

SULL'EVOLUZIONE DELLA DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA DI UN MATERIALE A GRANI FRANTUMABILI A SOLLECITAZIONI ELEVATE

Manuel Bartoli, Francesca Casini, Giulia Viggiani

Università degli Studi di Roma Tor Vergata

manuelbartoli@yahoo.com, francesca.casini@uniroma2.it, viggiani@uniroma2.it

Sommario

Questa nota presenta uno studio sperimentale dell'evoluzione della granulometria di un materiale artificiale a grani frantumabili a deformazioni e sollecitazioni elevate. In particolare, si presentano i risultati di sedici prove di compressione edometrica a controllo di spostamento, effettuate a partire da diverse granulometrie iniziali. Gli effetti indotti dalla compressione monodimensionale sono analizzati con riferimento all'evoluzione della curva granulometrica iniziale e alle conseguenti modifiche nella curva di distribuzione delle dimensioni delle particelle. Le granulometrie al termine della prova sono ben descritte da curve bimodali del passante in volume in funzione del diametro delle particelle, ottenute dalla sovrapposizione di due curve monomodali. La relativa distribuzione delle dimensioni delle particelle è caratterizzata da due diametri di picco, che assumono diversa importanza al variare del peso di ciascuna curva monomodale. La rottura relativa al termine delle prove è stata messa in relazione con il lavoro totale di deformazione.

1. Introduzione

La curva granulometrica dei materiali granulari a grani frantumabili può modificarsi per effetto dell'applicazione di carichi; la rottura delle particelle dipende da numerosi fattori, tra i quali alcuni caratteristici dell'aggregato, come la distribuzione granulometrica iniziale, lo stato di sollecitazione e l'indice dei vuoti, e altri caratteristici delle singole particelle, come la loro dimensione, forma, resistenza e composizione mineralogica. In questo lavoro si è esaminata l'evoluzione della granulometria di un materiale artificiale a grani frantumabili, i cui caratteri presentano alcune analogie con quelli delle rocce tenere piroclastiche come, ad esempio, l'elevata porosità intra-granulare, il ridotto peso specifico apparente delle particelle e la sua dipendenza dalle dimensioni (Cecconi e Viggiani, 2002).

Vari studi di letteratura suggeriscono che l'effetto predominante della frantumazione delle particelle è quello di incrementare la frazione fina dell'aggregato senza una significativa riduzione del diametro delle particelle più grandi. L'obiettivo di questo lavoro è quello di ottenere informazioni sperimentali sull'evoluzione della granulometria a tensioni e deformazioni elevate, che permettano di verificare l'ipotesi dell'esistenza di una granulometria ultima unica, spesso proposta in letteratura e utilizzata nella definizione dei parametri di rottura potenziale, totale e relativa.

1.2 Descrizione del materiale

L'osservazione sperimentale sistematica dell'evoluzione della granulometria di materiali naturali per effetto dei processi di frantumazione delle particelle è complicata dall'eterogeneità dei depositi naturali e dalla resistenza relativamente elevata delle particelle, che pregiudicano la ripetibilità dei risultati e rendono necessario applicare tensioni elevate per la rottura dei grani. Per queste ragioni, la sperimentazione è stata condotta su un materiale granulare artificiale costituito da particelle di argilla espansa, distribuito commercialmente con l'acronimo LECA (Light Expanded Clay Aggregate).

Per effetto del processo di produzione, il materiale è caratterizzato da una doppia porosità: "inter-granulare", cioè vuoti esistenti tra le particelle, e "intra-granulare", cioè vuoti all'interno delle singole

particelle, vedi Figura 1(a). La significativa porosità intra-granulare, n_i , è responsabile dei bassi valori di peso specifico apparente delle particelle, γ_{as} , e della sua dipendenza dalla loro dimensione. Nella Figura 1(b) sono riportati l'andamento di γ_{as} e di n_i con la dimensione delle particelle; quest'ultima è stata calcolata a partire dai valori misurati del peso specifico apparente come $n_i = 1 - \gamma_{as} / \gamma_s$, con γ_s peso specifico della matrice argillosa (26.5 kN/m^3). È chiaro che la porosità intra-granulare aumenta all'aumentare delle dimensioni delle particelle tendendo a un valore costante e pari a circa 2 per le particelle di dimensioni maggiori.

