

## **RESISTENZA A TAGLIO DI CAMPIONI RIMANEGGIATI DI OPALINUS CLAY**

Marco Rosone

*Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria  
marco.rosone@unipa.it*

Alessio Ferrari

*Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria  
alessio.ferrari@unipa.it*

Maurizio Ziccarelli

*Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria  
maurizio.ziccarelli@unipa.it*

### **Sommario**

La nota presenta una selezione dei risultati di un ampio programma sperimentale condotto con l'obiettivo di caratterizzare, dal punto di vista della resistenza a taglio, dei campioni rimaneggiati di Opalinus Clay, attraverso l'esecuzione di prove triassiali non convenzionali. I risultati mostrano chiaramente l'influenza del grado di preconsolidazione sul comportamento meccanico del geomateriale e in particolare sulla resistenza a taglio, che risulta caratterizzata da un picco di resistenza poco marcato e da un comportamento dilatante. La presenza di giunti all'interno del provino altera completamente il comportamento originario del materiale, che diventa duttile e contraente. Inoltre, in tali condizioni, la resistenza a taglio si riduce drasticamente ai valori di resistenza residua.

### **1. Introduzione**

L'Opalinus Clay costituirà la barriera geologica per il deposito profondo di scorie radioattive di alta attività che verrà costruito e messo in funzione in Svizzera a partire dal 2030. Tale materiale è stato scelto per la sua attitudine a prevenire la migrazione dei radionuclidi (Bossart et al., 2017), alla capacità di autosigillare le fratture (Gautschi, 2017) e alle sue favorevoli proprietà termo-idromeccaniche (e.g. Ferrari et al., 2014; Favero et al., 2016). Come è noto, il comportamento meccanico di geomateriali complessi dipende fortemente dalla microstruttura e dall'evoluzione di quest'ultima con i carichi termici, idraulici, chimici e meccanici. La microstruttura dell'Opalinus Clay è il risultato di un'articolata storia geologica, iniziata con la deposizione in ambiente marino e proseguita con intensi processi diagenetici. Tale materiale è caratterizzato da una significativa variabilità spaziale delle sue proprietà che rende particolarmente difficile la scelta di parametri geomeccanici unici per l'intera formazione; in quest'ultima sono molto frequenti anche giunti di stratificazione e, per effetto della storia geologica complessa, è possibile individuare anche zone disturbate tettonicamente e faglie. Presso il laboratorio di ricerca sotterraneo di Mont Terri (Canton Jura, Svizzera) sono state identificate tre diverse facies (shaly, sandy e carbonate-rich) ed è stata individuata una zona particolarmente disturbata dal punto di vista tettonico, denominata "Main Fault" (Bossart et al., 2017). Dal punto di vista geomeccanico, il comportamento dell'Opalinus Clay è caratterizzato da un legame costitutivo elasto-plastico complesso, le cui principali caratteristiche sono l'elasticità non lineare, l'anisotropia e la rottura fragile (e.g. Favero et al., 2018). In questo contesto geotecnico particolarmente complesso, risulta fondamentale caratterizzare alcuni parametri di riferimento della resistenza a taglio di questo geomateriale. Ferrari et al. (2020) hanno individuato il limite inferiore dei parametri di resistenza al

taglio dell'Opalinus Clay shale analizzando il comportamento meccanico di campioni delle diverse facies allo stato rimaneggiato. L'estensione di questo approccio ad altri parametri geomeccanici di riferimento può fornire indicazioni significative sul comportamento del materiale intatto, dati utili per la modellazione costitutiva e informazioni sul comportamento meccanico del terreno nelle zone di faglia, anche tenendo conto della variabilità della facies nella formazione dell'Opalinus Clay.

In questa nota, viene presentata una selezione dei risultati di un ampio programma sperimentale mirato alla caratterizzazione, dal punto di vista della resistenza a taglio, di campioni di Opalinus Clay prelevati nel laboratorio sotterraneo di Mont Terri. In particolare, vengono presentati i risultati di prove di compressione triassiale non convenzionali eseguite su campioni completamente rimaneggiati, appartenenti alla facies Shaly, preparati con l'utilizzo di diverse tecniche sperimentali.

