

## STUDIO SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO A FATICA DI ARGILLE STRUTTURATE

Andrea Ciancimino  
*Politecnico di Torino*  
[andrea.ciancimino@polito.it](mailto:andrea.ciancimino@polito.it)

Monica Barbero  
*Politecnico di Torino*  
[monica.barbero@polito.it](mailto:monica.barbero@polito.it)

Renato Maria Cosentini  
*Politecnico di Torino*  
[renato.cosentini@polito.it](mailto:renato.cosentini@polito.it)

Sebastiano Foti  
*Politecnico di Torino*  
[sebastiano.foti@polito.it](mailto:sebastiano.foti@polito.it)

Guido Musso  
*Politecnico di Torino*  
[guido.musso@polito.it](mailto:guido.musso@polito.it)

### Sommario

La presente nota tratta i risultati preliminari di uno studio sperimentale in corso presso il laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino, condotto al fine di valutare il comportamento a fatica di materiali di caprock. In particolare, le prove triassiali eseguite in questa fase hanno investigato gli effetti della frequenza di applicazione del carico, con l'obiettivo di individuare una metodologia compatibile con i tempi di esecuzione delle prove in laboratorio e che al contempo possa essere considerata rappresentativa in relazione all'effettivo processo di danneggiamento. Le frequenze caratteristiche del problema oggetto di studio, associate ai cicli di deposito/produzione di gas, sono infatti estremamente basse, e quindi incompatibili con i tempi di esecuzione delle prove di laboratorio. D'altra parte, la risposta ciclica dei materiali in oggetto dipende fortemente dalle condizioni di applicazione del carico. Al fine di studiare la dipendenza del comportamento del materiale dalla frequenza di carico, sono state preliminarmente condotte alcune prove monotone adottando diverse velocità di deformazione. Tali prove rappresentano il punto di riferimento delle successive prove di compressione ciclica, effettuate al variare della frequenza di applicazione del carico.

### 1. Introduzione

Con il termine "comportamento a fatica" si identifica il processo di danneggiamento caratteristico di alcuni materiali sottoposti a carichi ciclici (Bagde e Petroš, 2005). Tale processo è caratterizzato da un progressivo accumulo di deformazioni permanenti e da un deterioramento delle caratteristiche di resistenza e rigidità del materiale, che può portare alla rottura del campione dopo l'applicazione di un certo numero di cicli di carico (e.g. Cerfontaine e Collin, 2018).

I primi studi riguardanti il comportamento ciclico di materiali consistenti sono stati sviluppati prevalentemente nell'ambito dell'Ingegneria Mineraria, con l'obiettivo di studiare la risposta di rocce dure e fragili a sollecitazioni indotte da esplosivi o ripetute perforazioni (Burdine, 1963; Haimson e Kim, 1970). In seguito, l'importanza di tali problematiche è stata riconosciuta in diversi ambiti, quali ad esempio la progettazione di gallerie in condizioni sismiche, la degradazione dovuta all'esposizione a cicli di gelo-disgelo o lo studio dei fenomeni di invecchiamento dei pilastri di roccia in cave sotterranee dovuti a ripetute oscillazioni di falda (e.g. Hashash et al., 2001; Zhang et al., 2004; Liu et al., 2015).

Negli ultimi anni, il comportamento a fatica dei materiali consistenti ha assunto un'importanza rilevante in relazione all'uso di giacimenti depletati come depositi di stoccaggio di gas (e.g. Reitenbach et al., 2015; Fan et al., 2020). L'alternarsi dei periodi di deposito e produzione induce infatti una variazione ciclica della pressione interstiziale nei materiali di giacimento. L'effetto di tale variazione sui materiali di copertura è assimilabile all'applicazione di un carico ciclico assiale, le cui conseguenze possono compromettere l'integrità e la tenuta dei depositi.

Tali problematiche sono state ad esempio recentemente studiate nel caso delle caverne saline, mediante l'esecuzione di prove di laboratorio cicliche triassiali al fine di valutare la vita utile a fatica del materiale (Fan et al., 2020; Peng et al., 2020).

La presente nota introduce i risultati preliminari di uno studio sperimentale in corso presso il laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino, condotto al fine di valutare il comportamento a fatica di materiali di copertura. La nota si concentra sullo sviluppo di una metodologia efficace per la valutazione del comportamento a fatica del materiale. In particolare, alcune prove triassiali monotone e cicliche non drenate sono state condotte al fine di studiare l'influenza della frequenza di carico sulla risposta del caprock.

