

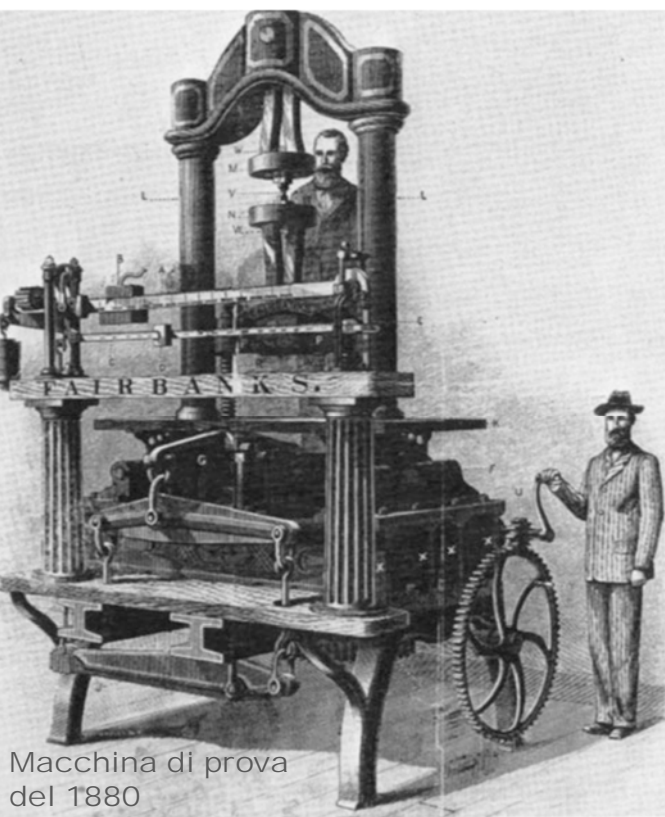
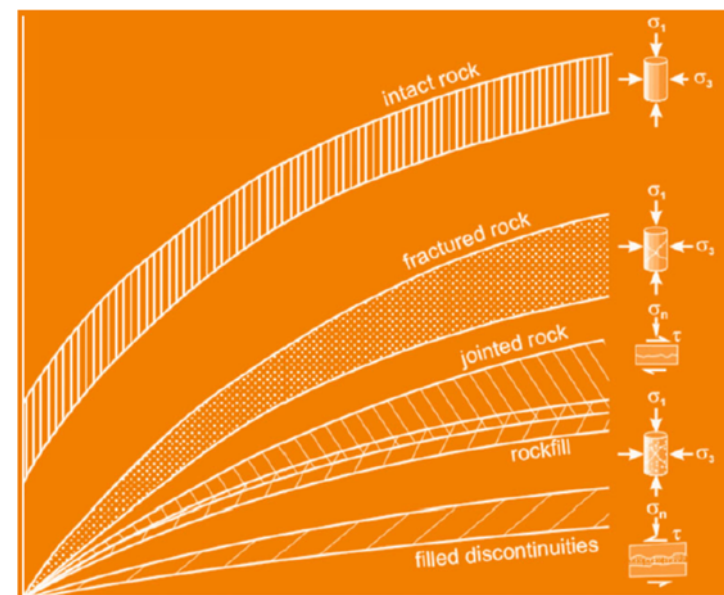


PROVE GEOMECCANICHE DI LABORATORIO

Fabio Fedrizzi

Servizio Geologico
Ufficio Studi Sismici e Geotecnici
Laboratorio Geotecnico

13 marzo 2026



Macchina di prova
del 1880



ARGOMENTI:

1) Introduzione

- **Inquadramento normativo, terminologia**

2) La matrice rocciosa

- Significato di matrice
- Variazioni delle caratteristiche della matrice (esempi di dispersione)
- Criteri di campionamento
- Valutazione preliminare dei campioni

3) Esempio di applicazione in laboratorio dei criteri di rottura

- Modello di Mohr Coulomb
- Modello Hoek e Brown

4) Le prove di laboratorio

- Prova a trazione indiretta tipo "Brasiliana"
- Point load test e sclerometro
- Compressione monoassiale
- Compressione triassiale
- Le misure di deformazione
- Prova di taglio con apparecchio di Hoek
- Misura della velocità ultrasonica delle onde elastiche

5) Determinazione dei parametri geomeccanici

- Valutazione preliminare qualitativa dei provini in base a misura V_p
- Scelta del dominio delle pressioni di confinamento nelle triassiali
- Procedura per la determinazione dei coefficienti di Hoek
- Moduli e coefficienti elastici



1. – INTRODUZIONE - Inquadramento normativo, terminologia

NTC 2018 Norme tecniche per le costruzioni

Capitolo 6 – Progettazione geotecnica

6.2.2 Indagini, caratterizzazione e modellazione geotecnica

[...]

I valori caratteristici delle proprietà fisiche e meccaniche da attribuire ai terreni devono essere dedotti dall'interpretazione dei **risultati di specifiche prove di laboratorio su campioni rappresentativi di terreno** e di prove e misure in sito.

[...]

Le prove di laboratorio, sulle terre e sulle rocce, devono essere eseguite e certificate dai laboratori di prova di cui all'art. 59 del DPR 6 giugno 2001, n. 380. I laboratori su indicati fanno parte dell'elenco depositato presso il Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

D.P.R. 380 / 2001 e s.m.

Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia di edilizia

Art. 52 (L) - Tipo di strutture e norme tecniche

1. In tutti i comuni della Repubblica le costruzioni sia pubbliche sia private debbono essere realizzate in osservanza delle norme tecniche riguardanti i vari elementi costruttivi [...].

Dette norme definiscono:

a) [...]

b) [...]

c) **le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le precisazioni tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione;** [...]

Art. 59 Laboratori

1. [...]

2. Il Ministero delle infrastrutture e dei trasporti può autorizzare, con proprio decreto, ai sensi del presente capo, altri laboratori ad effettuare:

a) prove sui materiali da costruzione;

b) (lettera soppressa)

c) **prove di laboratorio su terre e rocce;**

c-bis) prove e controlli su materiali da costruzione su strutture e costruzioni esistenti. (lettera aggiunta dall'art. 3, comma 1, legge n. 55 del 2019)

3. L'attività dei laboratori, ai fini del presente capo, è servizio di pubblica utilità.

Circolare Ministeriale 7618/STC dell' 8 settembre 2010

Criteri per il rilascio dell'autorizzazione ai Laboratori per l'esecuzione e certificazione di prove su terre e **rocce** di cui all'art. 59 del DPR 380/2001



1. – INTRODUZIONE - Inquadramento normativo, terminologia



Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
Presidenza del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

Circolare 08 settembre 2010, n. 7618 / STC

Criteria per il rilascio dell'autorizzazione ai *Laboratori per l'esecuzione e certificazione di prove su terre e rocce* di cui all'art. 59 del D.P.R. n. 380/2001.

1 – Disposizioni generali

1.1 – Campo di applicazione

Con riferimento al disposto del comma 2 dell'art. 59 del DPR n. 380 del 6 giugno 2001 nonché alle vigenti norme tecniche sulle costruzioni, le autorizzazioni disciplinate dalla presente Circolare riguardano i seguenti settori di prova e certificazione:

- **Settore A**
Comprendente le prove sulle terre
- **Settore B**
Comprendente le prove sulle rocce

La richiesta di autorizzazione per un laboratorio potrà riguardare uno o entrambi i settori sopra indicati.



1. – INTRODUZIONE - Inquadramento normativo, terminologia

Circolare Ministeriale 7618/STC 8 settembre 2010 – AUTORIZZAZIONE LABORATORI GEOTECNICI COSA STABILISCE?



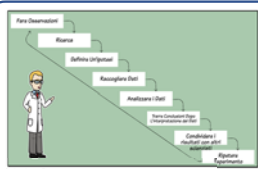
la competenza tecnica del direttore e degli sperimentatori



le garanzie di qualità;
di riservatezza e sicurezza;
di imparzialità, indipendenza e integrità



come fare la taratura degli strumenti



metodi di prova da adottare e le procedure



come devono essere i certificati di prova



la dotazione strumentale e i requisiti minimi



un elenco definito di tipologie di prove che il laboratorio deve condurre e certificare



l'iter amministrativo (verbale di accettazione, registro, archivio, ...)



di operare secondo il Sistema Qualità ISO 9001 e secondo un Manuale della Qualità, redatto anche secondo la EN 17025



di certificare il proprio Sistema Qualità ISO 9001

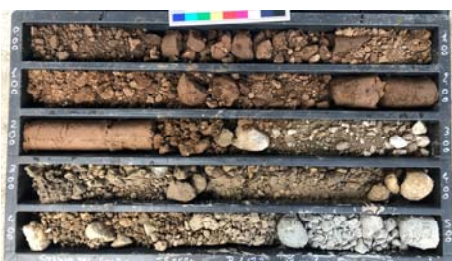


1. – INTRODUZIONE - Inquadramento normativo, terminologia

ALCUNE DEFINIZIONI

AGI:

Terra: materiale naturale formato da aggregati di granuli non legati tra loro o che possono essere separati per mezzo di modeste sollecitazioni o per mezzo di più o meno prolungato contatto con acqua.
(AGI 1977)



Roccia: materiale naturale che in campioni fuori dalla sua sede è dotato di elevata coesione anche dopo prolungato contatto con acqua
(AGI 1977)



Terreno: terra o roccia nella sua sede naturale
(AGI 1977)



UNI EN (ISO)

Soil: assemblage of mineral particles and/or organic matter in the form of a deposit but sometimes of organic origin, which can be separated by gentle mechanical means and which includes variable amounts of water and air (and sometimes other gases).
(UNI EN ISO 14688-1)

Rock: naturally occurring assemblage of minerals, consolidated, cemented, or otherwise bonded together, forming material generally stronger or stiffer than soils.
(UNI EN ISO 14689-2)

Ground: soil, rock and fill in place prior to the execution of the construction works;
(UNI EN 1997-1 Eurocodice 7: Progettazione geotecnica 1.5.2.3)



ARGOMENTI:

1) Introduzione

- Inquadramento normativo, terminologia

2) La matrice rocciosa

- Significato di matrice
- Variazioni delle caratteristiche della matrice (esempi di dispersione)
- Criteri di campionamento
- Valutazione preliminare dei campioni

3) Esempio di applicazione in laboratorio dei criteri di rottura

- Modello di Mohr Coulomb
- Modello Hoek e Brown

4) Le prove di laboratorio

- Prova a trazione indiretta tipo “Brasiliiana”
- Point load test e sclerometro
- Compressione monoassiale
- Compressione triassiale
- Le misure di deformazione
- Prova di taglio con apparecchio di Hoek
- Misura della velocità ultrasonica delle onde elastiche

5) Determinazione dei parametri geomeccanici

- Valutazione preliminare qualitativa dei provini in base a misura V_p
- Scelta del dominio delle pressioni di confinamento nelle triassiali
- Procedura per la determinazione dei coefficienti di Hoek
- Moduli e coefficienti elastici



2. – LA MATRICE ROCCIOSA – Significato di matrice

PROVE IN LABORATORIO: TERRE vs ROCCE

TERRE → **Meccanica del continuo
(volume elementare rappresentativo)** →

il campionamento e la preparazione dei provini è più facile sui terreni fini, dove meglio si applica la meccanica del continuo

(SI PUÒ INDAGARE LA PARTE PIÙ «SCADENTE»)



ROCCE → **Ogni provino è un campione
(elemento discreto)** →

il campionamento e la preparazione dei provini selezionano la parte più intatta dell'ammasso roccioso (c'è una sorta di selezione darwiniana: le parti da sottoporre a prova sono quelle che sono resistenti al carotaggio e alla rettifica)

(SI PUÒ INDAGARE SOLO LA PARTE MIGLIORE, riferita alla c.d. matrice rocciosa)





2. – LA MATRICE ROCCIOSA – Significato di matrice

PROVE IN LABORATORIO SU ROCCE: il contributo del laboratorio

Il contributo del laboratorio per la descrizione quantitativa dell'ammasso roccioso è molto ridotto rispetto alle prove sui terreni

Discontinuità



Prove di taglio sui giunti
(dati estremamente puntuali
e a scala molto ridotta)



Roccia intatta



Prove di compressione e
trazione indiretta sui provini
sopravvissuti al
campionamento, riferibili alla
matrice rocciosa





2. – LA MATRICE ROCCIOSA – Significato di matrice





2. – LA MATRICE ROCCIOSA – Significato di matrice

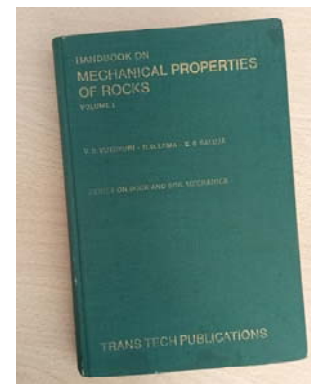


CHAPTER 1

Specimen Preparation for Laboratory Tests

1.1. Introduction

Proper sampling of the rock mass and preparation of specimens require considerable care and effort. The samples collected must truly represent the parent body. The preparation of specimens takes up much of the time allocated for tests. Often the results are widely scattered. This poses the problem as to how many specimens are required for the test.



V.S. Vutukuri, R.D. Lama, S.S. Saluja
Handbook on Mechanical Properties of Rocks –
Volume I – Trans Tech Publications
First Edition 1974 page 1



2. – LA MATRICE ROCCIOSA – Significato di matrice





2. – LA MATRICE ROCCIOSA – Significato di matrice



MONOASSIALE O TRIASSIALE



MONOASSIALI O TRIASSIALI



BRASILIANA

MONOASSIALE O TRIASSIALE



MONOASSIALE O TRIASSIALE BRASILIANA



ARGOMENTI:

1) Introduzione

- Inquadramento normativo, terminologia

2) La matrice rocciosa

- Significato di matrice
- Variazioni delle caratteristiche della matrice (esempi di dispersione)
- Criteri di campionamento
- Valutazione preliminare dei campioni

3) Esempio di applicazione in laboratorio dei criteri di rottura

- Modello di Mohr Coulomb**
- Modello Hoek e Brown**

4) Le prove di laboratorio

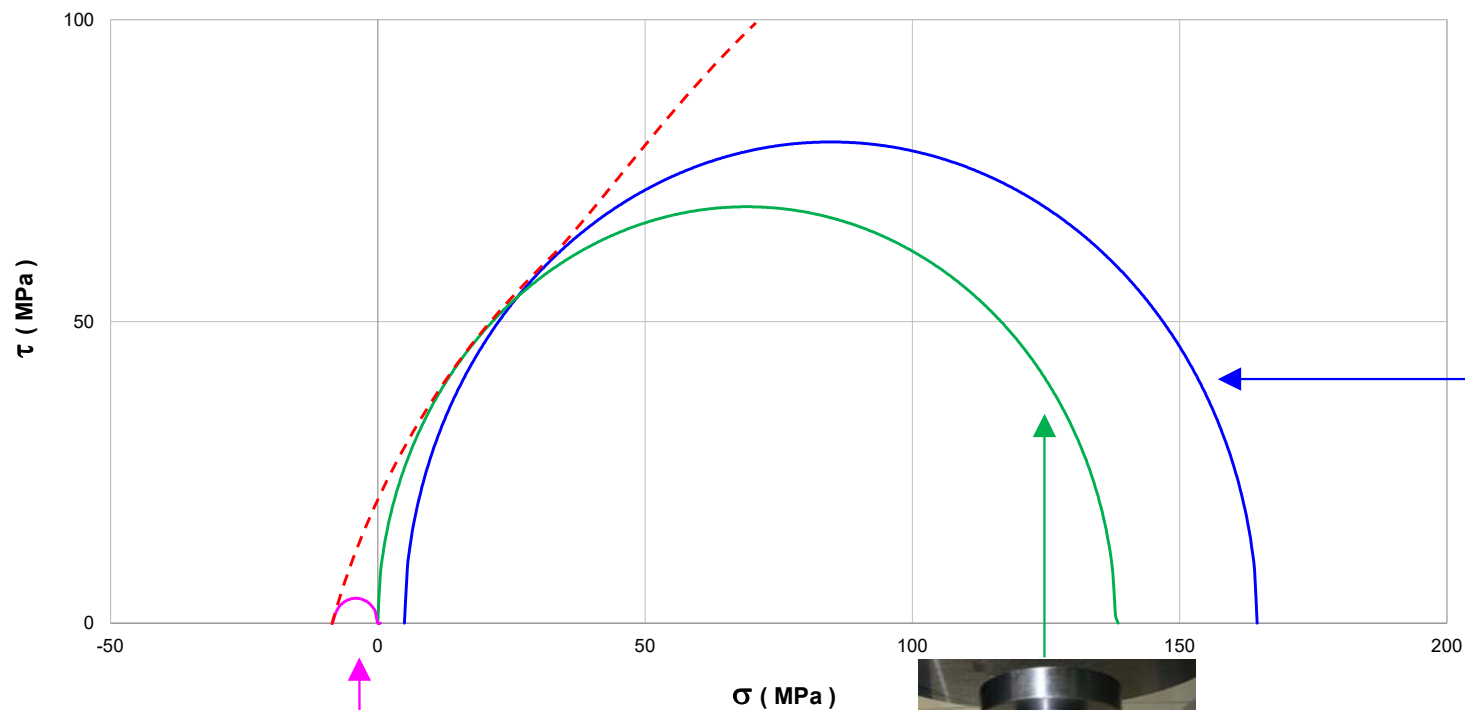
- Prova a trazione indiretta tipo “Brasiliiana”
- Point load test e sclerometro
- Compressione monoassiale
- Compressione triassiale
- Le misure di deformazione
- Prova di taglio con apparecchio di Hoek
- Misura della velocità ultrasonica delle onde elastiche

5) Determinazione dei parametri geomeccanici

- Valutazione preliminare qualitativa dei provini in base a misura V_p
- Scelta del dominio delle pressioni di confinamento nelle triassiali**
- Procedura per la determinazione dei coefficienti di Hoek
- Moduli e coefficienti elastici



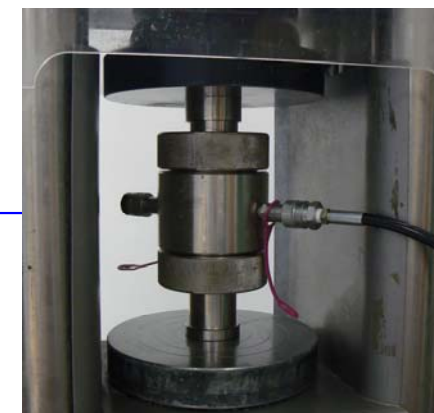
3. – BREVE CENNO AI CRITERI DI ROTTURA – Modello di Mohr Coulomb



TRAZIONE INDIRETTA



COMPRESSIONE UNIASSIALE



COMPRESSIONE TRIASSIALE

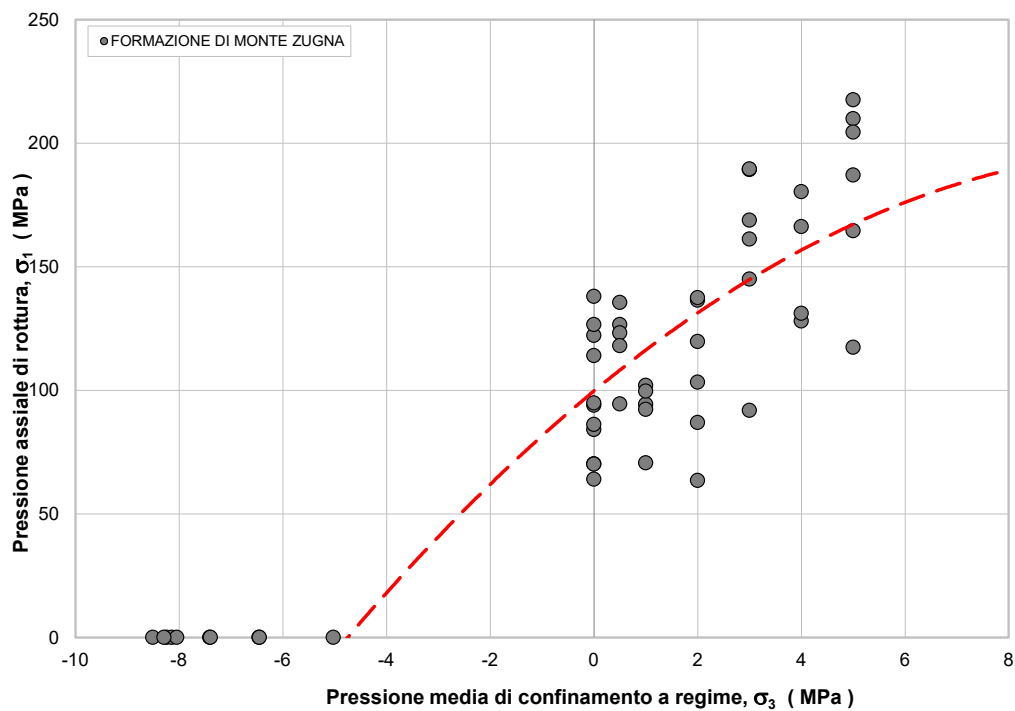


3. – BREVE CENNO AI CRITERI DI ROTTURA – Modello di Mohr Coulomb



ISRM 1983 Suggested Methods for Triaxial Compression Testing

[...] envelopes can be obtained [...] by fitting curve through the individual data points.