## 2. Materiale della sperimentazione

I campioni sottoposti a prova sono stati prelevati all'interno del laboratorio sotterraneo di Mont Terri (Canton Jura, Svizzera) e appartengono alle facies shaly dell'Opalinus Clay. Le principali proprietà geotecniche dei campioni, espresse in termini di massa specifica del terreno  $\rho_s$ , limite di liquidità  $w_l$ , limite di plasticità  $w_p$ , indice di plasticità  $PI$ , attività  $A$  e di frazioni granulometriche sono riportate nella Tabella 1; i dati riportati sono simili a quelli di precedenti ricerche sull'Opalinus Clay (Favero et al., 2016; Ferrari et al. 2020). Dal punto di vista mineralogico, la frazione argillosa è costituita principalmente da caolinite, clorite e illite ma sono anche presenti minori quantità di strati misti illite-smectite. La frazione sabbiosa è essenzialmente costituita da frammenti di quarzo e calcite.

Tabella 1. Proprietà indice dei campioni sottoposti a prova.

Facies	Campione	$\rho_s$	$w_l$	$w_p$	$PI$	$A$	Frazioni granulometriche (%)			
		(Mg/m <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla
Shaly	BGC-1 32	2.71	35	22	13	0.33	0	5	56	40
	BGC-2 36	2.69	42	33	10	0.22	0	4	51	45

La sperimentazione è stata condotta sul materiale completamente rimaneggiato e riconsolidato. La procedura di preparazione del materiale rimaneggiato proposta da Burland (1990) è stata presa come riferimento per l'individuazione della migliore tecnica da attuare in laboratorio sull'Opalinus Clay. I campioni sono stati inizialmente frantumati con un mortaio fino ad ottenere aggregati di materiale argilloso di dimensioni minori di 4.75 mm. Quindi, il materiale è stato miscelato con acqua distillata fino ad ottenere un contenuto d'acqua pari 1÷1.5 volte il limite di liquidità, e conservato in ambiente chiuso per 24÷48 ore. Dopo l'equalizzazione al contenuto d'acqua desiderato, si è proceduto ad un'ulteriore destrutturazione lavorando il materiale con una spatola metallica su una lastra di vetro. Il materiale completamente rimaneggiato è stato consolidato in condizioni 1D all'interno di un consolidometro (altezza  $h = 130$  mm, diametro  $d = 100$  mm). La tensione verticale efficace massima, applicata per successivi incrementi di carico, è stata pari a  $\sigma'_v = 320$  kPa. Dopo la fase di carico è stata eseguita una fase di scarico per step fino alla tensione  $\sigma'_v = 40$  kPa e uno scarico in condizioni non drenate alla tensione totale nulla. Questa procedura sperimentale produce dei campioni di argilla rimaneggiata con un indice di sovra-consolidazione  $OCR$  ( $OCR = \sigma'_{v,max} / \sigma'_{v,0}$ ) pari a 8.

## 3. Programma sperimentale

Il programma sperimentale ha previsto l'esecuzione di prove di compressione triassiale non convenzionali eseguite su provini di Opalinus Clay completamente destrutturati e rimaneggiati. Ciascun campione proveniente dal consolidometro è stato utilizzato per confezionare due provini cilindrici aventi  $d = 38$  mm e  $h = 76$  mm. I provini, una volta installati in cella triassiale, sono stati sottoposti, da entrambe le estremità, ad una back-pressure costante ( $u_{w,0}$ ) nell'intervallo di 150 ÷ 250

kPa e una tensione efficace di confinamento  $p'_0$  pari a 20÷40 kPa. Una volta terminata la fase di saturazione, ovvero quando il parametro B di Skempton risultava maggiore di 0.97, sono stati applicati dei percorsi isotropi di carico/scarico per indurre valori di OCR ( $OCR = p'_c / p'_0$ ) compresi tra 2 e 20. In altre parole, dopo la procedura di saturazione, i campioni sono stati consolidati alla pressione efficace di confinamento  $p'_c$  (400 kPa o 1200 kPa) e poi sono stati scaricati al valore designato di  $p'_0$ . Durante queste fasi, il drenaggio è stato consentito da entrambe le estremità del provino e sono state calcolate le deformazioni volumetriche attraverso le variazioni di contenuto d'acqua del provino. Le stesse misure sono state utilizzate per calcolare il coefficiente di consolidazione  $c_v$  sia durante i percorsi di carico, pari a  $c_v = 4\div7 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s, che durante i processi di scarico, pari a  $c_v = 4 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s ÷  $1 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s. Sulla base di tali parametri è stata selezionata una velocità di spostamento assiale (0.028 mm/min, corrispondente alla velocità di deformazione  $v = 6 \times 10^{-6}$  s<sup>-1</sup>) che consentisse l'equalizzazione delle pressioni interstiziali all'interno del provino anche durante la fase di rottura in condizioni non drenate (Head, 1986). Durante la fase di rottura, la pressione interstiziale è stata misurata per mezzo di due trasduttori di pressione collegati ai due circuiti di drenaggio.