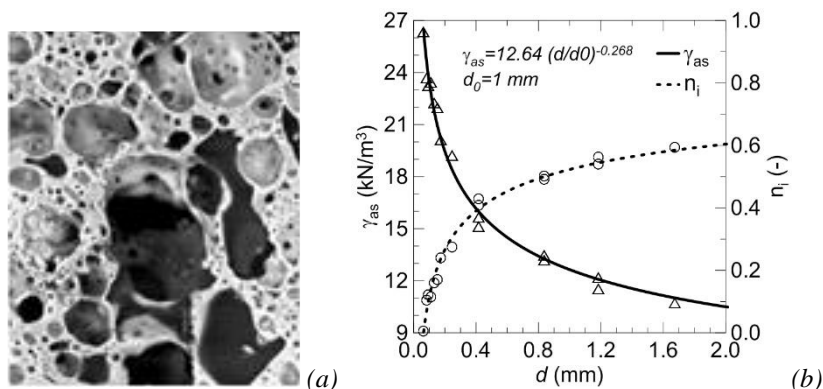


Fig. 1. (a) foto al microscopio ottico di LECA; (b) γ_{as} e n_i in funzione della dimensione delle particelle.

2. Programma sperimentale e risultati sperimentali

Il comportamento meccanico del LECA frantumato e l'evoluzione della sua granulometria per effetto di carichi applicati sono già stati studiati dagli stessi Autori (e.g., Casini e Viggiani 2011a e b, Casini *et al.*, 2013) per diverse granulometrie iniziali e percorsi di carico (isotropi, edometrici, triassiali) fino tensioni massime dell'ordine di 1÷2 MPa. In particolare, nell'ambito dei livelli di sollecitazione indagati in passato e come suggerito da diversi autori, si era osservato che, per effetto dell'applicazione dei carichi, la granulometria del materiale tendeva ad assumere una forma auto-similare con dimensione frattale, α , pari a circa 2.5-2.6, senza significative riduzioni del diametro massimo. Si era pertanto ipotizzata l'esistenza di una granulometria ultima, che per semplicità si era ammessa coincidente con quella al termine della prova in cui era stata osservata la maggiore frantumazione, e si era utilizzata questa curva per la definizione dei parametri di rottura potenziale, totale e relativa (Casini *et al.*, 2013). Lo scopo del presente programma sperimentale è quello di indagare il comportamento del materiale per percorsi di compressione monodimensionale che raggiungano livelli di deformazione e tensione molto più elevati di quelli adoperati in passato, per verificare l'ipotesi dell'esistenza di una granulometria ultima unica, a cui il materiale tende a partire da diverse granulometrie iniziali.

Il materiale è stato ricostituito in laboratorio con le stesse granulometrie adoperate in passato, prendendo in considerazione otto curve granulometriche iniziali caratterizzate dallo stesso diametro medio d_{50} (= 0.5 e 1 mm), e diversi coefficienti di uniformità U (= 3.5, 7, 14, 28). Ciascuna curva granulometrica iniziale è una curva auto-similare, descritta dall'equazione:

$$P = \left(\frac{d}{d_{max}} \right)^\beta \quad (1)$$

in cui d_{max} è il diametro massimo e $\beta = 3 - \alpha$ è un esponente, ottenuti imponendo che d_{50} e U fossero quelli richiesti: $d_{max} = d_{50} / (0.5^{1/\beta})$ e $\beta = \log_U 6$. Per ciascuna delle granulometrie, sono stati creati due provini cilindrici, di diametro $D = 100 \text{ mm}$ e altezza $H = 40 \text{ mm}$, all'interno di un anello edometrico. Il programma sperimentale prevedeva che i due provini fossero caricati, a velocità di spostamento controllata ($v = 1 \text{ mm/min}$), fino a spostamenti massimi imposti pari a $1/3H$ e $2/3H$, rispettivamente. Tuttavia, in nessuna prova si è riusciti a ottenere il valore di spostamento di $2/3H$, perché si è raggiunto prima il fondo scala della pressa meccanica utilizzata per le prove (100 KN). La Tabella 1 riporta i valori di deformazione imposta e tensione verticale massima raggiunta per tutte le prove eseguite.