3. – BREVE CENNO AI CRITERI DI ROTTURA – Modello di Mohr Coulomb

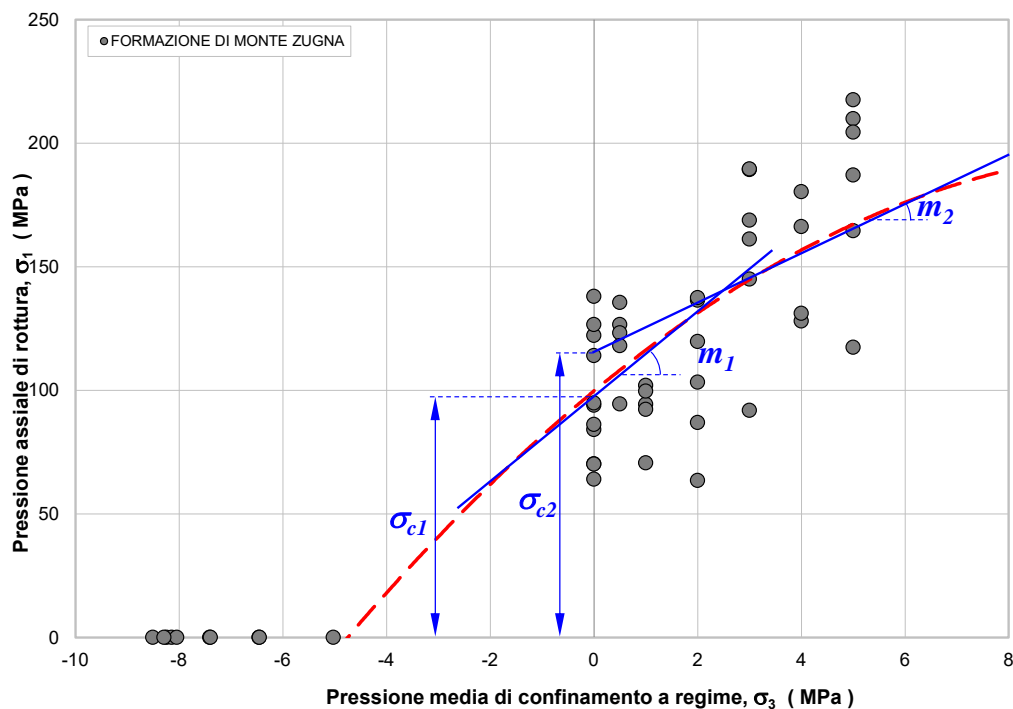


ISRM 1983 Suggested Methods for Triaxial Compression Testing

[...] envelopes can be obtained [...] by fitting curve through the individual data points. The peak strength envelope can be approximated mathematically by linear or, if required, bilinear expressions according to $\sigma_1 = m \sigma_3 + \sigma_c$. The position of the straight lines is fixed by the ordinate σ_c , the tangent of the slope angle m and the range of confining pressure to which they apply.

Using parameters m and σ_c , the internal friction angle ϕ and value for the «hypothetical» or «apparent» cohesion c (in the sense of Coulomb's failure theory), may be calculated from:

$$\phi_i = \arcsin \frac{m - 1}{m + 1} \quad c_i = \sigma_c \frac{1 - \sin \phi_i}{2 \cos \phi_i}$$





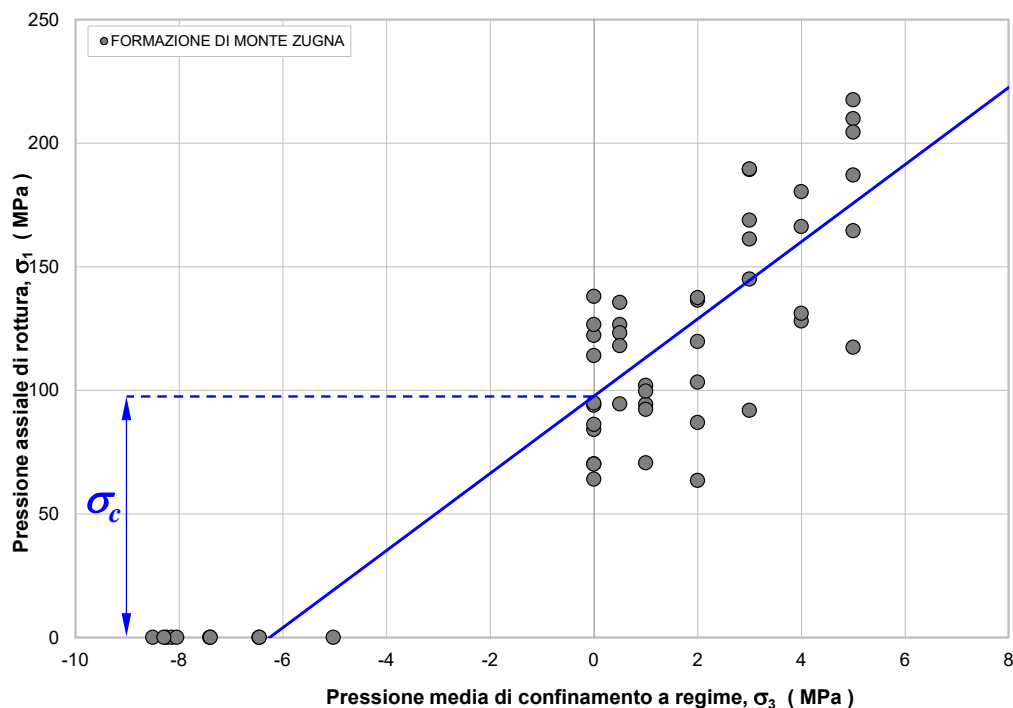
3. – BREVE CENNO AI CRITERI DI ROTTURA – Modello di Mohr Coulomb

ISRM 1983 Suggested Methods for Triaxial Compression Testing

[...] envelopes can be obtained [...] by fitting curve through the individual data points. The peak strength envelope can be approximated mathematically by linear or, if required, bilinear expressions according to $\sigma_1 = m \sigma_3 + \sigma_c$. The position of the straight lines is fixed by the ordinate σ_c , the tangent of the slope angle m and the range of confining pressure to which they apply.

Using parameters m and σ_c , the internal friction angle ϕ and value for the «hypothetical» or «apparent» cohesion c (in the sense of Coulomb's failure theory), may be calculated from:

$$\phi_i = \arcsin \frac{m - 1}{m + 1} \quad c_i = \sigma_c \frac{1 - \sin \phi_i}{2 \cos \phi_i}$$





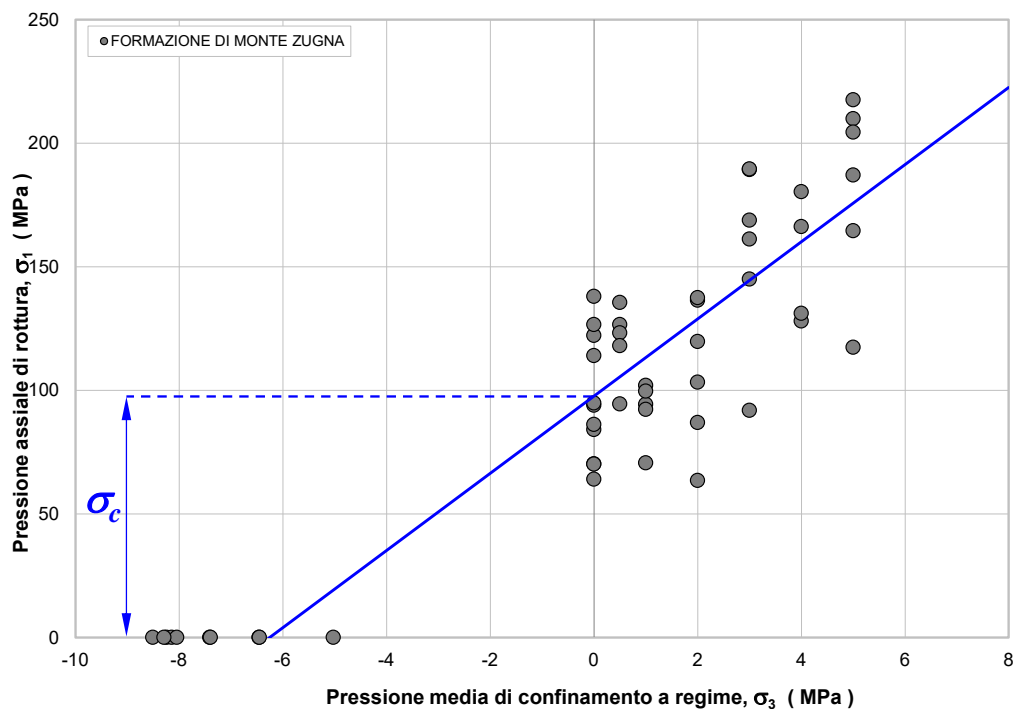
3. – BREVE CENNO AI CRITERI DI ROTTURA – Modello di Mohr Coulomb

ISRM 1983 Suggested Methods for Triaxial Compression Testing

[...] envelopes can be obtained [...] by fitting curve through the individual data points. The peak strength envelope can be approximated mathematically by linear or, if required, bilinear expressions according to $\sigma_1 = m \sigma_3 + \sigma_c$. The position of the straight lines is fixed by the ordinate σ_c , the tangent of the slope angle m and the range of confining pressure to which they apply.

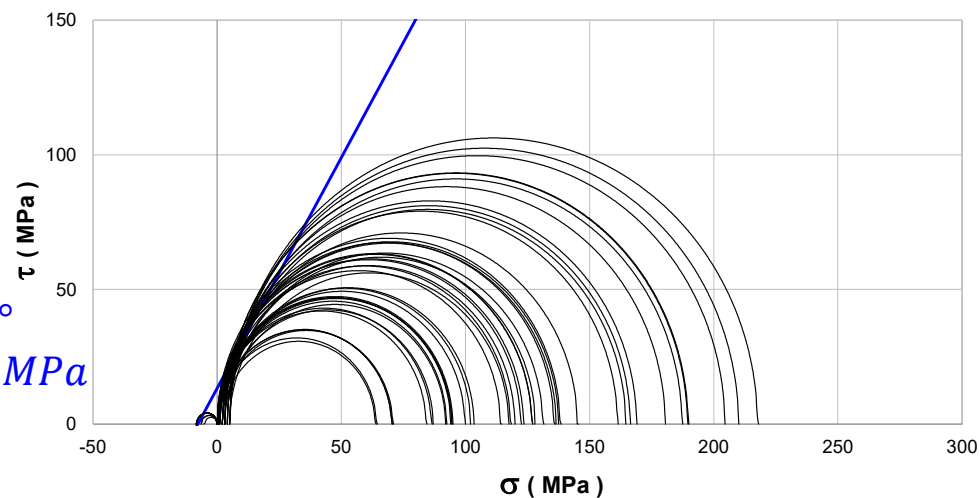
Using parameters m and σ_c , the internal friction angle ϕ and value for the «hypothetical» or «apparent» cohesion c (in the sense of Coulomb's failure theory), may be calculated from:

$$\phi_i = \arcsin \frac{m - 1}{m + 1} \quad c_i = \sigma_c \frac{1 - \sin \phi_i}{2 \cos \phi_i}$$



$$\phi = 59,9^\circ$$

$$c = 13,4 \text{ MPa}$$



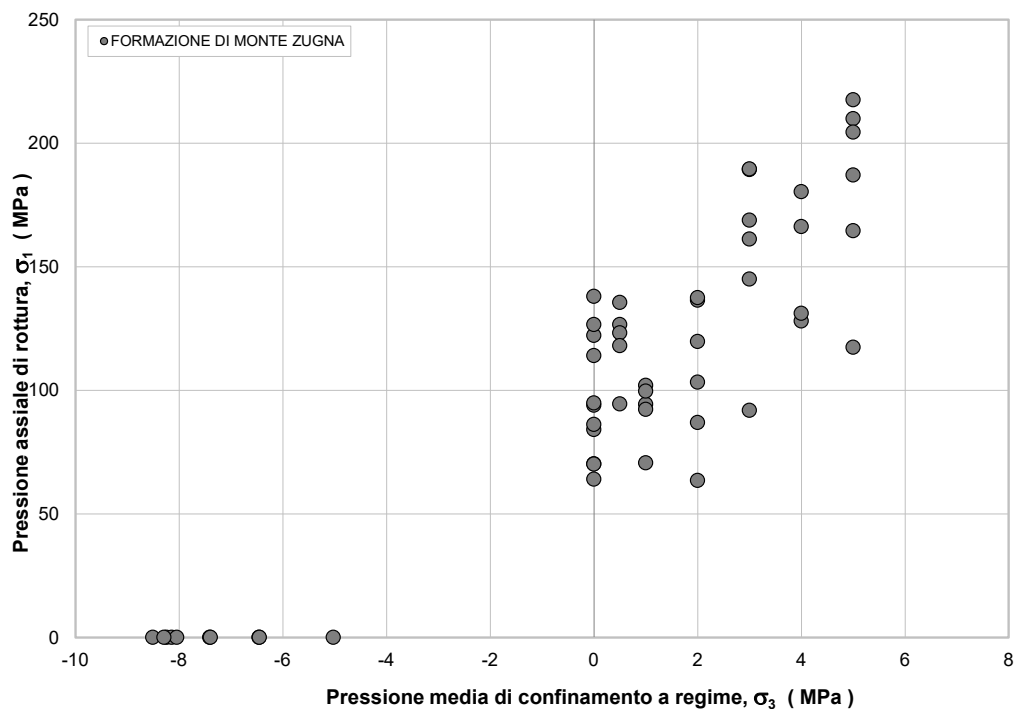
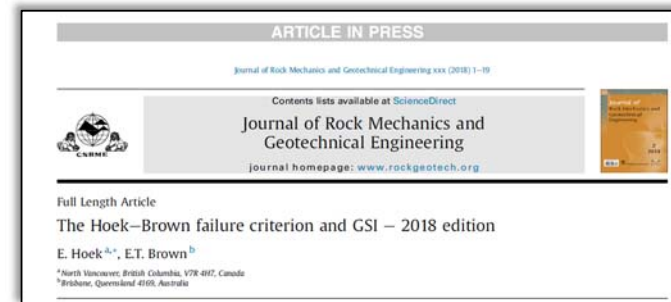


3. – BREVE CENNO AI CRITERI DI ROTTURA – Modello Hoek e Brown



Equazione empirica per interpolare i risultati di una vasta gamma di campioni di roccia intatta (Hoek and Brown, 1980 a, b):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}$$

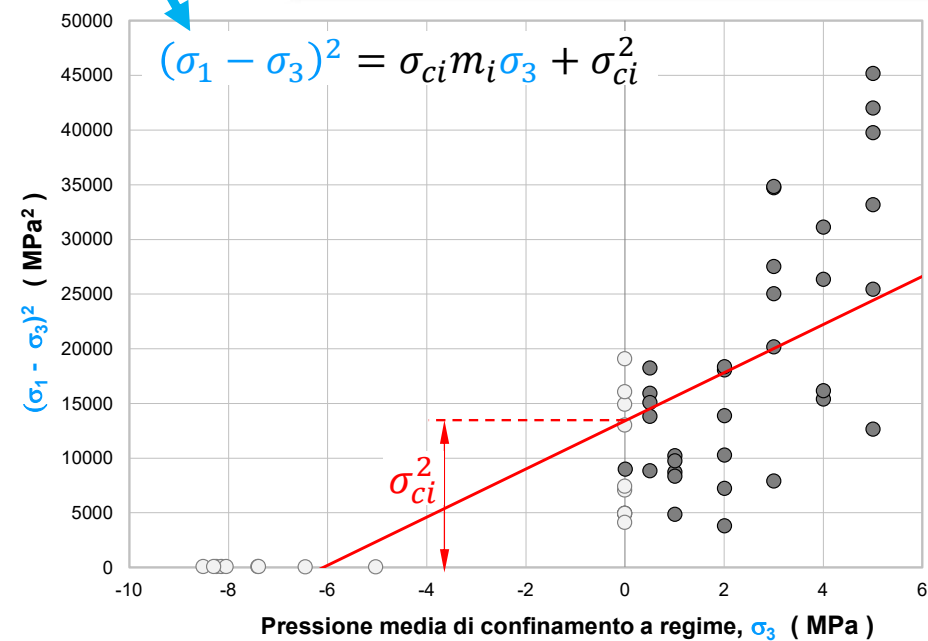
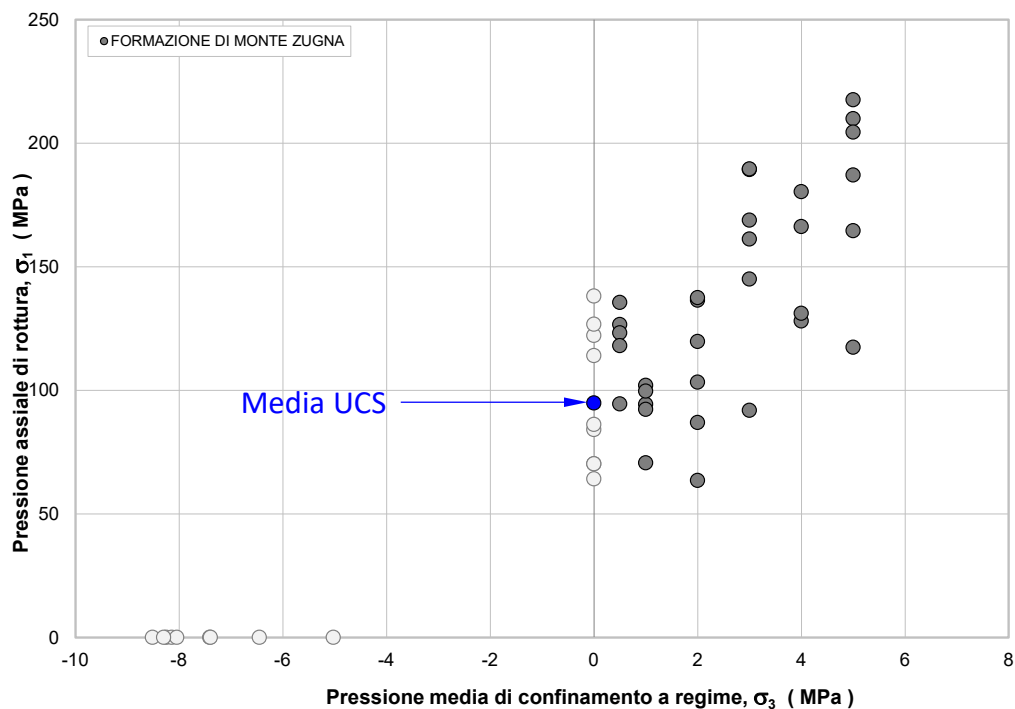




3. – BREVE CENNO AI CRITERI DI ROTTURA – Modello Hoek e Brown

Equazione empirica per interpolare i risultati di una vasta gamma di campioni di roccia intatta (Hoek and Brown, 1980 a, b):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}$$

