

Caratterizzazione meccanica di gessi ed anidriti con particolare riferimento a fenomeni degradativi

Riccardo Castellanza, Roberto Nova

Politecnico di Milano
Dipartimento di Ingegneria Strutturale

Sommario

I pilastri di miniere abbandonate di gesso e di anidrite sono frequentemente soggetti a processi di alterazione che riducendo le proprietà meccaniche possono indurne il collasso.

Essendo il gesso e l'anidrite rocce evaporitiche il principale processo di alterazione è la dissoluzione in acqua. Tale processo è attualmente in corso nella miniera abbandonata denominata Cava Carale in Santa Brigida (BG) i cui pilastri, sia di anidrite che di gesso, sono immersi in acqua soggetta a parziale ricambio.

Per riprodurre le differenti condizioni di degradazione di sito in laboratorio, più di 200 campioni di materiale intatto di gesso ed anidrite, prelevato da tale miniera abbandonata, sono stati degradati mediante immersione in acqua sia in condizioni di quiete che in condizioni di flusso. I risultati mostrano sempre una marcata diminuzione delle resistenza meccanica delle roccia intatta non appena il gesso e l'anidrite vengono messi a contatto con l'acqua. Al crescere del tempo di immersione e con differenti gradienti a seconda del tipo di degradazione adottato, tale riduzione continua fino al completo annullamento della resistenza meccanica. Per il gesso si mostrano anche i risultati del collasso di un pilastro riprodotto in laboratorio in piccola scala soggetto ad un carico assiale ed interessato da un processo di degradazione analogo a quanto avviene nel sistema minerario della Cava Carale.

Abstract

The pillars in abandoned mines of gypsum and anhydrite are frequently subjected to weathering processes, which induce the degradation of their mechanical properties and may lead to collapse.

Because gypsum and anhydrite are evaporitic rocks, the principal process of degradation is the dissolution in water. This process is currently going on in the abandoned mine called Cava Carale in Santa Brigida (BG), whose pillars, both of anhydrite and gypsum, are immersed in water partially subjected to recharge.

To reproduce in the laboratory the different in situ degradation procedures, more than 200 specimens of intact gypsum and anhydrite, originating from the aforementioned abandoned mine, have been weathered by means of immersion both in still water and in a flux of water. The results show a marked reduction of the mechanical strength of the intact rock as soon as the gypsum and the anhydrite come in contact with water. As time of immersion increases this reduction continues at different rates, depending on the different types of degradation imposed, to the point of complete annihilation of the mechanical strength. For gypsum are also shown the experimental results reproduced in the laboratory of the collapse of a small - scale pillar subjected to an axial load and a process of degradation analogous to that taking place in the mine system of Cava Carale.

1. Introduzione

Obiettivo primario del presente capitolo è la valutazione degli effetti di processi degradativi sul comportamento meccanico dei gessi e delle anidriti. In particolare è stato indagato il processo di dissoluzione indotto dal contatto tra una roccia evaporitica e l'acqua. Se è ben nota la cinetica di dissoluzione di rocce evaporitiche in ambiente acquoso più o meno saturo, minori informazioni si possono reperire in letteratura per quanto concerne la diminuzione delle proprietà meccaniche indotta dal processo di dissoluzione. Se consideriamo, a livello micromeccanico, la roccia evaporitica come un insieme di granelli interconnessi da legami stabili si può intuire che non appena per capillarità un fronte bagnato penetra nella roccia, si sviluppa un processo di alterazione che interessa innanzitutto i legami esistenti tra i grani o tra i cristalli costituenti la roccia. Il principale effetto macroscopico di tale processo è costituito da una progressiva forte riduzione della resistenza a compressione del materiale roccioso.

Ovviamente la velocità di tale riduzione dipenderà dalle condizioni al contorno nelle quali il processo di dissoluzione si sviluppa. Se ad esempio la roccia evaporitica sarà a contatto con acqua satura di ioni prodotti dalla dissoluzione tale fenomeno si arresterà, mentre in presenza di un flusso di acqua non satura si giungerà alla completa dissoluzione della roccia evaporitica. Dal momento che tali processi di alterazione sono in atto nella Cava Carale di Santa Brigida (BG) si è deciso di utilizzare tali rocce evaporitiche per il presente studio. Va osservato però che tale scelta è rappresentativa degli effetti geomeccanici della dissoluzione di rocce evaporitiche in generale, ed inoltre tale lavoro può essere visto come un protocollo sperimentale per riprodurre in piccola scala in laboratorio quei processi di alterazione che interessano in sito le rocce evaporitiche.

Dopo una breve descrizione della Cava Carale e dei processi di alterazione in atto, si presenteranno i risultati delle prove effettuate sul gesso per la caratterizzazione geomeccanica del materiale intatto. Successivamente verrà dedicato ampio spazio ai risultati delle prove sperimentali effettuate su provini aventi un differente grado di alterazione ottenuto secondo un opportuno spettro di condizioni al contorno. Inoltre si presenteranno i risultati di una prova in piccola scala del collasso di un pilastro di gesso con un carico costante immerso in un flusso d'acqua non satura. Da ultimo, si presenteranno i risultati di una campagna sperimentale effettuata sull'anidrite intatta ed alterata.

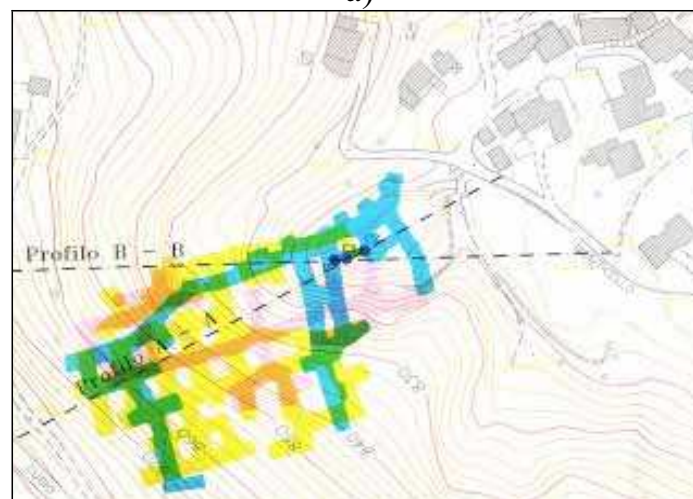
1.1. Inquadramento delle problematiche concernenti la sicurezza statica di miniere abbandonate

I pilastri di miniere abbandonate sono frequentemente soggetti a processi di altera-

zione che, riducendo nel tempo la resistenza meccanica, ne possono indurre il collasso (Elsayeb et al., 2001). Nel caso della miniera della Cava Carale di Santa Brigida è in corso un processo di dissoluzione dei pilastri di gesso e di anidrite per effetto dell'acqua che ha allagato i due livelli più profondi. Come si osserva in (Fig. 1a) l'acqua è soggetta ad un ricambio per effetto delle infiltrazioni a monte del sistema minerario. Pertanto è ragionevole assumere che il processo di alterazione continui ad avvenire nel tempo.



a)



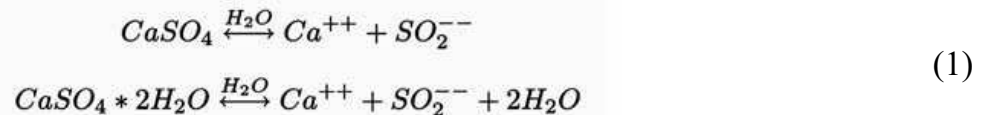
b)

Fig. 1: a) Sezione verticale; b) Pianta della Cava Carale (Santa Brigida (BG)).
Fig. 1: a) Vertical Section; b) plant of Cava Carale mine (Santa Brigida (BG)).

Effettuando un sopralluogo nella Cava Carale nei mesi invernali è possibile osservare dalle stalagmiti di ghiaccio presenti all'ingresso della miniera a testimonianza del fatto che l'ammasso roccioso è intensamente fessurato e

percolato da acqua (Fig. 2a); all'interno delle camere sono invece visibili fessure tra i livelli minerari e frequenti sono le cadute di blocchi di roccia (Fig. 2b). I vari fenomeni di dissesto osservati possono essere schematizzati come mostrato in (Fig. 2c).

Quando il gesso o l'anidrite vengono a contatto con l'acqua si attiva un processo di dissoluzione governato dalle seguenti relazione chimiche:



Vari autori (Gysel, 2002, Giambastiani et al., 2004, Raines and Dewers, 1991) hanno studiato i meccanismi di dissoluzione di anidriti e gessi. In questo capitolo si ricorda solamente che la solubilità dell'anidrite in acqua a 20° è pari 3.0 kg/m³, mentre quella del gesso è pari a 2.5 kg/m³.

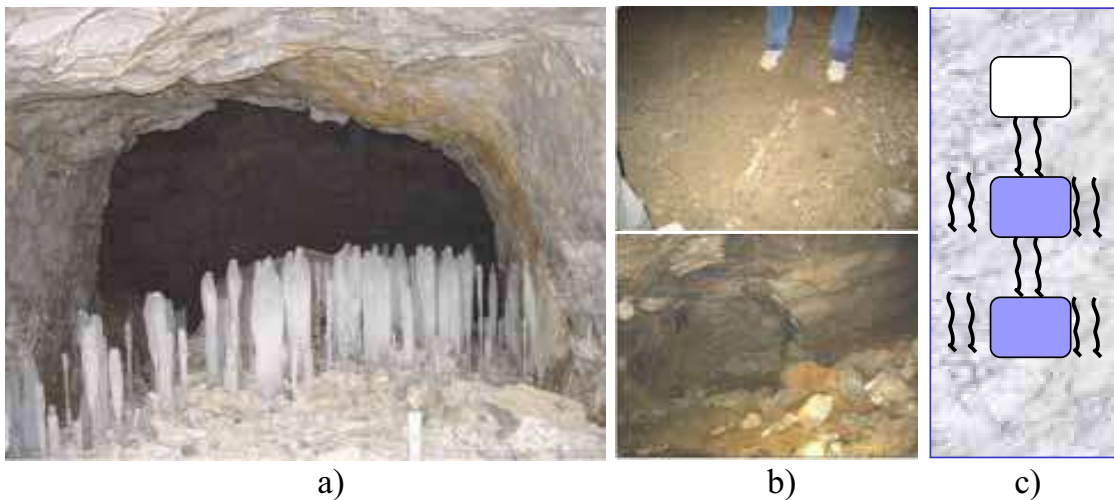
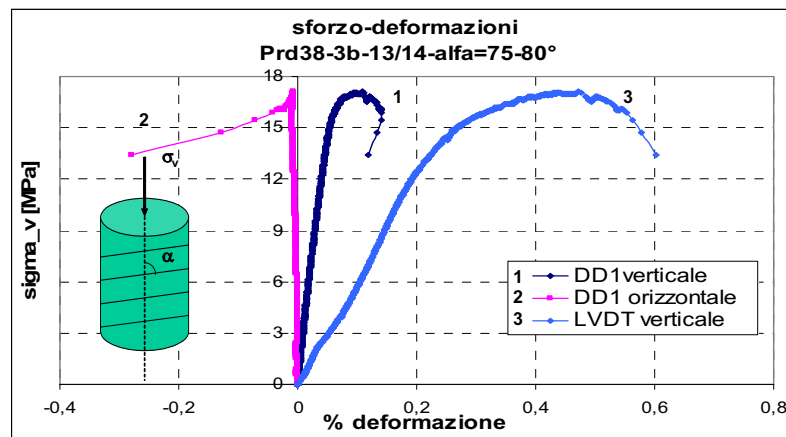
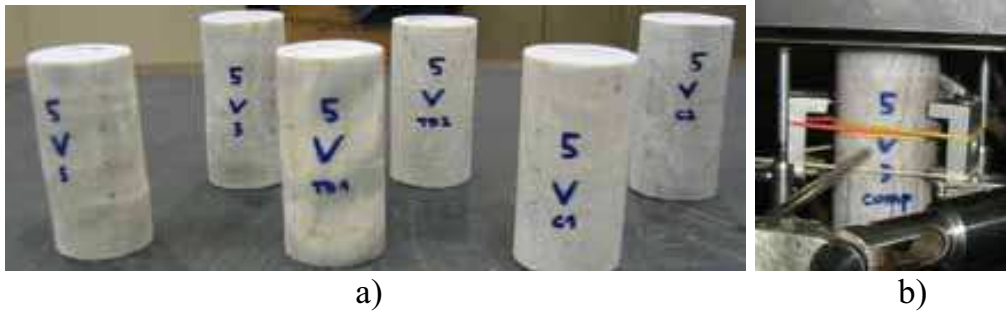


