

EFFETTI DIPENDENTI DAL TEMPO NELLE SABBIE CARBONATICHE IN CONDIZIONI EDOMETRICHE

M. Zicarelli^{*}, B. Valore^{*}

^{*} Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM)
Università di Palermo
Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy
e-mails: maurizio.zicarelli@unipa.it; borisvalore@hotmail.it.

(Ricevuto 23 Ottobre 2012, Accettato 05 Novembre 2012)

Keywords: Sand, Creep, Breakage, Evolution, Grain-size distribution.

Parole chiave: Sabbia, Creep, Frantumazione dei grani, Evoluzione, Composizione granulometrica.

Abstract. *The results of an extensive experimental study on the time-dependent effects, and in particular on the creep, of calcareous bioclastic sands subjected to 1-D compression are reported and discussed in the paper. Tests have been carried out on dry sands reconstituted in the laboratory; the tested sands are obtained by sieving of natural sand. Tests on quartz and on pumice sands have been carried out for comparison. The secondary coefficient of compression C_α increases with the applied vertical effective stress σ'_v , if the latter is applied as a single load step. However, rippling of the C_α - applied stress curve have been observed within the investigated stress interval and especially up to values of σ'_v up to 15 MPa. This behavior is related to the phenomenon of the crushing. The results show that creep of sands is not related only to crushing of grains, but also to other deformation mechanisms such as the relative displacements of sand particles.*

Sommario. *Si illustrano i risultati di uno studio sperimentale sugli effetti dipendenti dal tempo di sabbie carbonatiche bioclastiche sottoposte a compressione monodimensionale. La sperimentazione è stata eseguita su materiale asciutto ricostituito in laboratorio. Per confronto una serie di prove è stata eseguita anche su sabbie di quarzo e di pomice. Il coefficiente di compressione secondaria C_α aumenta con la tensione verticale applicata σ'_v , se quest'ultima viene applicata interamente fin dall'inizio, anziché per incrementi successivi. In tutto il campo tensionale esplorato si osservano, tuttavia, oscillazioni che sono legate al crushing che è discontinuo, specie fino a valori di σ'_v di 15 MPa. I risultati della ricerca indicano che il creep delle sabbie non dipende soltanto da crushing la cui influenza a pressioni medio-alte è trascurabile.*

1 INTRODUZIONE

I meccanismi di deformazione dei mezzi granulari, e in particolare delle sabbie, sono rappresentati dallo scorrimento mutuo dei grani, dalle defomazioni plastiche o elastoplastiche

in corrispondenza dei punti di contatto, dalle deformazioni elastiche (intrinseche) delle particelle, e dallo schiacciamento e frantumazione dei grani (*crushing*), cfr. figura 1. Dei meccanismi di deformazione rappresentati in figura 1, sempre presenti simultaneamente, lo scorrimento mutuo delle particelle e il *crushing* dei grani (meccanismi (a) e (d) di figura 1) sono generalmente quelli più significativi.

In alcuni casi esiste un quinto meccanismo di deformazione rappresentato dagli spostamenti di grani per effetto dell'inflexione di eventuali particelle lamellari.

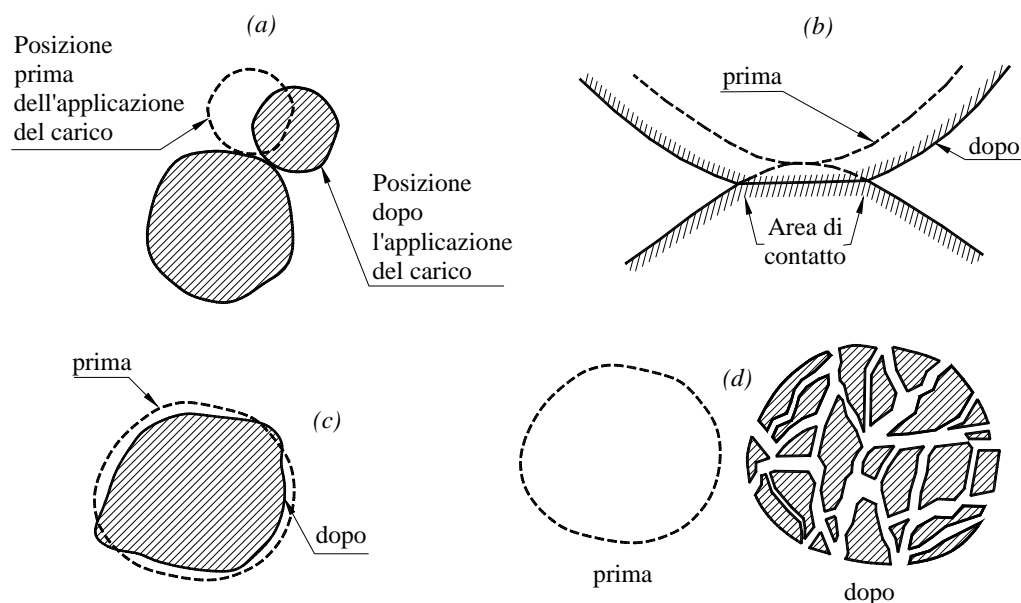


Figura 1. Principali meccanismi di deformazione delle sabbie: a) scorrimento mutuo delle particelle; b) deformazione plastica delle aree di contatto; c) deformazione intrinseca della singola particella; d) *crushing* dei grani.

Il *crushing* e gli scorrimenti relativi tra i grani prodotti dallo stesso *crushing* e dalle deformazioni plastiche in corrispondenza dei punti di contatto rappresentano i principali meccanismi di deformazione che danno luogo alle deformazioni dipendenti dal tempo (*creep*, rilassamento). Sull'argomento sono stati svolti diversi studi, sia a carattere sperimentale che numerico e di modellazione^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11}, sia in condizioni di deformazione monodimensionale che triassiale. Tuttavia non è ancora stato chiarito del tutto quale dei meccanismi di deformazione in esame è quello prevalente e come essi evolvono col livello tensionale.

Allo scopo di studiare l'importanza relativa dei meccanismi di deformazione dai quali trae origine il *creep* e sulla loro evoluzione con la tensione verticale efficace, è stata condotta un'ampia indagine sperimentale consistente in prove di compressione edometrica fino a pressioni molto alte (dell'ordine di 80MPa), con differente durata delle prove, su una sabbia carbonatica bioclastica (sabbia che per forma e costituzione intrinseca dei grani è molto frantumabile già a partire da livelli tensionali medi molto bassi), e per confronto su sabbie di quarzo. Alcune prove sono state eseguite su sabbie di pomice. I risultati relativi a queste due ultime sabbie saranno riportati in altra memoria.

2 PRINCIPALI CARATTERISTICHE INIZIALI DELLE SABBIE BIOCLASTICHE

La sperimentazione è stata condotta su una sabbia carbonatica bioclastica denominata SH. Sono state utilizzate sabbie essenzialmente monogranulari, con diametro dei grani compreso tra 0.18mm e 0.84mm. La composizione granulometrica delle sabbie utilizzate è rappresentata in figura 2, sulla quale è riportata anche la composizione granulometrica della sabbia naturale dalla quale sono state ottenute per staccatura le sabbie oggetto della sperimentazione. Il peso specifico γ_s della sabbia è di 26.7 kNm^{-3} . I grani hanno forma irregolare, sono generalmente allungati ma talvolta isometrici. La superficie esterna è a tratti concava. In alcuni grani sono presenti pori intragranulari. Gli spigoli sono da subarrotondati a vivi, figura 3.