La definizione del protocollo di carico è infatti problematica, poiché l'applicazione di carichi ciclici a una velocità di deformazione media coerente con quella effettiva definita dalla stagionalità dei cicli di stoccaggio/produzione di gas implicherebbe tempi di prova proibitivi. D'altra parte, al diminuire della frequenza di applicazione e di conseguenza della velocità di deformazione indotta, il numero di cicli a rottura tende a decrescere a causa del comportamento viscoso del materiale, che induce un maggiore accumulo di deformazioni permanenti in ogni ciclo di carico. Diversi studi sperimentali hanno evidenziato in passato l'influenza della velocità di deformazione sulla risposta monotona e ciclica di materiali a grana fine (e.g., Lefebvre e LeBoeuf, 1987) e rocce (e.g., Liu et al., 2018). Tuttavia, ulteriori studi sono necessari al fine di studiare l'influenza della frequenza di prova sulla risposta ciclica dei materiali di transizione, come le argille consistenti consolidate ad elevate pressioni di confinamento.

## **2. Risultati**

Il materiale oggetto di studio è costituito da un'argilla con limo consistente. I campioni sono inizialmente saturati e consolidati, in condizioni  $C\eta_0$ , ad uno stato tensionale efficace coerente con quello atteso in sito. In seguito, la fase di taglio è condotta in condizioni non drenate, in controllo di deformazione per quanto concerne le prove monotone o in controllo di sforzo nel caso di prove cicliche.

La Figura 1 mostra i risultati di una serie di prove condotte su campioni indisturbati di materiale di copertura consolidato a  $q_0=6.3$  MPa e  $p_0'=8.1$  MPa. In particolare, le prove M-TX1 e M-TX2 sono prove monotone eseguite imponendo una velocità di deformazione assiale  $\dot{\epsilon}_{ax}$  costante pari, rispettivamente, a 0.01%/min e 0.5%/min. La prova M-TX1 è considerata rappresentativa dell'effettiva risposta del materiale in sito, poiché la velocità di deformazione imposta è sufficientemente lenta da garantire l'equalizzazione delle pressioni interstiziali e il pieno sviluppo della banda di taglio all'interno del campione. Al contrario, la prova M-TX2 è stata condotta a una velocità di deformazione coerente con la prova ciclica C-TX, caratterizzata da un periodo di carico  $T=5$  min. Quest'ultima è

stata eseguita in controllo di sforzo imponendo un carico ciclico deviatorico caratterizzato da  $q_{mean}=7.5$  MPa e  $q_{max}=13.5$  MPa.

Il confronto tra le prove monotone mostra la dipendenza del comportamento meccanico dalla velocità di deformazione imposta, sia in termini di risposta sforzo-deformazione (Figura 1a-b), sia in termini di accumulo di sovrappressioni interstiziali  $\Delta u_w$  (Figura 1c). Il percorso tensionale seguito dal campione nella prova M-TX2 porta a un deviatore di picco più elevato, al quale corrisponde una pressione di confinamento  $p'$  leggermente inferiore a causa delle elevate sovrappressioni interstiziali raggiunte. Tali differenze comportano un aumento della resistenza del materiale se sottoposto a velocità di deformazione elevate. È ragionevole supporre che la superficie di rottura non abbia infatti tempo a sufficienza per svilupparsi completamente una volta raggiunto il picco (come anche si osserva del diagramma delle sovrappressioni interstiziali di Figura 1.c). Di conseguenza, per un dato livello deformativo, il materiale esibisce una resistenza superiore rispetto quella ottenuta per velocità di deformazione inferiori. Tali risultati sono coerenti con quanto ottenuto sperimentalmente da altri Autori in studi precedenti (e.g., Lefebvre e LeBoeuf, 1987, evidenziano la dipendenza della risposta del materiale dalla velocità di applicazione del carico, che deve quindi essere opportunamente considerata anche nel caso in cui si conducano prove cicliche).