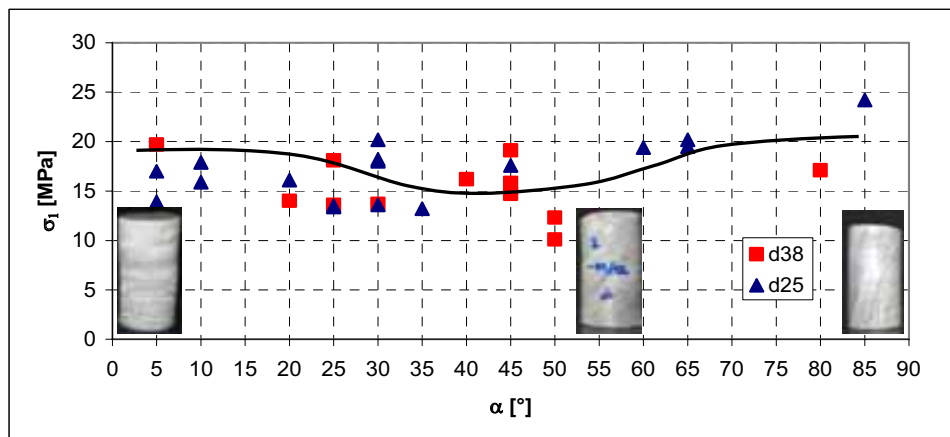
Fig. 2: a) Ingresso Cava Carale; b) Dissesti interni (livello 2); c) schema dissesti.
 Fig. 2: a) Cava Carale entrance; b) Macroscopic weathering effects; c) layout of damages.

2. Caratterizzazione geomeccanica del gesso intatto

Per poter valutare correttamente gli effetti dei fenomeni degradativi sul comportamento meccanico del gesso oggetto del presente studio è necessario conoscerne adeguatamente il comportamento meccanico nella condizione di materiale intatto; in tal modo è possibile avere un quadro di riferimento rispetto a cui valutare la diminuzione delle proprietà meccaniche indotte dai processi di alterazione.



c)



d)

Fig. 3: a) provini di gesso (diametro 38 e 25 mm); b) provino strumentato con trasduttori locali (DD1); c) curva sforzo assiale-deformazione assiale (locale: DD1 ed esterna: LVDT) e deformazione radiale; d) resistenza a compressione monoassiale-inclinazione del piano di deposizione rispetto alla verticale.

Fig. 3: a) gypsum specimens (diameter 38 and 25 mm); b) instrumented specimen with local transducers (DD1); c) axial stress vs. axial strain (local: DD1 and external: LVDT) and radial strain (local DD1); d) influence on strength of bedding orientation with respect to the vertical axis.

Nel caso specifico sono state effettuate:

- prove monoassiali su provini con differente giacitura per valutarne l'anisotropia;
- prove brasiliane sempre su provini con differente giacitura;
- prove triassiali a tre pressioni di confinamento.

I provini sono stati ottenuti dai carotaggi in continuo dei sondaggi S1 ed S2 (Fig. 1a) che hanno evidenziato un valore di RQD=64% per la formazione gessosa non alterata nel lato di valle della Cava Carale.

Si osserva dai risultati sperimentali mostrati in (Fig. 3), che il gesso ha una resistenza media a compressione monoassiale pari a 17 MPa e un modulo di elasticità pari a 6 GPa. Pertanto tale materiale, secondo la classificazione delle rocce di Deere e Miller (1966), appartiene alla classe EM e risulta quindi essere una roccia avente resistenza estremamente bassa. Inoltre dai dati riportati in (Fig. 3) si può dedurre che non presenta sensibili anisotropie nel suo comportamento meccanico.

La resistenza a trazione è stata misurata indirettamente mediante prove brasiliane su provini discoidali aventi diametro di 6 cm e spessore di 2.9 cm. I risultati, riportati in (Fig. 4), indicano un valore medio di σ_t pari ad uno sforzo assiale di 1,6 MPa.

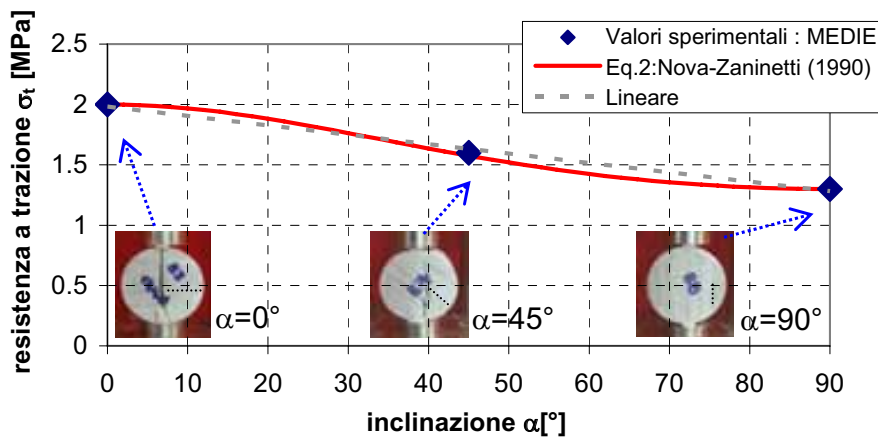


Fig. 4: Influenza dell'inclinazione del piano di deposizione sulla resistenza a trazione in prove brasiliane.

Fig. 4: Influence of bedding plan inclination on the tensile strength measured in brazilian tests.

Rispetto alle prove monoassiali, si osserva un più marcato comportamento anisotropo in relazione all'inclinazione del piano di deposizione rispetto alla direzione di sollecitazione. I valori medi di resistenza a trazione possono essere ben

interpolati sia da una retta che mediante un'espressione proposta da Nova e Zaninetti (1990), in accordo con quanto ottenuto in prove di trazione semplice su altro tipo di roccia:

$$\sigma_t = \sigma_{tMAX} \sigma_{tMIN} / (\sigma_{tMAX} \sin^2 \alpha + \sigma_{tMIN} \cos^2 \alpha) \quad (2)$$

In (Fig. 5) vengono riportati i risultati di tre prove triassiali che hanno permesso di valutare il comportamento meccanico al variare della pressione di confinamento, rispettivamente per 10, 15 e 30 MPa. I provini, ricavati direttamente da spezzoni di carotaggio, sono stati provati lungo la direzione verticale di sito che corrisponde ad un angolo α di inclinazione dei piani di giacitura di circa 75° . I risultati mostrano un aumento del punto di plasticizzazione ed un aumento della rigidezza al crescere del confinamento.

Infine tutti i punti di plasticizzazione ottenuti nelle differenti prove mostrate (per $\alpha=75^\circ$) sono raccolti in (Fig. 6) in termini di cerchi di Mohr a collasso. In questo modo è stato possibile ricavare i parametri dell'involuppo di rottura del gesso intatto secondo il criterio di Hoek e Brown (1980).

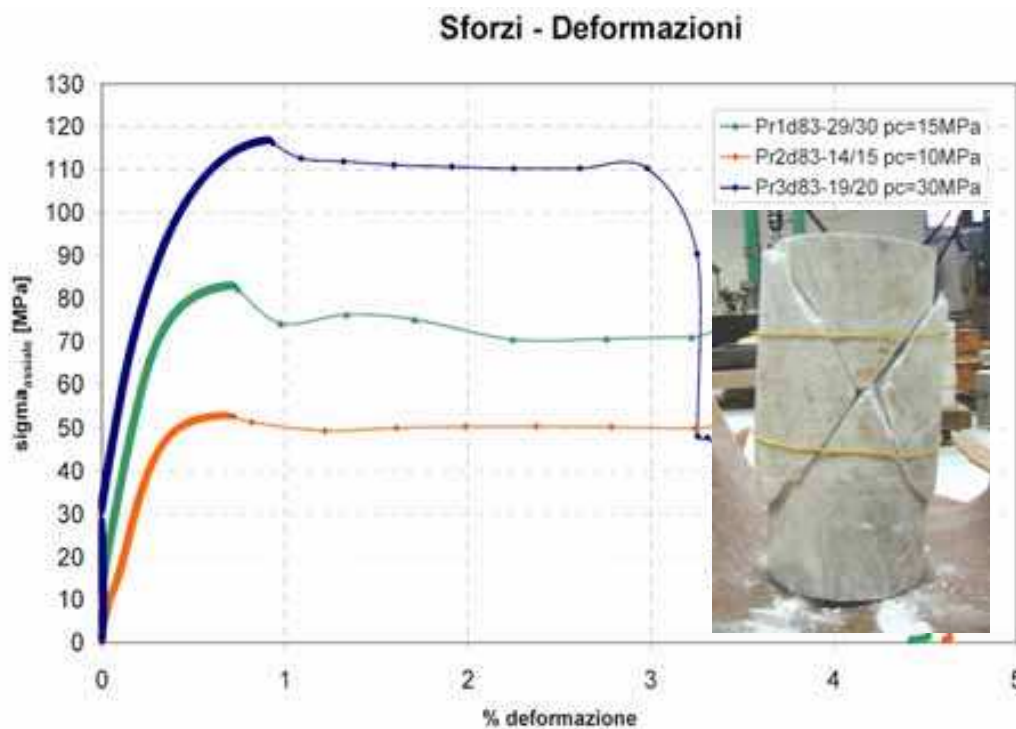


Fig. 5: Prove triassiali su gesso intatto ($\alpha=75^\circ$): a) andamento dello sforzo assiale in funzione della deformazione assiale, b) aspetto del campione dopo la prova.

Fig. 5: Triaxial tests on intact gypsum ($\alpha=75^\circ$): a) axial stress vs. axial strain, b) specimen after test.