Nell'ambito della stessa sperimentazione un secondo set di prove triassiali è stato condotto con l'obiettivo di valutare l'effetto della presenza di giunti preesistenti sul comportamento meccanico dell'Opalinus Clay. In particolare, sono state eseguite prove di compressione triassiale consolidate drenate ( $u_{w,0} = 350$  kPa) su provini che, dopo essere stati sottoposti alla procedura sperimentale illustrata in precedenza, sono stati tagliati lungo un piano inclinato di 59° rispetto all'orizzontale utilizzando di un dispositivo appositamente preparato e una sega a lama molto sottile (Fig. 1).

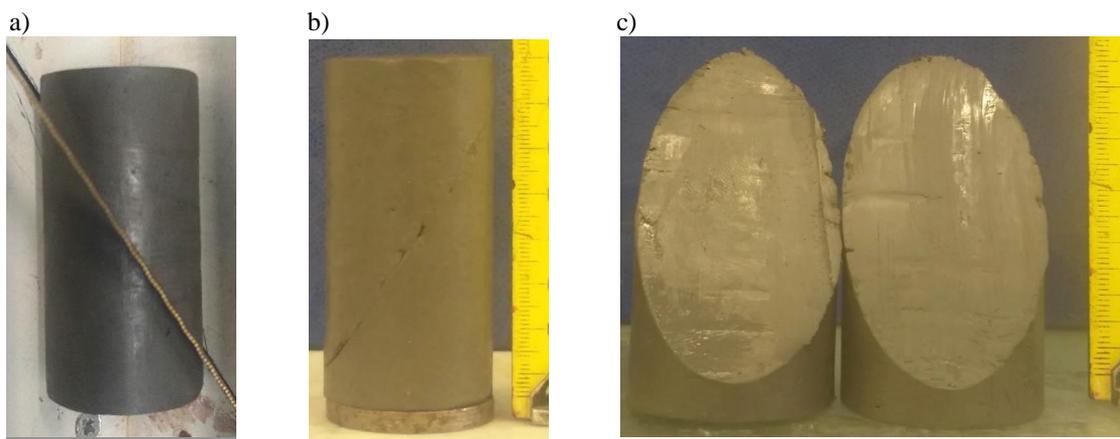


Fig. 1. Un provino per prove di compressione triassiale durante (a) e dopo (a) le operazioni di taglio del giunto artificiale; un particolare della superficie del giunto artificiale (c).

Nell'ambito del presente lavoro si illustreranno i risultati di una prova triassiale che è stata condotta in modalità multi-stage, applicando tensioni efficaci di confinamento  $p'_0$  pari a 100, 200, 400 e 800 kPa, al fine di ottenere un involuppo di resistenza a taglio completo da un unico provino. La procedura sperimentale adottata prevede di interrompere la fase di rottura una volta ottenuta la stabilizzazione della tensione deviatorica  $q = \sigma_1 - \sigma_3$  e di incrementare la tensione di confinamento fino al successivo valore di prova. La fase di rottura può essere proseguita solamente dopo avere verificato l'effettiva conclusione della fase di consolidazione indotta dall'incremento della pressione di cella, monitorando l'andamento delle deformazioni volumetriche. Per la fase di rottura drenata è stata scelta una velocità di spostamento verticale pari a 0.0005 mm/min (corrispondente a  $v = 1 \times 10^{-7}$  s<sup>-1</sup>). Per verificare l'adeguatezza di tale velocità rispetto alla capacità di drenaggio del provino, è stata utilizzata la procedura proposta da Escario e Saez (1987). Tale procedura prevede di interrompere la fase deviatorica per 24 ore, per permettere l'eventuale dissipazione delle sovrappressioni interstiziali indotte, e di verificare che non ci fosse una variazione della resistenza al taglio nella fase di ripartenza.