Dal punto di vista mineralogico la sabbia è costituita per il 90% circa di carbonato di calcio e per il resto di silice, magnesio e ferro. La diffrattometria di massa ai raggi X ha dimostrato che il carbonato di calcio è presente prevalentemente allo stato amorfo; sono presenti inoltre piccole quantità di minerali di quarzo, K-feldspati, pirosseni, dolomiti e miche¹².

La sabbia in esame è stata scelta per le seguenti ragioni: su di essa è stata già eseguita un'ampia sperimentazione fino a pressioni altissime (120 MPa) in condizioni edometriche, in condizioni triassiali, e in presenza di deformazioni deviatoriche molto grandi ottenute con l'apparecchio di taglio anulare^{12,13,14,15}. Inoltre essendo la sabbia costituita di grani facilmente frantumabili già a partire da bassi livelli tensionali essa dovrebbe raggiungere una composizione granulometrica e una struttura "stabile" (o in altri termini poco deformabile) a partire da pressioni relativamente basse; di conseguenza, anche gli effetti viscosi (*creep*) dovrebbero diventare trascurabili a tensioni verticali efficaci alte.

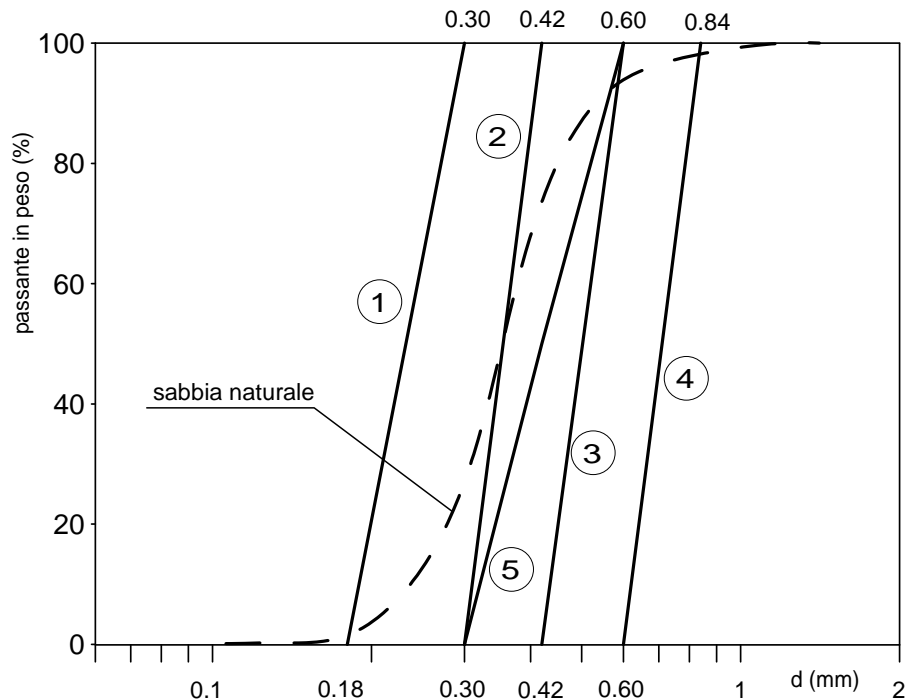


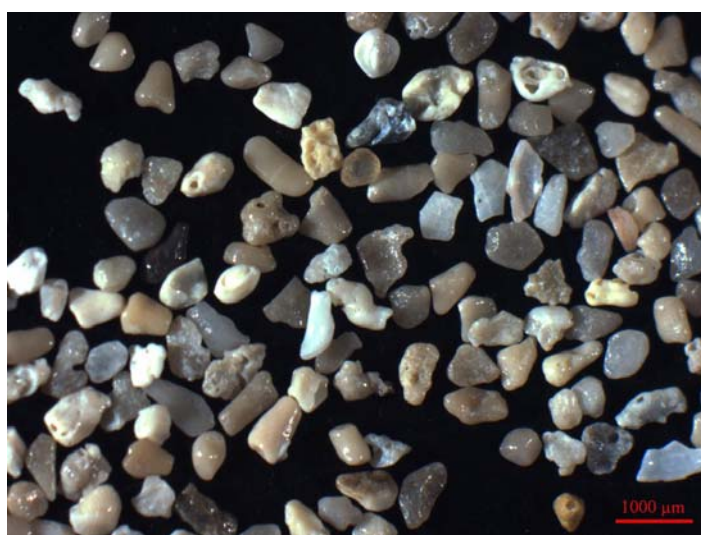
Figura 2. Sabbie bioclastiche SH utilizzate nella sperimentazione. 1) $0.18 \leq d \leq 0.30 \text{ mm}$; 2) $0.30 \leq d \leq 0.42 \text{ mm}$; 3) $0.42 \leq d \leq 0.60 \text{ mm}$; 4) $0.60 \leq d \leq 0.84 \text{ mm}$; 5) $0.30 \leq d \leq 0.60 \text{ mm}$, quest'ultima sabbia è stata ottenuta miscelando le sabbie 2) e 3) al 50%. In linea tratteggiata è riportata la composizione granulometrica della sabbia naturale.

3 MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLE PROVE E PIANO DELLA SPERIMENTAZIONE

Sono state eseguite prove di compressione edometrica, con pressione massima di 80 MPa, sia a incrementi di carico (IL), sia prove nelle quali la massima pressione prevista è applicata con un unico incremento di carico. I risultati riportati nel presente studio sono relativi a quest'ultimo tipo di prove. Per studiare gli effetti dipendenti dal tempo (*creep*) sono state eseguite prove con durata di 24h, e di 5 minuti per le quali il *creep* è naturalmente trascurabile. Alcune prove sono state eseguite, per confronto, con durate molto più lunghe.

Le prove sono state eseguite su provini con diametro di 5.5mm con classici edometri (convenzionali) e con un edometro che permette l'applicazione di tensioni verticali efficaci fino a 20 MPa. Con quest'ultimo apparecchio, con un anello edometrico di 3cm, sono state raggiunte pressioni di 80 MPa. L'altezza dei provini è in tutti i casi di 20mm.

In figura 3 sono riportate le foto nelle condizioni iniziali delle sabbie utilizzate nella sperimentazione 3) ($0.42\text{mm} < d < 0.60\text{mm}$) e 4) ($0.60\text{mm} < d < 0.84\text{mm}$), cfr. figura 2.



a)



b)

Figura 3. Sabbia carbonatica SH utilizzata nella sperimentazione. Foto al microscopio ottico: a) $0.42 \leq d \leq 0.60\text{mm}$; b) $0.60 \leq d \leq 0.84\text{mm}$. Si notano sia grani di forma allungata sia prossima a quella isometrica. Gli spigoli sono sia ben arrotondati che parzialmente arrotondati e in qualche caso a spigoli vivi. Si osservano in alcuni grani pori intragranulari.

Le prove sono state eseguite finora su materiale con contenuto d'acqua molto basso (dell'ordine del 0.1-0.2%) che il materiale presenta in laboratorio in ambiente controllato. I provini sono stati confezionati per *tamping* a strati di 1mm circa direttamente nell'anello edometrico. L'indice di porosità iniziale e_0 dei provini è compreso tra 0.64 e 1.02. Sono state eseguite finora complessivamente circa 150 prove. La temperatura di prova è di $20^\circ \pm 1^\circ$.

A fine prova, per tutti i provini, è stata determinata per via secca la composizione granulometrica, allo scopo di quantificare il processo di *crushing* delle particelle.