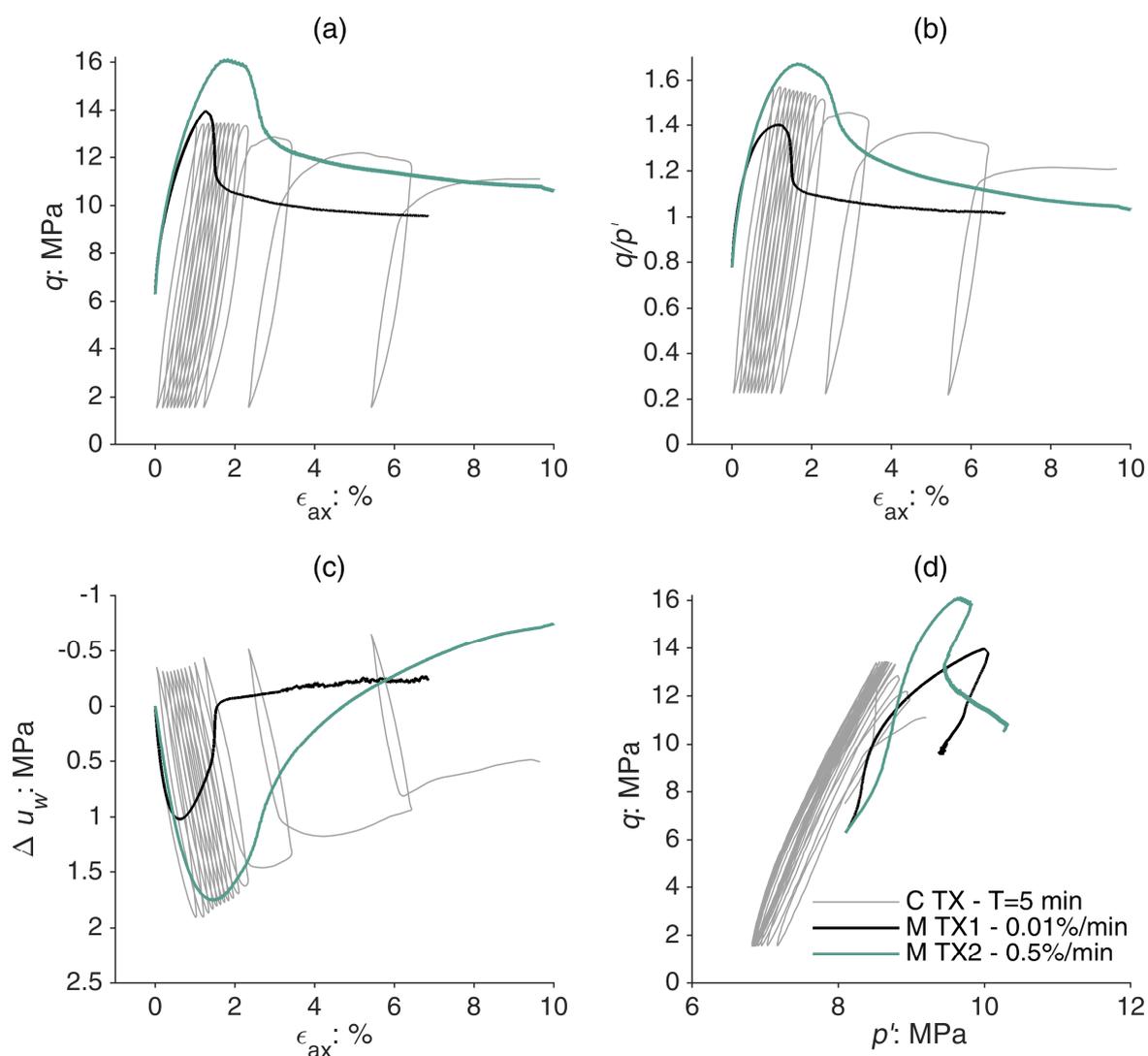


Fig 1. Risultati delle prove triassiali monotone e cicliche in condizioni non drenate: (a) sforzo deviatorico vs deformazione assiale; (b) rapporto tensionale  $\eta$  vs deformazione assiale; (c) sovrappressioni interstiziali vs deformazione assiale; (d) percorsi tensionali efficaci.

La prova ciclica è stata condotta imponendo una sollecitazione di periodo  $T = 5$  min, coerente con una velocità di deformazione  $\dot{\epsilon}_{ax}$  pari a circa 0.5%/min. Il deviatore massimo  $q_{max} = 13.5$  MPa corrisponde a circa il 96% della resistenza monotona misurata nella prova M-TX1 (condotta a  $\dot{\epsilon}_{ax} = 0.01$  %/min), mentre è pari al 85% della resistenza misurata nella prova M-TX2 (condotta a  $\dot{\epsilon}_{ax} = 0.5$  %/min). La prova ha portato alla rottura del campione dopo l'applicazione di undici cicli di carico.

