

## CARATTERISTICHE DI DILATANZA E DEGRADAZIONE DELLA CEMENTAZIONE DI SABBIE ARTIFICIALMENTE CEMENTATE

Daniela Porcino

*Università Mediterranea di Reggio Calabria*

*daniela.porcino@unirc.it*

Vincenzo Marcianò

*Università Mediterranea di Reggio Calabria*

*Vincenzo.marciano@unirc.it*

### Sommario

La nota si inquadra in una più ampia ricerca volta ad investigare l'influenza della cementazione e della sua degradazione sul comportamento deformativo ed a rottura di sabbie cementate. La presente nota riporta i risultati ottenuti da prove triassiali monotoniche drenate condotte su provini di sabbia cementati artificialmente (a debole e moderata cementazione), considerando differenti tensioni efficaci di confinamento. L'influenza della componente di cementazione indotta da un agente cementante e la sua degradazione durante la fase di taglio è stata analizzata in termini di relazioni sforzi-dilatanza. I risultati hanno evidenziato come la legge di dilatanza di Rowe (1962) per terreni dotati di coesione sia in grado di cogliere il comportamento esibito sperimentalmente dai campioni cementati, tenendo conto della progressiva destrutturazione dei legami di cementazione durante la rottura. I dati sperimentali sono stati utilizzati per derivare una legge di degradazione della cementazione con le deformazioni plastiche complessive (volumiche e di taglio) mobilitate.

### 1. Introduzione

Le sabbie cementate comprendono sia depositi naturali sia terreni stabilizzati per migliorarne le caratteristiche meccaniche iniziali (cementazione artificiale). In entrambi i casi i legami di cementazione tra i grani influenzano la resistenza al taglio dei materiali con l'aggiunta di un contributo rappresentato dalla componente di coesione secondo la formulazione analitica di Mohr-Coulomb. Questo parametro è stato successivamente adottato come parametro rappresentativo del grado di cementazione anche per quanto riguarda altri aspetti del comportamento vicino alla rottura (pre e post-picco) di tali materiali, quali ad es. il comportamento nei confronti della dilatanza (Yu et al., 2007). La progressiva decentramento associata alla comparsa di deformazioni plastiche (volumetriche e di taglio) esercita una significativa influenza sugli aspetti precedentemente citati (resistenza di picco, softening, etc.) e la sua presa in conto consente di spiegare tipici fenomeni propri di questi materiali, quali ad es. quello della "dilatanza ritardata" (Yu et al., 2007). Per inglobare il contributo della componente legata alla cementazione sono state proposte in letteratura relazioni sforzi-dilatanza per materiali coesivo-atritivi basate sia sull'approccio energetico originariamente proposto da Rowe (1962, 1963) sia su un approccio diverso (Zhang e Salgado, 2009).

La presente nota riporta i risultati di prove triassiali drenate eseguite su provini di sabbia cementati artificialmente (debole e moderata), a differenti tensioni efficaci di confinamento. Le prove sono state analizzate alla luce della relazione sforzi-dilatanza nella quale è stato inglobato il contributo della coesione mobilitata, e derivando la legge di degradazione del parametro di coesione all'aumentare delle deformazioni plastiche complessive (volumetriche e deviatoriche).

## 2. Materiali utilizzati

La sperimentazione ha previsto l'esecuzione di prove triassiali drenate CID-CL condotte su provini cementati della sabbia del Ticino ( $D_{50}=0.56$  mm) e, per confronto, su provini non cementati della stessa sabbia. I provini non cementati di sabbia, di altezza pari a 140 mm e diametro 70 mm, sono stati ricostituiti ad un prefissato stato di addensamento iniziale sciolto ( $D_r=45\%$ ), attraverso il metodo della deposizione pluviale. La cementazione è stata indotta utilizzando una soluzione a base di silicato di sodio (con reagente inorganico) per indurre una debole cementazione ed una soluzione contenente silice pura, che porta alla formazione di cristalli di silicato impartendo al terreno trattato moderati livelli di cementazione. La procedura di preparazione garantisce caratteristiche di uniformità e ripetitività dei provini cementati. Inoltre, tale procedura consente di minimizzare qualunque effetto di disturbo associato alla fase di preparazione, che rappresenta un aspetto critico soprattutto nel caso dei provini con debole cementazione. I dettagli della procedura di preparazione dei campioni cementati e delle fasi di prova sono riportate in Porcino et al. (2012). Le prove sono state effettuate investigando differenti tensioni efficaci di confinamento ( $p'$ ). La fase di rottura è stata condotta ad una velocità di prova pari a 0.03 mm/min. I risultati di prove di compressione semplice non confinata (UCS) eseguite su numerosi campioni cementati hanno fornito un valore medio della resistenza al picco  $q_{UCS}$  pari a 75 kPa per i campioni a debole cementazione e pari a 470 kPa per quelli moderatamente cementati.