d_{50} [mm]	U [-]	Serie 1		Serie 2	
		ε_a [-]	σ'_v [MPa]	ε_a [-]	σ'_v [MPa]
0.5	3.5	0.33	3.4	0.5	12.6
	7	0.33	6.07	0.44	12.6
	14	0.33	6.08	0.42	12.6
	28	0.33	3.94	0.41	12.6
1	3.5	0.33	1.89	0.56	11.8
	7	0.33	3.23	0.52	12.6
	14	0.33	5.02	0.44	12.6
	28	0.33	7.34	0.4	12.6

Tab. 1. Deformazioni e sollecitazioni massime per le 16 prove edometriche

Per la Serie 1, a parità di deformazione imposta ($\varepsilon_a = 33\%$), la tensione massima a fine prova aumenta sempre con il coefficiente di uniformità iniziale; a parità di tensione verticale (fondo scala della pressa), per la Serie 2, la deformazione assiale al termine della prova diminuisce sempre all'aumentare del coefficiente di uniformità iniziale. Entrambe le osservazioni indicano che le granulometrie caratterizzate da un valore più elevato di U , e quindi meno uniformi, sono più resistenti alla frantumazione di quelle più uniformi, probabilmente a causa della possibilità per le particelle più grandi di essere circondate da particelle di dimensioni minori, che attribuisce loro un numero di coordinazione più alto rendendole più resistenti alla rottura.