4 EVOLUZIONE DEL PROCESSO DI DEFORMAZIONE

In figura 4 sono riportate le foto al microscopio ottico di alcune frazioni della sabbia, avente la composizione granulometrica iniziale 3 di figura 2, a fine prova per una prova con tensione verticale massima σ'_v di 66 MPa. A fine prova sono presenti ancora grani trattenuti allo staccio con apertura 0.42mm, figura 4a). Questi grani, ancorché presentino deformazioni plastiche in corrispondenza dei punti di contatto con altri grani e siano in qualche punto smussati, sono sopravvissuti al processo di carico. Per effetto dell'applicazione del carico si generano grani di dimensioni più piccole rispetto a quelle di partenza, figure 4 b), c), d), e) f). Le particelle più fine generate per frantumazione hanno diametro minore di 0.075mm. Per tutte le frazioni generate si osserva che i grani presentano spigoli vivi, compresa la frazione passante allo staccio n. 200 ASTM (figura 4 f). Questo risultato è di notevole importanza in quanto dimostra che anche le particelle più piccole sono a spigoli vivi e quindi ancora potenzialmente frantumabili e suscettibili di smussamento per effetto dell'aumento del livello tensionale o per effetto dell'applicazione di carichi di lunga durata (fenomeni di *creep*).

La generazione di grani con spigoli vivi è stata riscontrata anche nelle prove eseguite sulle sabbie di quarzo (figura 5) e su sabbie pomicee, figura 6.

In figura 7 sono riportate le curve granulometriche a fine prova per alcune delle prove eseguite con durata delle prove di 24 h, sulle sabbie 2 ($0.30\text{mm} < d < 0.42\text{mm}$) e 3 ($0.42\text{mm} < d < 0.60\text{mm}$), cfr. figura 2.

Il processo di frantumazione e schiacciamento (*crushing*) dei grani inizia già a bassi valori del livello tensionale e a parità di altre condizioni, è tanto più intenso quanto più grande è la dimensione media dei grani della sabbia di partenza. Per la sabbia 3 ($0.42 < d < 0.60\text{mm}$) si osservano significative variazioni della composizione granulometrica per valori di σ'_v dell'ordine di 1MPa. Per la sabbia più grossa (sabbia 4, $0.60 < d < 0.84\text{mm}$, figura 2), variazioni evidenti di composizione granulometrica si hanno già per valori di σ'_v di 200-300 kPa. Per la sabbia più fina, sabbia 1 ($0.18 < d < 0.30\text{mm}$, figura 2), variazioni significative di composizione granulometrica iniziano a riscontrarsi per valori più alti della tensione verticale applicata ($\sigma'_v = 5\text{MPa}$).

Sulla figura 8 sono riportate le curve granulometriche di alcune prove relative alla stessa tensione σ'_v , con durata di 5 minuti e 24 ore. Le differenze delle curve granulometriche, ad eccezione della prova sulla sabbia $0.30 < d < 0.42\text{mm}$ e $\sigma'_v = 30\text{MPa}$, sono sempre modeste e minori dell'8%.

Il processo di frantumazione e schiacciamento dei grani, sia con riferimento alla singola particella che a un insieme di grani, è stato oggetto di diversi studi sia di tipo sperimentale che numerico in condizioni di deformazione 1-D e triassiale fino a livelli tensionali molto alti^{12,13,14,16,17,18,19,20,21,22,23}.

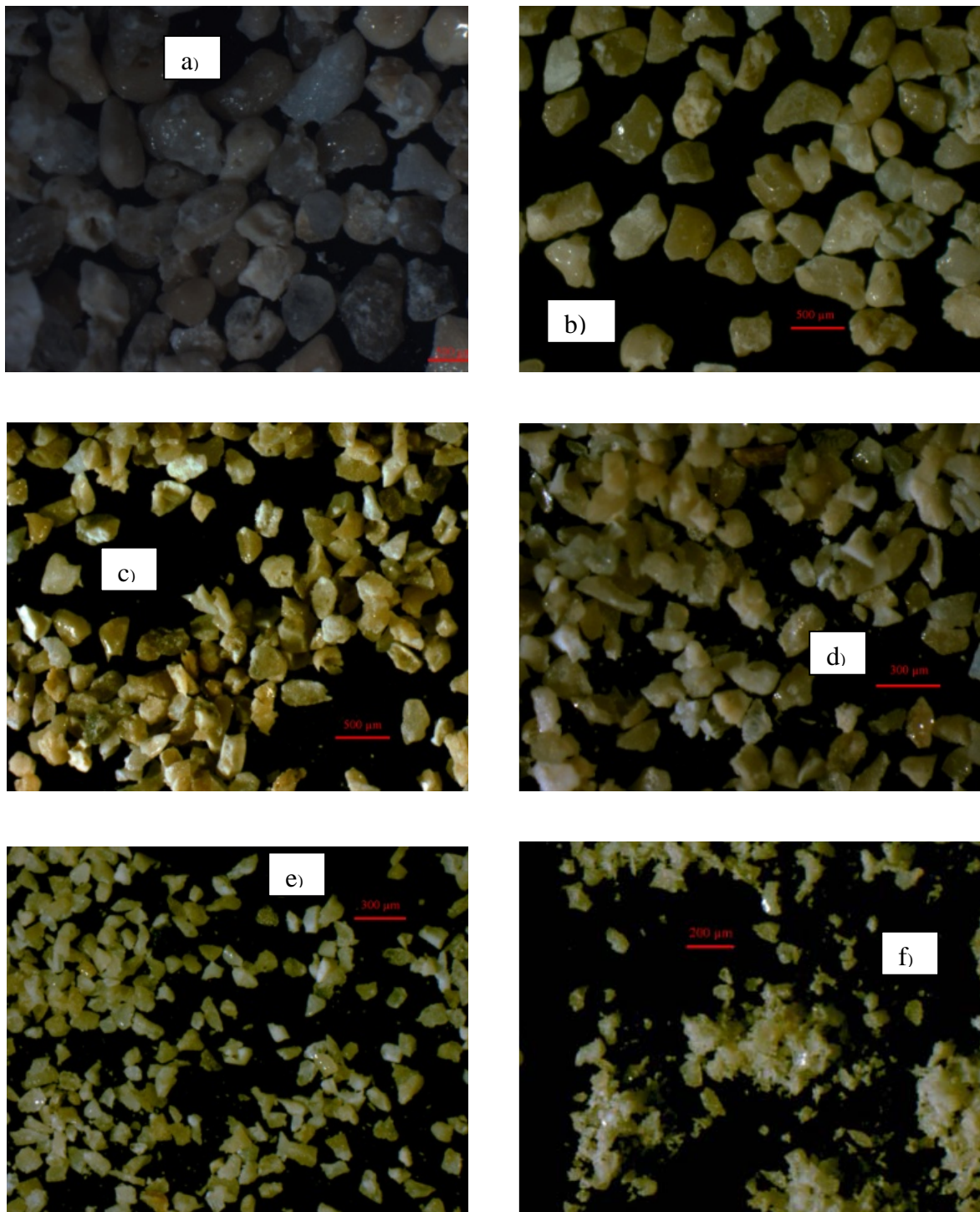


Figura 4. Sabbia bioclastica SH con composizione granulometrica iniziale 3 di figura 2 ($0.42 < d < 0.60$ mm). $\sigma'_v=66$ MPa; durata delle prove 24 h. Fotografie al microscopio ottico dello stato dei grani a fine prova: a) grani con $0.42 < d < 0.60$ mm sopravvissuti (22% in peso). Grani generati per frantumazione: b) $0.30 < d < 0.42$ mm (21% in peso); c) $0.18 < d < 0.25$ mm (14% in peso); d) $0.106 < d < 0.15$ mm (10% in peso); e) $0.075 < d < 0.106$ mm (6% in peso); f) $d < 0.075$ mm (15% in peso).