Osservando i risultati, si nota innanzitutto un marcato accumulo di deformazione assiale permanente sin dai primi cicli di carico (Figura 1.a). Tale accumulo, dovuto all'elevato valore di  $q_{max}$  imposto, comporta uno spostamento dei cicli sforzo-deformazione, che attraversano rapidamente le curve relative alla prova monotona M-TX1. Viceversa, la prova M-TX2 ben involupa i risultati della prova ciclica, specialmente in termini di andamento del rapporto  $q/p'$  (Figura 1.b). Analogamente, il campione tende a sviluppare inizialmente elevate sovrappressioni interstiziali, che tendono però a decrescere all'aumentare delle deformazioni permanenti accumulate (Figura 1.c). È ragionevole supporre che tale diminuzione possa essere interpretata come manifestazione dello sviluppo della superficie di rottura.

La rottura del campione avviene per una deformazione assiale pari a circa il 2%, quando la sollecitazione ciclica imposta (in termini di rapporto  $q/p'$ ) tende a ricongiungersi con l'involuppo definito dalla prova M-TX2 (Figura 1.b). Dal momento che la prova è condotta in controllo di sforzo, tale condizione corrisponde all'imposizione di una velocità di deformazione equivalente molto elevata (superiore rispetto al valore medio di 0.5%/min).

### 3. Conclusioni

Il confronto tra i risultati di prove monotone e cicliche permette di delineare il ruolo della velocità di deformazione nella risposta meccanica del materiale. La resistenza di picco osservata nella prova MTX-1 è inferiore rispetto al valore massimo ottenuto nella prova ciclica. Si potrebbe quindi erroneamente concludere che la resistenza ciclica del materiale sia superiore in condizioni cicliche, in termini di accumulo di deformazioni assiali e rapporto tensionale  $q/p'$  di picco.

Al contrario, la risposta ciclica del materiale è del tutto coerente con quella monotona nel caso in cui le prove vengano eseguite a velocità di deformazione comparabili. Il  $q_{max}$  imposto nella prova C-TX è pari all'85% della sollecitazione di picco raggiunta nella prova M-TX2. In tali condizioni, è necessaria l'applicazione di undici cicli di carico prima di indurre la rottura ciclica per fatica del campione. Quest'ultima è chiaramente identificabile con l'istante in cui la curva rappresentativa della prova ciclica incrocia la curva monotona di riferimento (prova M-TX 2).

Tali osservazioni preliminari suggeriscono che l'esecuzione di prove cicliche a frequenze relativamente elevate, compatibili con tempi di prova di laboratorio, possa essere un'opzione praticabile solo nel caso in cui i risultati vengano confrontati con curve monotone di riferimento ottenute a velocità di deformazione coerenti con quelle indotte dall'applicazione del carico ciclico.

### Bibliografia

- Bagde M.N., Petroš V. (2005). "Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 237-250.
- Burdine N. (1963). "Rock failure under dynamic loading conditions". *Soc. of Petroleum Eng. Journal*, 3, 1-8.
- Cerfontaine B., Collin F. (2018). "Cyclic and fatigue behaviour of rock materials: review, interpretation and research perspectives". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 391-414.
- Fan J., Liu W., Jiang D., Chen J., Tiedeu W.N., Daemen J.J. (2020). "Time interval effect in triaxial discontinuous cyclic compression tests and simulations for the residual stress in rock salt". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 4061-4076.
- Haimson B.C., Kim C., (1970). "Mechanical behaviour of rock under cyclic fatigue". Proc. 13th Symp. Rock Mech., Urbana, Illinois, pp 845-863.

- Hashash Y.M., Hook J.J., Schmidt B., John I., Yao C. (2001). “Seismic design and analysis of underground structures”. *Tunnelling and underground space technology*, 16, 247-293.
- Lefebvre G., LeBoeuf D. (1987). “Rate effects and cyclic loading of sensitive clays”. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113, 476-489.
- Liu Q., Huang S., Kang Y., Liu X. (2015). “A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze–thaw”. *Cold Regions Science and Technology*, 120, 96-107.
- Liu Y., Dai F., Dong L., Xu N., Feng P. (2018). “Experimental investigation on the fatigue mechanical properties of intermittently jointed rock models under cyclic uniaxial compression with different loading parameters”. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 47-68.
- Peng H., Fan J., Zhang X., Chen J., Li Z., Jiang D., Liu C. (2020). “Computed tomography analysis on cyclic fatigue and damage properties of rock salt under gas pressure”, *International Journal of Fatigue*, 134, 105523.
- Reitenbach V., Ganzer L., Albrecht D., Hagemann B. (2015). “Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues”. *Environmental Earth Sciences*, 73, 6927-6937.
- Zhang S., Lai Y., Zhang X., Pu Y., Yu W. (2004). “Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze–thaw cycle condition”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19, 295-302.