## 3. Risultati sperimentali

### 3.1. Curve sforzi-deformazioni e comportamento volumetrico

La figura 1 mostra le variazioni del rapporto tensionale  $\eta=q/p'$ , essendo  $p'=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$  e  $q=(\sigma_1-\sigma_3)$  e della deformazione volumetrica,  $\varepsilon_p$ , al variare della deformazione assiale ( $\varepsilon_1$ ) ottenute da prove triassiali drenate eseguite su un provino moderatamente cementato di sabbia del Ticino ( $p'_c=50$  kPa) e, per confronto, sul corrispondente provino non cementato.

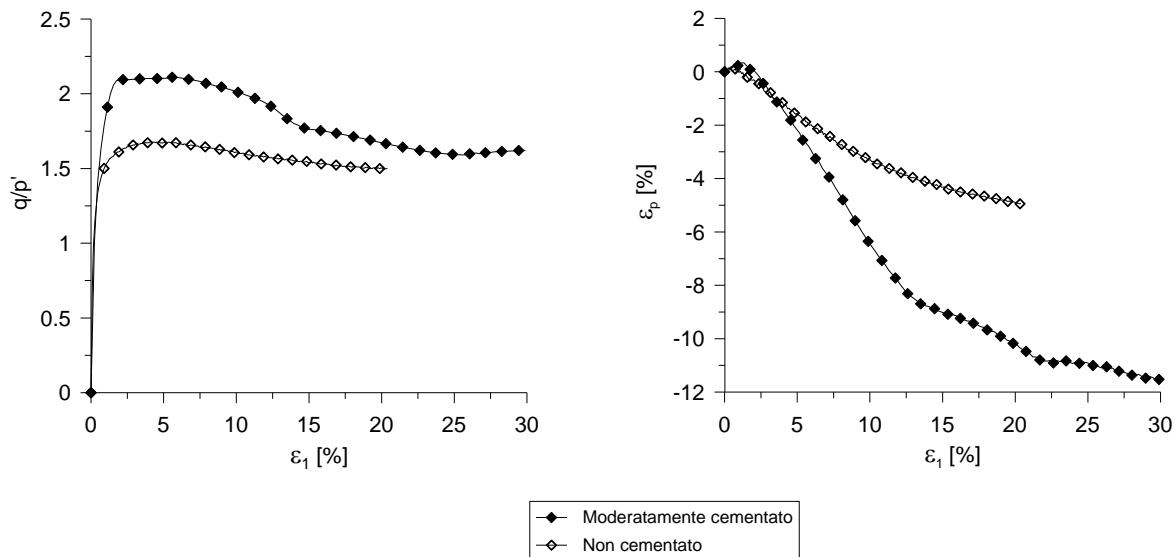


Fig.1.Curve rapporto tensionale-deformazioni e comportamento volumetrico di provini moderatamente cementati e non cementati ( $p_c=50$  kPa).

Sono evidenti le differenze di comportamento dei provini cementati rispetto a quelli non cementati: è, infatti, riconoscibile un picco di resistenza associato ad una esaltata risposta dilatante del campione cementato. Allo stato ultimo, in corrispondenza del raggiungimento di grandi deformazioni ( $\varepsilon_1=30\%$ ), il campione cementato tende ad un valore di resistenza allo stato critico dei corrispondenti provini non cementati. A bassi livelli tensionali, la fase post-picco è spesso accompagnata dalla formazione di una zona (“shear band”), con localizzazione delle deformazioni.

### 3.2. Relazione sforzi-dilatanza per terreni cementati

Una delle componenti che contribuisce alla resistenza al taglio dei terreni cementati, oltre all'attrito e alla dilatanza, è rappresentata dalla cementazione. Una maniera semplice di tener conto dei tre contributi è quello di esprimere attraverso la relazione sforzi-dilatanza (Rowe 1962, 1963). Questo approccio è stato seguito da Yu et al. (2007) nell'ambito del modello costitutivo definito CASM per terreni cementati.