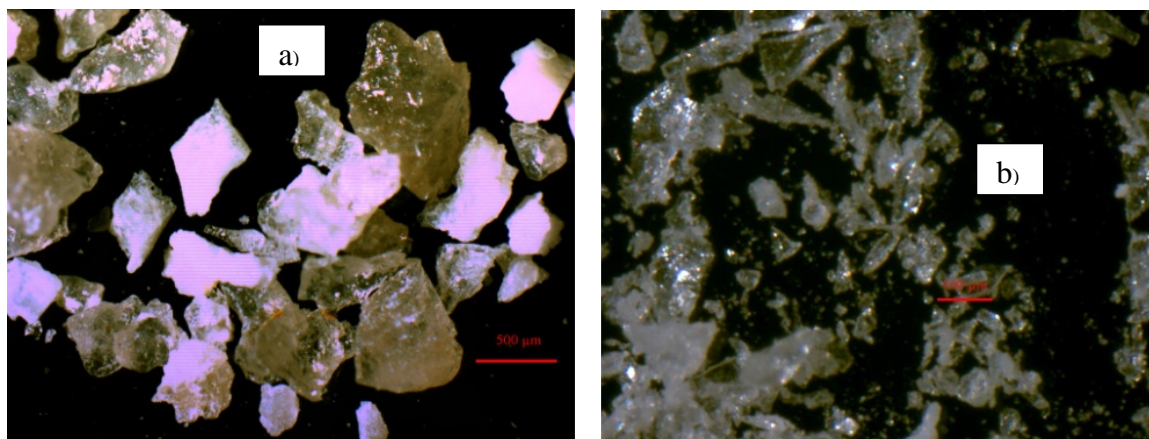


Figura 5. Fotografie al microscopio ottico della sabbia di quarzo a fine prova ($\sigma'_v=83.2$ MPa). Grani generati per frantumazione: a) $0.30 < d < 0.42$ mm; b) $d < 0.106$ mm. Sabbia iniziale: $0.42 < d < 0.60$ mm.

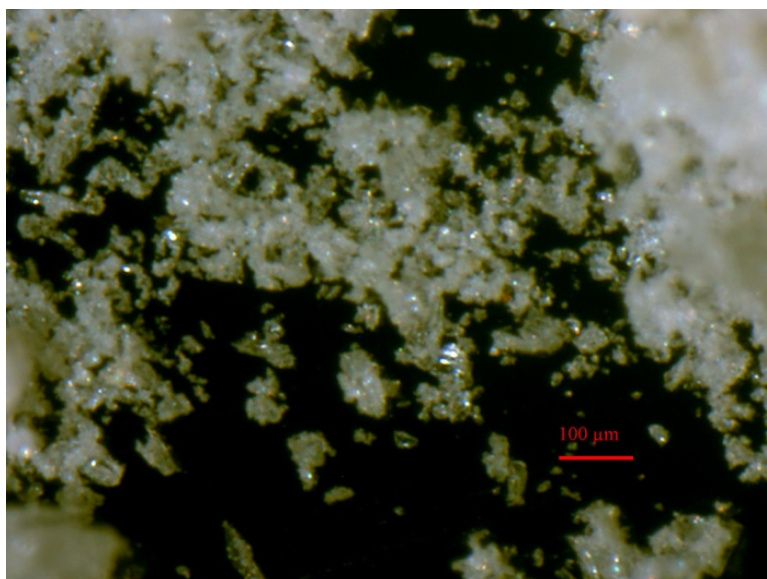


Figura 6. Fotografia al microscopio ottico delle sabbia pomicea a fine prova ($\sigma'_v=40$ MPa) con $d < 0.106$ mm. Sabbia iniziale: $0.30 < d < 0.42$ mm.

Per caratterizzare le differenze fra la composizione granulometrica iniziale e quella finale di un materiale granulare assoggettato a un processo di carico sono stati definiti diversi coefficienti la maggior parte dei quali fa riferimento a singoli diametri caratteristici^{23,24,25}. Il coefficiente che caratterizza il processo di *crushing* nel suo insieme è l'indice di *breakage relativo* B_r di Hardin²⁶, definito come in figura 9.

Il coefficiente B_r si basa sulla differenza tra la distribuzione granulometrica della sabbia a fine prova e quella iniziale e consente quindi di descrivere con un solo parametro la differenza tra la composizione granulometrica finale e quella iniziale relativa alla generica pressione applicata.

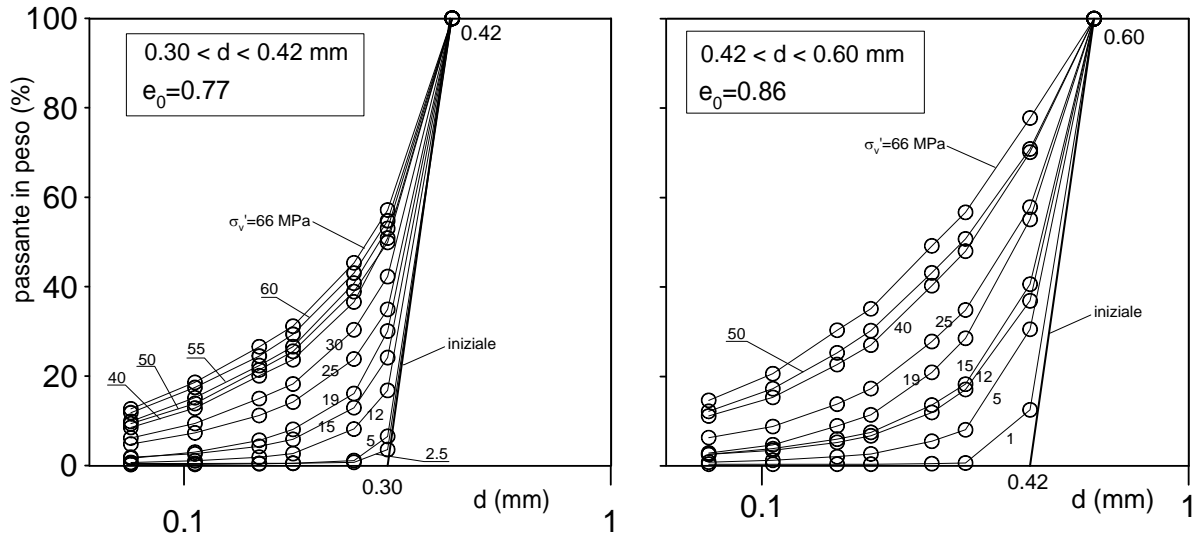


Figura 7. Sabbia SH. Evoluzione della composizione granulometrica della sabbia in funzione della σ'_v . Durata delle prove: 24 ore.