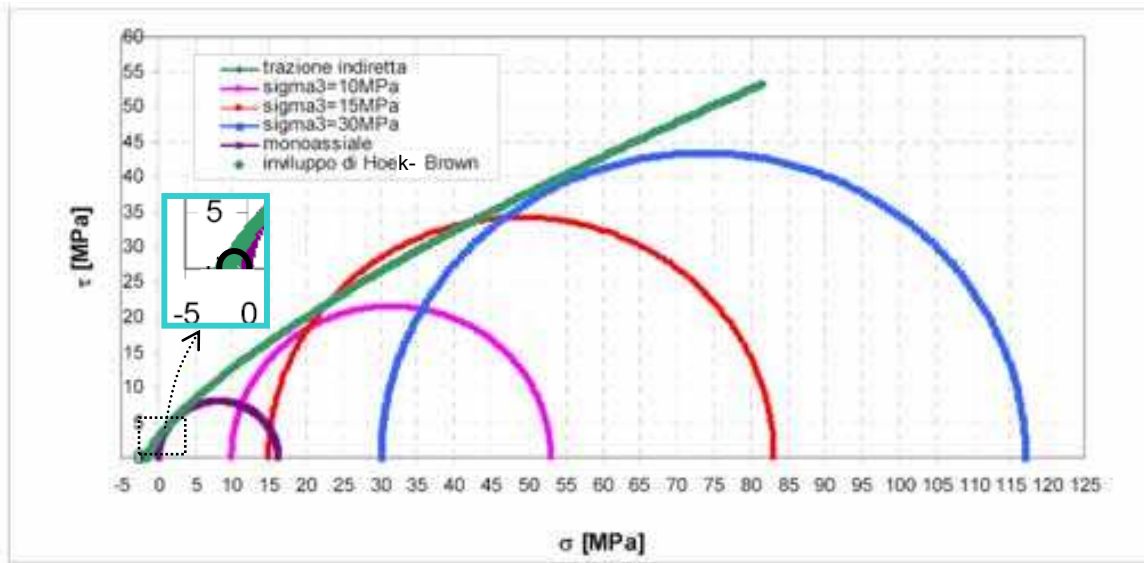


Fig. 6: involuppo di rottura del gesso intatto ($\alpha=75^\circ$) secondo il criterio di Hoek e Brown.
Fig. 6: Hoek and Brown failure envelope for gypsum ($\alpha=75^\circ$).

3. Caratterizzazione geomeccanica del gesso soggetto a processi di degradazione riprodotti in laboratorio

In questo paragrafo vengono presentate le prove eseguite per studiare la degradazione del gesso a contatto con l'acqua. Lo scopo di queste prove sperimentali è quello di valutare l'entità del processo di dissoluzione del solfato di calcio e quindi l'avanzamento dei fenomeni di alterazione dei pilastri delle gallerie della miniera di Santa Brigida. Data la complessità del sistema minerario e del reticolo idrogeologico che governa il ricambio ed il flusso dell'acqua che allaga i livelli 3 e 4, si è deciso di riprodurre in laboratorio la degradazione del gesso nei due casi limite: a) la degradazione dei pilastri immersi in acqua in quiete e non soggetta ad un ricambio che tende alla saturazione degli ioni prodotti dalla dissoluzione del gesso, b) la degradazione dei pilastri immersi in un flusso d'acqua corrente non satura. La prima condizione può riguardare ad esempio i pilastri degli strati più profondi lontani dalle venute d'acqua nel sistema minerario; la seconda condizione può rappresentare la condizione dei pilastri in prossimità delle venute d'acqua.

Inoltre, le due condizioni sopraesposte sono state applicate sia a provini cilindrici scarichi sia a provini cilindrici soggetti ad uno stato tensionale analogo a quello medio dei pilastri in sito. Per riprodurre la degradazione dei pilastri in sito su provini di piccole dimensioni (diam. 25mm, altezza 50 mm) si è utilizzata l'acqua dell'acquedotto di Milano che per la sua durezza presenta caratteristiche simili a

quelle riscontrate per l'acqua in ingresso al sistema minerario della Cava Carale di Santa Brigida.

Le differenti modalità di degradazione adottate e le corrispondenti sigle sono così definite (G sta per gesso):

1. DQS-G: (Degradazione-Quiete-Saturazione) Immersione di provini di gesso in ridotto volume di acqua in quiete senza flusso e senza ricambio in modo tale da arrivare a saturazione. Vengono quindi eseguite prove monoassiali su provini degradati con grado di alterazione variabile in funzione del tempo di immersione.
2. DFU-G: (Degradazione-Flusso-Non Saturo) Immersione di provini di gesso in ridotto volume di acqua in flusso con continuo ricambio e velocità inferiore ad 1mm/s. Vengono quindi eseguite prove monoassiali su provini degradati con grado di alterazione variabile in funzione del tempo di immersione.
3. DQC-G: (Degradazione-Quiete-Carico) Prove di degradazione di provini soggetti ad un carico assiale costante immersi in acqua in quiete senza ricambio.
4. DFC-G: (Degradazione-Flusso-Carico) Prove di degradazione di provini soggetti ad un carico assiale costante immersi in un flusso d'acqua non satura.

Le prove DQC-G e DFC-G sono di fatto equivalenti al riprodurre in piccola scala la risposta meccanica dei pilastri soggetti a differenti fenomeni di alterazione delle loro proprietà meccaniche in seguito a processi di alterazione chimica.

Dal momento che l'obiettivo primario del presente lavoro è lo studio dell'evoluzione del comportamento meccanico indotto da processi di alterazione chimica i risultati saranno sempre riportati in funzione al tempo di esposizione alla modalità di degradazione adottata.

3.1. Prove DQS-G: immersione in acqua in quiete senza ricambio

Al fine di valutare gli effetti della dissoluzione che possono interessare dei pilastri immersi in acqua in quiete senza ricambio e quindi satura di gesso (DQS-G), si è deciso di effettuare delle prove di compressione monoassiale su campioni di diametro 25 mm lasciati immersi in acqua inizialmente non satura per differenti periodi di tempo. In questo caso l'assenza di un ricambio d'acqua determina il raggiungimento di una condizione di saturazione che nel tempo arresta il processo di dissoluzione.

I provini sono stati immersi in un recipiente pieno d'acqua della capacità di 18 litri ad una temperatura dell'acqua di circa 17.5°C. Le prove di compressione semplice

sono state eseguite per ciascuna coppia di provini rispettivamente a 4,14,28 e 42 giorni di immersione. I risultati, riportati in (Fig.7), mostrano un diminuzione superiore al 60% del valore iniziale della resistenza a compressione misurata in prove monoassiali dopo soli 14 giorni di immersione. Ad essa segue il mantenimento nel tempo di un valore di resistenza residuo 5-6 MPa contro un valore iniziale di 16 MPa. Inoltre i campioni immersi non subiscono rilevanti variazioni di forma e il rapporto H/D rimane costante e pari a 2. Si può pertanto concludere che per questa tipologia di alterazione, si registra un arrestarsi della degradazione dopo circa 14 giorni per effetto della saturazione degli ioni calcio e solfato liberati dal processo di dissoluzione dei provini di gesso.

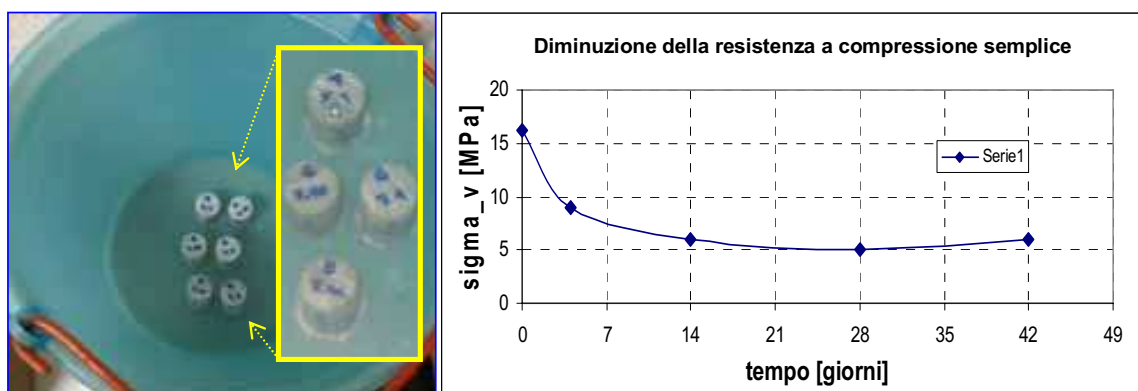


Fig. 7: DQS-G : a) Provini immersi in acqua in quiete senza ricambio; b) Andamento dello resistenza a compressione semplice in funzione del tempo di immersione.

Fig. 7: DQS-G: a) Specimen dissolution in still water; b) evolution of uniaxial strength vs. time of exposure to still water.

3.2. Prove DFU-G: immersione in un flusso d'acqua non saturo

Nel presente paragrafo si riportano i risultati di prove di degradazione per provini immersi in un flusso d'acqua non saturo.

I provini di diametro 25 mm sono stati collocati alla base di un secchio della capacità di 18 litri interessato da un flusso continuo garantito da una portata entrante di 0.75 litri/min (Fig. 8a) d'acqua non saturo alla temperatura di 17.5°C.

Il valore della portata entrante è stato scelto sulla base delle informazioni esistenti circa le quantità d'acqua potenzialmente in afflusso nelle gallerie; in particolare:

a) in periodi di secca (fine inverno 2002, estate 2002 e fine inverno 2003) la portata misurata presso la sfioro delle gallerie è stata dell'ordine di 4-6 litri/sec.

b) durante il periodo di piogge intense del 13-16 novembre 2002 in 3 giorni la portata in afflusso è stata di almeno 150 l/sec e più verosimilmente dell'ordine di 200-300 l/sec.

Il valore di 0.75 litri/min, con un'opportuna trasformazione di scala, riproduce almeno come ordine di grandezza la condizione di un pilastro in adiacenza all'ingresso d'acqua nella miniera assumendo una portata in afflusso a regime di 4 litri/sec.