La relazione sforzi-dilatanza può essere espressa:

$$d = \frac{\delta\epsilon_p^p}{\delta\epsilon_q^p} = \frac{9 \cdot (M - \eta) + 6 \cdot \frac{c}{p} \cdot \sqrt{(3 + 2M) \cdot (3 - M)}}{9 + 3M - 2M \cdot \eta + 4 \cdot \frac{c}{p} \cdot \sqrt{(3 + 2M) \cdot (3 - M)}} \quad (1)$$

dove:

- $d = \delta\epsilon_p^p / \delta\epsilon_q^p$  rappresenta la dilatanza, essendo  $\delta\epsilon_p^p$  e  $\delta\epsilon_q^p$  rispettivamente gli incrementi di deformazione plastica volumetrica e deviatorica ( $d < 0$  dilatanza);
- $M$  è la pendenza della retta di stato critico nel piano  $q - p'$ , legata all'angolo di resistenza al taglio allo stato critico ( $\phi_{cs}$ ).

Il parametro “c”, che esprime il contributo della cementazione, varia durante la fase di taglio a partire da un valore iniziale, e degrada a causa del graduale processo di decementazione. È necessario, pertanto, tener conto della sua evoluzione durante la prova. Il grado di cementazione iniziale può essere vantaggiosamente correlato alla resistenza a compressione non confinata, come suggerito da diversi autori (Schnaid et al., 2001, Lo et al., 2003). In figura 2 è riportata per i provini non cementati di sabbia la relazione sperimentale sforzi-dilatanza in termini di rapporto tensionale  $\eta = q/p'$  e  $d$ , quest'ultima espressa in termini di incrementi di deformazioni totali volumetriche e deviatoriche, avendo trascurato per semplicità il contributo legato alle deformazioni elastiche. I risultati si riferiscono alle prove condotte a due tensioni efficaci di confinamento ( $p'_c = 50$  e  $300$  kPa).

Come era da attendersi, esiste una buona corrispondenza tra i dati sperimentali e la relazione teorica espressa dall'eq. (1), particolarizzata per terreni non cementati ( $c/p' = 0$  ed  $M = 1.37$ , corrispondente a  $\phi_{cs} = 34^\circ$ ) (fig. 2). La figura 3 riporta le curve definite dall'eq.(1) al variare del rapporto  $c/p'$  insieme con la curva sperimentale relativa ad un provino mediamente cementato di sabbia, consolidato a due differenti tensioni efficaci di confinamento.

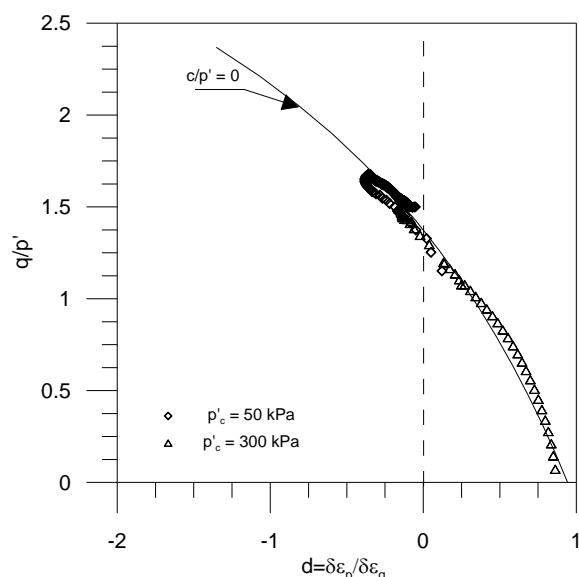


Fig. 2. Relazione sforzi-dilatanza ottenuta da prove TX-CID eseguite sui provini non cementati della sabbia del Ticino e confronto con la curva teorica