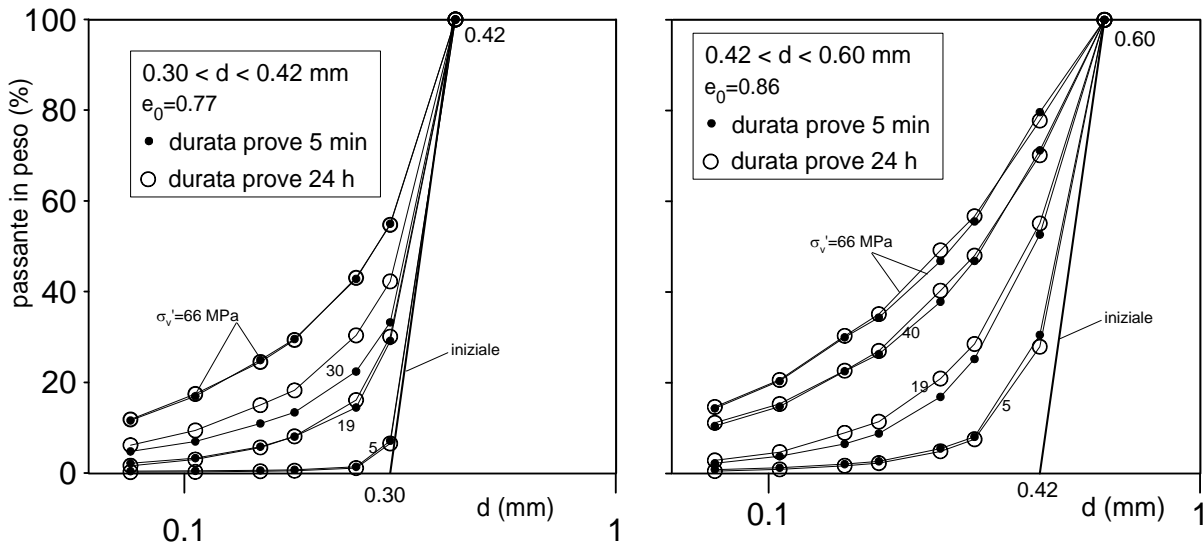


Figura 8. Sabbia SH. Confronto delle curve granulometriche per le prove di durata di 5 minuti e 24 ore .

È stato dimostrato^{12,13,14} che l'evoluzione della composizione granulometrica delle sabbie carbonatiche, e di altra natura come ad esempio il quarzo, in condizioni di deformazione 1-D, di compressione triassiale e di taglio anulare, può essere espressa con una funzione di Verhulst:

$$f(x) = \frac{1}{k} \frac{h}{(1 + C e^{-h \log(x)})} \tag{1}$$

nella quale h , k , e C sono costanti positive e dipendenti dalla costituzione mineralogica e dallo stato iniziale (indice di porosità iniziale, granulometria, assortimento granulometrico) della sabbia, f rappresenta la variazione del generico diametro caratteristico ΔD_i , mentre x , nel caso 1-D, è la tensione verticale applicata σ'_v .

Anche l'andamento dell'indice di *breakage* relativo B_r di Hardin in funzione di σ'_v è descrivibile con una funzione di Verhulst.

$$B_r(\sigma'_v) = \frac{1}{k_1} \frac{h_1}{(1 + C_1 e^{-h_1 \log(\sigma'_v)})} \quad (2)$$

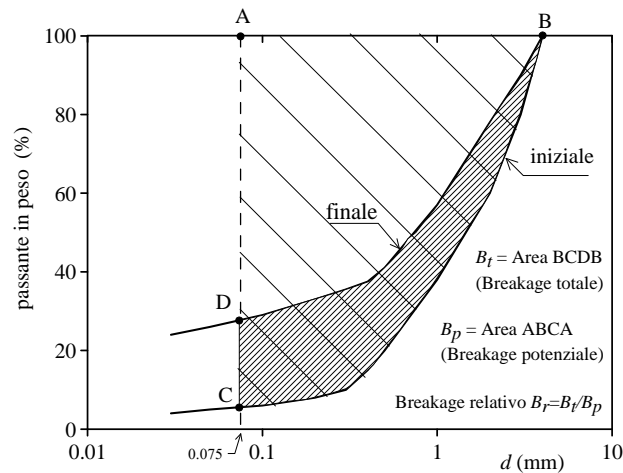


Figura 9. Definizione dell'indice di *Breakage* relativo secondo Hardin (1985).

5 COMPRESSIONE SECONDARIA

Gli effetti del tempo sul comportamento meccanico dei terreni sono generalmente quantificati mediante l'indice di compressione secondaria C_α del quale sono note in letteratura diverse definizioni che valgono sia per i terreni granulari che per quelli a grana fina^{27,28,29,30}

L'indice di compressione secondaria C_α utilizzato nella presente ricerca è definito in figura 10. Si è considerata l'altezza ($H-\rho_1$) che il provino ha all'inizio della compressione secondaria, al tempo t_1 (cfr. figura 10). Il tempo t_1 è pari a 4 minuti per la maggior parte delle prove eseguite sulle sabbie SH.

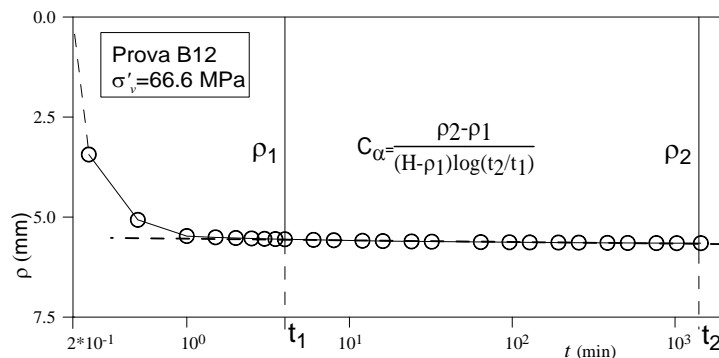


Figura 10. Definizione dell'indice di compressione secondaria C_α utilizzato nella presente ricerca.

6 RELAZIONE TRA COMPRESSIONE SECONDARIA E *CRUSHING* DELLE SABBIE SH

Sulla figura 11 sono riportati i cedimenti in funzione del tempo per alcune delle prove eseguite sulle sabbie $0.30 < d < 0.42 \text{ mm}$ (figura 11a) e $0.42 < d < 0.60 \text{ mm}$ (figura 11b). La maggior parte dei cedimenti ha luogo nei primi 2 minuti; successivamente si osservano in tutte le prove incrementi di cedimento nel tempo comunque significativi.

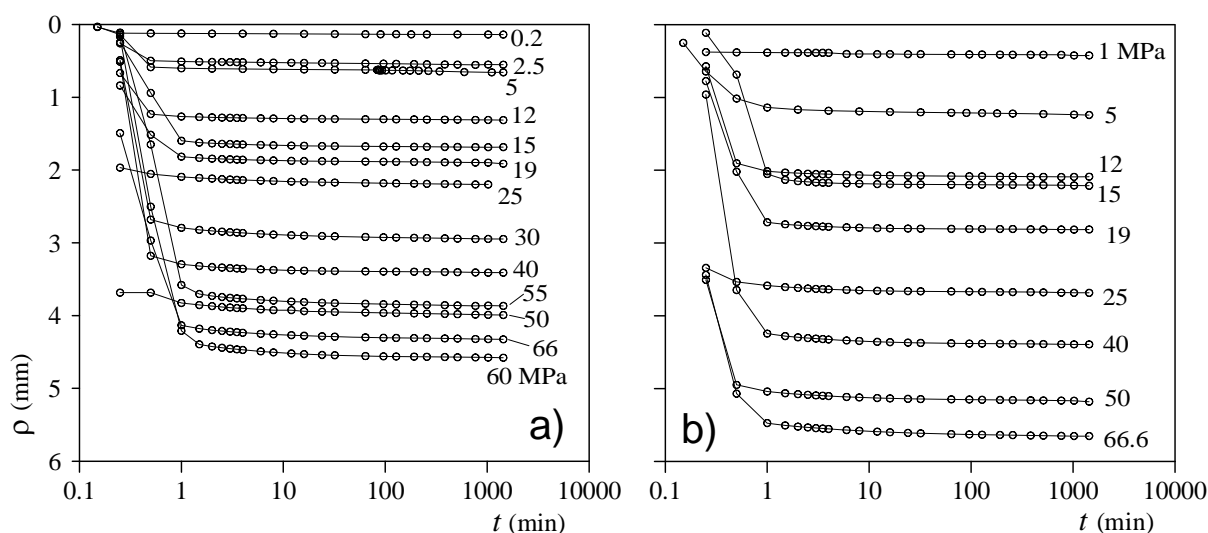


Figura 11. Sabbia SH. Cedimenti in funzione del tempo. a) $0.30 < d < 0.42 \text{ mm}$; b) $0.42 < d < 0.60 \text{ mm}$. Durata delle prove 24h.