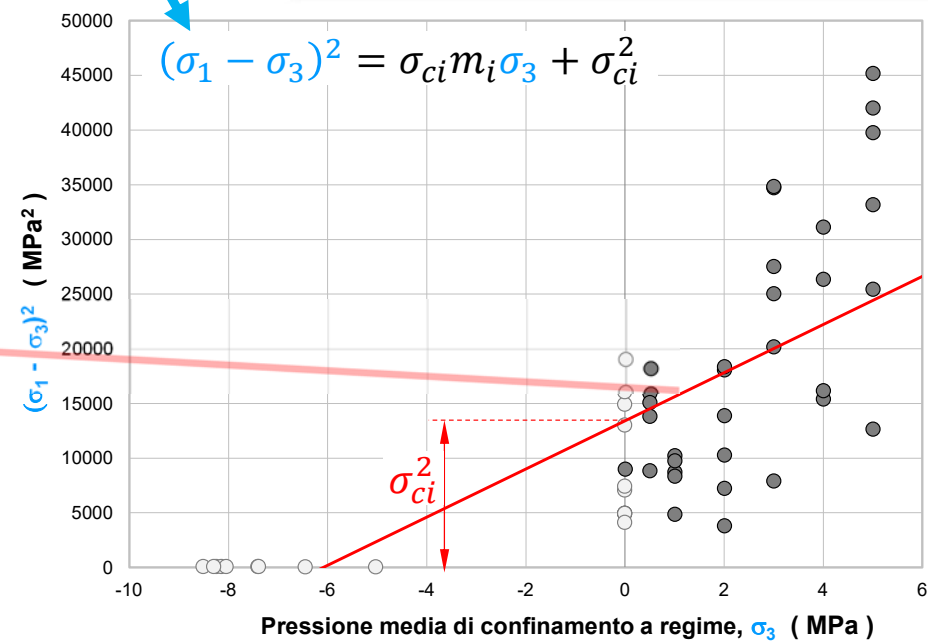
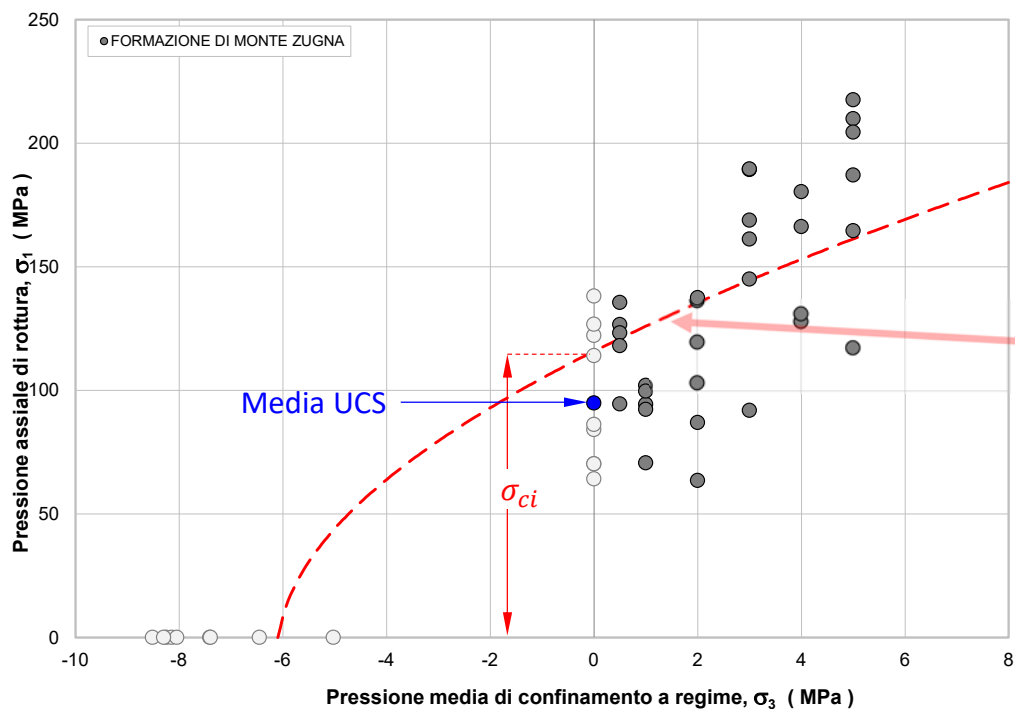




3. – BREVE CENNO AI CRITERI DI ROTTURA – Modello Hoek e Brown

Equazione empirica per interpolare i risultati di una vasta gamma di campioni di roccia intatta (Hoek and Brown, 1980 a, b):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}$$



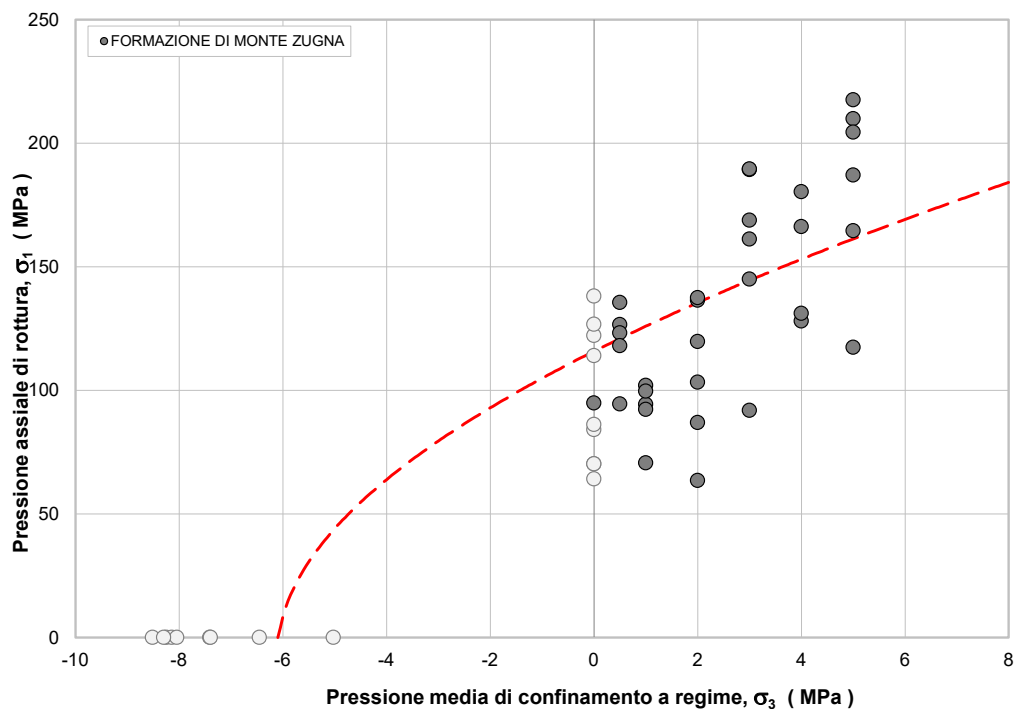


3. – BREVE CENNO AI CRITERI DI ROTTURA – Modello Hoek e Brown



Equazione empirica per interpolare i risultati di una vasta gamma di campioni di roccia intatta (Hoek and Brown, 1980 a, b):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}$$



Critero generalizzato di Hoek e Brown per la stima della resistenza dell'ammasso roccioso (Hoek, 1994 a Hoek et al., 1995)

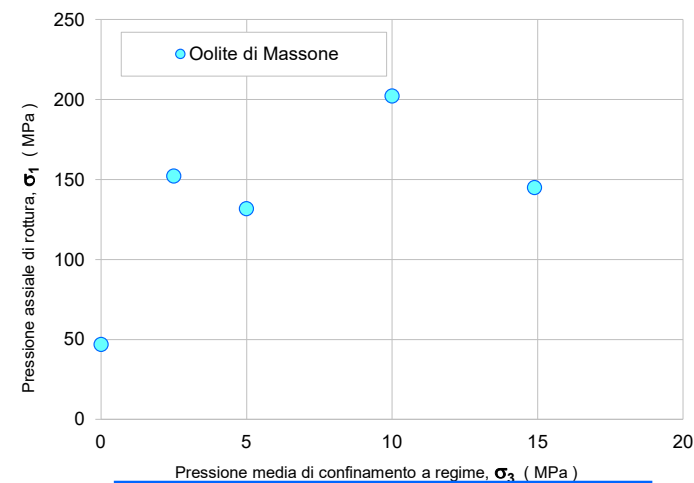
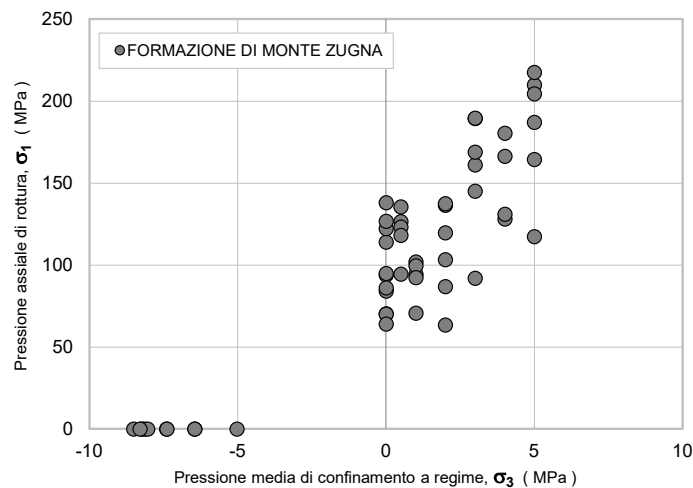
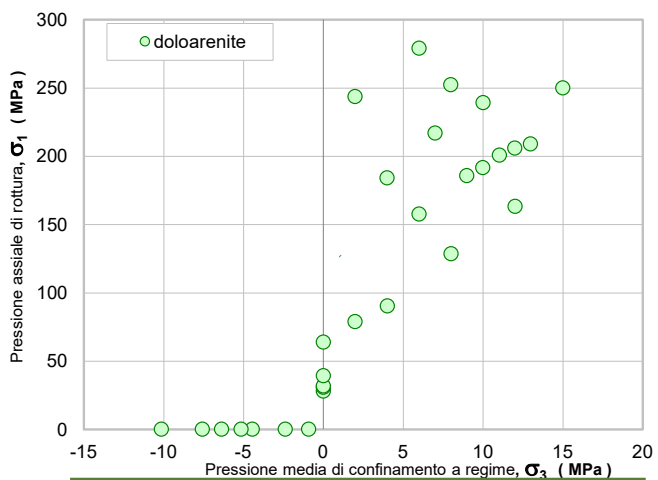
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \rightarrow \text{stima di GSI} \quad (m_b, s, a = f(\text{GSI}; D))$$





3. – BREVE CENNO AI CRITERI DI ROTTURA – Esempi di dispersione dei valori

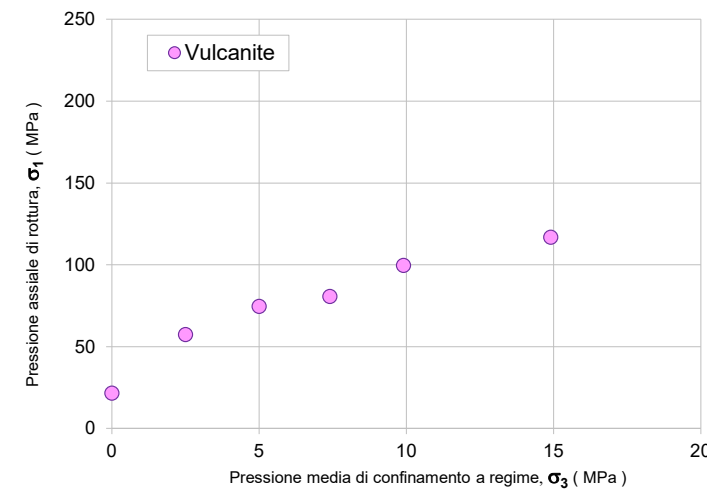
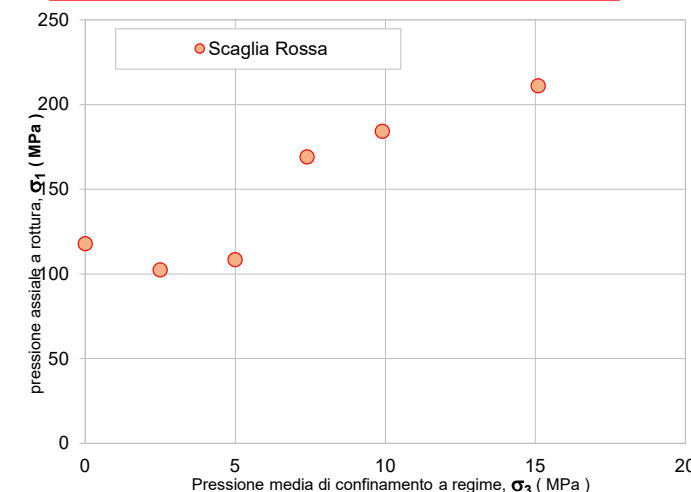
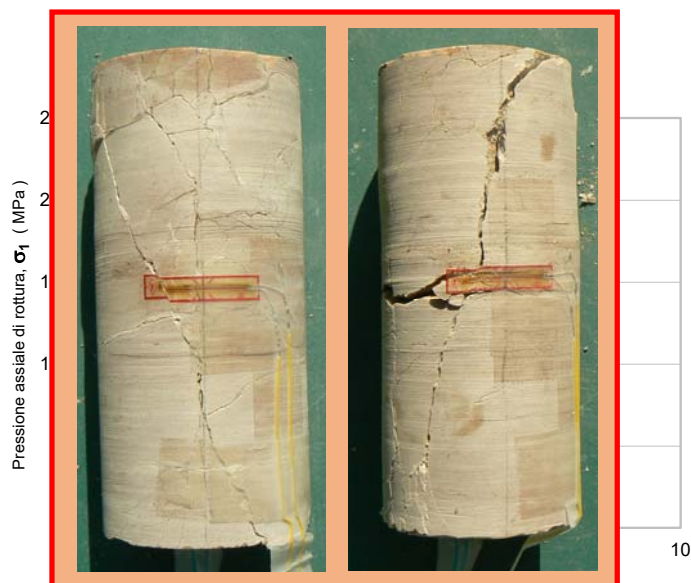
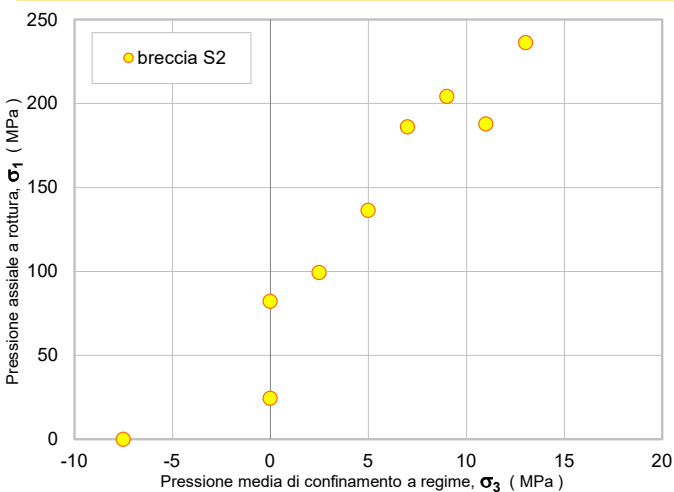
Esempi di dispersione dei valori di rottura:





3. – BREVE CENNO AI CRITERI DI ROTTURA – Esempi di dispersione dei valori

Esempi di dispersione dei valori di rottura:





ARGOMENTI:

1) Introduzione

- Inquadramento normativo, terminologia

2) La matrice rocciosa

- Significato di matrice
- Variazioni delle caratteristiche della matrice (esempi di dispersione)
- Criteri di campionamento
- Valutazione preliminare dei campioni

3) Esempio di applicazione in laboratorio dei criteri di rottura

- Modello di Mohr Coulomb
- Modello Hoek e Brown

4) Le prove di laboratorio

- Prova a trazione indiretta tipo "Brasiliana"
- Point load test e sclerometro
- Compressione monoassiale
- Compressione triassiale
- Le misure di deformazione
- Prova di taglio con apparecchio di Hoek
- Misura della velocità ultrasonica delle onde elastiche

5) Determinazione dei parametri geomeccanici

- Valutazione preliminare qualitativa dei provini in base a misura V_p
- Scelta del dominio delle pressioni di confinamento nelle triassiali
- Procedura per la determinazione dei coefficienti di Hoek
- Moduli e coefficienti elastici



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Prova a trazione indiretta tipo «Brasiliana»

Obiettivo: determinazione della resistenza a trazione di un materiale roccioso.

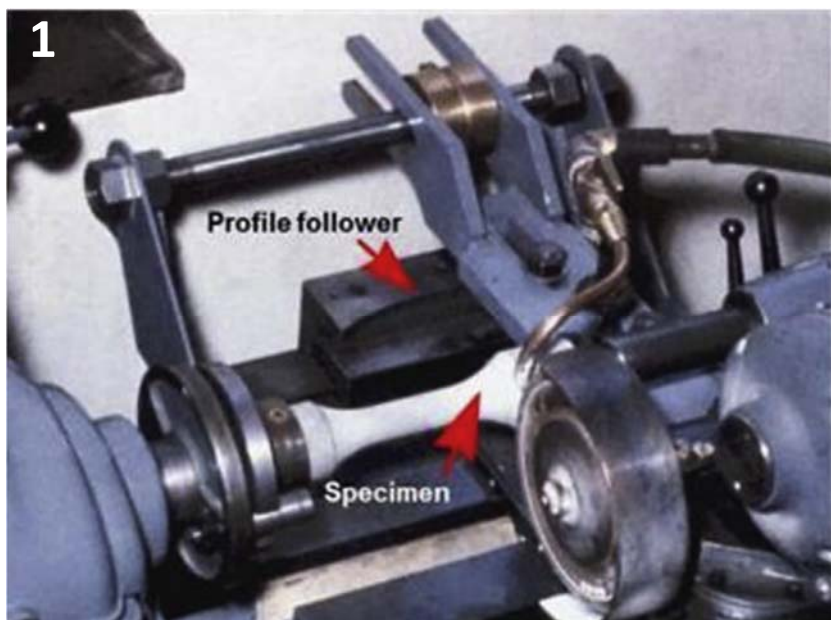


Immagine tratta da «The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition» E. Hoek, E.T. Brown /Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering xxx (2018) 1-19, pag. 18



Immagine tratta da «Alternative Approaches for the Determination of Unconfined Rock Deformation and Strength Properties» Thomas Stoxreiter, Paul Gehwolf, Robert Galler/Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (2020) 53:411-433

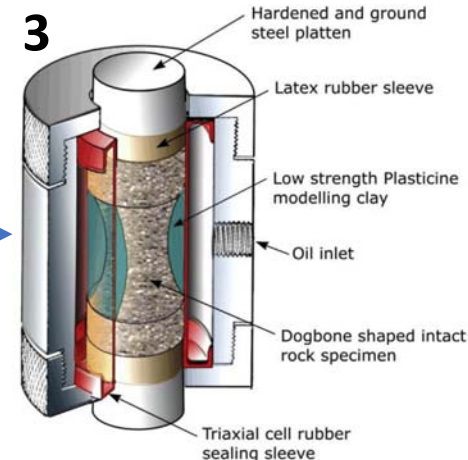


Immagine tratta da «The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition» E. Hoek, E.T. Brown /Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering xxx (2018) 1-19, pag. 18

Perché si preferisce la trazione indiretta?

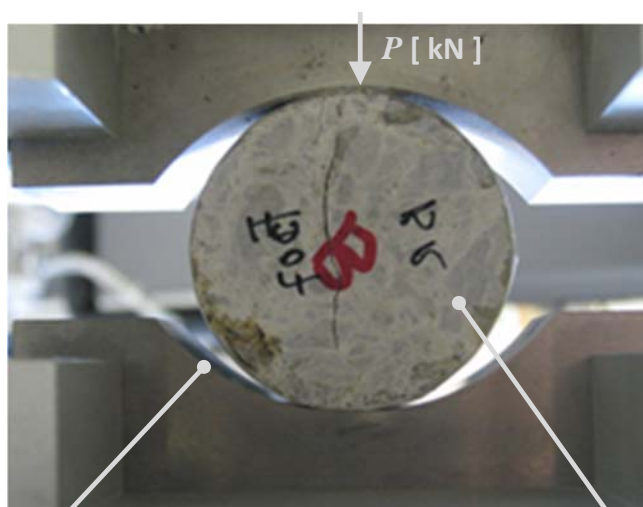
1. Troppo difficile realizzare provini sagomati («dogbone specimens»), eventualmente solo per rocce isotrope
2. Necessità di realizzare la prova con una macchina dedicata oppure
3. Difficoltà di utilizzo della cella di Hoek (tenuta del manicotto, «plastilina da modellare a bassa resistenza», ...)