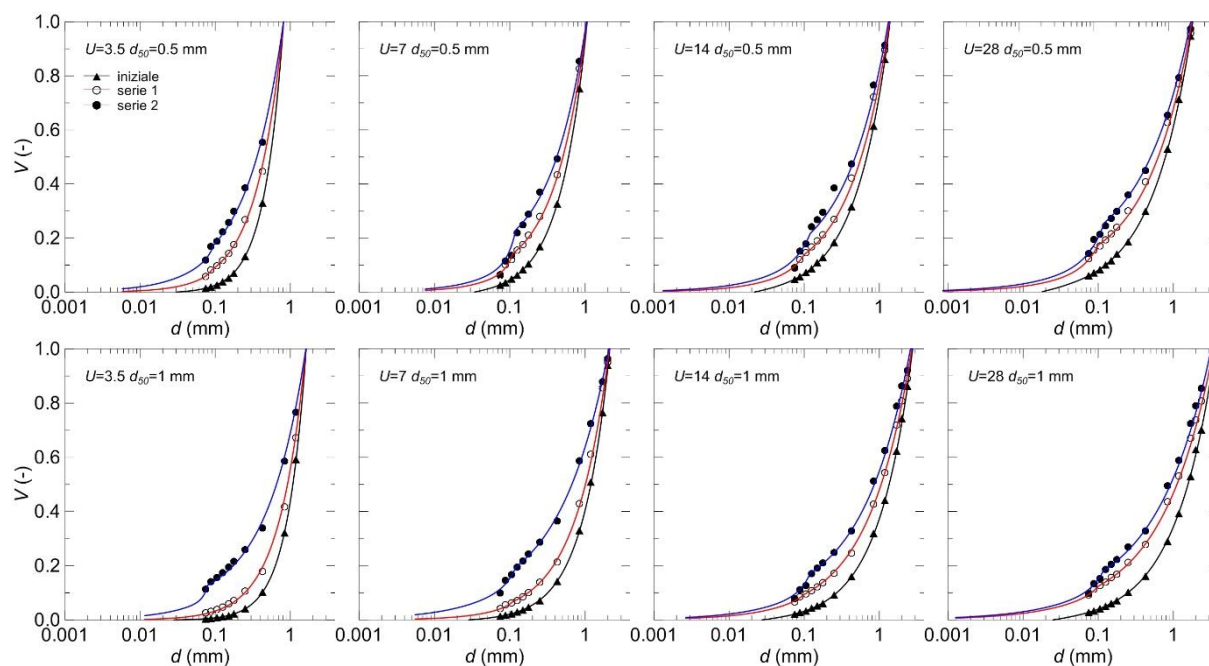


Fig. 2. Granulometrie volumetriche del materiale prima e dopo le prove

La Figura 2 riporta le percentuali di passante in volume determinate prima e dopo ciascuna prova per $d_{50}=0.5\text{mm}$ e $d_{50}=1\text{mm}$, rispettivamente; esse mostrano chiaramente che, all'aumentare della deformazione assiale applicata, aumenta il grado di frantumazione delle particelle, con una tendenza delle granulometrie a spostarsi verso sinistra e verso l'alto rispetto alla curva iniziale. Tuttavia, mentre le granulometrie con un valore iniziale di U più basso e, più in generale, a livelli di deformazione non troppo elevati, tendono a ruotare attorno al punto che corrisponde al diametro massimo, mantenendo una forma che può essere descritta ancora usando l'eq.(1) con valori di \mathcal{R} minori di quelli iniziali, per le granulometrie inizialmente meno uniformi, soprattutto se portate a deformazioni più elevate, si osserva una modifica della forma della curva granulometrica, con una tendenza ad "emergere" dalla curva granulometrica iniziale, di una altra granulometria caratterizzata da un diametro medio minore e

da una minore uniformità. Questo comportamento si è osservato sistematicamente per tutte le granulometrie investigate ed è più evidente per le granulometrie caratterizzate da valori più alti del coefficiente di uniformità iniziale.

In prima approssimazione, si sono interpolate le curve granulometriche ottenute al termine delle prove con curve bi-modali che risultano dalla somma pesata di due curve auto-similari (eq.1) delle quali la prima è quella che deriva dall'evoluzione della curva originaria, e la seconda è quella che emerge progressivamente con la deformazione. L'equazione della curva bi-modale risultante è:

$$V = w_1 \cdot \left(\frac{d}{d_{max1}}\right)^{\beta_1} + (1 - w_1) \cdot \left(\frac{d}{d_{max2}}\right)^{\beta_2} \quad (2)$$

dove w_1 e w_2 ($=1-w_1$) sono i pesi delle due curve esponenziali, e d_{max1} e d_{max2} e β_1 e β_2 ne rappresentano il diametro massimo e l'esponente, rispettivamente.

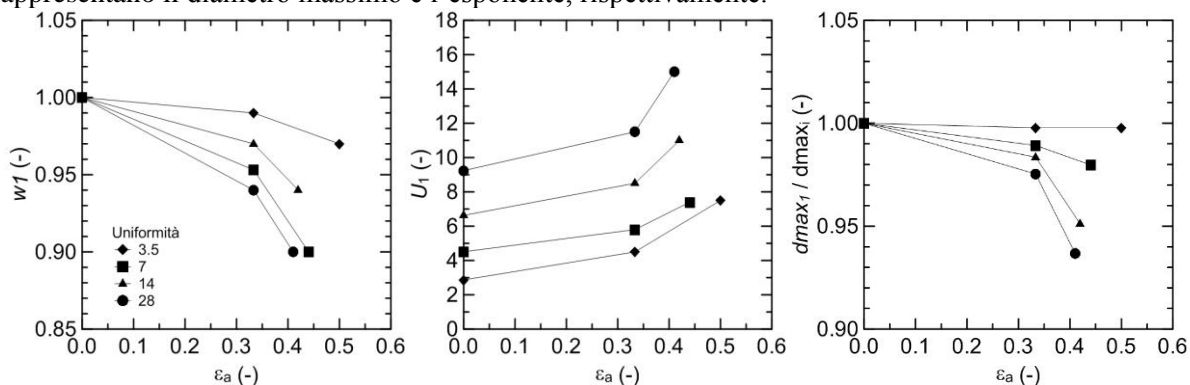


Fig. 3 w_1 , U_1 , d_{max1}/d_{max1} in funzione della deformazione assiale ($d_{50} = 0.5$ mm)