Vista la complessità della prova, tale verifica è stata condotta nell'ultima fase di rottura.

#### 4. Analisi dei risultati

I risultati delle prove di compressione triassiale consolidate non drenate eseguite sui provini omogenei, ovvero senza il taglio, sono presentati in Fig. 2 in termini di tensione deviatorica  $q$  (Fig. 2a), sovrappressione interstiziale  $\Delta u_w$  (Fig. 2b) e coefficiente di Skempton  $A$  ( $A = \Delta u_w / (\sigma_1 - \sigma_3)$ ) al variare della deformazione assiale  $\varepsilon_a$ .

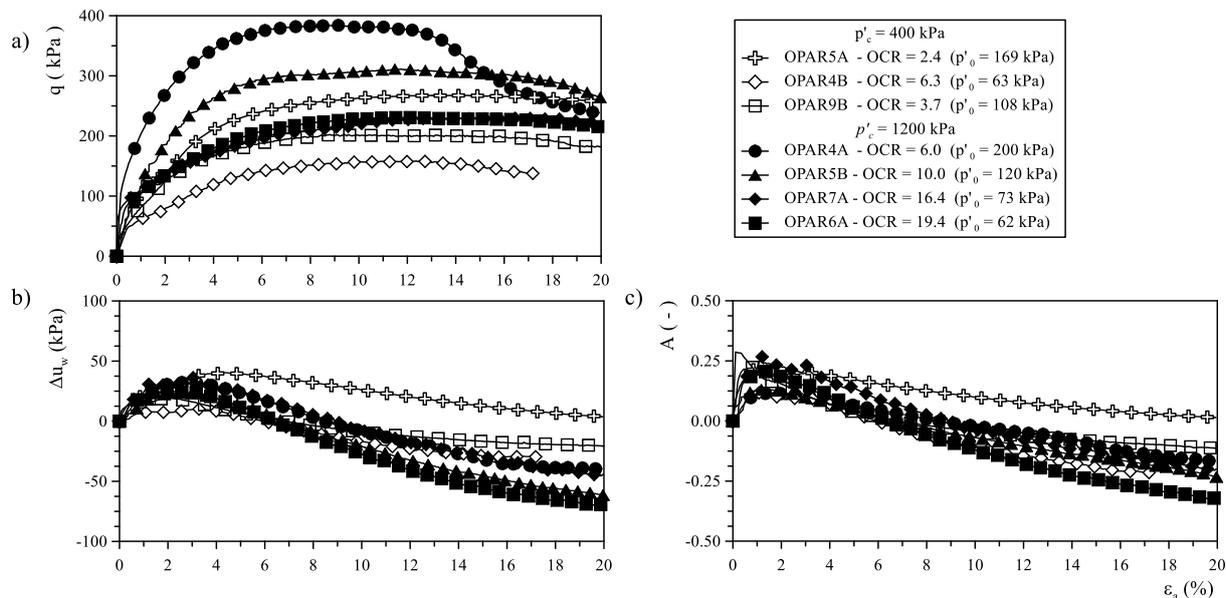


Fig. 2. Risultati della fase di rottura delle prove di compressione triassiale eseguite su provini omogenei (senza giunto artificiale): andamento della tensione deviatorica  $q$  (a), della sovrappressione interstiziale  $\Delta u_w$  (b) e del coefficiente di Skempton  $A$  in funzione della deformazione assiale.

In generale, le curve  $q$  vs  $\varepsilon_a$ , riportate in Fig. 2, evidenziano un picco di resistenza non significativamente marcato in corrispondenza di una deformazione assiale  $\varepsilon_a = 10 \div 12\%$ . Solo il campione OPAR4A ha mostrato un pronunciato picco di resistenza. In ogni caso, la condizione stazionaria di resistenza ultima non è stata chiaramente raggiunta alla fine delle prove. All'inizio della fase di rottura la pressione interstiziale ha una tendenza crescente, ma prima del picco di resistenza la tendenza si inverte completamente, diventando decrescente. Il massimo valore della pressione interstiziale si raggiunge in corrispondenza di una deformazione assiale pari a  $\varepsilon_a = 10 \div 12\%$ . In corrispondenza della rottura, ovvero in corrispondenza del valore massimo della tensione deviatorica, la sovrappressione interstiziale è risultata negativa o poco maggiore di zero. Il minimo valore della pressione interstiziale è stato registrato a fine prova ( $\varepsilon_a = 18 \div 20\%$ ), anche se le condizioni stazionarie non sono chiaramente raggiunte. Come è noto, la riduzione della pressione interstiziale a rottura è l'evidenza sperimentale del comportamento volumetrico dilatante del materiale, che in condizioni non drenate risulta inibito, e il coefficiente  $A$  risulta negativo o poco maggiore di zero (Fig. 2c).