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Prova a trazione indiretta tipo «Brasiliana»

ISRM 1978 Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials
PART 2: SUGGESTED METHOD FOR DETERMINING INDIRECT TENSILE STRENGTH BY THE BRAZIL TEST

ASTM D 3967 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens
(5.2.1 Flat Bearing Blocks - 5.2.2. Curved Bearing Blocks)



Reggio della ganascia = 1,5 raggio provino

PROVINO, raggio minimo 54 mm (NX)
Spessore ≈ Raggio



D

RESISTENZA A TRAZIONE DEL PROVINO:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt}$$

DOVE P = CARICO DI ROTTURA

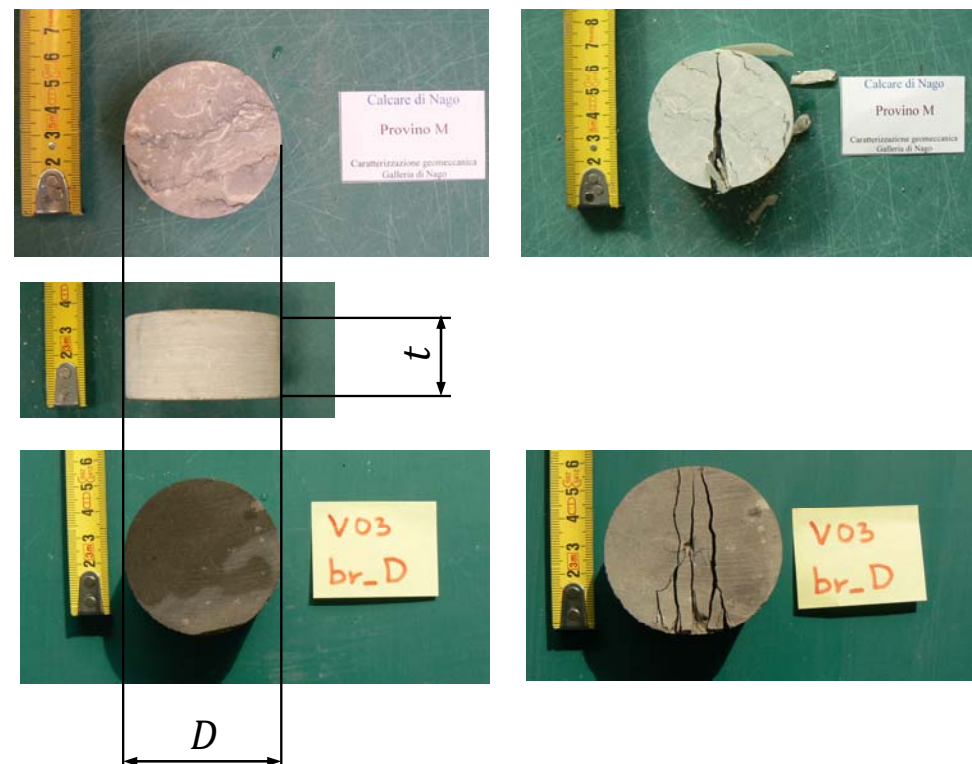
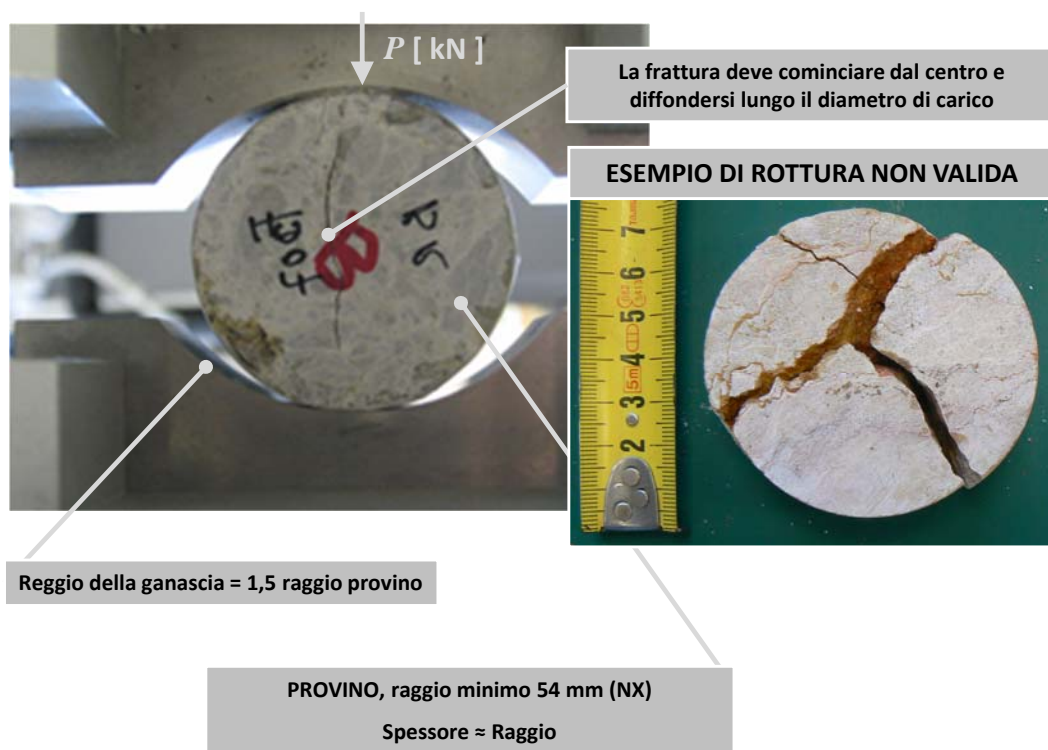
(ISRM 1978 – f) Deve essere determinato il carico di rottura in corrispondenza della prima frattura (in alcuni casi il carico continua a crescere dopo la prima rottura perché il provino rotto può ancora sopportare il carico)



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Prova a trazione indiretta tipo «Brasiliana»

ISRM 1978 Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials
PART 2: SUGGESTED METHOD FOR DETERMINING INDIRECT TENSILE STRENGTH BY THE BRAZIL TEST

ASTM D 3967 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens
(5.2.1 Flat Bearing Blocks - 5.2.2. Curved Bearing Blocks)



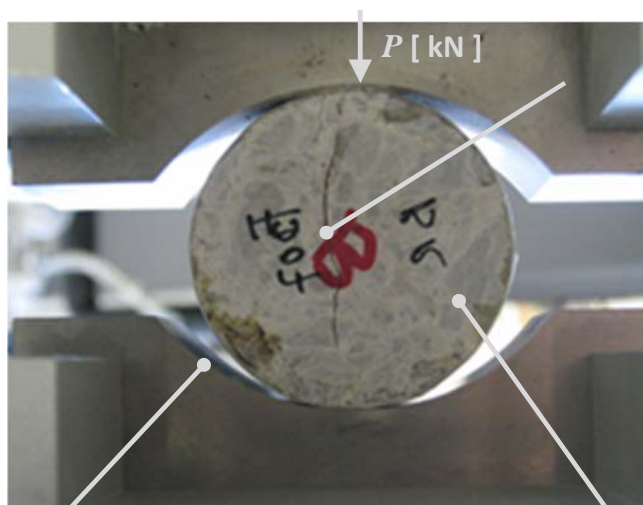
RESISTENZA A TRAZIONE DEL PROVINO: $\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt}$ DOVE P = CARICO DI ROTTURA

(ISRM 1978 – f) Deve essere determinato il carico di rottura in corrispondenza della prima frattura (in alcuni casi il carico continua a crescere dopo la prima rottura perché il provino rotto può ancora sopportare il carico)



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Prova a trazione indiretta tipo «Brasiliana»

ISRM 1978 Suggested Methods for Determining Tensile
PART 2: SUGGESTED METHOD FOR DETERMINING INDIRECT
THE BRAZIL TEST



Reggio della ganascia = 1,5 raggio provino

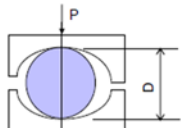
PROVINO, raggio minimo 54 mm (NX)
Spessore ≈ Raggio

PROVA DI TRAZIONE INDIRECTA (PROVA BRASILIANA) Pag. 1 di 1

CERTIFICATO DI LABORATORIO SU ROCCE n. 5954

Committente: Servizio Geologico Provincia Autonoma di Trento				Opera: Galleria rettificata curva dei rospi SS240			
Prof. verbale accettazione: 509924542		Commessa: PR1621		Certificato: BR0821		Località: Loppio	
Richiesta N°: 1131		Normativa di riferimento: ISRM 1978					
Informazioni sul campione							
Sondaggio: S1	Coordinate WGS 84:		Prelevato da: dott. Campedel	Data accettazione: 10/05/21			
Campione: 03	x = 648424		Data prelievo: 10/05/21	Data inizio prova: 23/11/21			
Profondità: 80,50-82,00 m	y = 5081007		Contenitore: Cassa	Data fine prova: 23/11/21			
Descrizione: formazione di Monte Zugna			Condizione: carote	Stoccaggio: laboratorio			

N° provino	Profondità	Dimensioni provino		Massa del provino	Peso di volume γ	Velocità di rottura	Carico rottura P	Carico rottura σ _t
		diametro D	spessore t					
	m	mm	mm	g	kN/m ³	mm/min	kN	MPa
L	80,50-82,00	63,6	32,2	258,018	24,752	1,000	13,554	4,210
M	80,50-82,01	63,5	33,1	264,983	24,760	1,000	23,750	7,183
N	80,50-82,02	63,5	33,2	273,652	25,489	1,000	27,727	8,359
O	80,50-82,03	63,6	33,2	264,894	24,593	1,000	23,155	6,966
P	80,50-82,04	63,5	31,5	260,398	25,600	1,000	12,622	4,015
Q	80,50-82,05	63,6	29,8	242,271	25,126	1,000	14,102	4,736
R	80,50-82,06	63,5	31,4	260,674	25,656	1,000	25,743	8,198
S	80,50-82,07	63,5	32,7	267,095	25,303	1,000	23,046	7,060
T	80,50-82,08	63,7	32,1	255,415	24,525	1,000	23,514	7,322
VALORE MEDIO RILEVATO DALLE PROVE ESEGUITE							σ _t = 6,450 MPa	



$$\sigma_t = \frac{0,636 P}{D t}$$

Method for Splitting Tensile Strength of
5.2.2. Curved Bearing Blocks)



RESISTENZA A TRAZIONE DEL PROVINO:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi D t}$$

DOVE P = CARICO DI ROTTURA

(ISRM 1978 – f) Deve essere determinato il carico di rottura in corrispondenza della prima frattura (in alcuni casi il carico continua a crescere dopo la prima rottura perché il provino rotto può ancora sopportare il carico)



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Point Load Test

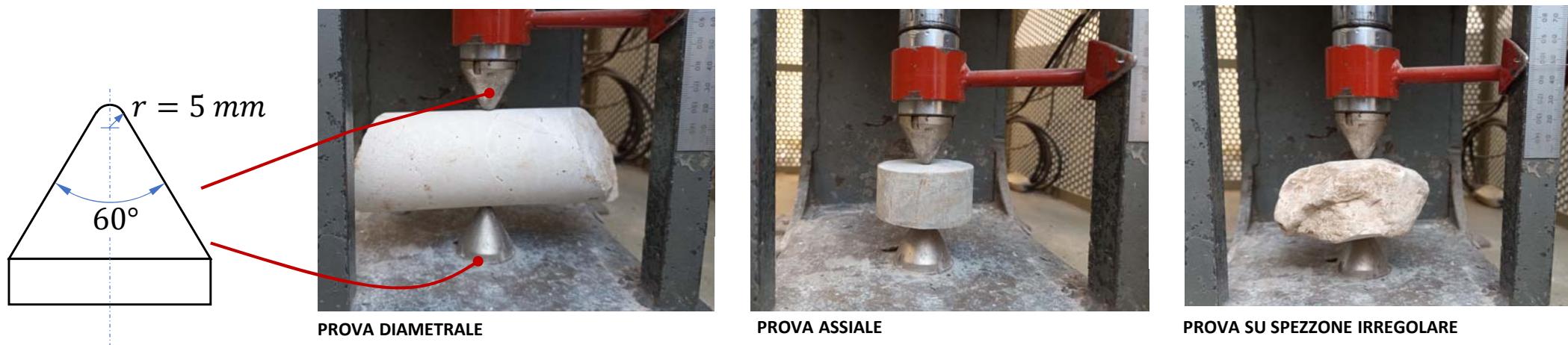
Obiettivo: determinazione di un indice di resistenza ($I_{s(50)}$) per la classificazione del materiale roccioso; previsione di altri parametri di resistenza correlati, ad esempio la resistenza a compressione uniassiale.

ISRM 1975 Suggested Method for Determining Point Load Strength (raccomandazioni ISRM per la misura della resistenza al punzonamento)

13(b) Il valore di resistenza al punzonamento $I_{s(50)}$ di un campione o di un provino di roccia è definito come il valore di I_s riferito ad un provino standard di dimensioni $D = 50$ mm.

13(c) Il modo più affidabile [...] è quello di effettuare prove diametrali su provini di diametro pari, o prossimo, a $D = 50$ mm. [...] Un caso ulteriore è quello di effettuare prove diametrali su provini ricavati da carotaggi NX, $D = 54$ mm.

Negli altri casi si utilizza un fattore correttivo di forma come indicato ai punti 13(d) e 13(e)



ANNOTAZIONI ALLA ISRM 1985: LA PROVA DI PUNZONAMENTO È STATA INTRODOLTA, INIZIALMENTE, PER LA PREVISIONE DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE UNIASSIALE, CHE RAPPRESENTA LA PROVA PIÙ AFFIDABILE PER LA CLASSIFICAZIONE DELLE ROCCE.

IL VALORE DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE UNIASSIALE RISULTA CIRCA 20-25 VOLTE LA RESISTENZA A PUNZONAMENTO. QUESTO RAPPORTO, IN REALTÀ, PUÒ VARIARE TRA 15 E 50 SPECIALMENTE NEL CASO DI ROCCE ANISOTROPE E, CONSEGUENTEMENTE, L'ERRORE CHE SI COMMITTE STIMANDO ARBITRARIAMENTE IL VALORE DI TALE RAPPORTO PER LA VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE SEMPLICE DALLA RESISTENZA AL PUNZONAMENTO MISURATA PUÒ ESSERE ANCHE DEL 100%.



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Sclerometro (martello di Schmidt)



Obiettivo: determinazione dell'indice di rimbalzo di una roccia; stima della resistenza a compressione uniassiale.

ISRM 2009: Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version

The SH rebound hardness value (R) is perhaps the most frequently used index in rock mechanics practice for estimating the uniaxial compressive strength (UCS) and the modulus of elasticity (E) of intact rock both in laboratory conditions and in situ.

UCS = 20 to 150 MPa

Raccogliere almeno 20 valori di rimbalzo separati di almeno il diametro dello stelo.



ASTM D 5873 Standard Test Method for Determining of Rock Hardness by Rebound Hammer Method

The portable testing apparatus may be used in the laboratory or field to provide a means of rapid assessment of rock hardness or to serve as an indicator of rock hardness.

UCS between approximately 1 and 100 MPa

Verificare il Martello di Schmidt con un'incudine di taratura (media di dieci letture prese sull'incudine).





4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Compressione monoassiale

Obiettivo: determinazione della resistenza a compressione uniassiale di provini cilindrici di roccia. La prova è rivolta soprattutto alla caratterizzazione della roccia integra.

ISRM 1979 Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials

Cilindri di roccia con rapporto altezza/diametro di 2,5 – 3,0 ed un diametro preferibilmente non inferiore alla dimensione della carota NX (54 mm).

Diametro provino/ diametro grano più grande > 10.

ASTM D 7012 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

Cilindri di roccia con rapporto altezza diametro più desiderabile è 2. Qualsiasi $L/D < 2$ è inaccettabile. Per $L/D > 2$ i valori di resistenza possono essere moltiplicati per un fattore di correzione.

Diametro provino/ diametro grano più grande > 10, salvo rocce tenere.





4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Compressione monoassiale

ISRM 1979 Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials

Facce del campione piane con scostamento inferiore a 0,02 mm e perpendicolari all'asse del campione entro 0,05 mm su 50 mm.
Superfici lisce con scostamento non superiore a 0,3 mm sull'intera lunghezza.



ASTM D 7012 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

Specimen according to **ASTM D 4543**: superfici lisce e prive di irregolarità con scostamento non superiore a 0,5 mm.

Facce piane con scostamento non superiore a 0,025 mm.

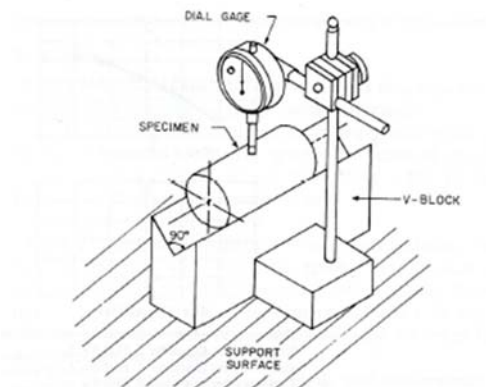


FIG. 1 Assembly for Determining the Straightness of Elements on the Cylindrical Surface (6.1.2, Procedure B)

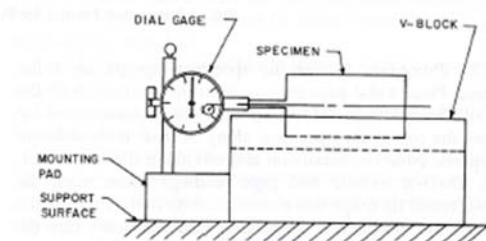


FIG. 2 Assembly for Determining the Flatness and Perpendicularity of End Surfaces to the Specimen Axis (6.2.1, Procedure A)

Immagine tratta da ASTM D 4543 Standard Practices for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerance



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Compressione monoassiale

ISRM 1979 Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials

Il carico sul provino è applicato in modo continuo con velocità di applicazione costante del carico per cui la rottura avvenga in 5 – 10 minuti.



ASTM D 7012 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

La prova può essere condotta in controllo di carico o in controllo di deformazione, il tempo di prova va da 2 a 15 minuti.





4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Le misure di deformazione

Obiettivo: determinazione delle curve tensione – deformazione, del modulo di Young e del coefficiente di Poisson durante la compressione di un provino cilindrico.

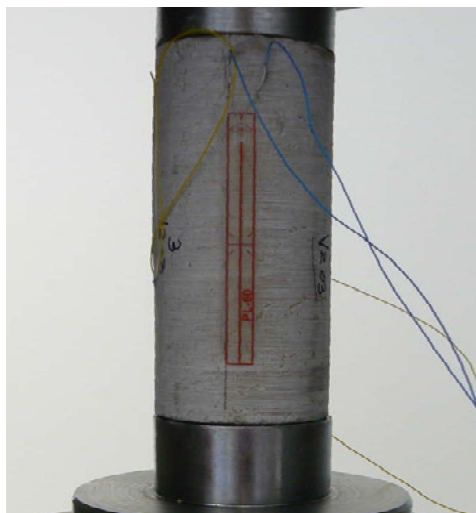
ISRM 1979 Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials

estensimetri elettrici a resistenza, trasduttori di spostamento LVDT, strumenti ottici o altri strumenti di misura adeguati.

ASTM D 7012 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperature

Electrical resistance strain gages, compressometers, linear variable differential transformers (LVDTs), or other suitable means.