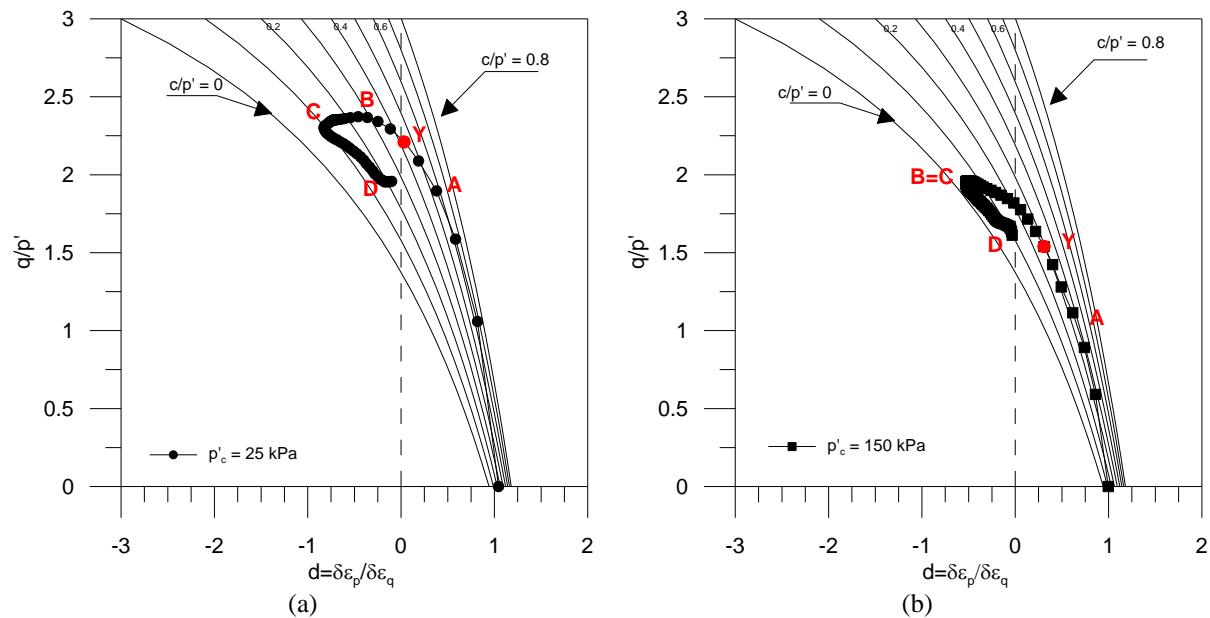


Fig. 3. Relazioni sforzi-dilatanza ottenute da due prove TX-CID eseguite su provini moderatamente cementati di sabbia (a)  $p'_c=25$  kPa; (b)  $p'_c=150$  kPa

E' possibile distinguere tre principali fasi:

- *Fase pre-picco*: la dilatanza sembra inibita dalla cementazione ("struttura boccata"), la resistenza al taglio è principalmente controllata dalla componente di cementazione.
- *Fase post-picco*: una volta superato il punto di snervamento Y, la rottura dei legami di cementazione (evidenziata dal passaggio verso successive curve teoriche a  $c/p'$  decrescenti) diventa significativa e determina una riduzione di resistenza controbilanciata da un incremento dovuto alla dilatanza. Quest'ultima raggiunge valori  $d_{max}$  significativamente più elevati di quelli corrispondenti al provino non cementato. Il punto in cui si verifica  $d_{max}$  non corrisponde al picco di resistenza ( $\eta_p$ ).
- *Stato ultimo*: a grandi deformazioni il materiale esibisce un comportamento prevalentemente attritivo;  $c/p'$  tende a valori prossimi a 0, e ciò è tanto più vero quanto maggiore è la tensione efficace di confinamento.

Tenendo conto della degradazione della cementazione durante la prova, la relazione teorica (eq.1) consente di cogliere il modello di comportamento esibito dai campioni cementati durante la fase di taglio.

In figura 4 sono riportati i dati sperimentali insieme alle curve teoriche nel caso di provini di sabbia con debole cementazione. La figura evidenzia come per un provino debolmente cementato per tensioni efficaci di confinamento  $p'_c=200$  kPa (fig. 4b), la risposta si riconduce già a quella di un provino di sabbia non cementato; la soglia tensionale corrispondente a tale passaggio di comportamento (da coesivo ad attritivo) si riduce quanto più basso è il grado di cementazione iniziale (Coop, 2005). Nel caso di provini a debole cementazione l'individuazione del punto di snervamento appare piuttosto incerta.