I percorsi di tensione sul piano ( $p'$ ,  $q$ ) sono rappresentati in Fig. 3 al variare della massima tensione applicata  $p'_c$ . Come è noto, la definizione della condizione di rottura è un punto chiave per la comprensione del comportamento dell'argilla allo stato sovra-consolidato a causa, principalmente, della curvatura verso destra del percorso delle tensioni efficaci, che è associata al comportamento dilatante dei provini sottoposti a prova. Pertanto, i percorsi di tensione riportati in Fig. 3 possono essere caratterizzati da tre diverse condizioni di rottura: il valore massimo di  $A$ , il valore massimo della variazione della pressione interstiziale  $\Delta u_w$  e la massima tensione deviatorica  $q_{max}$ . Generalmente, queste tre condizioni non coincidono e, per ricavare i parametri di resistenza a taglio, è necessario

fissare una di queste condizioni come rappresentativa della rottura. Nella Fig. 3, i punti che corrispondono alla massima tensione deviatorica sono stati interpolati per determinare i parametri  $c'$  e  $\phi'$ , valevoli per l'intervallo tensionale investigato, attraverso le note relazioni di tali parametri con l'intercetta ( $a = 6 c' \cos \phi' / (3 - \sin \phi')$ ) e l'inclinazione della retta involucro ( $M = 6 \sin \phi' / (3 - \sin \phi')$ ) sul piano ( $p', q$ ). Dai parametri ricavati, risulta evidente che c'è una chiara evidenza sperimentale dell'incremento della coesione intercetta  $c'$  con la tensione di pre-consolidazione  $p'_c$  mentre l'angolo di resistenza a taglio  $\phi'$  assume una leggera tendenza a diminuire.

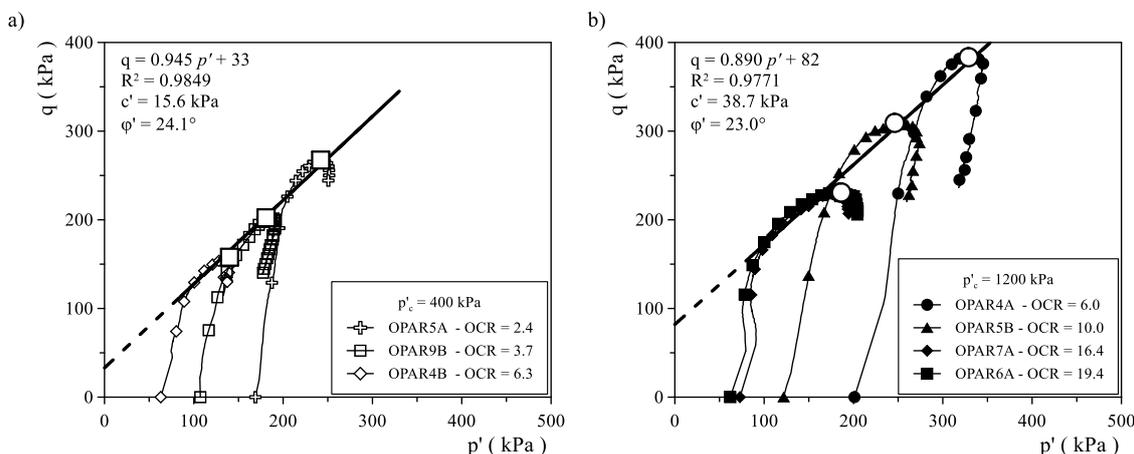


Fig. 3. Percorsi di tensione e involucro a rottura sul piano ( $p', q$ ) per i provini sottoposti alla pressione efficace di confinamento massima  $p'_c = 400$  kPa (a) e 1200 kPa (b).