I cinque parametri dell'eq. (2) sono stati determinati a partire dai risultati sperimentali minimizzando la somma degli scarti quadratici medi e imponendo alcuni vincoli che derivano da condizioni sia fisiche, come, ad esempio, che il diametro massimo delle particelle non possa aumentare con il procedere della frantumazione, sia matematiche, come ad esempio che il peso, w_1 , sia sempre minore dell'unità. Le relative curve bi-modali risultanti sono quelle rappresentate insieme ai dati nella Figura 2.

La Figura 3 mostra l'andamento dei parametri che descrivono il peso della granulometria volumetrica iniziale, w_1 , e la sua forma, U_1 e d_{max1} (quest'ultimo adimensionalizzato rispetto al valore iniziale d_{max1}), in funzione della deformazione assiale, per tutte le prove con $d_{50} = 0.5$ mm. Per tutte le granulometrie, U_1 aumenta sempre fino alla massima deformazione assiale raggiunta nella prova. Per le granulometrie inizialmente più uniformi ($U=3.5$), il diametro massimo si mantiene pressoché costante ($d_{max1}/d_{max1} \approx 1$) e non si registrano significative modifiche di forma, nel senso che la curva rimane sostanzialmente auto-similare ($w_1 \approx 1$). Invece, per le granulometrie meno uniformi ($U = 7 \div 28$), si registrano riduzioni significative del diametro massimo, e il progressivo emergere della seconda curva auto-similare ($w_1 < 1$).

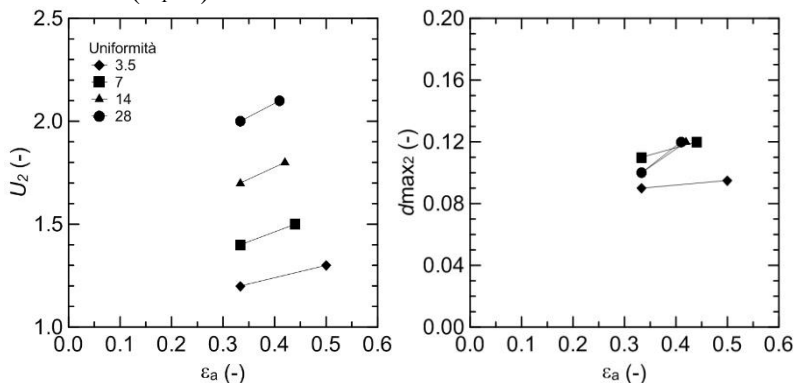


Fig. 4. U_2 , d_{max2} in funzione della deformazione assiale ($d_{50} = 0.5$ mm)

Per quanto riguarda quest'ultima, i risultati mostrati nella Figura 4 sembrano indicare che, per tutte le uniformità investigate, la curva granulometrica emergente abbia un diametro massimo pari a circa 0.1

mm, forse solo leggermente crescente con la deformazione, e un coefficiente di uniformità molto minore di quello della curva originaria ($1 < U_2 < 2$) e che cresce sia con l'uniformità iniziale sia al progredire della deformazione.

Gli andamenti delle curve per $d_{50} = 1$ mm, non mostrati per ragioni di brevità, sono del tutto analoghi anche se, per il medesimo grado di uniformità, sono caratterizzati da maggiori riduzioni del diametro massimo rispetto alle granulometrie più fine, mostrate nella Figura 3. Questo conferma il fatto che le particelle di dimensioni maggiori sono meno resistenti, perché è più alta la probabilità che esse contengano difetti.