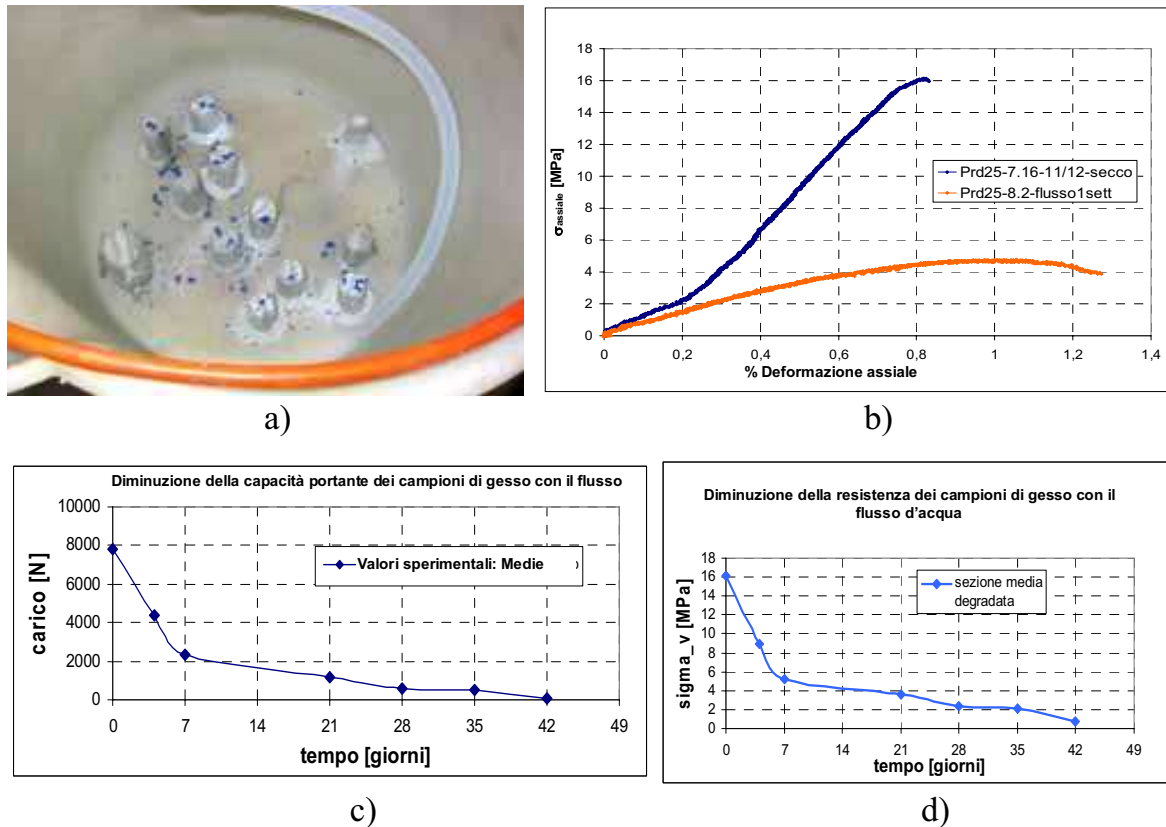


Fig. 8: DFU-G a) Provini immersi in flusso d'acqua non saturata; b) curva sforzo-deformazione assiale di un provino intatto e di uno esposto al flusso per 7 giorni; c) riduzione della capacità portante dei campioni di gesso nel tempo d) diminuzione della resistenza a compressione nel tempo avendo assunto un valore medio per l'area della sezione del campione.

Fig. 8: DFU-G a) Specimen dissolution in unsaturated water flux; b) axial stress-strain curve for intact and weathered specimen (7 days); c) specimen bearing capacity limit load with time of exposure to water flux; d) reduction of uniaxial strength with time of exposure to water flux.

In (Fig. 8b) si evidenzia la drastica riduzione della resistenza monoassiale σ_c da 16 MPa a 4.5 MPa e del modulo di rigidità E da 2.5 GPa a 0.57GPa dopo una sola settimana di immersione del provino nel flusso d'acqua. La (Fig. 8c) raccoglie i dati di almeno 10 prove monoassiali effettuate su provini immersi nel flusso d'acqua per tempi crescenti. Anche in questo caso, come nel caso DQS-G, si registra la drastica riduzione della resistenza nella prima settimana, cui però segue

una riduzione più lenta ma significativa fino al completo annullamento dopo circa 42 giorni. Ciò accade in conseguenza del fatto che il continuo il flusso d'acqua non consente il raggiungimento di una condizione di saturazione che possa arrestare il processo.

Infatti, come si osserva chiaramente in (Fig. 9a) i provini di gesso vengono letteralmente disciolti cambiando aspetto e forma. Il contatto dei provini con il fondo del contenitore preserva la dissoluzione della base ed induce una velocità di alterazione crescente al crescere dell'altezza del provino, come presumibilmente accade in sito. Data tale variazione di forma non sarà più possibile assumere uno stato tensionale uniforme in prove monoassiali. Pertanto, come mostrato in (Fig. 8c), è necessario presentare i dati in termini di evoluzione del carico limite, che può essere sostenuto da provini inizialmente cilindrici di 25 mm di diametro e 50 mm di altezza. I dati registrati della riduzione del diametro superiore, centrale ed inferiore, così come la riduzione di altezza e di peso sono riportati nelle (Fig. 9b, 9c, 9d).

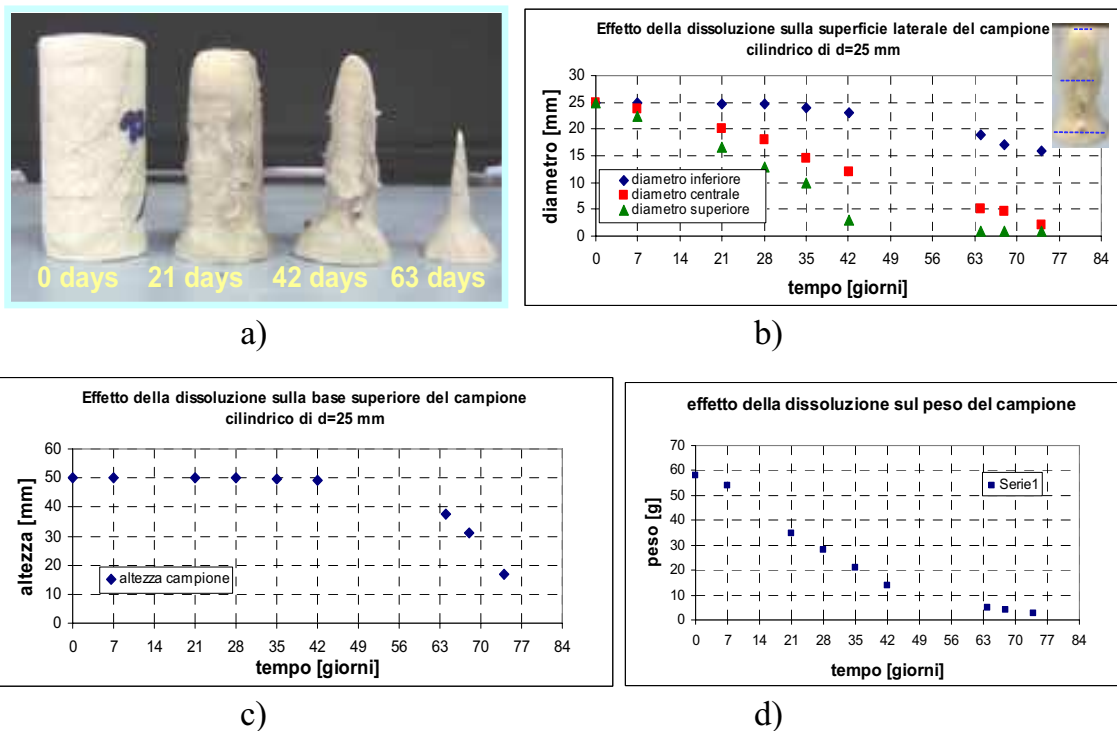


Fig. 9: DFU-G: a) variazione della forma dei provini indotta dalla dissoluzione; b) variazione dei diametri; c) variazione dell'altezza; d) variazione del peso.

Fig. 9: DFU-G a) specimen shape evolution induced by dissolution; b) evolution of the top, medium, bottom diameters c) evolution of height d) evolution of weight.

3.3. Prove DQC-G: Provini con carico assiale immersi in acqua senza ricambio.

Per la tipologia di prova DQC-G, i provini, immersi in un ridotto volume d'acqua senza ricambio che tende alla saturazione, sono al contempo, soggetti ad un carico assiale mantenuto costante analogo allo sforzo verticale medio agente nei pilastri in sito (Fig. 10 a, b). Pertanto tali prove possono riprodurre i fenomeni di accoppiamento chemo-meccanico che interessano i pilastri più profondi immersi in acqua in quiete che tende alla saturazione.

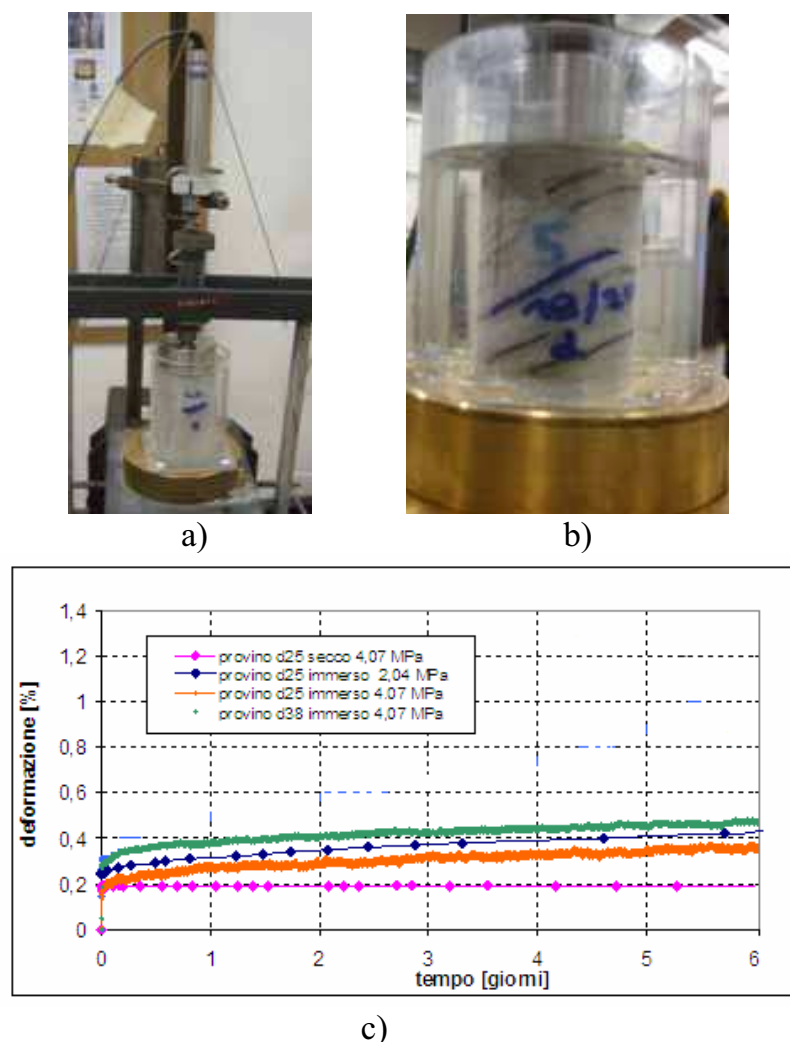


Fig. 10: DQC-G: a) apparecchiatura di prova; b) provino sotto carico immerso in acqua senza ricambio; c) andamento nel tempo (fase iniziale) della deformazione assiale.

Fig. 10: DQC-G a) experimental apparatus; b) loaded specimen in still water; c) evolution of axial strain with time (initial phase) for different tests.

I risultati verranno mostrati in termini di evoluzione della deformazione assiale al crescere del tempo di immersione. Per poter evidenziare il ruolo indotto dall'immersione in acqua si è dapprima effettuata una prova di creep su un provino secco non immerso in acqua e successivamente varie prove su provini sia di diametro 25mm che 38mm soggetti ad uno sforzo assiale pari a 2 e 4 MPa.

In (Fig. 10c) sono riportati, per chiarezza, solo le fasi iniziali di tali prove (primi 6 giorni) mentre le prove, durate oltre 30 giorni, hanno manifestato il raggiungimento di valori asintotici della deformazione assiale per valori inferiori allo 0.5%.