I risultati della prova triassiale eseguita sul provino tagliato artificialmente (Fig. 2) sono riportati in Fig. 4. In particolare, sono diagrammati gli andamenti delle tensioni totali principali  $\sigma_1, \sigma_3$ , della pressione interstiziale  $u_w$  (Fig. 4a) e della deformazione volumetrica  $\varepsilon_v$  (Fig. 4b) in funzione della deformazione assiale  $\varepsilon_a$  applicata. Da tali diagrammi risulta evidente che, per effetto del giunto artificiale, il comportamento meccanico del provino risulta duttile e contraente durante tutte le fasi di taglio eseguite. Tenuto conto della presenza del giunto, si è preferito interpretare i risultati di tale prova calcolando le tensioni di taglio  $\tau$  e le tensioni normale efficace  $\sigma'_n$  agenti sulla superficie del giunto secondo un modello meccanico a blocchi, simile a quello proposto da Chandler (1966), Webb (1969) e Burland (1990). L'evoluzione delle tensioni  $\tau$  e  $\sigma'_n$  viene diagrammata in Fig. 4c in funzione dello spostamento relativo  $\delta$  delle due metà del provino. Riportando tali andamenti sul piano del Mohr ( $\sigma'_n, \tau$ ) è stato possibile ricavare direttamente l'involuppo di resistenza a rottura valido per i provini di Opalinus Clay contenenti un giunto artificiale. I parametri di resistenza ottenuti ( $c' = 0$  e  $\phi' = 9.9^\circ$ ) sono sostanzialmente coincidenti con quelli ricavati da Ferrari et al. (2020) attraverso prove di taglio anulare eseguite su campioni completamente rimaneggiati di Opalinus Clay in facies shaly.

## 5. Conclusioni

La nota ha presentato una selezione dei risultati di un ampio programma sperimentale condotto con l'obiettivo di caratterizzare la resistenza a taglio di campioni rimaneggiati di Opalinus Clay attraverso l'esecuzione di prove triassiali non convenzionali. I risultati presentati evidenziano che i provini sovraconsolidati mostrano picco di resistenza poco marcato e un comportamento dilatante che, essendo inibito in condizioni non drenate, si traduce in sovrappressioni interstiziali a rottura negative o poco maggiori di zero. La presenza di giunti all'interno del materiale omogeneo ha un significativo effetto sul comportamento meccanico che diventa duttile e contraente. Inoltre, la resistenza a taglio misurata in tali condizioni risulta sostanzialmente coincidente con la resistenza residua misurata con prove di taglio anulare su campioni completamente rimaneggiati.