L'intersezione dei dati sperimentali della relazione  $\eta$ - $d$  con le successive curve a  $c/p'$ , consente di ricavare la legge di decadimento della cementazione che descrive la progressiva destrutturazione dei legami di cementazione tra le particelle con le deformazioni complessive (volumica e deviatorica)  $\epsilon_d = \sqrt{(\epsilon_p)^2 + (\epsilon_q)^2}$  (fig. 5). Tale relazione è esprimibile attraverso un'equazione del tipo:

$$C = C_0 \cdot e^{-D_c \cdot (\epsilon_d - \epsilon_{d0})} \quad (2)$$

essendo,  $D_c$  un parametro che controlla la velocità di degradazione della cementazione a partire dal valore iniziale  $c_0$ . Quest'ultimo è stato determinato in corrispondenza del punto di snervamento (punto Y in fig. 3), individuato sulla base anche della variazione del modulo di elasticità longitudinale tangente nella fase di taglio, in accordo alla procedura suggerita da diversi autori (i.e. Lo et al., 2003). La figura 5 mostra come la legge di degradazione di "c" espressa dall'eq. 2 sia in grado di cogliere mediamente bene l'andamento dei punti relativi al provino mediamente cementato (fig. 5a) ( $D_c=0.39$ ). Considerazioni analoghe valgono anche per il provino debolmente cementato, per il quale il parametro  $D_c$  assume valori pari a 0.36.

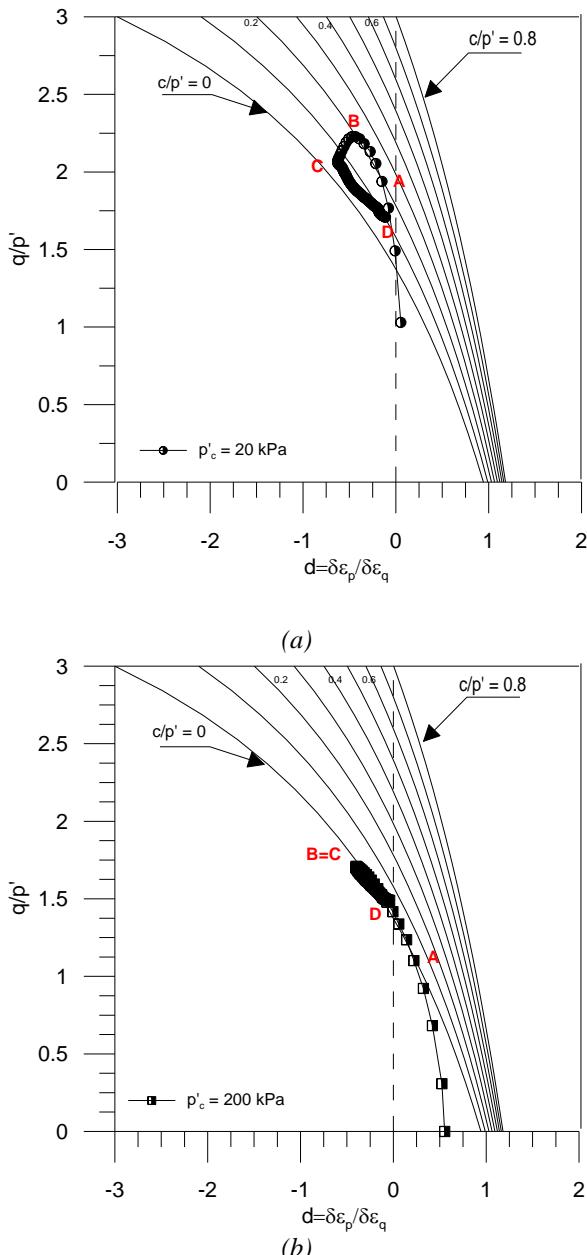


Fig. 4. Relazioni sforzi-dilatanza ottenute da prove TX-CID eseguite sui provini debolmente cementati di sabbia  
 (a)  $p'_c=20 \text{ kPa}$ ; (b)  $p'_c=200 \text{ kPa}$