Si può notare che il provino non immerso in acqua non manifesta sensibili aumenti della deformazione assiale nel tempo, mentre per tutte le altre curve mostrate in (Fig. 10c) si può apprezzare che non appena viene aggiunta l'acqua nel contenitore, dopo aver applicato il carico assiale, si registra un marcato incremento di deformazione assiale che tende poi ad assestarsi dopo il primo giorno.

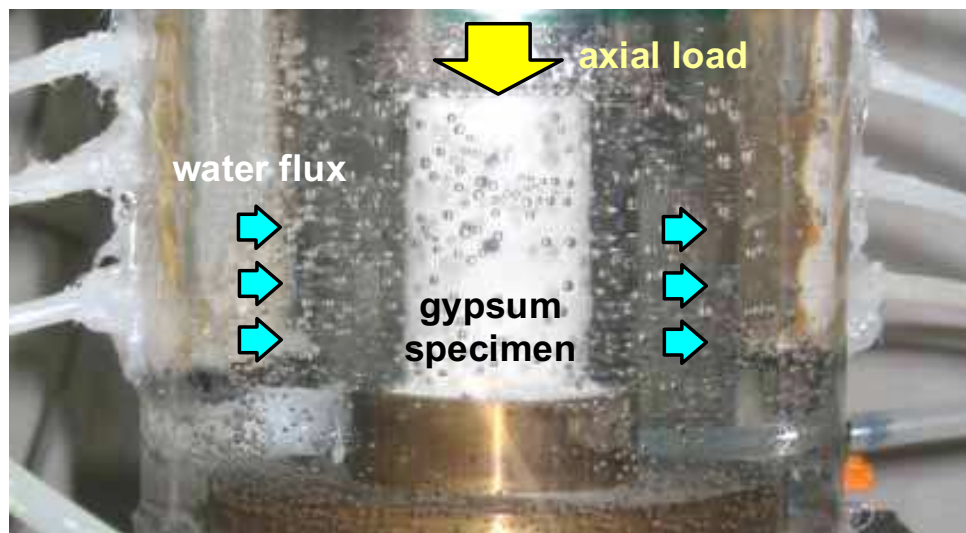
Pertanto il processo di alterazione/dissoluzione induce immediatamente un indebolimento dei legami che tengono uniti i cristalli di gesso. Questo processo che tende ad arrestarsi non appena l'acqua tende alla saturazione degli ioni (calcio e solfati) prodotti dalla dissoluzione del gesso. Se quindi in sito l'acqua dovesse saturarsi la progressiva alterazione di pilastri tenderebbe ad arrestarsi. Si fa presente che i provini dopo più di un mese di immersione non mostrano alcuna apprezzabile variazione delle dimensioni.

3.4. Prove DFC-G: Provini con carico assiale immersi in un flusso d'acqua.

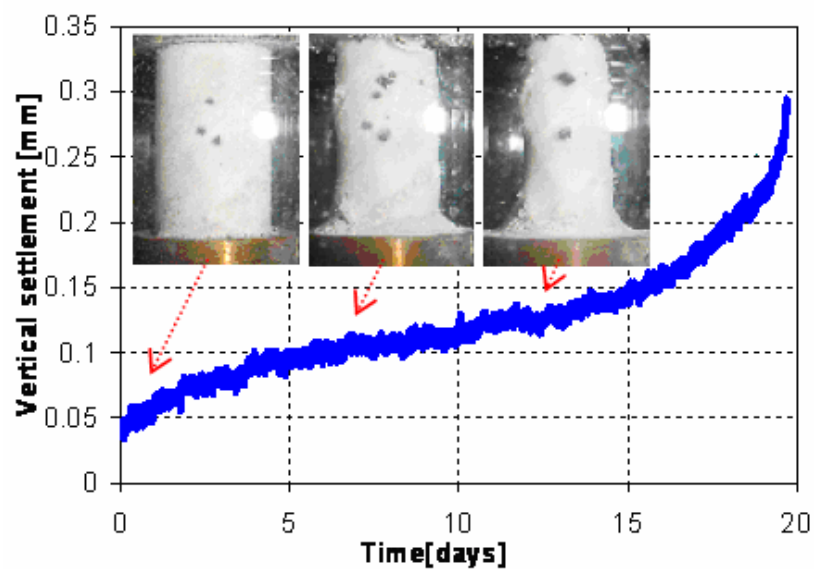
Le prove DFC-G riguardano provini soggetti ad un carico assiale mantenuto costante nel tempo, ma immersi in un flusso d'acqua che non si satura mai nel tempo. Si intende pertanto riprodurre un fenomeno accoppiato di natura idro-chemo-meccanica che può riguardare in sito quei pilastri interessati da un processo di alterazione conseguente ad un continuo ricircolo d'acqua non satura. Sono state eseguite una decina di prove su provini di differente diametro (25, 38 e 45mm) e per differenti valori di sforzo assiale (2, 4, 6 MPa) secondo lo schema dell'apparecchiatura realizzata mostrato in Fig. 11a. Il volume d'acqua contenuto nel contenitore è di 1 litro ed il flusso entrante ed uscente è pari a 0,22 litri/min. In (Fig. 11b) si riportano i risultati di una prova effettuata su di un provino di 38 mm di diametro soggetto ad uno sforzo verticale di 6 MPa.

Come si può osservare il processo di alterazione si manifesta, oltre che con un rapido incremento dei cedimenti nel tempo sotto carico costante, anche con una progressiva dissoluzione del provino che nel tempo si riduce di diametro. Pertanto all'interno del provino, negli strati di roccia ancora resistenti, si assisterà ad un progressivo aumento dello stato tensionale.

Ne consegue che tali fenomeni (l'alterazione e la progressiva riduzione del diametro) inducono un aumento esponenziale dei cedimenti fino al raggiungimento del collasso dopo 21 giorni. Per le altre prove si rimanda al lavoro di Betti (2005). Tuttavia, si fa presente che tutti i provini nell'arco di 1 mese hanno raggiunto il collasso con andamenti analoghi a quello mostrato.



a)



b)

Fig. 11: DFC-G: a) provino sotto carico immerso in un flusso d'acqua non saturo; b) variazione nel tempo dei cedimenti verticali indotti dall'alterazione.

Fig. 11: DFC-G a) loaded specimen in water flux; b) variation with time of weathering induced axial displacement.

4. Caratterizzazione geomeccanica dell'anidrite intatta

In analogia a quanto presentato per il gesso (§ 3) sono state eseguite prove per la caratterizzazione meccanica dell'anidrite proveniente dalle miniere di Santa Brigida. Tali prove sono state svolte al fine di evidenziare gli effetti di differenti fenomeni degradativi che inducono la progressiva riduzione delle caratteristiche meccaniche dell'anidrite. Le differenti condizioni di degradazione hanno voluto coprire i differenti scenari che si possono avere in situ: da condizioni di acqua in quiete (degradazione che tende ad arrestarsi) alla condizione di acqua in movimento (dissoluzione completa del materiale).



Fig. 12: Provini di anidrite intatta ricavati dal blocco mostrato per l'intera campagna.
 Fig. 12: Intact anhydrite specimen for all the experimental tests on anhydrite.

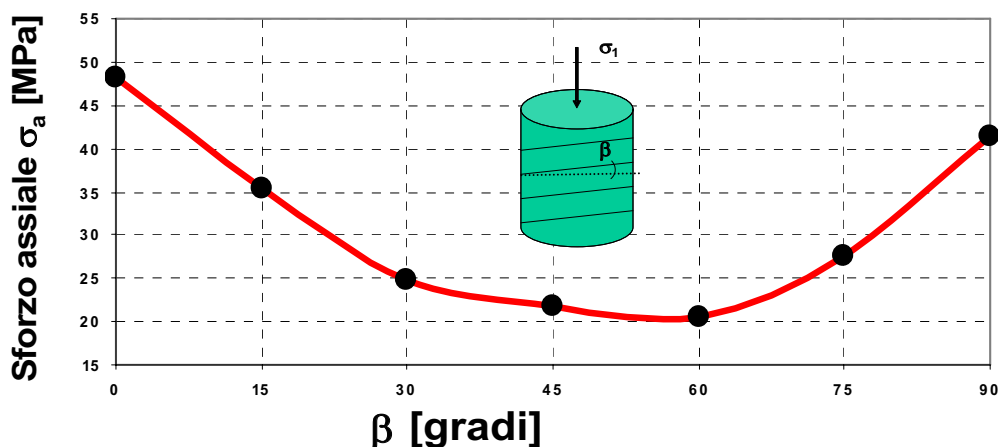


Fig. 13: variazione della resistenza a compressione monoassiale con l'inclinazione dei piani di deposizione per l'anidrite intatta.
 Fig. 13: variation of uniaxial compression strength with the bedding plane inclinations.

5. Caratterizzazione geomeccanica dell'anidrite soggetta a processi di degradazione riprodotti in laboratorio

In questo paragrafo si presentano le prove eseguite per studiare la degradazione dell'anidrite a contatto con l'acqua. Come nel caso precedente, per tutta la campagna sperimentale si è utilizzata l'acqua dell'acquedotto di Milano. Le sigle DQS-A e DFU-A indicano condizioni di prova analoghe a quelle corrispondenti per il gesso (in questo caso A sta per anidrite). Inoltre sono state effettuate prove:

- DQNS-A: (Degradazione in acqua in Quiete Non Saturata) Immersione di provini in elevato volume di acqua in quiete senza flusso e senza ricambio ma tale da non arrivare mai a saturazione; i provini possono interamente disciogliersi nell'acqua in cui sono immersi. Vengono quindi eseguite prove monoassiali su provini degradati con grado di alterazione variabile in funzione del tempo di immersione.
- DQR-A: (Degradazione in Quiete con Ricambio) Immersione di provini in ridotto volume di acqua in quiete senza flusso ma con ricambio tale da arrivare non raggiungere la saturazione. Vengono quindi eseguite prove monoassiali su provini degradati con grado di alterazione variabile in funzione del tempo di immersione.

Con le 4 differenti modalità di degradazione scelta si è voluto rappresentare il processo di alterazione che in sito può avvenire con differenti condizioni al contorno. Infatti è pensabile che i pilastri più profondi e lontani dalla zona di ingresso dell'acqua di ricircolo del sistema minerario siano soggetti ad un processo del tipo DQS-A o DQNS-A, i pilastri dei livelli intermedi da processi simili a DQR, i pilastri nei pressi dell'ingresso di acqua non satura da processi DFU-A. Pertanto si può affermare che il processo DQS-A rappresenti il processo di alterazione più lento mentre il processo DFU-A quello più veloce. Nei successivi paragrafi verrà illustrata la modalità pratica con la quale ciascuna modalità di degradazione è stata attuata ed i suoi effetti di degrado macroscopici visibili osservando i provini. Per chiarezza espositiva si rimanda ad un apposito paragrafo conclusivo (§5.5) che racchiude tutti i risultati in termini di riduzione della resistenza a compressione e della rigidezza tangente E_{t50} ottenuti eseguendo le prove monoassiali su provini degradati a differenti livelli per ciascun metodo di alterazione.

5.1. Prove DQS-A: immersione in acqua in quiete in saturazione

Questa tipologia di degradazione intende riprodurre la condizione dei pilastri im-

mersi in acqua inizialmente non satura che tende a saturarsi con il tempo. Il raggiungimento del livello di saturazione all'interno della vasca (Fig 14a) è stato assicurato immettendo in 175 litri un numero di provini di anidrite aventi un peso di circa 2 Kg che corrisponde ad una quantità cinque volte superiore a quella massima dissolubile in tale volume d'acqua. In (Fig. 14b e Fig. 14c) si evidenzia l'effetto della dissoluzione dei provini immersi come progressiva dissoluzione dei legami intergranulari.