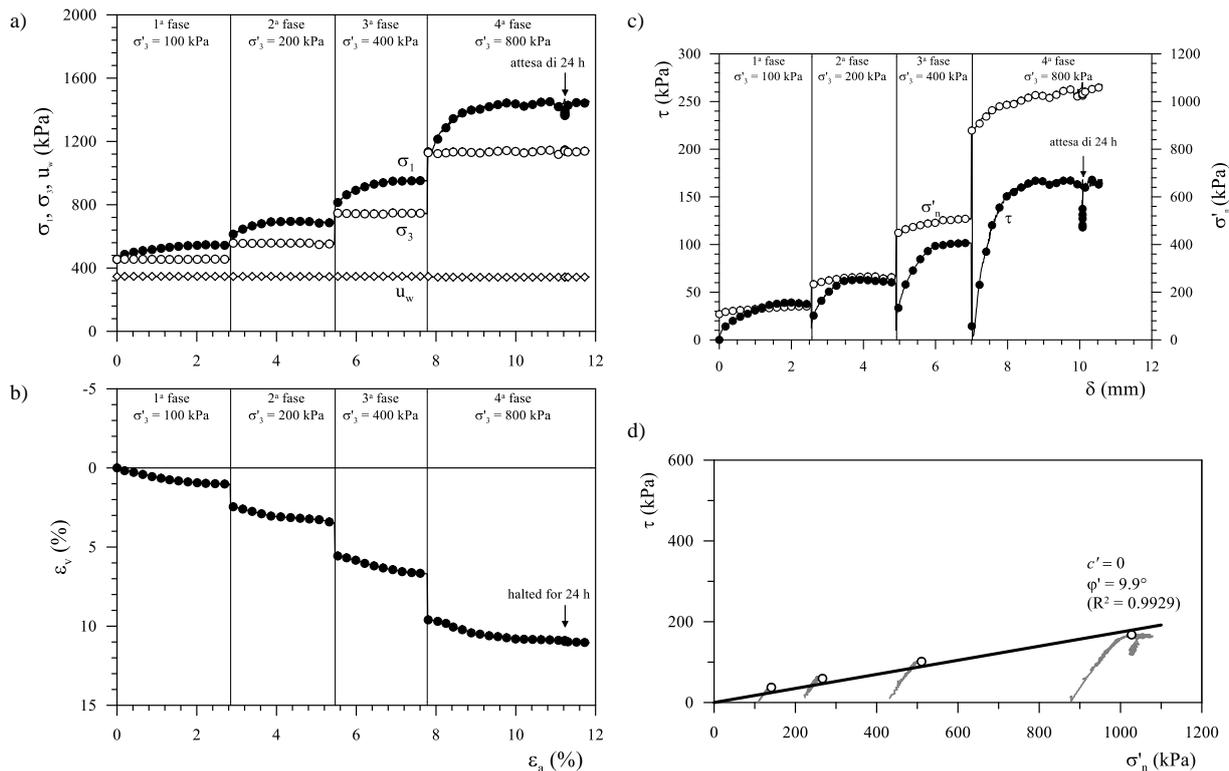


Fig. 4. Tensioni totali principali  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ , pressione interstiziale  $u_w$  (a) e deformazione volumetrica  $\epsilon_v$  (b) in funzione della deformazione assiale  $\epsilon_a$  durante la prova su provino con giunto. c) Andamenti delle tensioni di taglio  $\tau$  e delle tensioni normali efficaci  $\sigma'_n$  agenti sulla superficie del giunto in funzione dello spostamento relativo del giunto  $\delta$ . d) Involuppo di resistenza calcolato sulla base dei percorsi di tensione ( $\sigma'_n$ ,  $\tau$ ).

## Bibliografia

- Bossart, P., Bernier, F., Birkholzer, J., Bruggeman, C., Connolly, P., Dewonck, S., Fukaya, M., Herfort, M., Jensen, M., Matray, J.-M., Mayor, J.C., Moeri, A., Oyama, T., Schuster, K., Shigeta, N., Vietor, T., Wiczorek, K. (2017). "Mont Terri rock laboratory, 20 years of research: introduction, site characteristics and overview of experiments", *Swiss Journal of Geosciences* 110,1, 3-22.
- Burland, J.B. (1990) "On the compressibility and shear strength of natural clays", *Géotechnique*, 40, 3, 329-378.
- Chandler R.J. (1966) "The Measurement of Residual Strength in Triaxial Compression", *Géotechnique*, 16,3, 181-186.
- Escario V, Saez J (1987) Shear strength of partly saturated soils versus suction. Proceedings of the 6th international conference on expansive soils, New Delhi
- Favero, V., Ferrari, A., Laloui, L. (2016a) "Thermo-mechanical volume change behaviour of Opalinus Clay", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 90, 15-25.
- Favero, V., Ferrari, A., Laloui, L. (2018) "Anisotropic behaviour of Opalinus Clay through consolidated and drained triaxial testing in saturated conditions", *Rock Mechanics and Rock Engineering* 51, 5, 1305-1319.
- Ferrari, A., Favero, V., Marschall, P., Laloui, L. (2014) "Experimental analysis of the water retention behaviour of shales", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 72, 61-70.
- Ferrari, A., Rosone, M., Ziccarelli, M., Giger, S.B. (2020) "The shear strength of Opalinus Clay shale in the remoulded state", *Geomechanics for Energy and the Environment* 21, 100142.
- Gautschi, A. (2017). "Safety-relevant hydrogeological properties of the claystone barrier of a Swiss radioactive waste repository: An evaluation using multiple lines of evidence", *Grundwasser*, 22,3, 221-233.
- Head K.H. (1986) Manual of soil laboratory testing, vol. 3: effective stress tests, John Wiley & Sons, New York.
- Webb D.L. (1969) "Residual strength in conventional triaxial tests". Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. Found. Eng., Mexico, 1, 433-441.