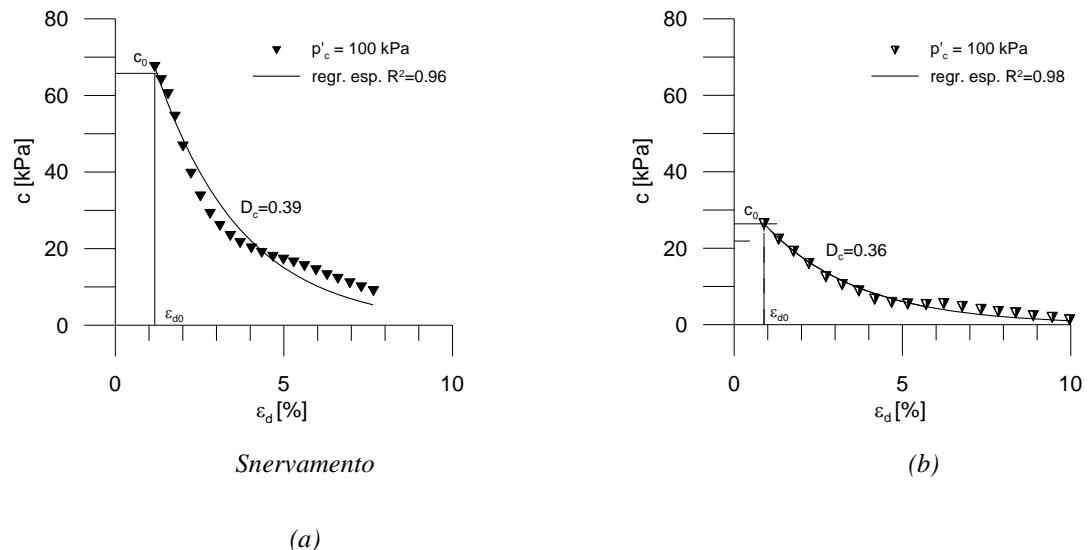


Fig. 5. Riduzione del parametro di cementazione all'aumentare delle deformazioni ( $\epsilon_d$ ) (a) provino mediamente cementato; (b) debolmente cementato di sabbia.

## Conclusioni

Il contributo della cementazione e gli effetti della sua degradazione durante la fase di taglio sono stati analizzati a partire dai risultati di prove triassiali drenate eseguite su provini di sabbia cementata artificialmente a due differenti livelli di cementazione iniziali. Il comportamento sperimentale è stato spiegato prendendo in conto la legge sforzi-dilatanza di Rowe (1962,1963) che ingloba in sé la componente legata alla cementazione, che evidentemente evolve durante la prova a causa della rottura dei legami interparticellari. Sulla base dei dati sperimentali è stato possibile derivare il parametro che controlla la velocità di degradazione della cementazione con le deformazioni.

Gli ulteriori sviluppi della ricerca riguardano l'inquadramento della teoria all'interno di un modello costitutivo proposto da Yu et al. (2007) per materiali cementati. Sarà anche verificata l'affidabilità di altre leggi sforzi-dilatanza per terreni cementati, quale ad esempio quella recentemente suggerita da Zhang e Salgado (2009).

## Bibliografia

- Coop M.R. (2005). "On the mechanics of reconstituted and natural sands". Proceedings of Deformation Characteristics of Geomaterials, London, Edited by Di Benedetto et al., Taylor e Francis Group, pp. 29-58.
- Lo S.-C. R, Lade P. V., and Wardani S. P. R. (2003). "An experimental study of the mechanics of two weakly cemented soils". *Geotechnical Testing Journal*, 26 (3), Paper ID GTJ10405\_263.
- Porcino D., Marcianò V., Granata R. (2012). "Static and dynamic properties of a lightly cemented silicate grouted sand". *Canadian Geotechnical Journal*, 49 (10), 1117-1133.
- Rowe P. W. (1962). "The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact". *Proc. R. Soc. London*, 1962, A269, 500-527.
- Rowe P. W. (1963). "Stress-dilatancy, earth pressure, and slopes". *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE*, 89(SM3), 37-61.
- Schnaid F., Prietto P. D. M., and Consoli, N. C. (2001). "Characterization of cemented sand in triaxial compression". *J. Geotech. Geoenvir. Eng. ASCE*, 127(10), 857-868.
- Zhang J. Salgado R. (2009). "A stress-dilatancy relation for cemented sands". Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. M. Hamza et al. (Eds.) 2009 IOS Press., 5-9 October, Alexandria (Egypt).
- Yu H. S., Tan S. M. & Schnaid F. (2007). "A critical state framework for modelling bonded geomaterials". *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 2(1), 61-74.