Sulle figure 12 e 13 sono riportati gli andamenti di C_α con la σ'_v per le sabbie $0.30 < d < 0.42 \text{ mm}$ e $0.42 < d < 0.60 \text{ mm}$, relativi alle prove con durata di 24 ore, in scala naturale e semilogaritmica rispettivamente.

Nel campo di tensioni esplorato C_α tende generalmente ad aumentare con la σ'_v . Si osservano, tuttavia, delle oscillazioni che per la sabbia più fina riguardano tutto l'intervallo di tensioni esplorato. Per la sabbia più grossa le oscillazioni sono minori ma si registra un picco evidente per $\sigma'_v = 6-7 \text{ MPa}$ (cfr. figura 13), cui segue una forte riduzione di C_α che raggiunge un minimo per $\sigma'_v = 10-12 \text{ MPa}$, e successivamente un nuovo incremento con oscillazioni che tendono a ridursi con la σ'_v . Le oscillazioni di C_α , nell'intervallo tensionale esplorato, sono legate al *crushing* dei grani che è un fenomeno discontinuo. Difatti il materiale all'aumentare della σ'_v raggiunge configurazioni granulometricamente "stabili" per un dato intervallo tensionale superato il quale si verifica nuovamente un incremento piuttosto repentino del numero di grani frantumati e il raggiungimento di una nuova configurazione "stabile".

Questo tipo di comportamento sembra analogo per alcuni aspetti a quello riscontrato per i metalli – quali per esempio il rame – e interpretato come conseguenza di collasso periodico della struttura del materiale seguito da incrudimento temporaneo. Questo tipo di comportamento sarebbe causato nel caso dei mezzi granulari da due meccanismi di collasso: schiacciamento dei grani e propagazione della rottura lungo il contorno dei grani. Questi due meccanismi sarebbero all'origine dell'andamento ondulante o, meglio, caratterizzato da increspature della curva deformazione da *creep*-tempo¹⁶.

Nelle figure 14 e 15 sono diagrammati in funzione di σ'_v gli andamenti di B_r per le prove con durata di 24 ore e di 5 minuti. Questi dati sono interpolati con una curva di Verhulst. Sulle figure 14 b) e 15 b) sono riportati i corrispondenti andamenti della derivata dell'indice B_r rispetto a σ'_v che ha la seguente espressione:

$$\frac{dB_r(\sigma'_v)}{d\sigma'_v} = \frac{1}{k_1 \ln 10} \frac{C_1 h_1^2 \sigma'_v \left(\frac{h_1}{\ln 10} - 1\right)}{\left(C_1 + \sigma'_v \left(\frac{h_1}{\ln 10}\right)\right)^2} \quad (3)$$

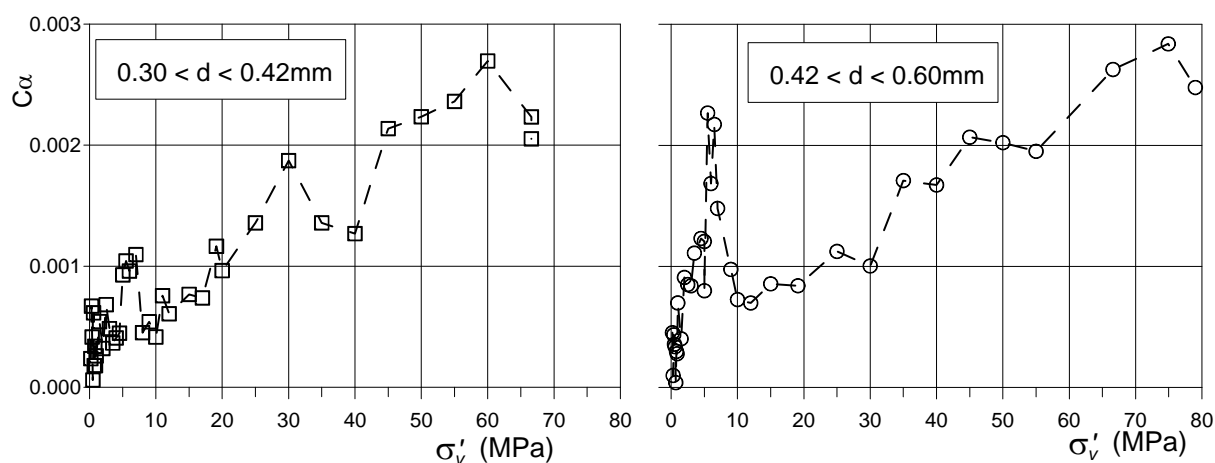


Figura 12. Indice di compressione secondaria C_α delle sabbie SH in funzione della tensione verticale σ'_v per prove con durata di 24 h. (σ'_v in scala naturale).

Per valori di σ'_v minori di 10 MPa la curva che interpola i dati sperimentali non riesce a cogliere bene le oscillazioni dei punti sperimentali stessi. Ad alti valori di σ'_v l'indice di *crushing* B_r tende a stabilizzarsi a conferma che il materiale raggiunge una composizione granulometrica e una struttura sempre più stabile sempre più difficile da modificare. Tuttavia i grani, compresi quelli più piccoli, cfr. figure 3 e 4, non tendono alla forma isometrica e presentano ancora spigoli vivi. Questo risultato indica comunque che il numero di coordinazione delle particelle con diametro maggiore - sia quelle originarie che quelle generate - diventa in ogni caso molto grande; di conseguenza esse risultano sempre meno frantumabili poiché le azioni cui sono sottoposte sono ben distribuite e gli sforzi deviatorici modesti. Questa considerazione è confermata dal fatto che anche per valori di σ'_v di 70 MPa circa sopravvive una quantità significativa di grani non frantumati (cfr. figura 3a). L'andamento di $dB_r/d\sigma'_v$ dimostra che il fenomeno del *crushing* presenta la massima "velocità" per $\sigma'_v=15$ MPa per la sabbia $0.30 < d < 0.42$ mm e per $\sigma'_v=5$ MPa per la sabbia $0.42 < d < 0.60$ mm. Questo risultato dimostra inoltre che il *crushing* inizia e diventa significativo a pressioni decrescenti con l'aumentare del diametro medio iniziale delle particelle. All'aumentare di σ'_v il valore di $dB_r/d\sigma'_v$ decresce fino ad assumere valori tendenti a zero per σ'_v maggiori di 60-70 MPa. Per tali livelli tensionali la rottura dei grani diventa sempre meno probabile.