Misura delle deformazioni con strain-gauges



La lunghezza dello strain-gauge deve essere di almeno 10 volte il grano massimo

VANTAGGI:

Trasduttori *on-sample*. Alta risoluzione. Restituiscono direttamente letture di deformazione in $\mu\epsilon$ ($1 \mu\epsilon = 1 \mu\text{m}/\text{m}$). Anche per misure diametrali (coeff. di Poisson). Anche per provini in cella di Hoek (prove triassiali).

SVANTAGGI:

Misure non rappresentative in provini anisotropi. Sensibili a deformazioni o localizzate o trasversali. Possibili prerotture degli strain-gauges.

Misura delle deformazioni con trasduttori di spostamento montati su anelli



VANTAGGI:

Adatti anche per provini con grani centimetrici. Non influenza di deformazioni localizzate.

SVANTAGGI:

Bassa risoluzione. Difficoltà di bloccaggio degli anelli sul provino; adattabili solo per diametri compatibili. No misure diametrali, no misure in cella di Hoek. No provini dalla rottura «esplosiva» che possono rompere i trasduttori.



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Le misure di deformazione

Obiettivo: determinazione delle curve tensione – deformazione, del modulo di Young e del coefficiente di Poisson durante la compressione di un provino cilindrico.

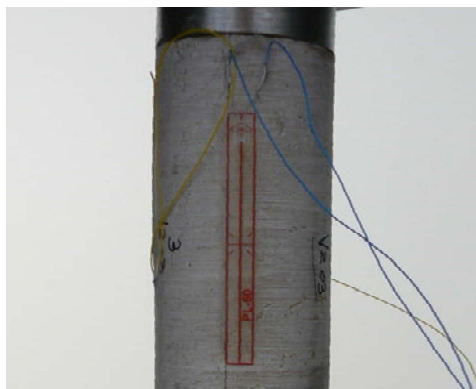
ISRM 1979 Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials

estensimetri elettrici a resistenza, trasduttori di spostamento LVDT, strumenti ottici o altri strumenti di misura adeguati.

ASTM D 7012 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Modulus of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperature

Electrical resistance strain gages, compressometers, variable differential transformers (LVDTs), or other suitable means.

Misura delle deformazioni con strain-gauges



Misura delle deformazioni con trasduttori di spostamento montati su anelli



SVANTAGGI:

Bassa risoluzione.

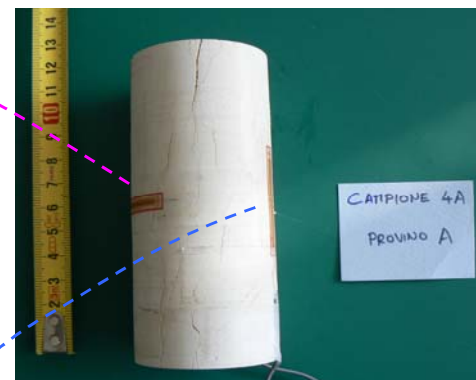
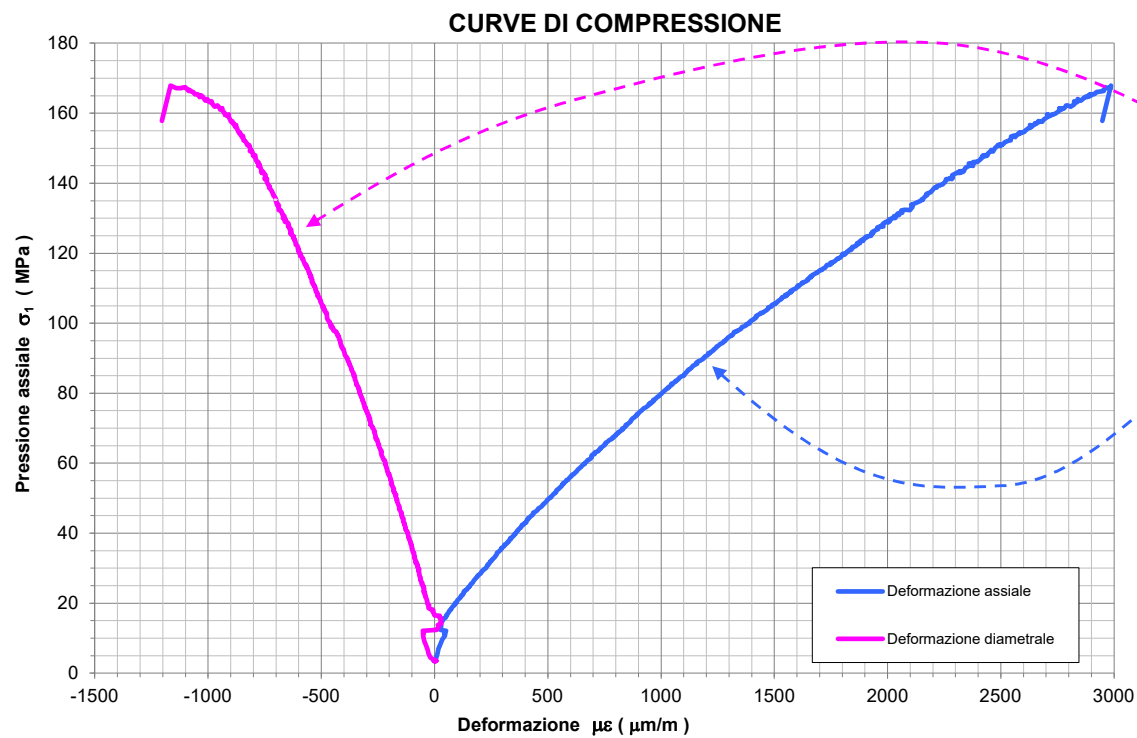
Difficoltà di bloccaggio degli anelli sul provino; adattabili solo per diametri compatibili.

No misure diametrali, no misure in cella di Hoek.

No provini dalla rottura «esplosiva» che possono rompere i trasduttori.

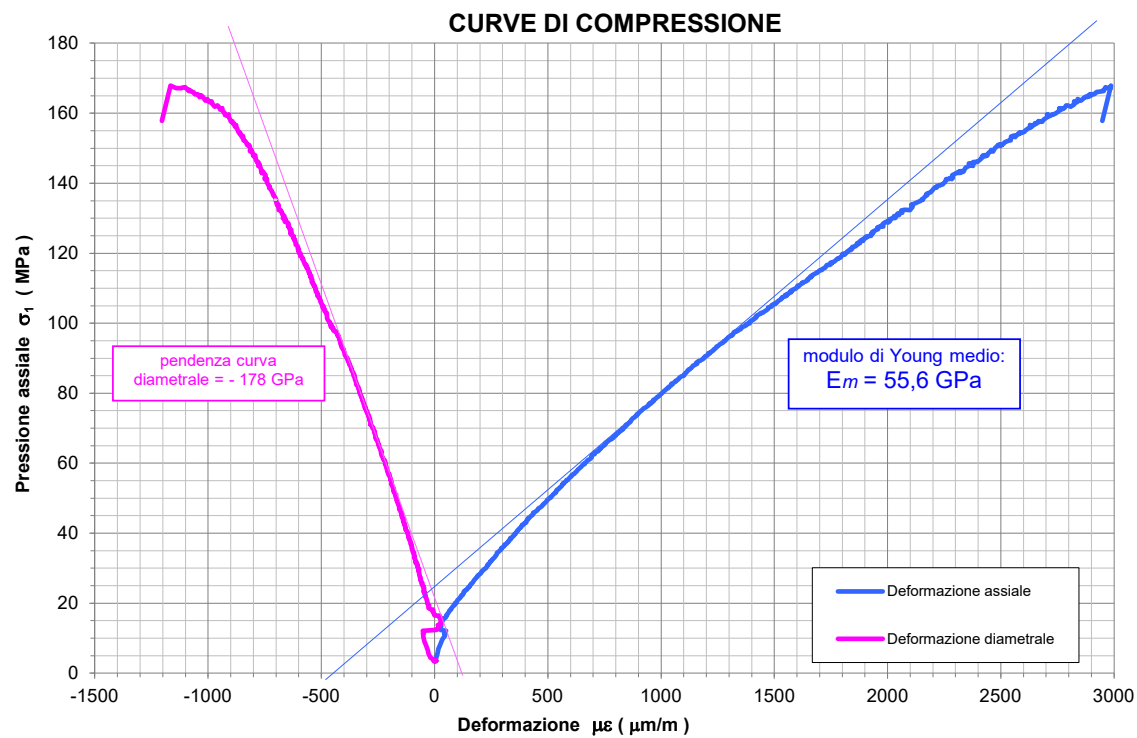


4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Le misure di deformazione





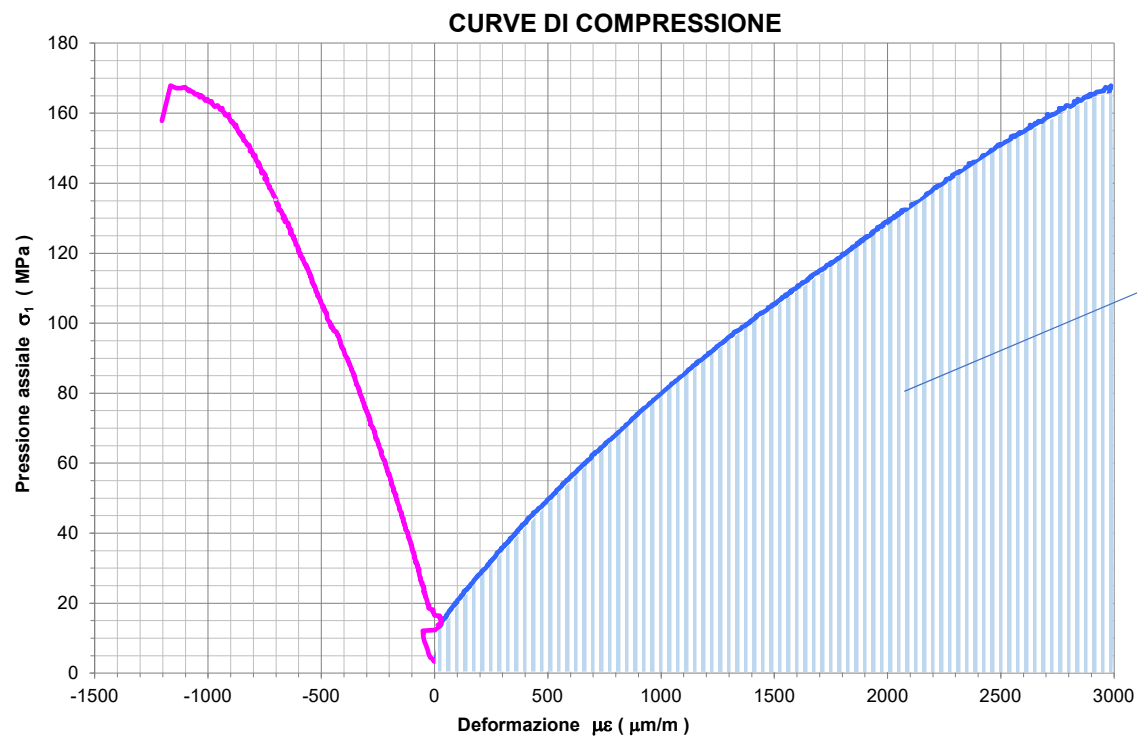
4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Le misure di deformazione



$$\nu = - \frac{E_m}{\text{pendenza della curva diametrale}} = 0,31$$



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Le misure di deformazione



ENERGIA
VOLUMETRICA

$$\frac{W_{max}}{V_0} = \int_0^{\varepsilon_{max}} \sigma_1(\varepsilon) d\varepsilon$$

Infatti:
$$\int_0^{\varepsilon_{max}} \sigma_1(\varepsilon) d\varepsilon = \int_{L_0}^{L_0 - \Delta L_{max}} \frac{F(L) dL}{A_0 L_0}$$

Calcolando l'area raccolta sotto alla curva sforzo - deformazione è possibile una stima dell'energia di deformazione dissipata fino alla rottura (*dissipated strain energy up to the peak stress*) e questa energia è correlabile con il tipo di danno prodotto al provino a seguito della rottura.

Alcuni studi correlano l'energia dissipata al tipo di danno del provino, codificato secondo le seguenti classi:



I = macroscopically intact



Sp = split



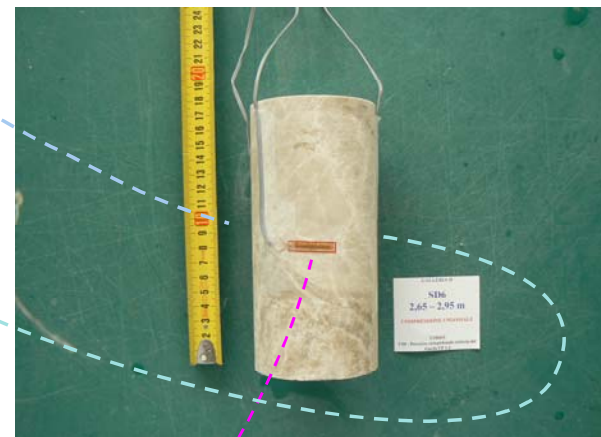
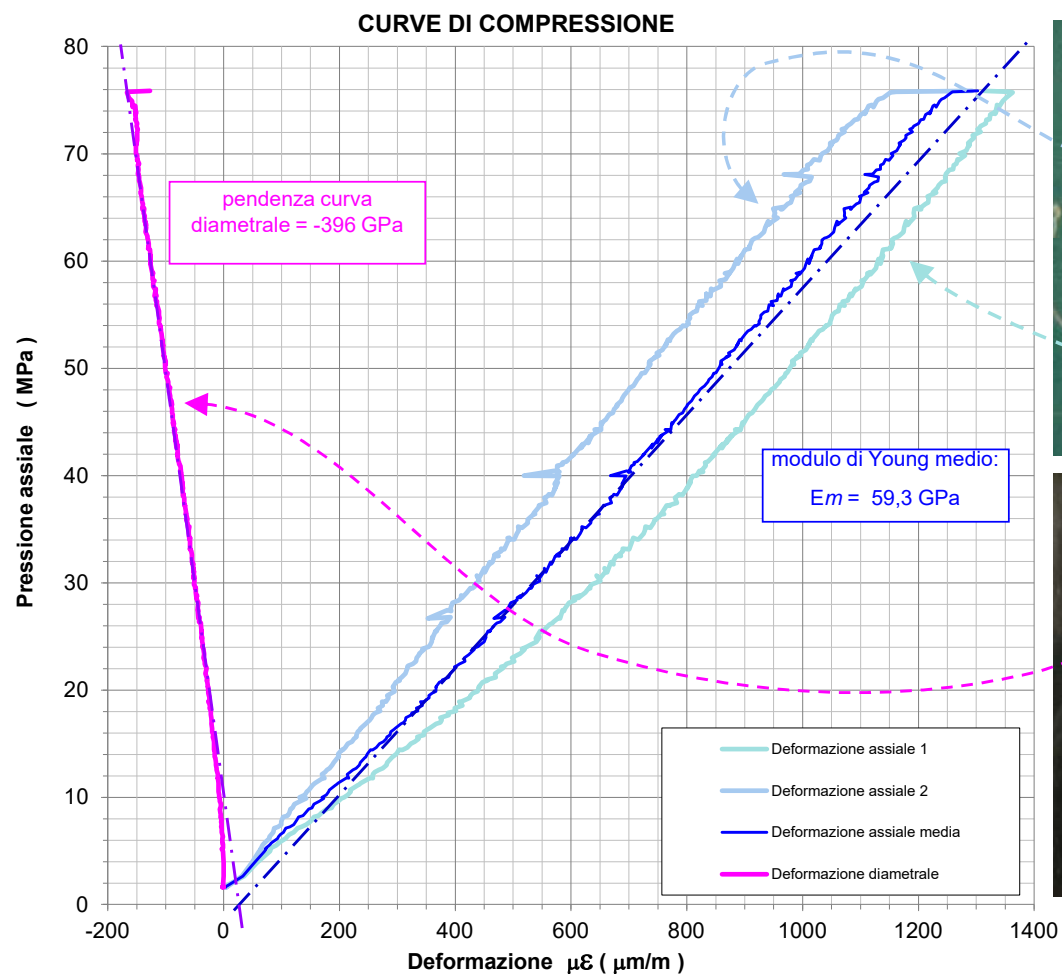
F = incipient and prominent fragmentation



SH = shattered



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Le misure di deformazione



Fm. dei calcari di Zucchi -
ciclovía del Garda

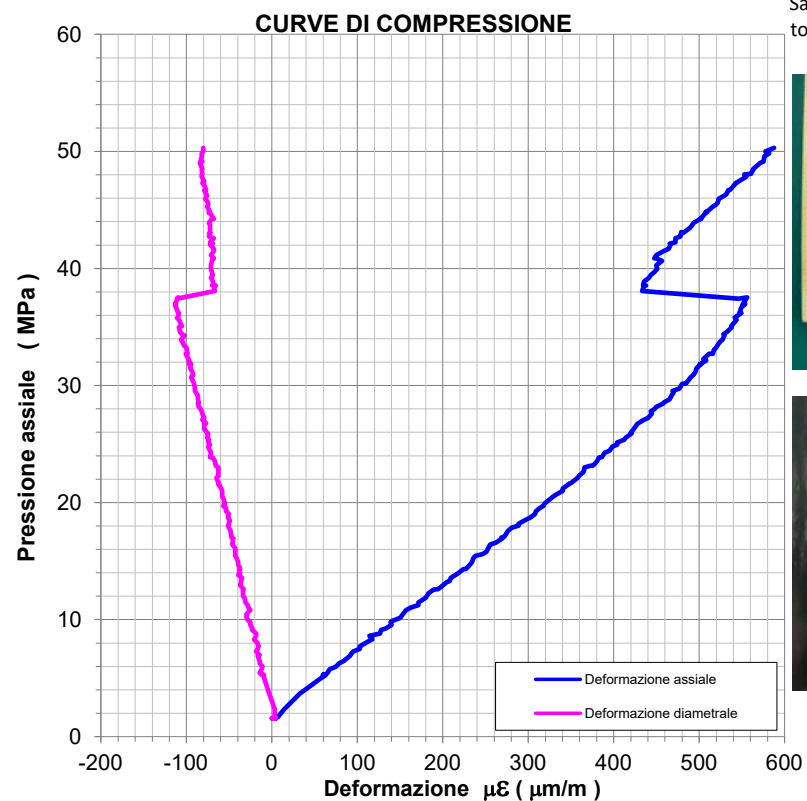
$$\nu = - \frac{E_m}{\text{pendenza della curva diametrale}} = 0,15$$



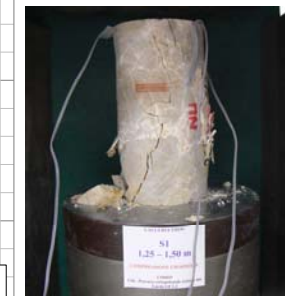
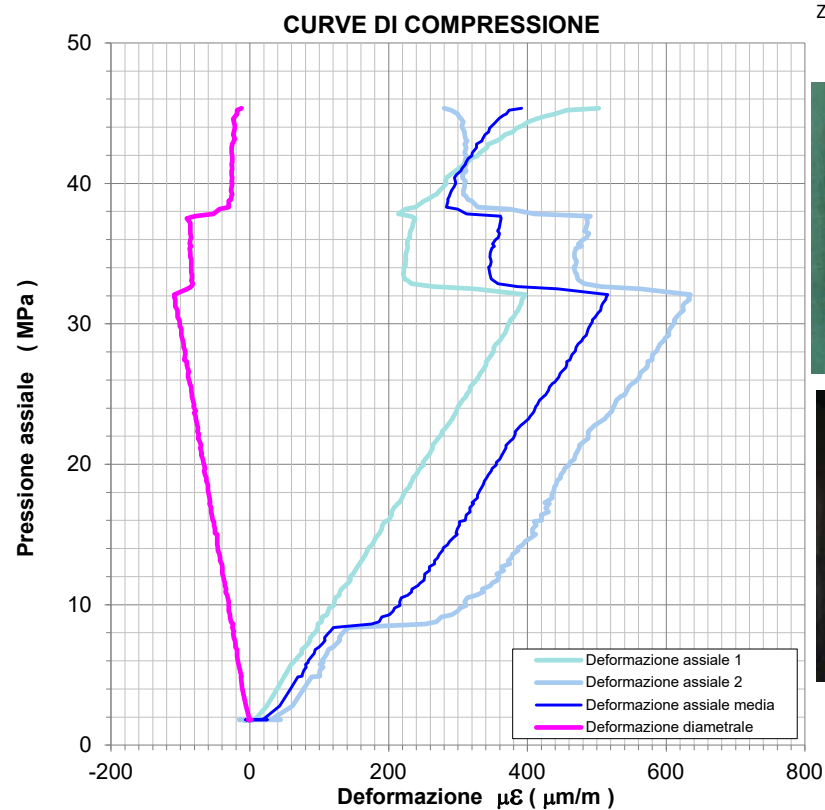
4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Le misure di deformazione