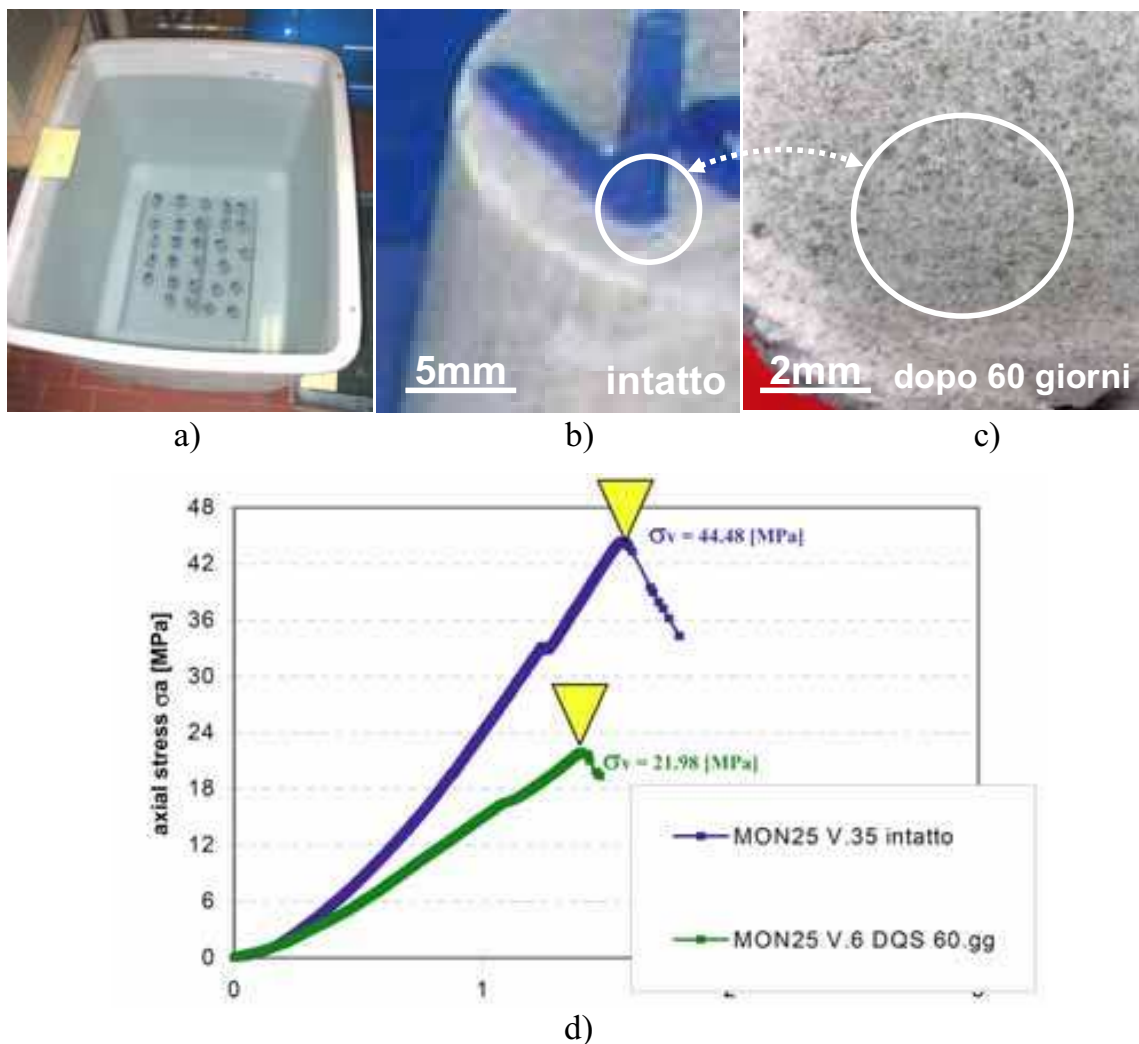


Fig. 14: DQS-A: a) provini immersi in acqua in quiete; b) superficie di un provino intatto; c) struttura granulare visibile dopo immersione per 60 giorni; d) curva sforzo-deformazione assiale di un provino intatto e degradato 60 giorni.

Fig. 14: DQS-A: a) Specimens dissolution in still water; b) surface of an intact specimen; c) surface of a weathered specimen after 60 days where grains are visible; d) axial stress-strain curve for intact and weathered specimens.

Infatti sulla superficie esterna sono chiaramente visibili i grani o cristalli che costituiscono l'anidrite.

Gli effetti di tale fenomeno di parziale alterazione sul comportamento meccanico sono stati studiati eseguendo delle prove monoassiali su provini immersi in acqua per tempi crescenti, secondo la metodologia DQS-A. In (Fig. 14d) è visibile la drastica riduzione della resistenza monoassiale e della rigidità indotta dalla degradazione per un tempo di immersione pari a 60 giorni.

I risultati complessivi fino a 120 giorni di immersione sono riportati in (Fig. 18 e 19).

5.2. Prove DQNS-A: immersione in acqua in quiete non satura

Mediante questa tipologia di prove si è voluto riprodurre la condizione di non saturazione dell'acqua. Sono stati infatti inseriti meno di 400 gr. di materiale in più di 200 litri di acqua. Per ottenere un numero adeguato di provini (circa 35) utile a verificare la ripetibilità delle prove monoassiali, sono state predisposte quattro vasche da 200 litri ciascuna. La condizione di quiete è stata soddisfatta non agitando mai l'acqua delle vasche; inoltre, per ottenere una degradazione il più possibile omogenea dei provini, si è evitato il contatto con il fondo della vasca mediante un supporto in rete zincata (Fig. 15a).

I provini degradati presentano un elevato grado di danneggiamento così come mostrato in (Fig. 15b, c;) a titolo esemplificativo, per questa metodologia di degradazione DQNS si riportano (Fig.15d e Fig 15e) la riduzione del diametro e della massa al crescere del tempo di evoluzione sia per la serie di provini a giacitura verticale che orizzontale. Per ulteriori dettagli, anche per le altre metodologie di degradazione, si rimanda a Colombo-Garoni e Braga (2006).

Si fa presente che mentre il diametro e la massa residua dopo 120 giorni di immersione sono almeno l'80% (Fig. 15d e Fig. 15e), la resistenza e la rigidità sempre a 120 giorni scende al 25%, come visibile in (Fig. 15f). I risultati complessivi sono riportati in (Fig. 18 e Fig. 19).

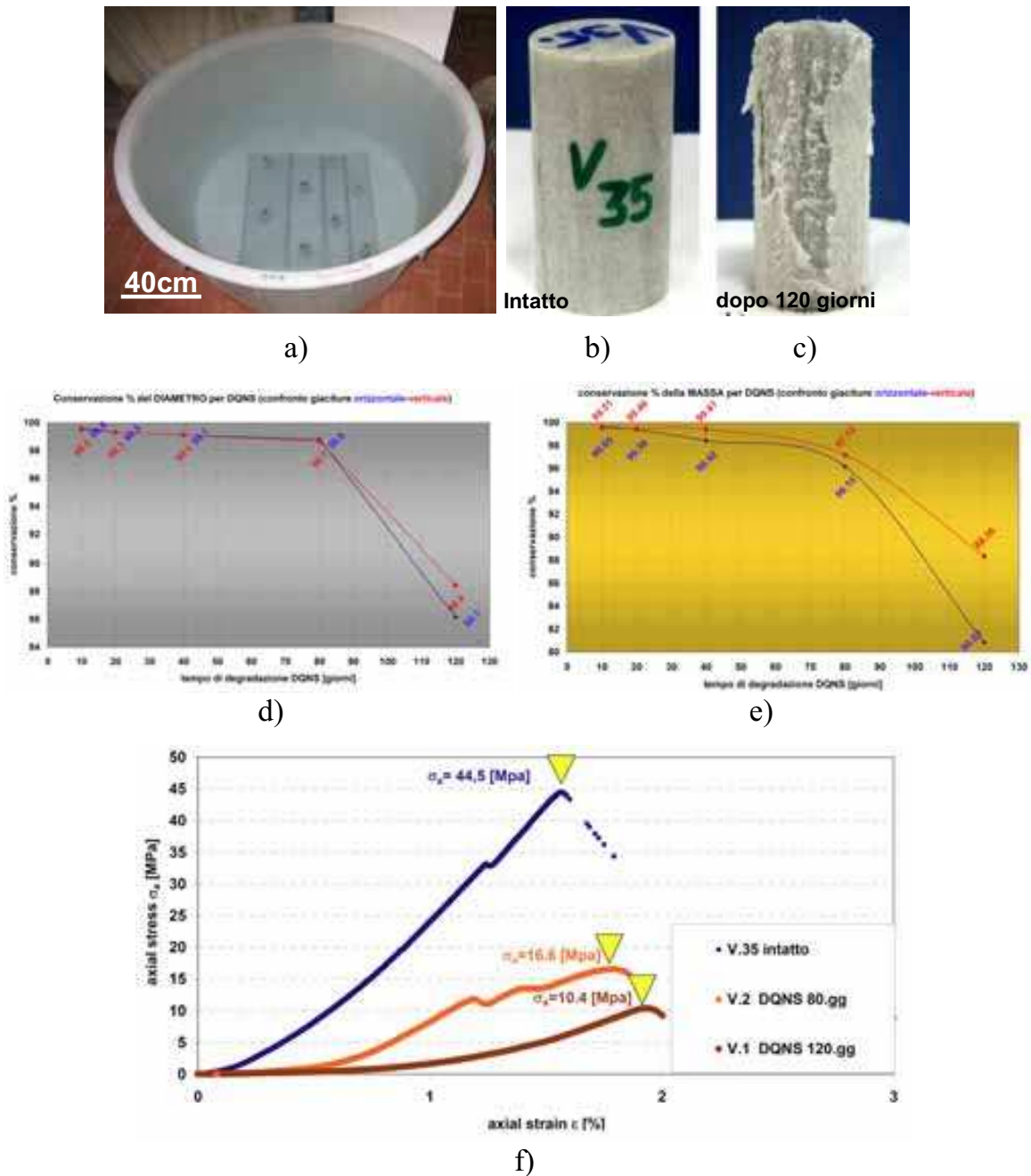


Fig. 15: DQNS-A: a) provini immersi in acqua in quiete non satura; b) superficie di un provino intatto; c) superficie dopo immersione di 120 giorni; d-e) variazione del diametro e della massa nel tempo; f) curva sforzo-deformazione assiale di un provino intatto, degradato 80 giorni e 120 giorni.

Fig. 15: DQNS-A: a) Specimens dissolution in unsaturated steady water; b) surface of an intact specimen; c) surface of a weathered specimen after 120 days; d-e) diameter and weight evolution with time of exposure f) axial stress-strain curve for intact and weathered specimens.

5.3. Prove DQR-A: immersione in acqua in quiete con ricambio

Questa metodologia è volta a simulare il processo di degrado di pilastri immersi in acqua in quiete che tende a saturarsi e che ciclicamente, ad esempio in corrispondenza di abbondanti piogge, è soggetta a ricambi.