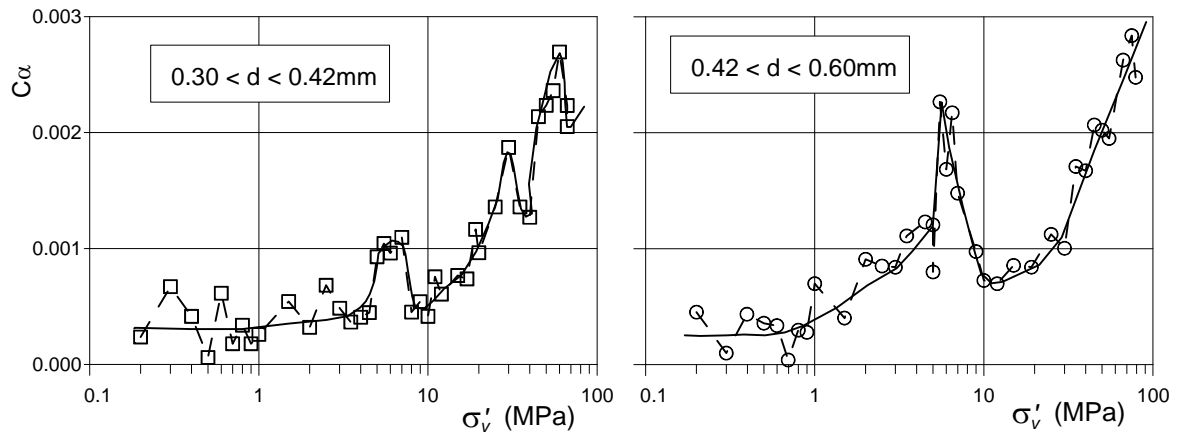


Figura 13. Sabbia SH. Indice di compressione secondaria C_α in funzione della tensione verticale σ'_v per prove con durata di 24 h. (σ'_v in scala logaritmica).

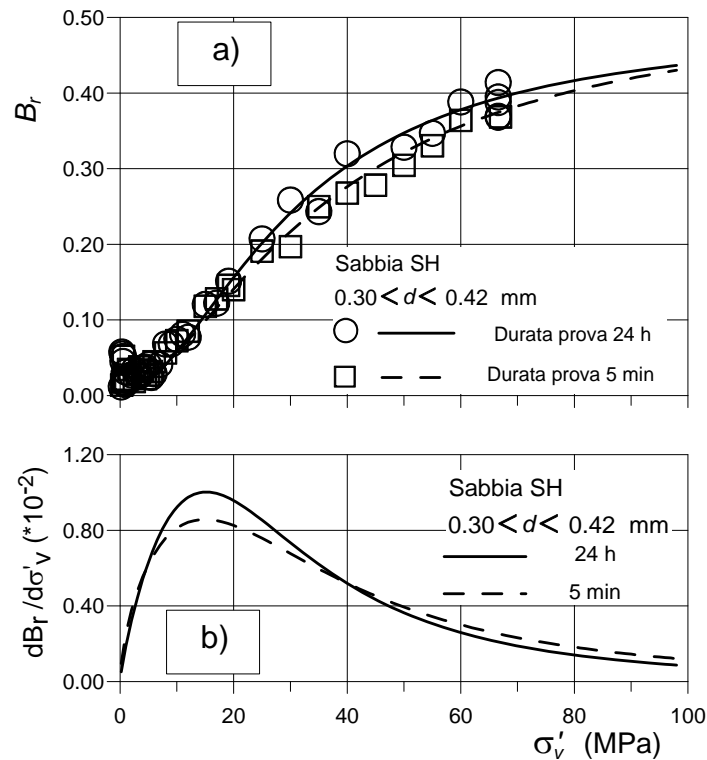


Figura 14. Sabbia SH $0.30 < d < 0.42 \text{ mm}$. a) indice di crushing B_r per le prove con durata 24h e 5min e interpolazione dei dati con curve di Verhulst in funzione di σ'_v . b) derivata di B_r rispetto a σ'_v in funzione di σ'_v .

Gli andamenti dell'indice di crushing B_r e di $dB_r/d\sigma'_v$ relativi alle prove con diversa durata (figure 14 e 15) presentano differenze trascurabili per la sabbia più grossa ($0.42 < d < 0.60 \text{ mm}$) e comunque molto piccole per la sabbia più fina ($0.30 < d < 0.42 \text{ mm}$).

Questi risultati dimostrano che le deformazioni da *creep* nelle sabbie aumentano con il livello tensionale raggiunto nelle prove ma all'aumentare del livello tensionale i meccanismi di deformazione dipendenti dal tempo (*creep*) sono dovuti sempre meno alla rottura dei grani. A livelli tensionali alti le deformazioni viscose sono dovute prevalentemente agli scorrimenti

relativi tra i grani, alle deformazioni plastiche in corrispondenza dei punti o aree di contatto e agli spostamenti relativi che queste ultime comportano.

Come già accennato, con l'aumentare del livello tensionale la frantumazione dei grani è sempre meno probabile in quanto le particelle, e specialmente quelle più grandi, presentano un numero di coordinazione alto e le sollecitazioni nei singoli grani tendono alla compressione uniforme, anche nel caso delle particelle allungate.

I risultati ottenuti indicano che il *creep* delle sabbie a livelli tensionali alti non è controllato esclusivamente dal *crushing* almeno per le sabbie carbonatiche e di quarzo utilizzate nella sperimentazione; essi non confermano quindi le conclusioni di Augustesen et al.¹, di Lingard et al.², di Karimpour e Lade³, Lade e Karimpour⁴ e di Lade et al.⁵ secondo le quali soltanto i processi di *crushing* sarebbero all'origine delle deformazioni dipendenti dal tempo per stato tensionale efficace costante.

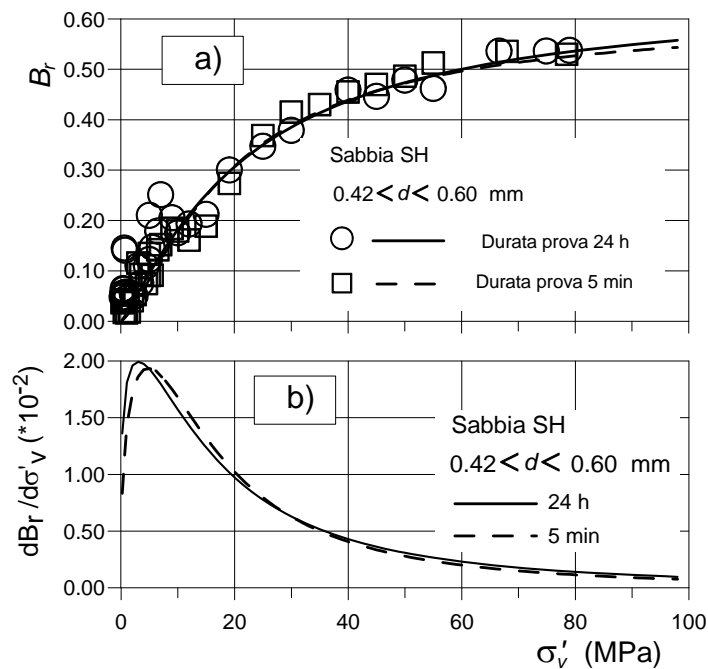


Figura 15. Sabbia SH $0.42 < d < 0.60$ mm. a) indice di crushing B_r per le prove con durata 24h e 5min e interpolazione dei dati con curve di Verhulst in funzione di σ'_v . b) derivata di B_r rispetto a σ'_v in funzione di σ'_v .

7 CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati della ricerca fin qui svolta si possono trarre le seguenti conclusioni. La sabbia utilizzata subisce, per effetto delle pressioni efficaci applicate, notevoli modifiche della composizione granulometrica e della struttura che producono configurazioni del materiale sempre più stabili all'aumentare della tensione verticale applicata. Il processo di *crushing* dà luogo a materiali sempre più assortiti granulometricamente, con frazione costituita da particelle minori di 0.075mm significativa. Una parte dei grani iniziali sopravvive al processo di carico anche per valori di σ'_v molto alti per effetto dell'elevato numero di contatti con particelle più fine che le contornano che si vengono a generare ossia a causa dell'alta densità di contatti; per queste particelle sopravvissute le sollecitazioni tendono alla compressione uniforme per la quale è molto difficile la rottura.

