menàrd;
- ❖ prova con dilatometro;
- ❖ prova Lugeon;
- ❖ prova di inettabilità;
- ❖ misura dello stato di sollecitazione naturale:
  - metodo della liberazione delle tensioni;
  - metodo del ripristino delle tensioni;
- ❖ prova di fratturazione idraulica;
- ❖ prova di carotaggio sonico;
- ❖ prospezione sismica a rifrazione e riflessione.



# PROVE IN SITO

## PROVE NEI CUNICOLI ESPLORATIVI

### CARATTERISTICHE DI RESISTENZA:

- ❖ misure di resistenza a compressione;
- ❖ determinazione della resistenza al taglio.

### DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITÀ:

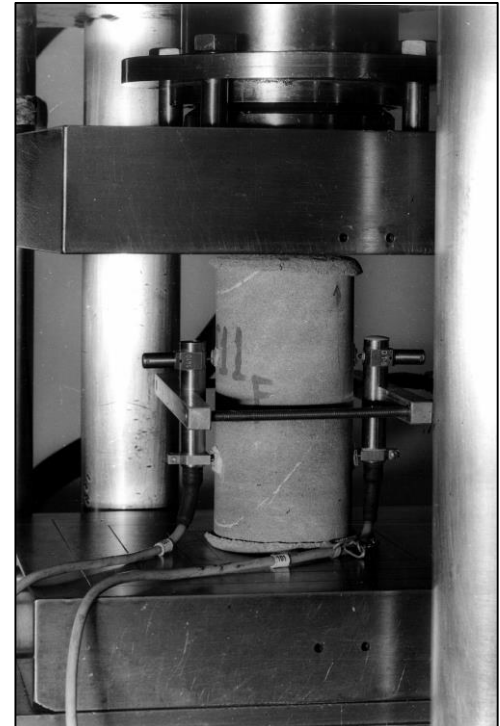
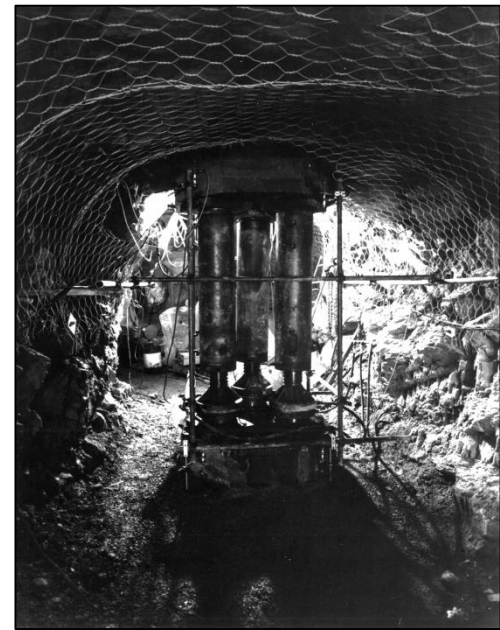
- ❖ prova di carico su piastra;
- ❖ prova della camera idraulica in pressione;
- ❖ prova con martinetto piatto.

### MISURE DELLO STATO DI SOLLECITAZIONE NATURALE:

- ❖ prova con martinetto piatto.

## PROVE DI LABORATORIO

- ❖ analisi chimiche sulle acque;
- ❖ analisi petrografiche e mineralogiche sulla roccia;
- ❖ analisi chimiche sulla roccia;
- ❖ determinazione delle proprietà fisiche (peso specifico, porosità, contenuto in acqua, coefficiente di imbibizione);
- ❖ velocità sonica;
- ❖ comportamento rigonfiante e spingente;
- ❖ prova di punzonamento;
- ❖ prova di trazione;
- ❖ prova di alterabilità;
- ❖ prova di permeabilità;
- ❖ prova di compressione monoassiale;
- ❖ prova di compressione triassiale;
- ❖ prova di taglio diretto su giunto.







Risalita dal pozzo piezometrico del  
Geologo Fabbri

# LAZZARO RISORTO



# ...ero giovane

GAME  
OVER