Dolomia –
Santa Giustina
torrente Noce

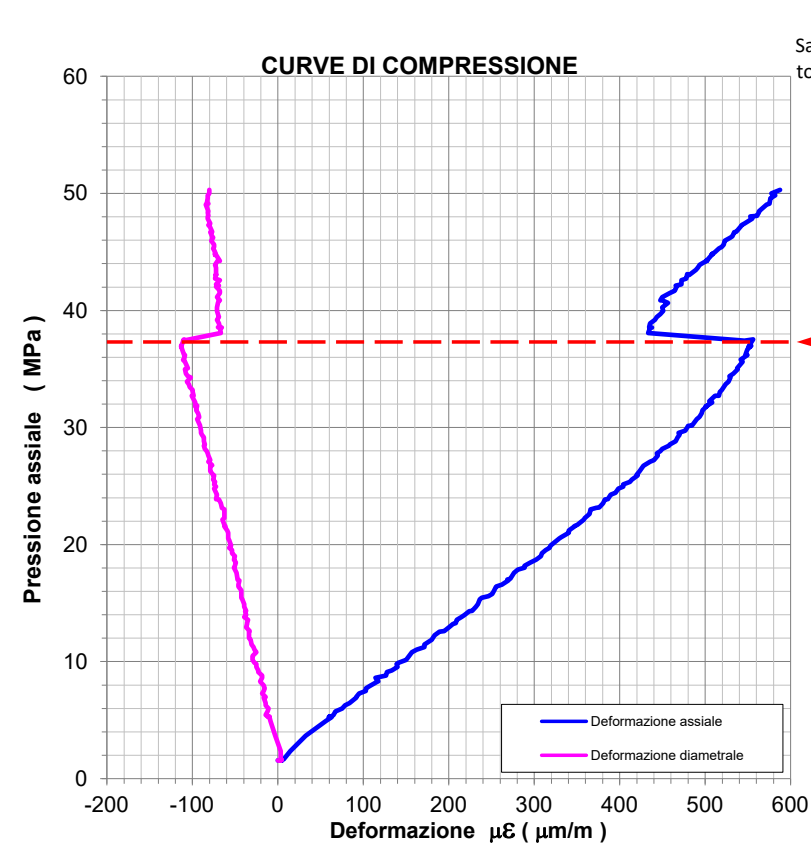


Fm. Dei calcari di
Zu – ciclovia del
Garda



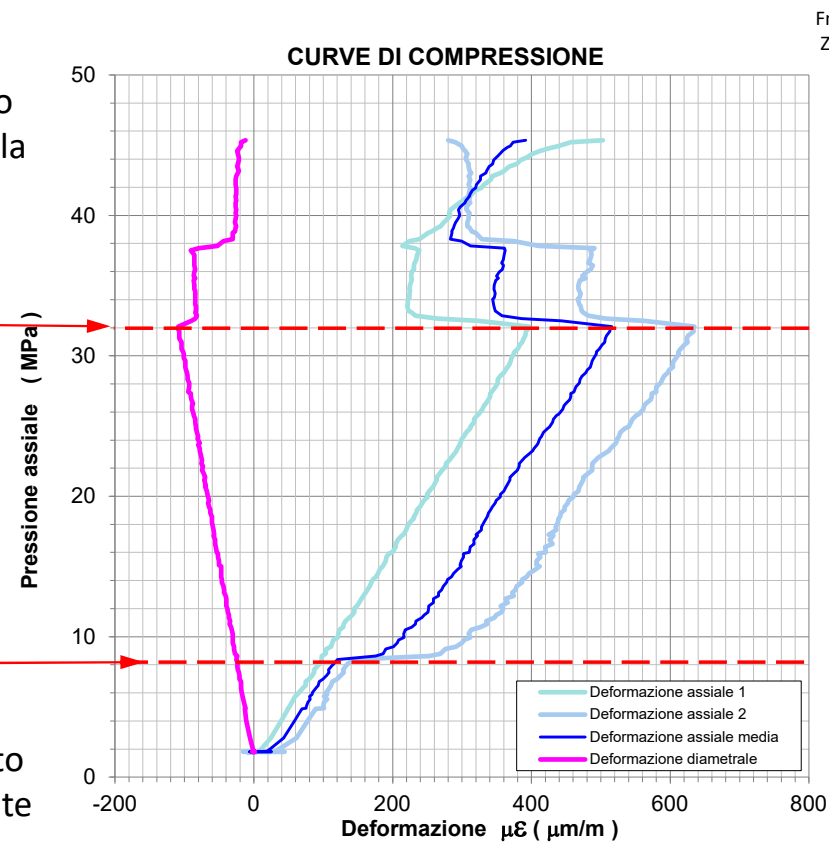


4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Le misure di deformazione



detsensionamento
generalizzato durante la
fase di carico

detsensionamento
localizzato durante
la fase di carico



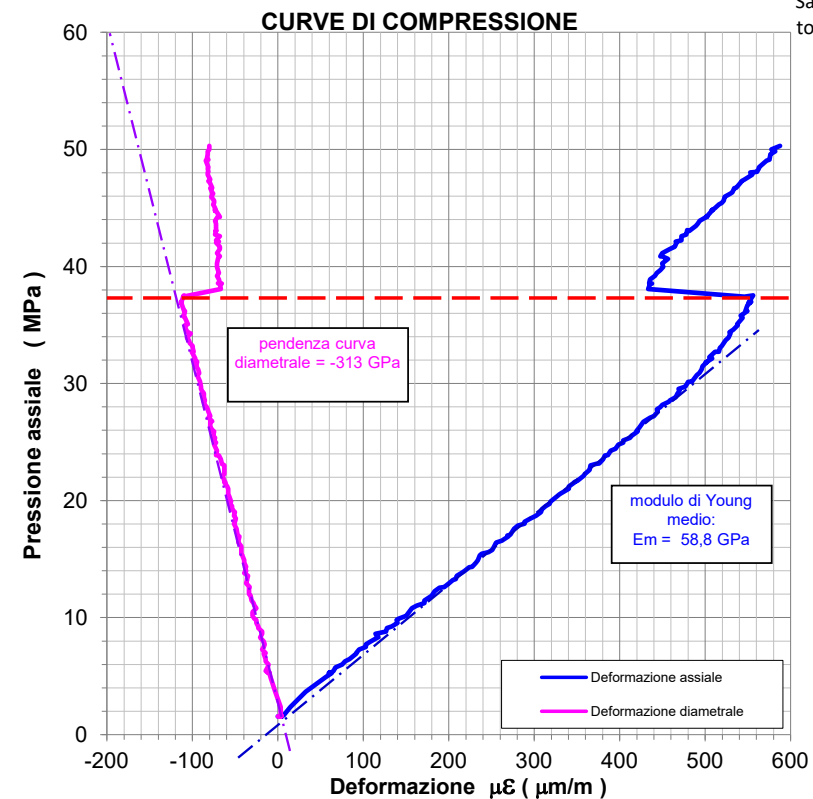


4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Le misure di deformazione

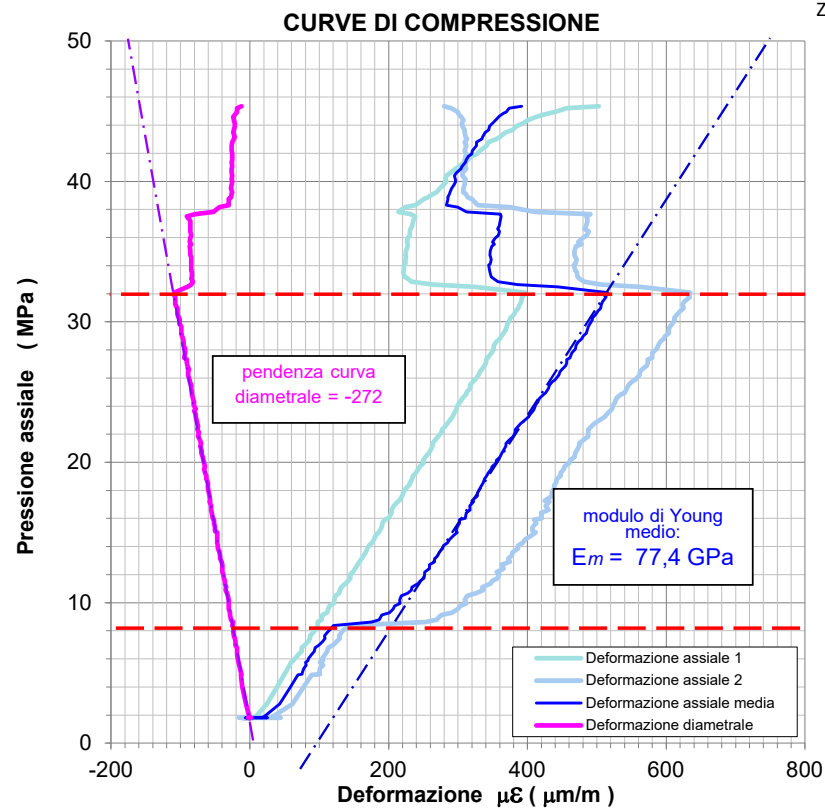


Dolomia –
Santa Giustina
torrente Noce

Fm. Dei calcari di
Zu – ciclovia del
Garda



$$\nu = - \frac{E_m}{\text{pendenza della curva diametrale}} = 0,19$$



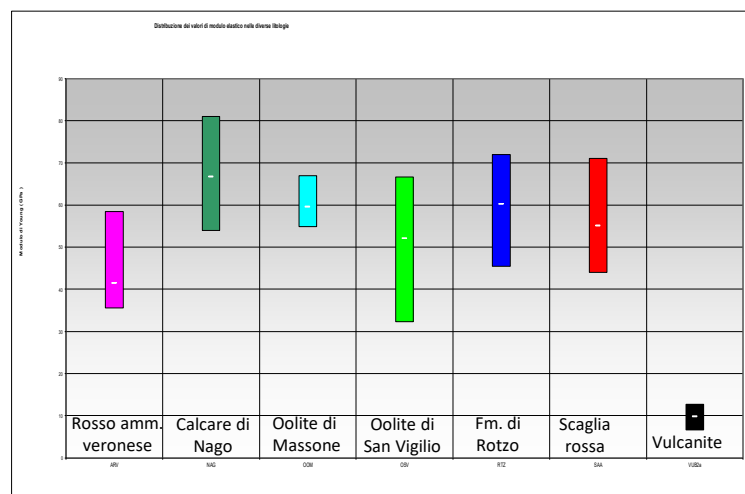
$$\nu = - \frac{E_m}{\text{pendenza della curva diametrale}} = 0,29$$



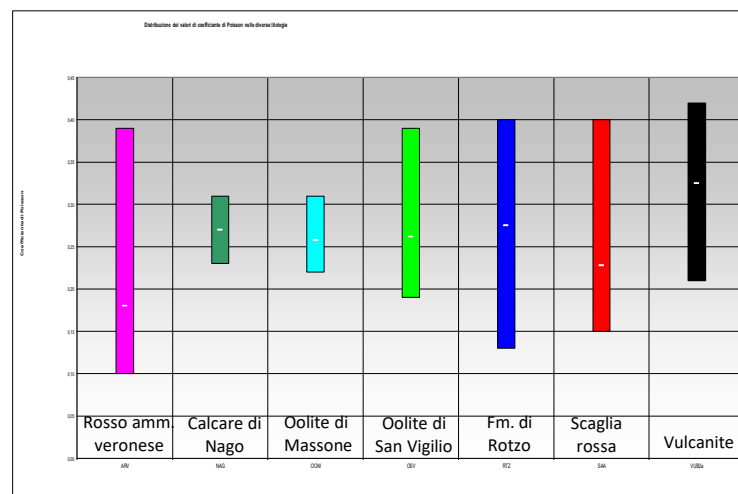
4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Le misure di deformazione

Esempio studio variante di Nago,

valori medi e distribuzione dei moduli di Young e dei coefficienti di Poisson per le varie litologie:



$\Phi =$	51,4°	64,4°	44,8°	54,9°	55,1°	50,2°	45,6°
c =	8,6 MPa	4,3 MPa	20,4 MPa	15,1 MPa	7,5 MPa	17,7 MPa	7,2 MPa



$\Phi =$	51,4°	64,4°	44,8°	54,9°	55,1°	50,2°	45,6°
c =	8,6 MPa	4,3 MPa	20,4 MPa	15,1 MPa	7,5 MPa	17,7 MPa	7,2 MPa

n° determinazioni	5	3	4	6	6	6	6
-------------------	---	---	---	---	---	---	---

	5	2	4	6	6	4	6
--	---	---	---	---	---	---	---



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Compressione triassiale

Obiettivo: determinazione della resistenza a compressione di provini cilindrici di roccia integra in funzione della pressione di confinamento.

ISRM 1983 Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version

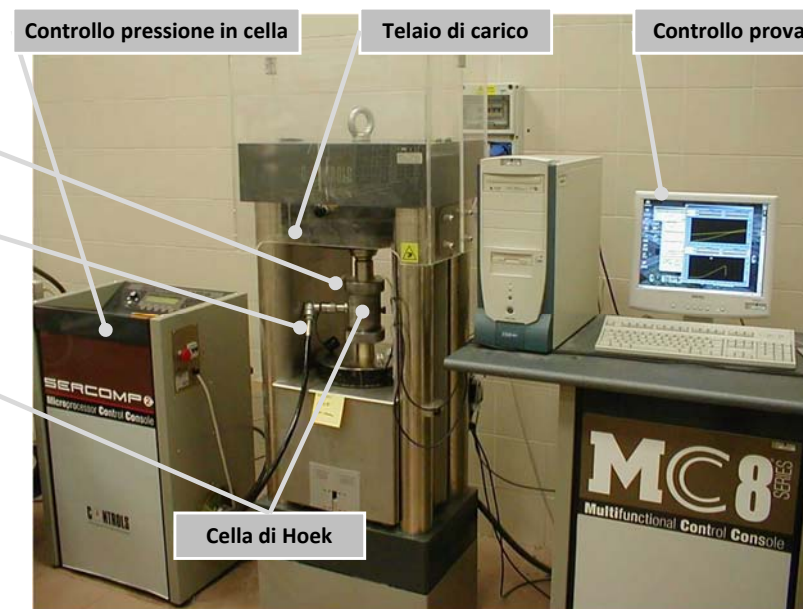
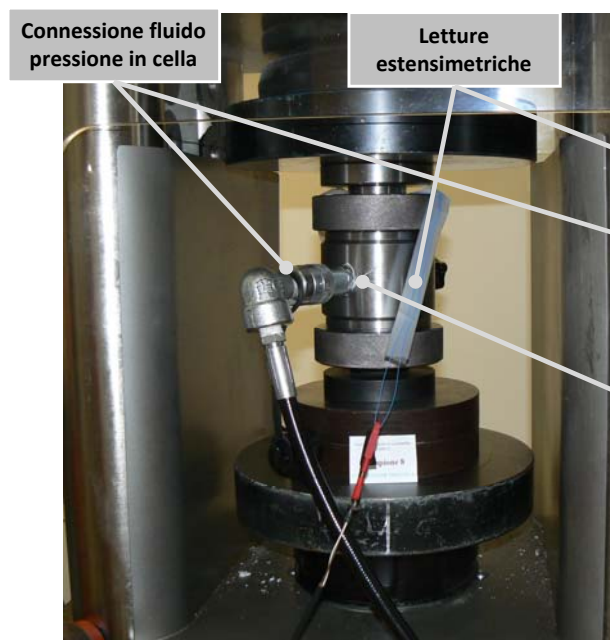
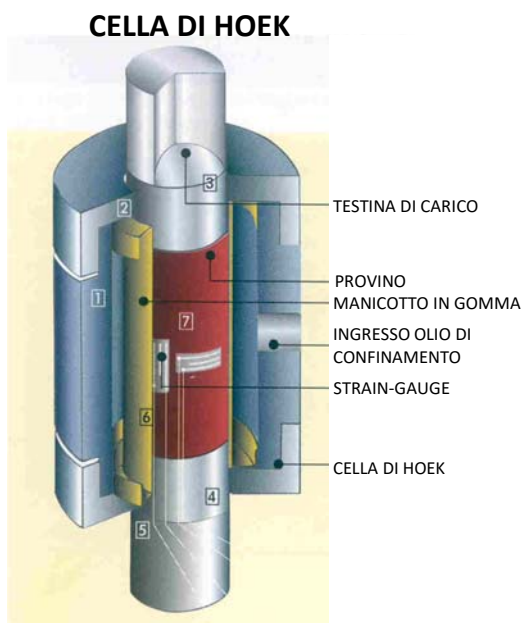
Cilindri di roccia con rapporto altezza/diametro di 2,0 – 3,0 ed un diametro preferibilmente non inferiore alla dimensione della carota NX (54 mm).

Diametro provino/ diametro grano più grande > 10.

ASTM D 7012 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

Cilindri di roccia con rapporto altezza diametro più desiderabile è 2. Qualsiasi L/D < 2 è inaccettabile. Per L/D > 2 i valori di resistenza possono essere moltiplicati per un fattore di correzione.

Diametro provino/ diametro grano più grande > 10, salvo rocce tenere.