Le osservazioni di cui sopra sono messe meglio in evidenza rappresentando la distribuzione delle dimensioni delle particelle PSD = $dV/d\log(d)$ come nella Figura 5, dalla quale si vede con chiarezza emergere la seconda curva auto-similare, con il picco in corrispondenza del diametro $d_{2max} \sim 0.1$ mm, particolarmente per le granulometrie inizialmente meno uniformi.

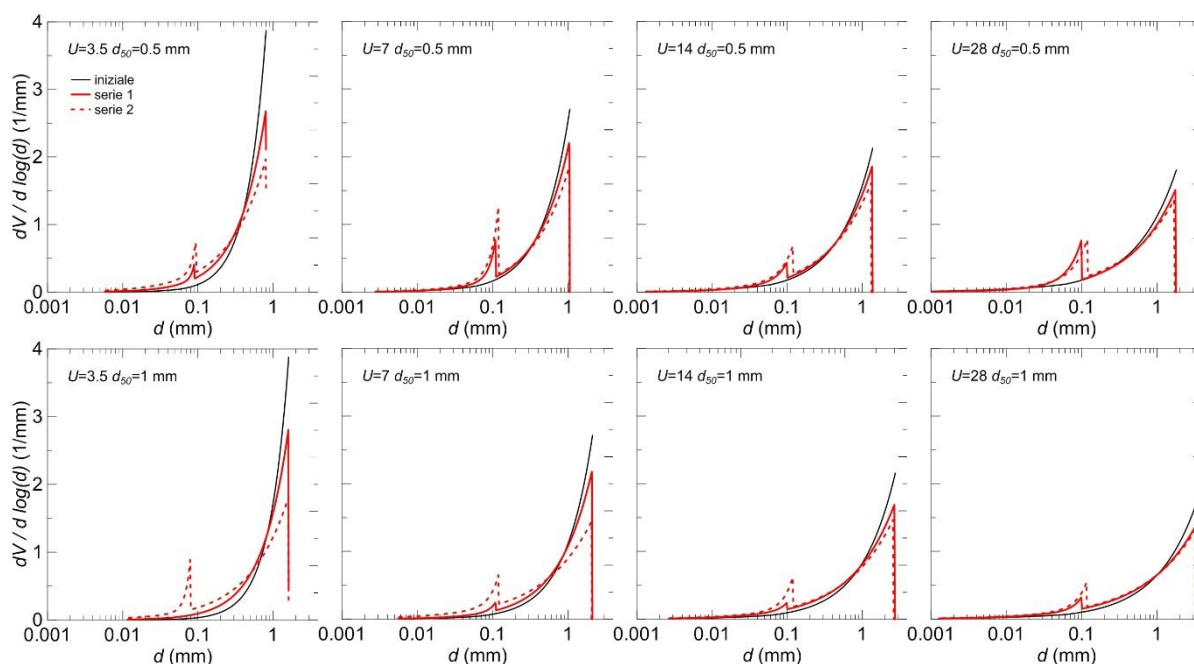


Fig. 5. Distribuzione delle dimensioni delle particelle

Casini *et al.* (2013) avevano introdotto un parametro di rottura relativa definito in modo da assumere valori crescenti e compresi tra 0 e 1, man mano che la granulometria corrente si spostava dalla sua posizione iniziale, avvicinandosi alla granulometria ultima. Sulla base dei risultati ottenuti a livelli di sollecitazione dell'ordine di 1÷2 MPa, si era ammesso che questa fosse ancora una granulometria auto-similare, con il medesimo diametro massimo della granulometria originaria e una dimensione frattale pari a circa 2.5, corrispondente a quella ottenuta al termine delle prove per le quali si era osservata una maggiore frantumazione. I risultati ottenuti con gli esperimenti presentati in questa nota, tuttavia, sembrano indicare che al procedere della deformazione, soprattutto quando il coefficiente di uniformità iniziale è già abbastanza elevato, anche le particelle più grandi si rompono e la forma della distribuzione granulometrica cambia, mentre emerge una nuova distribuzione granulometrica caratterizzata da un diametro medio minore e da una minore uniformità. Per deformazioni elevate e frantumazioni molto spinte, è possibile che la granulometria originaria tenda a scomparire del tutto ($w_1 \rightarrow 0$), mentre una nuova granulometria ancora più fina emerge come risultato del processo di frantumazione.