I grani generati, compresi quelli più piccoli, presentano spigoli vivi. Per le prove a unico incremento di carico l'aumento dell'indice di compressione secondaria C_α con σ'_v è probabilmente legato alla frantumazione dei grani fino a valori di σ'_v di 20MPa circa; a livelli tensionali più alti esso dipende fundamentalmente dagli spostamenti relativi dei grani e dalle deformazioni plastiche in corrispondenza dei punti di contatto, anziché dal *crushing*.

C_α presenta andamento crescente con σ'_v in tutto il campo tensionale esplorato. Si osservano, tuttavia, oscillazioni che sono legate al fenomeno del *crushing* che è discontinuo. L'andamento generale descritto per le sabbie oggetto dello studio necessita di conferma per sabbie di natura e caratteristiche diverse. Allo stato attuale il comportamento descritto per le sabbie carbonatiche SH è stato riscontrato anche per le sabbie di quarzo e di pomice.

Elenco dei principali simboli

B_r	Indice di <i>breakage</i> relativo secondo Hardin
C_α	Indice di compressione secondaria
d	Diametro dei grani o delle particelle solide
D	Diametro caratteristico
ΔD	Variazione del diametro caratteristico
e	Indice di porosità
e_0	Indice di porosità iniziale
H	Altezza iniziale dei provini
h, h_1, k, k_1, C, C_1	Costanti dell'equazione di Verhulst
t	Tempo
γ_s	Peso specifico della sabbia
ρ	Cedimento
σ'_v	Tensione verticale efficace

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Augustesen, M. Lingsgaard and P.V. Lade, "Evaluation of time-dependent behavior of soils" *Int. J. of Geomechanics*, ASCE, **4**, No. 3, 137-156 (2004).
- [2] M. Lingsgaard, A. Augustesen and P.V. Lade, "Characterization of models for time-dependent behavior of soils" *Int. J. of Geomechanics*, ASCE, **4**, 3, 157-177 (2004).
- [3] H. Karimpour and P.V. Lade, "Time effect relate to crushing in sand" *J. of Geotech. and Geoenviron. Engng*, ASCE, **136**, 9, 1209-1219 (2010).
- [4] P.V. Lade and H. Karimpour, "Static fatigue controls particle crushing and time effects in granular materials" *Soils and Foundations*, **50**, 5, 573-583 (2010).
- [5] P.V. Lade, C.D. Liggio and J. Nam, "Strain rate, creep, and stress drop-creep experiments on crushed coral sand" *J. of Geotech. and Geoenviron. Engng*, ASCE, **135**, 7, 941-953 (2009).
- [6] P.V. Lade and C.T. Liu, "Experimental study of drained creep behavior of sand" *J. of Engineering Mech.*, ASCE, **124**, 8, 912-920 (1998).
- [7] R. Kuwano and R. Jardine, "On measuring creep behaviour in granular materials through triaxial testing" *Canadian Geotech. J.*, **39**, 5, 1061-1074 (2002).
- [8] F. Tatsuoka, F. Santucci de Magistris, K. Hayano, Y. Momoya and J. Koseki, "Some new aspect of time effects on the stress-strain behavior of stiff geomaterials" *Proc. 2nd*

- Hard Soil Soft Rock*, Napoli, Evangelista and Picarelli Eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol. II, 1285-1371 (2000).
- [9] L.Q. Anh Dan, F. Tatsuoka and J. Koseki, "Viscous effects on the stress-strain behavior of gravelly soil in drained triaxial compression" *Geotech. Test. J.*, **29**, 4, 330-240 (2006).
- [10] J.H. Yin, "Non-linear creep of soils in oedometer tests" *Géotechnique*, **49**, No. 5, 699-707 (2002).
- [11] T. Kiyota and F. Tatsuoka, "Viscous property of loose sand in triaxial compression, extension and cyclic loading" *Soils and Foundations*, **46**, 5, 665-684 (2006).
- [12] M. Ziccarelli, "Comportamento meccanico di sabbie carbonatiche bioclastiche in stato di deformazione monodimensionale" – *Tesi di dottorato in Ingegneria Geotecnica* – Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geotecnica – Consorzio tra le Università di Catania e di Palermo – Catania (1999).
- [13] C. Valore and M. Ziccarelli, "Stiffness of a calcareous sand under 1-D compression at medium-high stresses", *15th Int. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng.*, Istanbul, **1**, 311-315 (2001).
- [14] C. Valore and M. Ziccarelli, "The evolution of grain-size distribution of sands under 1-D compression", *17th Int. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Engng.* – Alexandria, **1**, 84-88 (2009).
- [15] M. Ziccarelli, "Composizione granulometrica limite di sabbie carbonatiche bioclastiche sottoposte a sollecitazioni deviatoriche, *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2005 – IARG 2005* – Ancona 29 Giugno – 1 Luglio 2005, Atti su CD, 1-4 (2005).
- [16] J. Feda, "Creep of soils and related phenomena". *Developments in Geotechnical Engineering*, 68, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands (1992).
- [17] G.R. McDowell and A. Humphreyes, "Yielding of granular materials". *Granular Matter*. Springer-Verlag, Vol. 4, 1-8, (2002).
- [18] M.D. Bolton, Y. Nakata, Y.P. Cheng, "Micro – and macro – mechanical behavior of DEM crushable materials" *Géotechnique*, **58**, 6, 471-480 (2008).
- [19] G.R. McDowell and M.D. Bolton, "On the micromechanics of crushable aggregates" *Géotechnique*, **48**, 5, 667-679 (1998).
- [20] A. Ramha, "Modélisation du comportement du milieu granulaire en fonction de l'écrasement des grains" *Can. Geotech. J.*, **35**, 517-523 (1998).
- [21] M.M. Hagerty, D.R. Hite, C. R Ullrich and D.B. Hagerty, "One-dimensional high-pressure compression of granular media". *J. of Geotech. Engrg*, ASCE, Vol. **119**, No 1, 1-18 (1993).
- [22] P.V. Lade, J.A. Yamamuro and P.A. Bopp, "Significance of particle crushing in granular materials" *J. of Geotech. Engrg*, ASCE, Vol. **122**, No 4, 309-316 (1996).
- [23] J. A. Yamamuro, P.A. Bopp and P.V. Lade, "One-dimensional compression of sands at high pressures. *J. of Geotech. Engrg*, ASCE, **112**, 2, 147-154 (1996).
- [24] K. L Lee and I. Farhoomand, "Compressibility and crushing of granular soils in anisotropic triaxial compression" *Can. Geotech. J.*, Ottawa, Canada, **4**, 1, 68-86 (1967).
- [25] R.J Marsal, "Large scale testing of rockfill materials" *J. of Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, **93**, SM2, 27-43 (1967).
- [26] B.O. Hardin, "Crushing of soil particles", *J. of Geotech. Engng*, ASCE, **111**, 10, 1177-1192 (1985).
- [27] G. Mesri, "Coefficient of secondary compression" *J. of Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, **99**, 1, 123-137 (1973).

- [28] G. Mesri and P.M. Goldewsky, "Time and stress-compressibility interrelationship" *J. of Geotech. Engng., ASCE*, **103**, 5, 417-430 (1977).
- [29] T. Berre and K. Iversen, "Oedometer tests with different specimen heights on a clay exhibiting large secondary compression" *Géotechnique*, **22**, 1, 53-70 (1972).
- [30] S. Leroueil, M. Kabbaj, F. Tavenas and R. Bouchard, "Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays" *Géotechnique*, **35**, 2, 159-180 (1985).