A tal fine si è inserito un certo numero di provini equivalenti in totale a 1960 grammi in 50 litri d'acqua (Fig. 16a).

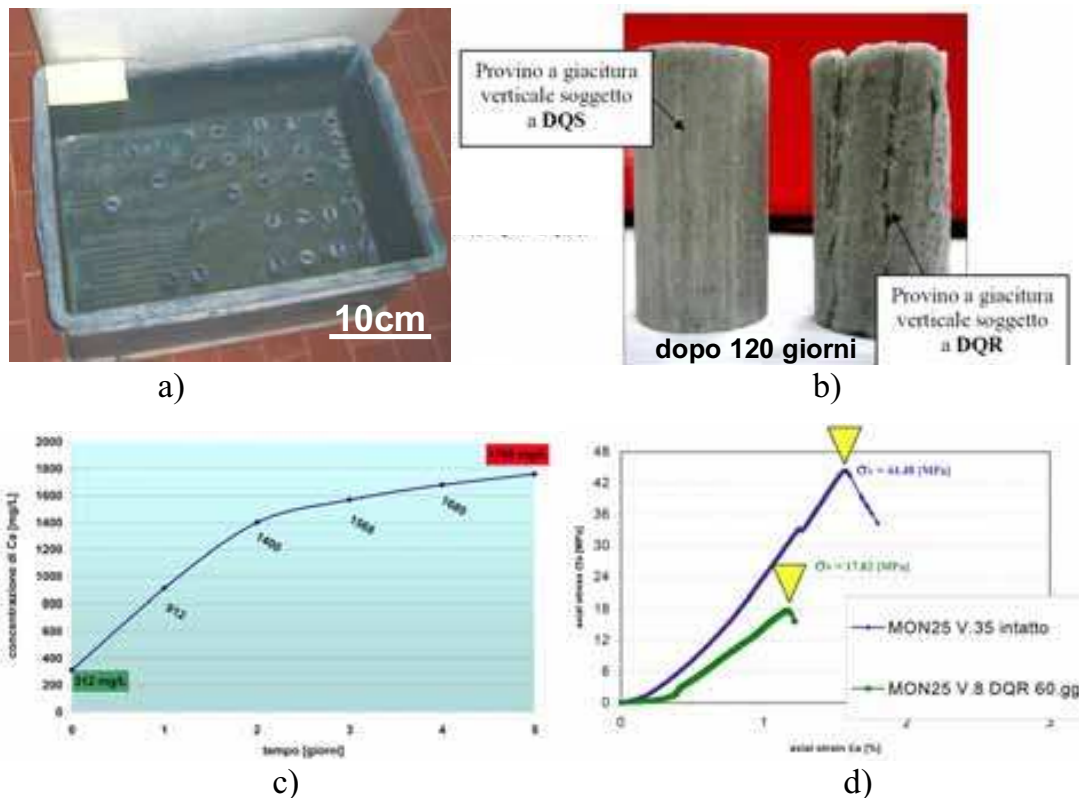


Fig. 16: DQR-A: a) provini immersi in acqua in quiete con ricambio; b) superficie di un provino degradato 120 giorni con metodo DQR e DQS; c) concentrazione ione calcio nel tempo; d) curva sforzo-deformazione assiale di un provino intatto e degradato 60 giorni.

Fig. 16: DQR-A: a) Specimens dissolution in unsaturated steady water; b) surface intact specimens submitted to DQR-A and DQS-A weathering method; c) concentration of Ca²⁺ with time d) axial stress-strain curve for intact and weathered specimens.

Il quantitativo massimo di anidrite dissolubile in tale volume d'acqua è di circa 100 grammi. Pertanto il processo tende alla saturazione come mostrato in (Fig. 16c), dove si riporta l'andamento dello ione calcio misurato ogni giorno nell'acqua in cui sono stati immersi i provini; si osserva un andamento monotono crescente che tende al valore limite di 2090mg/l; pertanto si è deciso di effettuare un ricambio ogni 5 giorni, dove si è registrato un valore di 1760gr/l prossimi al valore di

saturatione, in modo da cogliere la ciclicità del processo intesa come evento meteorico che ricambia l'acqua pressoché satura nella quale sono immersi i pilastri. In (Fig. 16b) viene mostrato l'aspetto di un provino di anidrite dopo 120 giorni di immersione in acqua con il metodo DQR-A messo a confronto con un provino immerso 120 giorni con il metodo DQS-A. Infine, in (Fig. 16d) si riportano le curve sforzi-deformazioni assiali di un provino intatto e di un provino degradato con il metodo DQR per 60 giorni che corrispondono a 12 cicli di ricambio. Si rimanda sempre alle (Fig. 18 e 19) per i risultati complessivi circa la riduzione nel tempo della resistenza e della rigidezza.

5.4. Prove DFU-A: immersione in flusso d'acqua

Quest'ultima metodologia riproduce la condizione più gravosa di pilastri immersi in un flusso d'acqua continuo che, oltre a garantire la non saturazione dell'acqua, ne accelera il processo di degradazione del materiale ed anche il suo dilavamento.

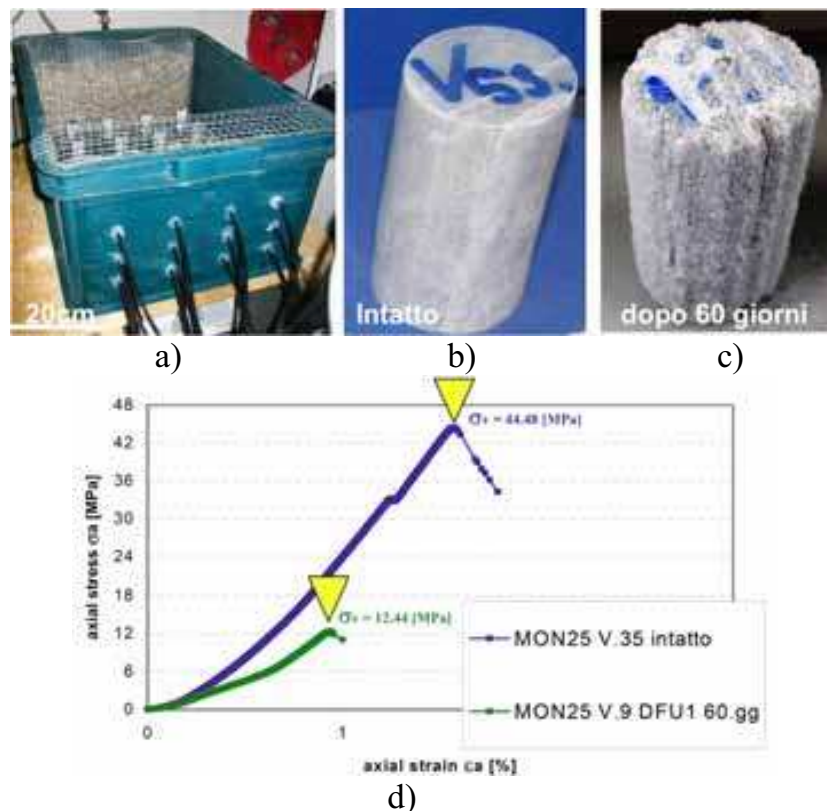


Fig. 17: DFU-A: a) provini immersi in un flusso d'acqua; b) provino degradato intatto; c) provino degradato 120 giorni; d) curva sforzo-deformazione assiale di un provino intatto e degradato 120 giorni .

Fig. 17: DFU-A: a) Specimens dissolution in a water flux; b) intact specimen; c) weathered specimen; d) axial stress-strain curve for intact and weathered specimens.

A tal fine si è realizzata un apposita vasca riportata in (Fig. 17°) con una serie di tubi disposti su tre livelli di due pareti opposte, una per il flusso d'ingresso ed una per l'uscita. Mediante un sistema di filtri in ghiaia si è potuto ottenere un flusso omogeneo caratterizzato da una velocità dell'ordine di 0.5mm/sec.

Da un primo confronto tra la curva sforzo-deformazione assiale del materiale e del materiale degradato a 60 giorni, si può notare che i valori di resistenza e di rigidità siano notevolmente diminuiti, in un arco di tempo relativamente breve (2 mesi), (Fig. 17b), come evidente dall'aspetto del provino degradato riportato in (Fig. 17c). Si rimanda sempre alle (Fig. 18 e 19) per i dati complessivi ottenuti con questo metodo ed i precedenti.

5.5. Risultati complessivi delle prove di degradazione dell'anidrite

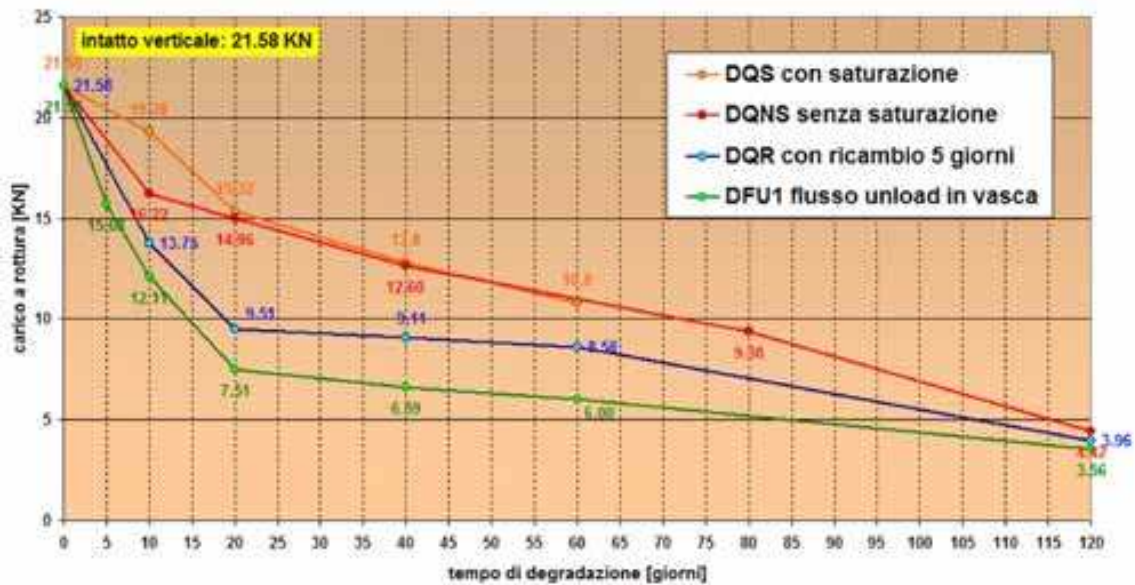
In questo paragrafo sono riportati i risultati complessivi delle prove di compressione monoassiale di provini di anidrite in termini di carico a rottura, resistenza a rottura σ_c (MPa) e di rigidità E_{t50} (GPa) in funzione al tempo di immersione in acqua secondo le 4 metodologie esposte nei paragrafi precedenti. Ogni punto riportato nelle (Fig. 18 e 19) rappresenta il valor medio di almeno tre prove monoassiali effettuate su provini di anidrite sottoposti alla stessa degradazione.