In assenza di una granulometria ultima ben identificata, seguendo l'approccio di Hardin (1985), è ancora possibile definire la rottura potenziale, B_p , come l'area al disopra della curva granulometrica iniziale e compresa tra le due verticali per $d = d_{max}$ e $d = 0.074$ mm (che rappresenta una sorta di limite di comminuzione), e la rottura totale, B_t , come la differenza tra questa area e quella al disopra della curva granulometrica attuale, ancora per valori del diametro delle particelle $0.074 \text{ mm} < d < d_{max}$, vedi

Figura 6(a). La rottura relativa è poi definita come $B_r = B_t/B_p$ ed, evidentemente, assume valori compresi tra 0 e 1, via via che la curva granulometrica si sposta verso sinistra e verso l'alto.

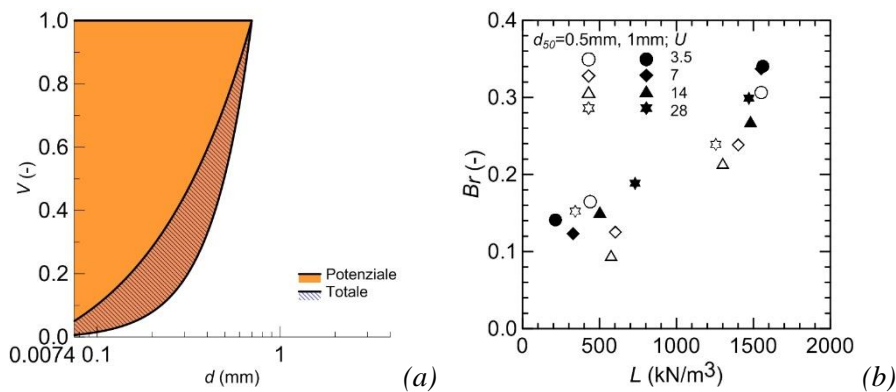


Fig. 6. (a) rottura potenziale, B_p , e totale, B_t ; (b) rottura relativa B_r , in funzione del lavoro per unità di volume

I valori della rottura relativa B_r sono stati diagrammati in funzione del lavoro totale nella Figura 6(b). È facile notare che la rottura relativa aumenta all'aumentare del lavoro totale immesso nel sistema, e che a parità di lavoro la rottura relativa è maggiore per la granulometria più fina. È necessario tuttavia elaborare i dati con maggiore attenzione, insieme a quelli ottenuti a valori di sollecitazione più bassi per definire in modo più chiaro il ruolo giocato dall'uniformità e dal diametro medio sulla rottura.

Bibliografia

- Casini F, Viggiani GMB (2011a). "Evoluzione della granulometria di un materiale artificiale a grani frantumabili per diversi percorsi di sollecitazione". IARG 2011, Torino
- Casini, F., Viggiani, G.M.B. (2011b). "Experimental investigation of the evolution of grading of an artificial material with crushable grains under different loading conditions". Proc. 5th Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials, Seoul, Korea, 957-964.
- Casini F, Viggiani GMB, Springman SM (2013). "Breakage of an artificial crushable material under loading". *Granular Matter* 15, 661-673.
- Cecconi M, Viggiani GMB (2002). "Structural features and mechanical behaviour of a pyroclastic weak rock. *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 25(15): 1525-1557.
- Hardin B.O (1985). "Crushing of soil particles". *J. Geotech. Eng. ASCE* 111(10), 1177-1192