4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Compressione triassiale

Le caratteristiche dimensionali dei provini sono vincolate al diametro del manicotto inserito nella cella di Hoek.



formazione di Nalles

L'utilizzo della cella di Hoek nella prova triassiale necessita di provini con diametri prestabiliti, adatta ai manicotti di gomma entro i quali devono essere inseriti:

54 mm (NX) oppure 64 mm (HQ)



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Compressione triassiale

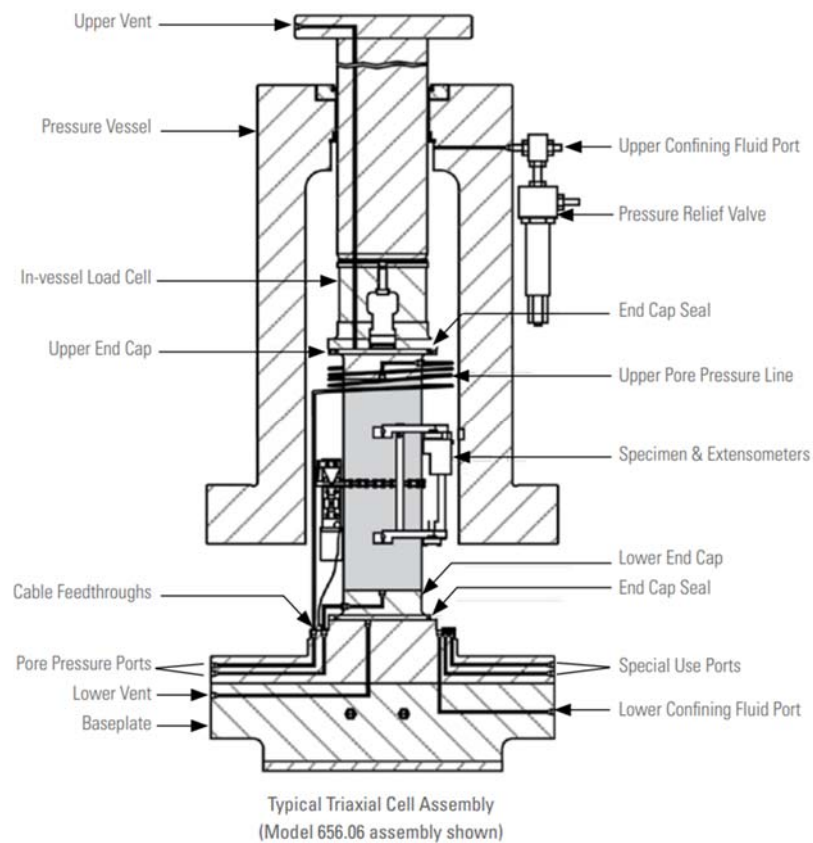


Immagine tratta da MTS
System Corporation
www.mts.com

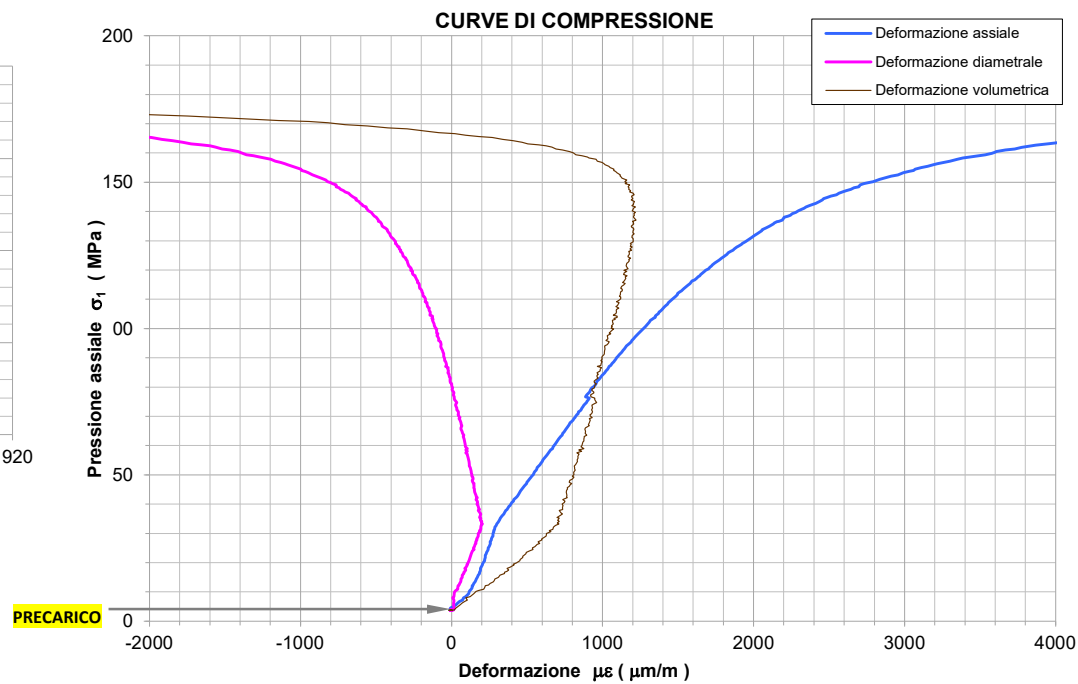
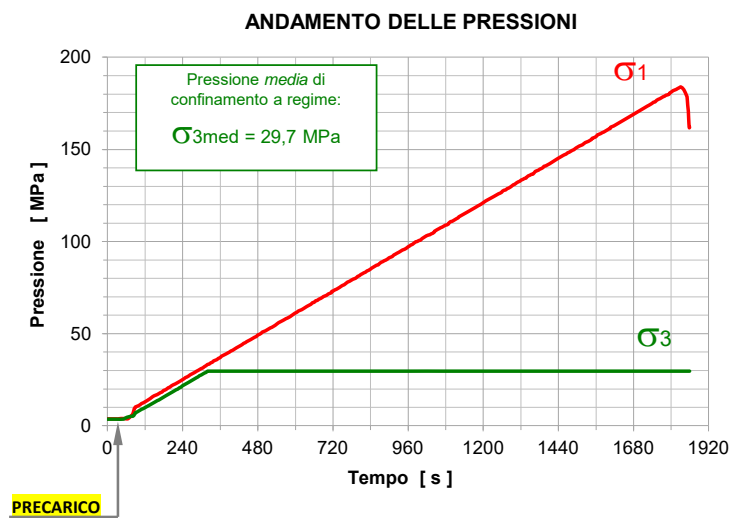
**Metodi alternativi alla cella di Hoek:
sistemi di prova completi (pressione, temperatura, onde elastiche, ecc.) con cabina pressurizzata («*pressure vessel*») e uso di estensometri come trasduttori *on sample*, provini in guaina termorestringente**



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Compressione triassiale

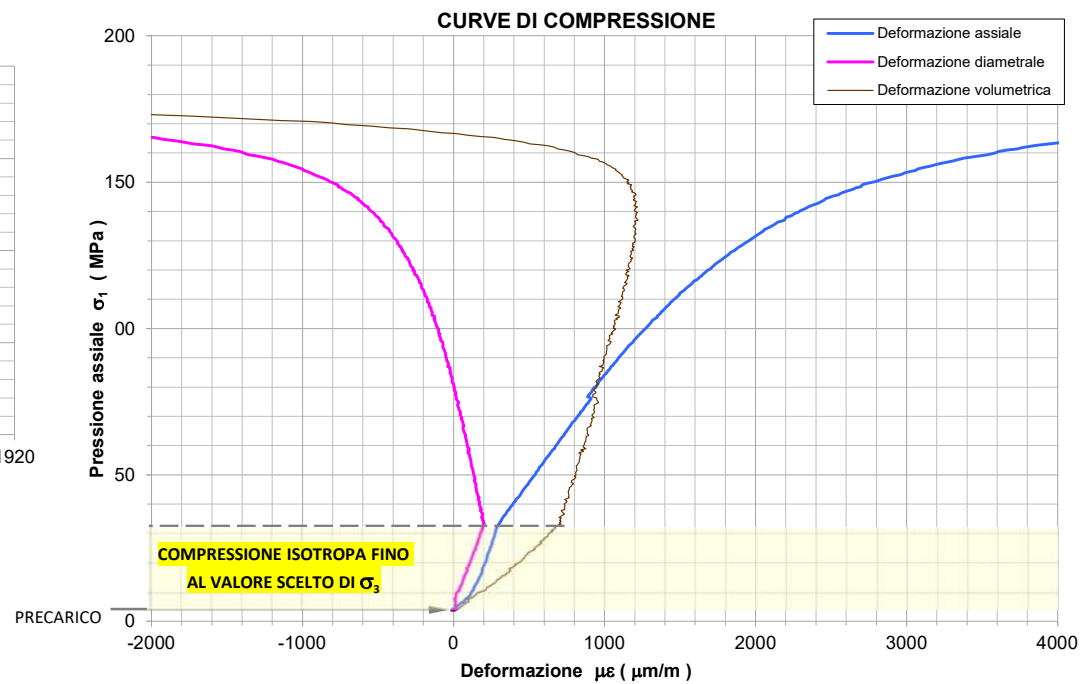
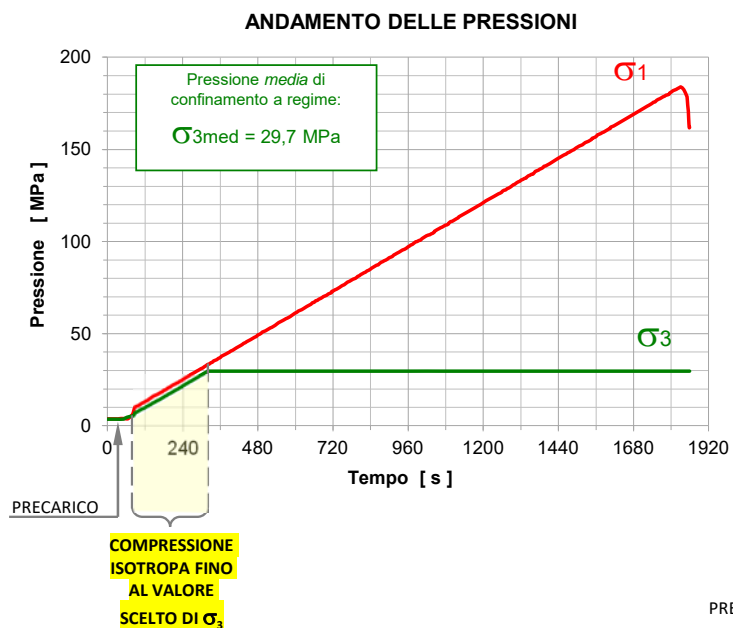


Marmo Lasa





4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Compressione triassiale

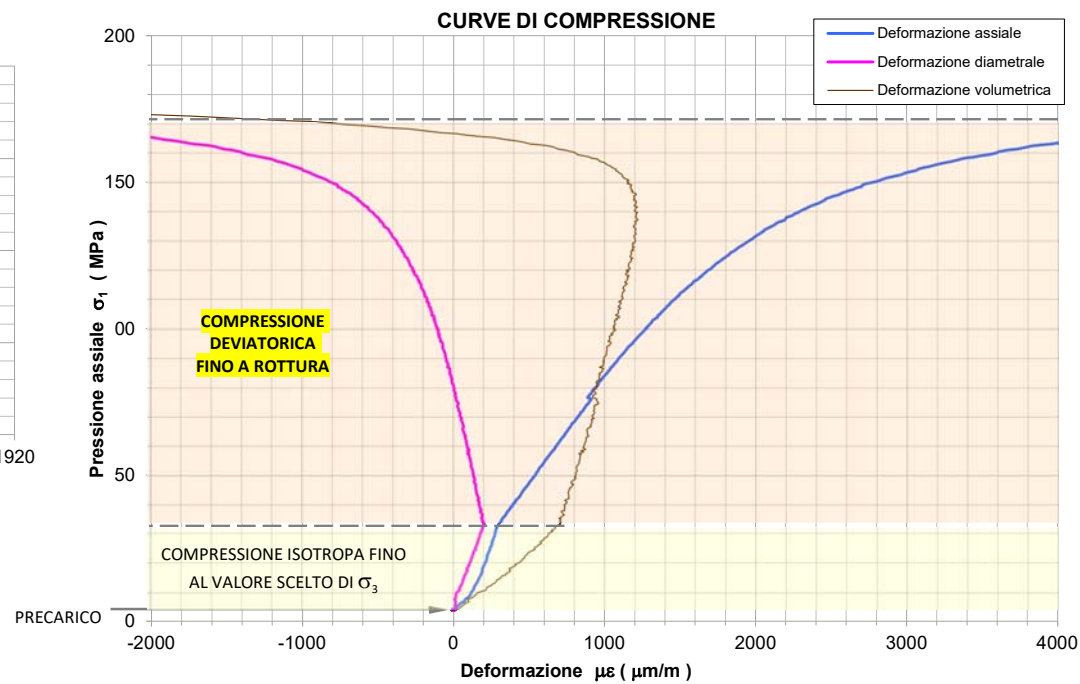
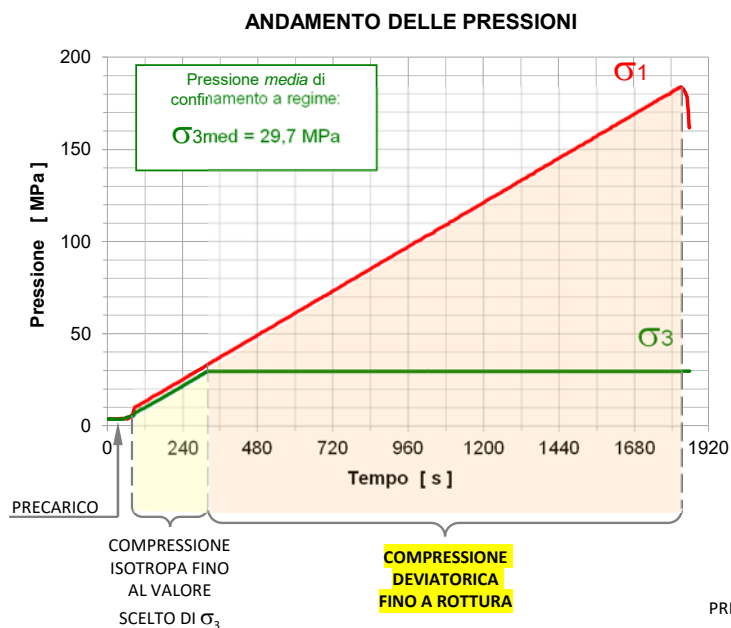




4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Compressione triassiale



Marmo Lasa

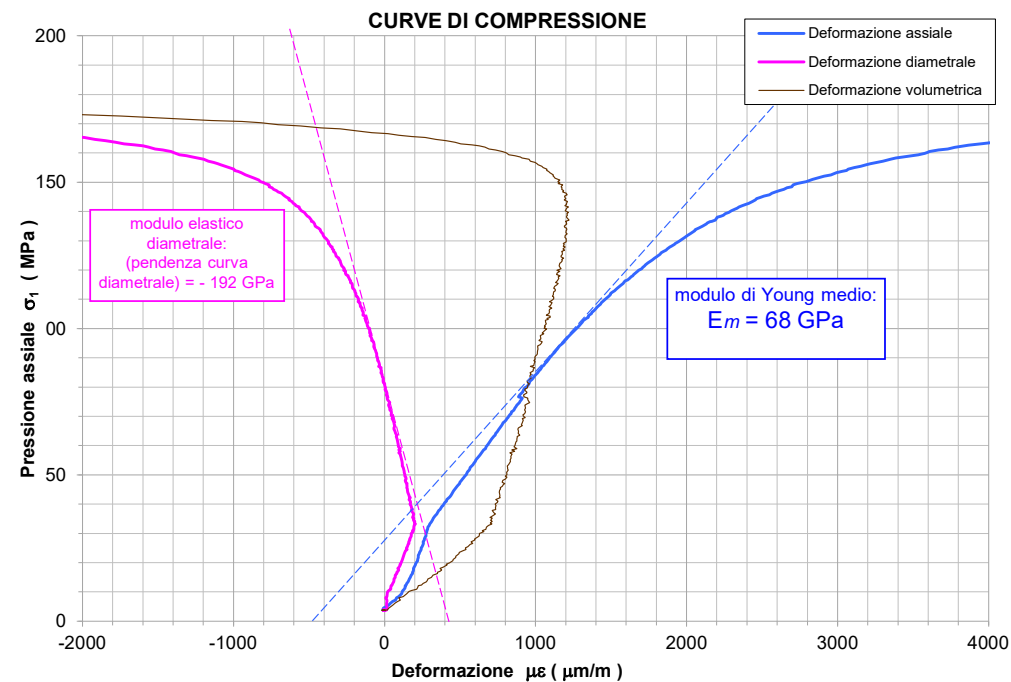
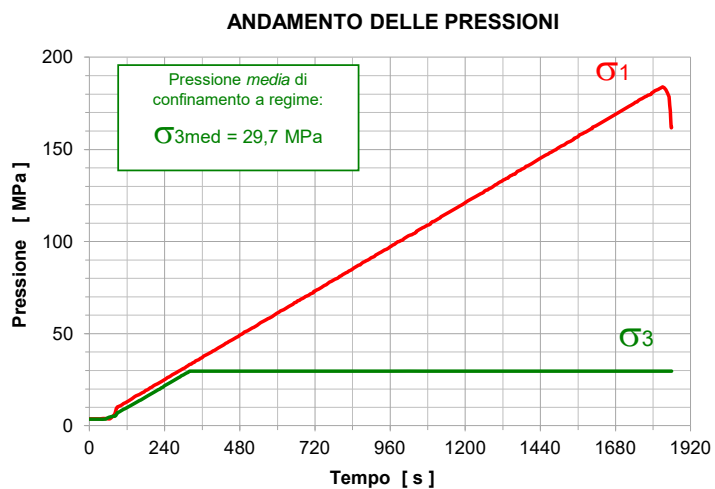




4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Compressione triassiale



Marmo Lasa



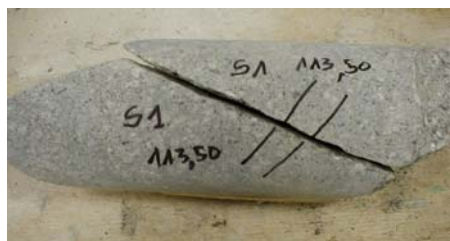
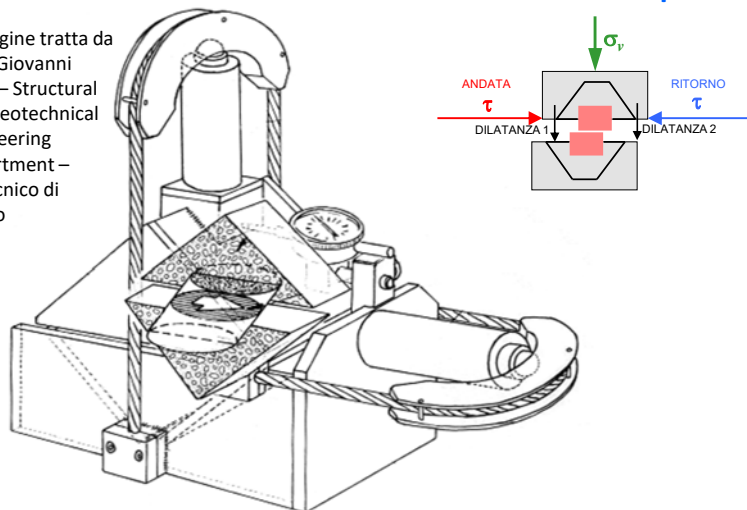
$$\nu = - \frac{E_m}{\text{pendenza della curva diametrale}} = 0,35$$



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Prova di taglio con apparecchio di Hoek sulle discontinuità

Obiettivo: misura della resistenza al taglio di picco e residua di una discontinuità in funzione della pressione verticale.

Immagine tratta da
prof. Giovanni
Barla – Structural
and Geotechnical
Engineering
Department –
Poltecnico di
Torino



Ignimbrite
riodacitica –
Galleria di
scolmo
presso
Borgo
Valsugana



PRIMA DELLA PROVA



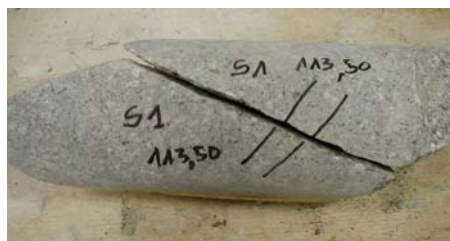
DOPO LA PROVA





4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Prova di taglio con apparecchio di Hoek sulle discontinuità

Obiettivo: misura della resistenza al taglio di picco e residua di una discontinuità in funzione della pressione verticale.