In (Fig. 18°) si mostra la riduzione del carico limite (kN) con il tempo di immersione (degradazione) di provini con giacitura verticale aventi un diametro iniziale di 25 mm ed altezza pari a 50mm. In (Fig. 18b) gli stessi risultati sono ora riportati in termini di sforzo assiale massimo valutato come rapporto tra il carico a rottura ed l'area del provino calcolata utilizzando il diametro medio al momento dell'esecuzione della prova monoassiale.

Si può notare per tutte le metodologie di degradazione una marcata riduzione delle resistenza nei primi 20 giorni di immersione, e successivamente un gradiente minore che fa sì che l'anidrite mantenga, dopo 120 giorni di degradazione, una resistenza a compressione pari al 25% del valore iniziale.

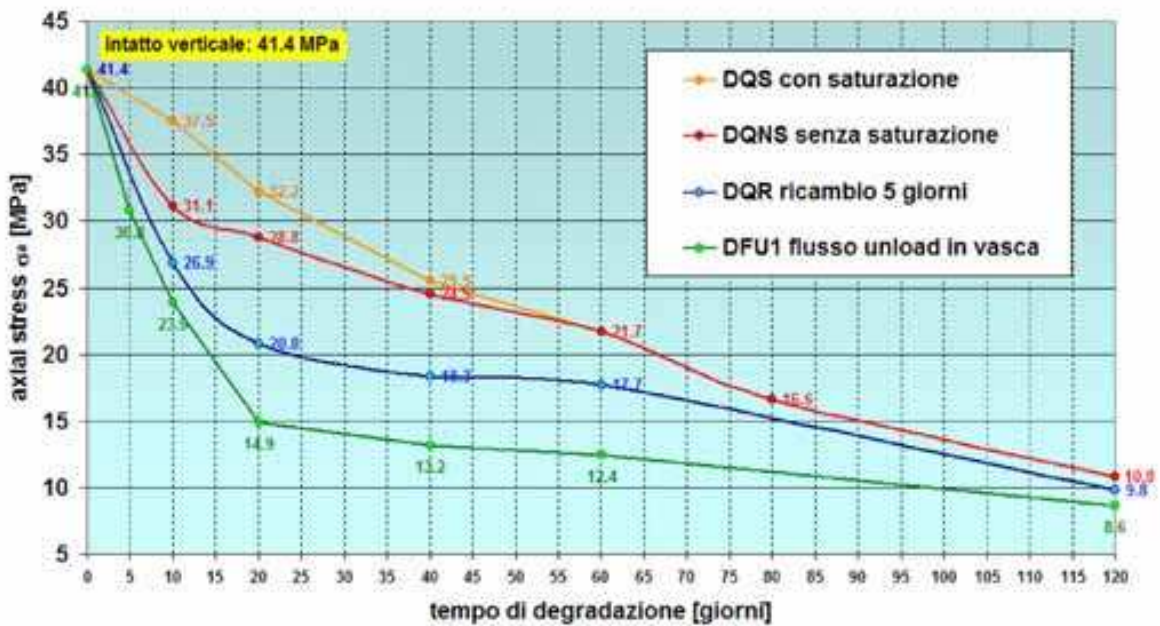
Confrontando i risultati delle prove DQS-A e DQNS-A, si può osservare che dopo una più marcata riduzione della resistenza per le prove DQNS-A nei primi 10 giorni, i risultati sperimentali arrivano a coincidere con quelli DQS-A ad indicare che se l'acqua è in quiete il processo di degrado prosegue lentamente ma inesorabilmente sia in condizioni di acqua satura che non satura.

I metodi DQR-A e DFU-A sono inizialmente più attivi in termini di degradazione riducendone la resistenza fino al 70% in 20 giorni, ma successivamente mostrano un più lento progredire della degradazione che in ulteriori 100 giorni non va oltre l'80%.



a)

Diminuzione di σ_a dovuta a diverse tipologie degradative per giaciture verticali



b)

Fig. 18: Anidrite: a) riduzione della resistenza compressione nel tempo; b) riduzione del carico nel tempo per i metodi adottati.

Fig. 18: Anhydrite: a) decay of uniaxial strength with time of exposure; b) decay of limit load with time of exposure related to the different weathering method adopted.

Per quanto concerne la riduzione di rigidità riportata in (Fig. 19), definite come rigidità tangente al 50% si osserva per tutte le metodologie lo stesso comportamento sia in termini qualitativi che quantitativi. Esso è caratterizzato da un marcata riduzione al 65% nei primi 20 giorni ed una più lenta riduzione nei successivi 100 giorni che comunque non è mai superiore al 50 %.

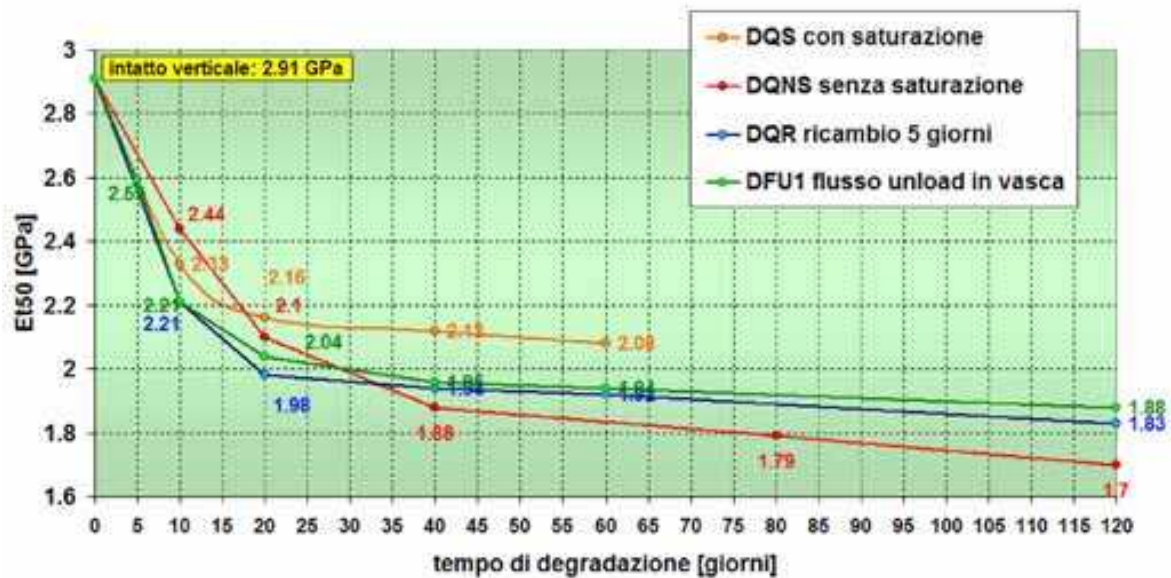


Fig. 19: Anidrite: riduzione della rigidità tangente E_{t50} in funzione del tempo di provini soggetti a degradazione con i metodi proposti.

Fig. 19: Anhydrite: decay of tangent stiffness with time of exposure to the adopted weathering processes.

Conclusioni

Il presente capitolo ha riguardato lo studio dell'evoluzione del comportamento meccanico del gesso e dell'anidrite soggetti a fenomeni di degrado, in particolare sono state eseguite:

1. Prove di compressione monoassiale, trazione indiretta e triassiali sul gesso e sull'anidrite nella condizione di materiale intatto. Tali prove hanno consentito: i) di caratterizzare la resistenza meccanica ed i moduli elastici del materiale intatto, ii) di mostrare che, per il gesso, il comportamento meccanico non è influenzato dall'anisotropia tessiturale dei piani di deposizione mentre esso lo è in modo marcato per l'anidrite.
2. Prove di compressione monoassiale su provini a differente grado di alterazione, mediante immersione in acqua per durate differenti. Tali prove hanno evidenziato che il processo di dissoluzione dei campioni induce nel tempo un marcato decadimento della resistenza e della rigidità. La riduzione delle caratteristiche meccaniche è rilevante non appena la roccia evaporitica è a contatto con l'acqua e tende ad un asintoto se la soluzione si satura di ioni calcio e di solfati. Se invece l'acqua non raggiunge la saturazione (condizione di flusso) la resistenza nel tempo viene progressivamente annullata ed il campione totalmente dissolto. Pertanto per i pilastri di gesso e di anidrite immersi in acqua esiste il pericolo di collasso a medio e lungo termine.
3. Prove di degradazione su provini di gesso immersi in un flusso d'acqua e contemporaneamente soggetti ad un carico assiale. Tali prove mostrano che si può riprodurre in laboratorio il collasso a lungo termine dei pilastri e che tale collasso avviene tanto più rapidamente quanto più il contenuto di soluto è lontano dalla saturazione.

Alla luce dei presenti risultati si può osservare che pilastri di miniere abbandonate costituiti da rocce evaporitiche (ad esempio gesso ed anidrite), se a contatto con acqua, sono soggetti a processi di alterazione che più o meno velocemente ne riducono drasticamente la capacità portante. Inoltre si è osservata una riduzione delle proprietà meccaniche più rapida del processo di dissoluzione chimica che la induce.

Infine si osserva che i risultati ottenuti possono essere utilizzati per calibrare e validare opportuni modelli di analisi teoriche o numeriche. Tali modelli, come mostrato nel capitolo successivo, possono essere utilizzati per predire la stabilità o il collasso di pilastri di miniere abbandonate soggette a degradazione.

Ringraziamenti

Si ringraziano gli ingg. David Betti, David Spada, Riccardo Colombo Garoni, Marco Braga ed il dott. ing. Marco Parma per la preziosa collaborazione nell'esecuzione delle prove sperimentali.

Bibliografia

- BETTI D., (2005). Effetti della degradazione chimica sul comportamento meccanico di rocce ad alto contenuto di gesso, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano.
- COLOMBO-GARONI R.E., BRAGA M., (2006). Caratterizzazione meccanica dell'anidrite della miniera di Santa Brigida soggetta a fenomeni degradativi, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano.
- DEERE D.U. AND MILLER R.P., (1966). 'Engineering classification and index properties for intact rock', Technical Report No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Force Base, New Mexico.
- ELSHAYEB Y., KOUNAILI S., JOSIEN J.-P., GUERNIFFEY Y., (2001). Towards the determination of surface collapse type over abandoned mines in the Lorraine iron basin. In: Särkkä, P. , &, Eloranta, P., (eds), Rock mechanics – a challenge for society, Lisse, Swets & Zeitlinger, 819–824.
- GIAMBASTIANI M., CELESTINO T., AND BORTOLUCCI A., (2004). Time dependent behaviour of gypsum and anhydrite rocks: preliminary results. In Schubert, editor, Eurock 2004 Proc. Geomechanics Colloquium, pages 393–398: VGE.
- GYSEL, M. (2002): Anhydrite dissolution phenomena: Three case histories of anhydrite karst caused by water tunnel operation. Rock Mechanics and Rock Engineering 35,1–21.
- HOEK E. AND BROWN E.T., (1980). Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Engng Div., ASCE 106 (GT9), 1013-1035.
- NOVA R., ZANINETTI A., (1990). An investigation into the tensile behaviour of a schistose rock. I. J. Rock Mech. Min. Sc., 27, 4, 231-242.
- RAINES M. AND DEWERS T., (1991). Mixed transport/reaction control of gypsum dissolution kinetics in aqueous solution and initiation of gypsum karst. Chemical Geology 140, 29 – 48.