Ignimbrite riodacitica – Galleria di scolmo presso Borgo Valsugana

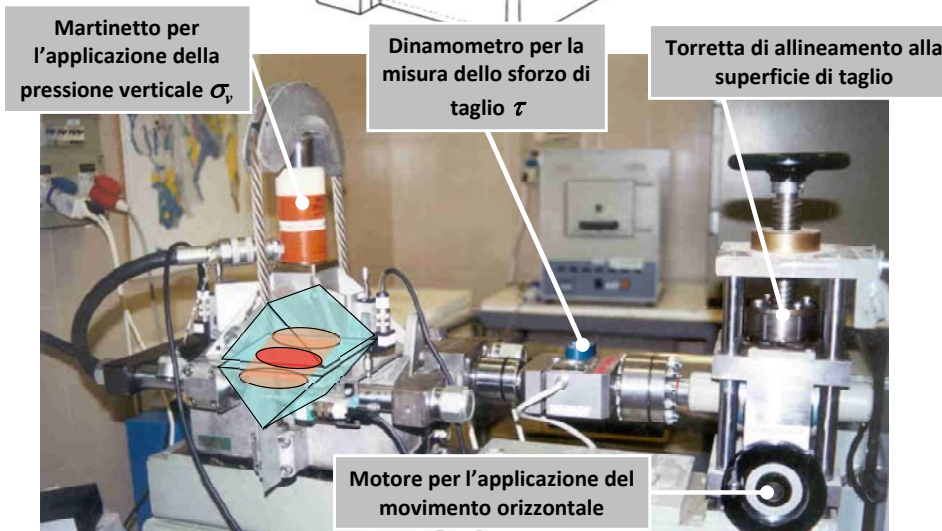
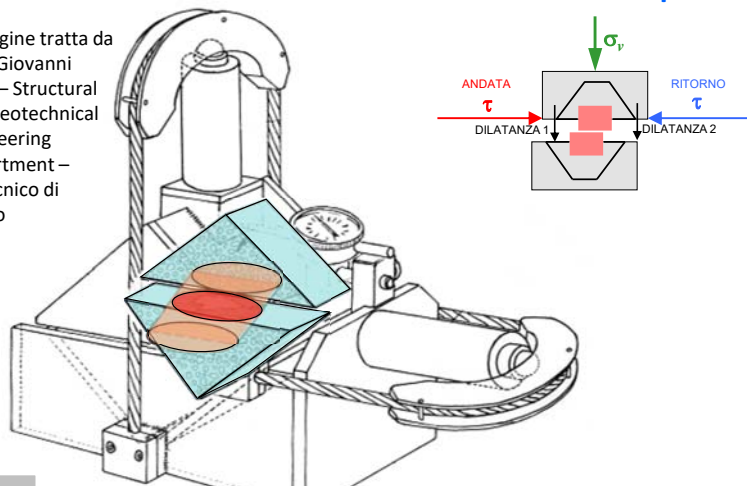


PRIMA DELLA PROVA



DOPO LA PROVA

Immagine tratta da prof. Giovanni Barla – Structural and Geotechnical Engineering Department – Poltecnico di Torino



Martinetto per l'applicazione della pressione verticale σ_v

Dinamometro per la misura dello sforzo di taglio τ

Torretta di allineamento alla superficie di taglio

Motore per l'applicazione del movimento orizzontale



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Prova di taglio con apparecchio di Hoek sulle discontinuità



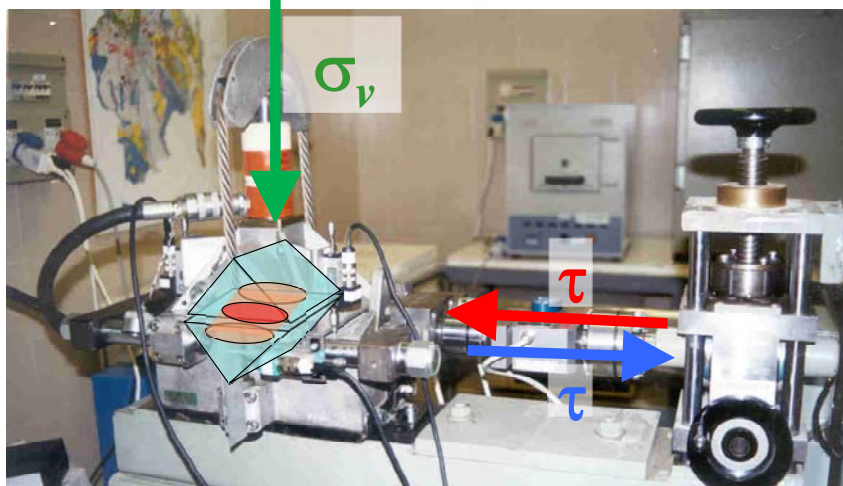
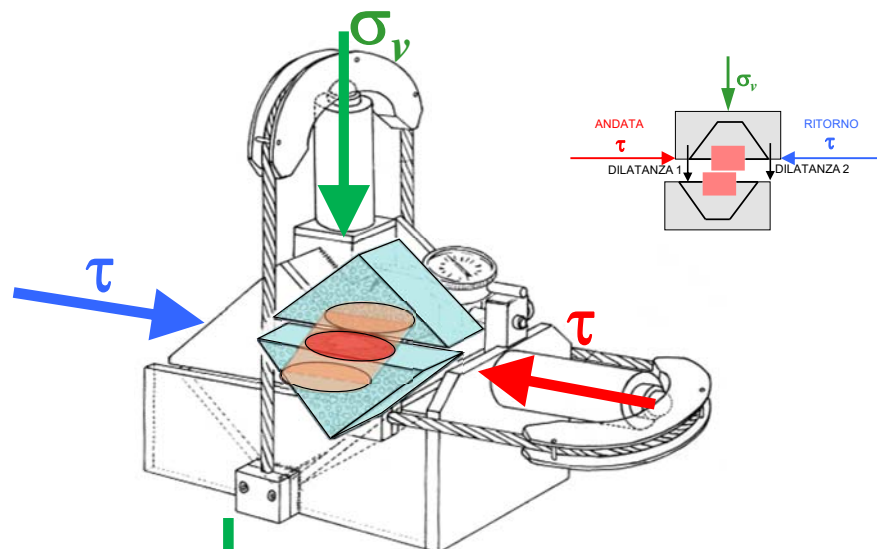
Ignimbrite riodacitica – Galleria di scolmo presso Borgo Valsugana



PRIMA DELLA PROVA



DOPO LA PROVA





4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Prova di taglio con apparecchio di Hoek sulle discontinuità



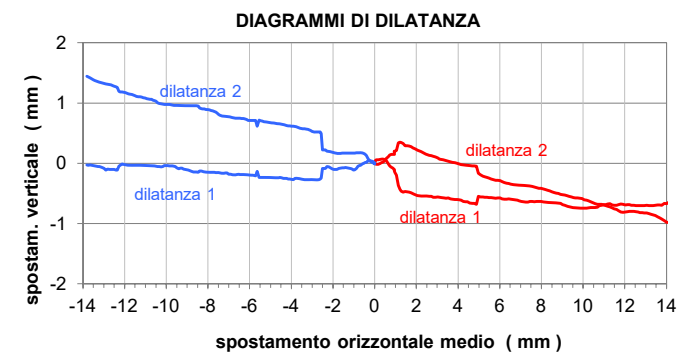
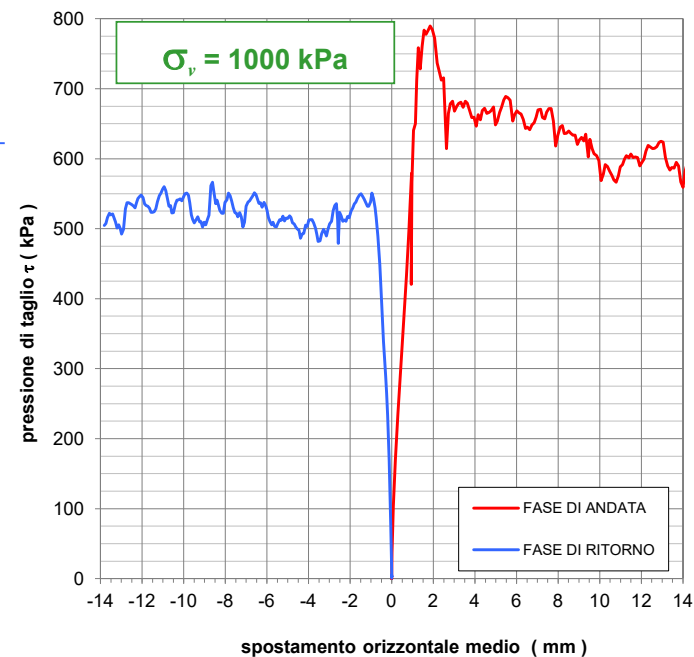
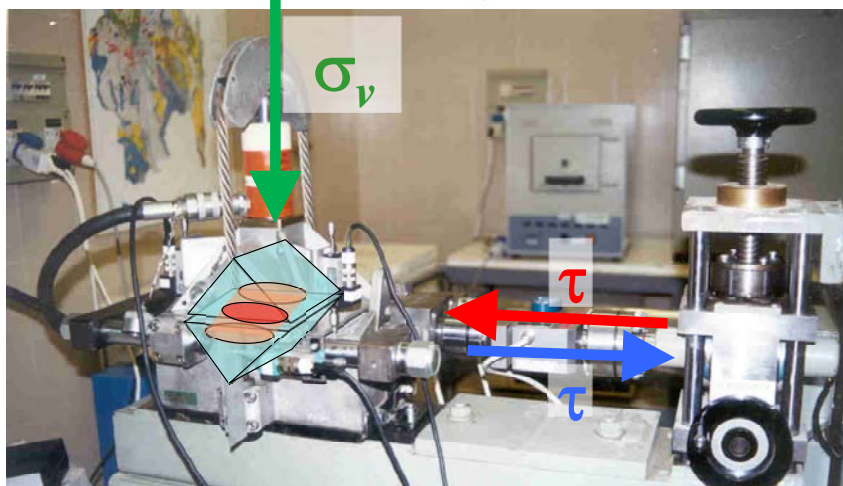
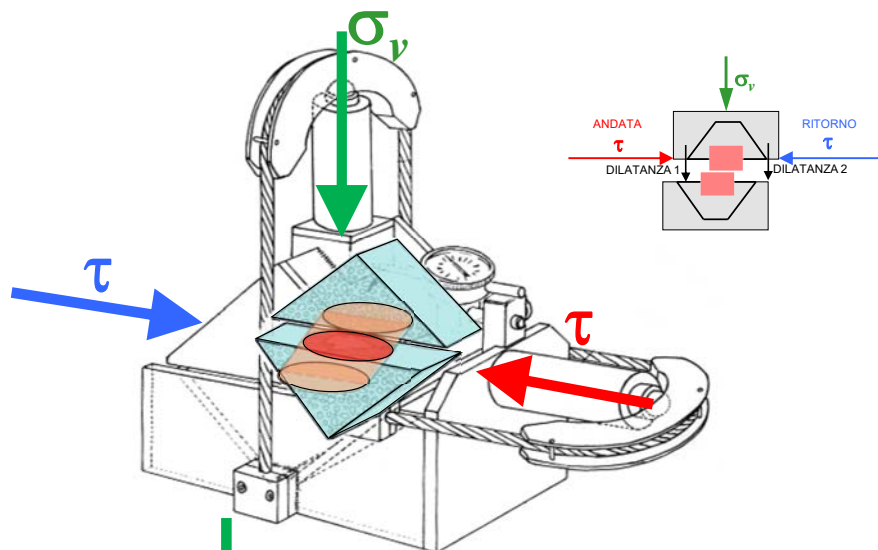
Ignimbrite riodacitica – Galleria di scolmo presso Borgo Valsugana



PRIMA DELLA PROVA



DOPO LA PROVA





4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Prova di taglio con apparecchio di Hoek sulle discontinuità

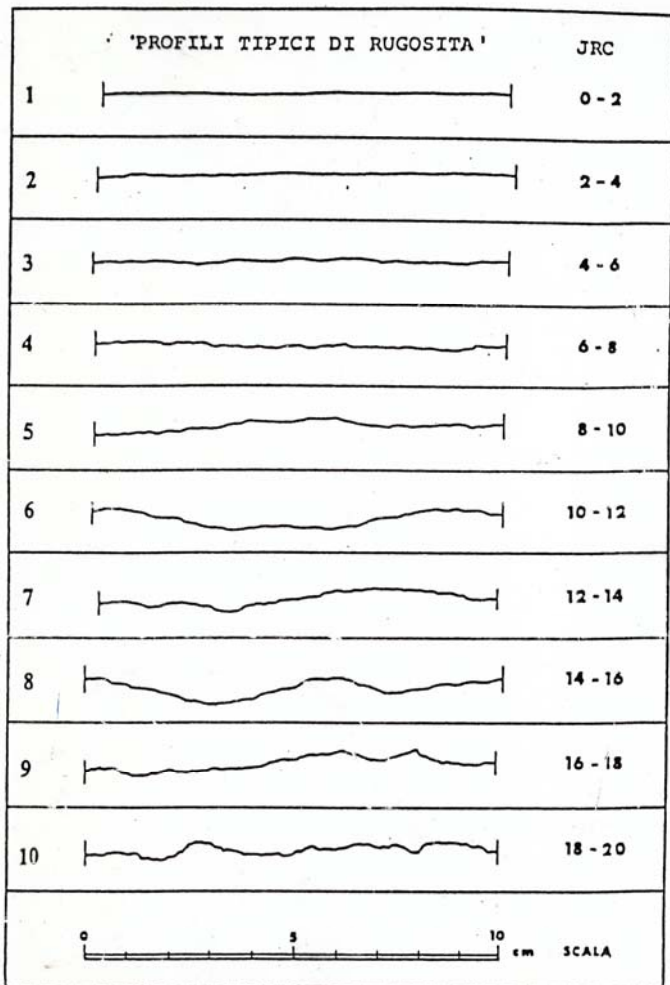


Fig. 19 - Profili di rugosità e corrispondenti intervalli di valori di JRC [6].

Equazione empirica per la resistenza al taglio di una discontinuità scabra:

$$\varphi_p = JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r$$

$$\tau_n = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right]$$

JRC = coefficiente di rugosità del giunto
(Joint Roughness Coefficient)

JCS = resistenza **sulla parete del giunto**
(Joint Wall Compressive Strength)

φ_p = angolo d'attrito di picco

τ_n = resistenza al taglio

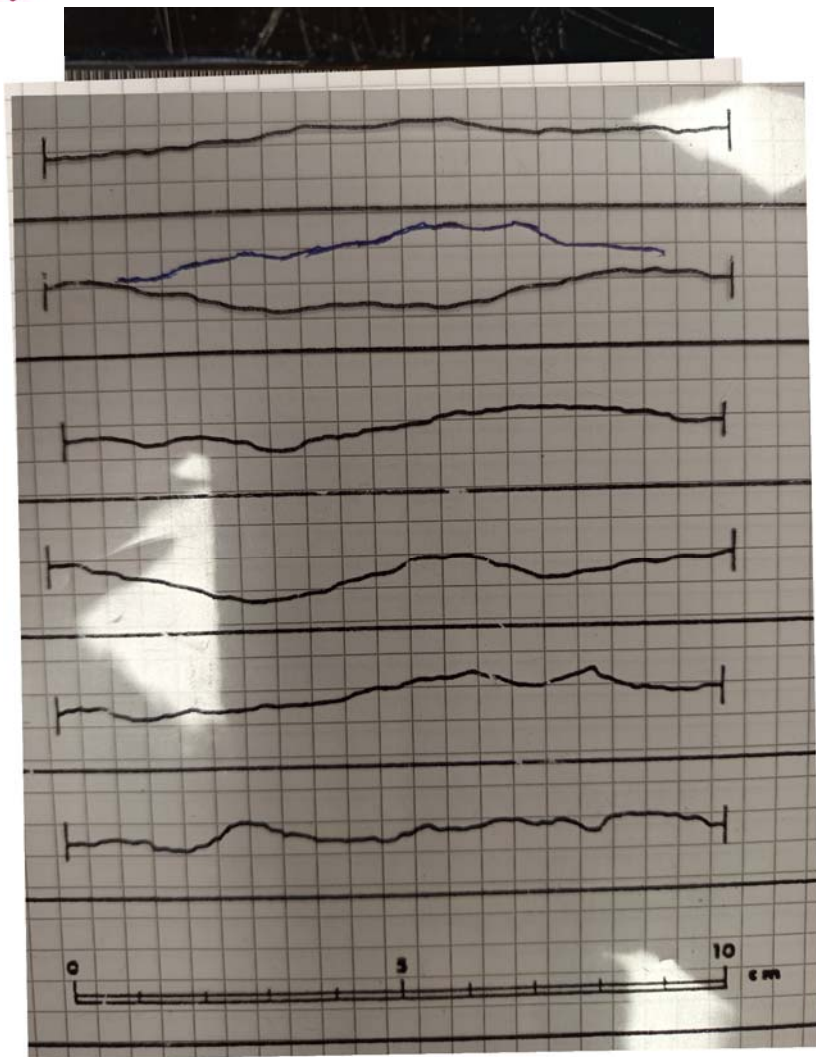
σ_n = sforzo normale

φ_r = angolo di attrito residuo





4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Prova di taglio con apparecchio di Hoek sulle discontinuità



Equazione empirica per la resistenza al taglio di una discontinuità scabra:

$$\varphi_p = JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r$$

$$\tau_n = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right]$$

JRC = coefficiente di rugosità del giunto
(Joint Roughness Coefficient)

JCS = resistenza **sulla parete del giunto**
(Joint Wall Compressive Strength)

φ_p = angolo d'attrito di picco

τ_n = resistenza al taglio

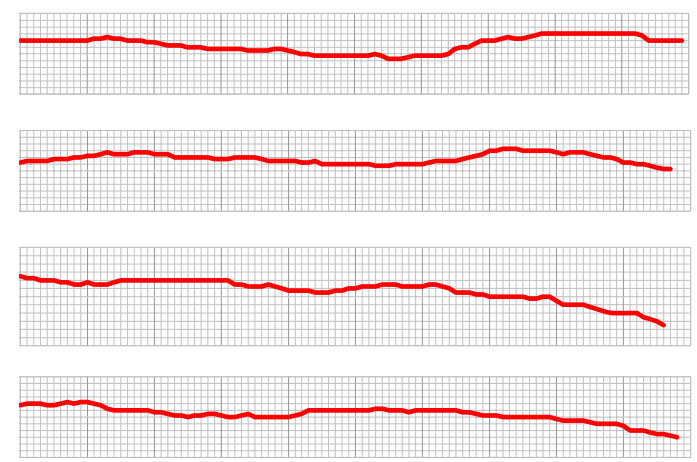
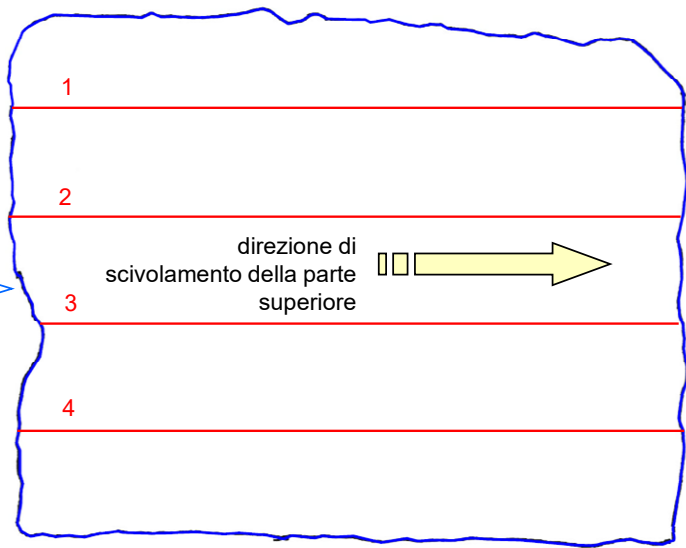
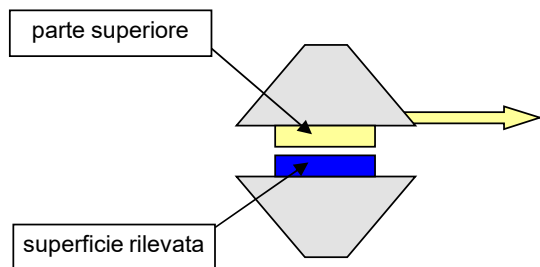
σ_n = sforzo normale

φ_r = angolo di attrito residuo





4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Prova di taglio con apparecchio di Hoek sulle discontinuità



$JRC_1 = 9$

$JRC_1 = 8$

$JRC_1 = 9$

$JRC_1 = 7$

$JRC_{MEDIO} = 8,25$



4. – LE PROVE DI LABORATORIO – Misura della velocità ultrasonica delle onde elastiche

Obiettivo: misura della velocità di propagazione delle onde longitudinali nei provini di roccia per una valutazione preliminare speditiva della qualità dei provini da sottoporre alle prove di compressione.

ASTM D 7012 - Standard Test Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

par. 7.1 The specimens for each sample shall be selected from cores representing a valid average of the type of rock under consideration. This can be achieved by visual observations of mineral constituents, grain sizes and shape, partings and defects such as pores and fissures, or by other methods such as **ultrasonic velocity measurements**





“ Per qualsiasi tipo di prova [di laboratorio], possiamo subito individuare una serie di problemi:

1. Prelievo di campioni di buona qualità. [...]
2. Necessità di estrapolare i risultati delle prove di laboratorio, che si riferiscono a provini il cui volume può essere dell'ordine di $0,03 \text{ m}^3$, al sito interessato dalla costruzione, che comprende parecchie migliaia di metri cubi.
3. Limitatezza delle attrezzature di laboratorio. [...]
4. **Capacità e interesse del personale del laboratorio.** ”



Joseph E. Bowles, Fondazioni. Progetto e analisi – McGraw-Hill Libri Italia srl 1991 pagg. 15-16
Titolo originale *Foundation Analysis and Design*, 4° ed. 1988

Grazie per l'attenzione