

# CALIBRAZIONE DI UN MODELLO ENERGETICO PER LA STIMA DELLE SOVRAPPRESSIONI NEUTRE IN DEPOSITI SABBIOSI

Lucia Mele

*Università degli Studi di Napoli Federico II*  
[lucia.mele@unina.it](mailto:lucia.mele@unina.it)

Fausto Somma

*Università degli Studi di Napoli Federico II*  
[fausto.somma@unina.it](mailto:fausto.somma@unina.it)

Stefania Lirer

*Università di Roma Guglielmo Marconi*  
[s.lirer@unimarconi.it](mailto:s.lirer@unimarconi.it)

Alessandro Flora

*Università degli Studi di Napoli Federico II*  
[flora@unina.it](mailto:flora@unina.it)

## Sommario

La simultanea generazione, dissipazione e redistribuzione delle sovrappressioni neutre negli strati dei depositi di terreno, a causa di un evento sismico, può modificare significativamente la risposta sismica dell'intero deposito. La corretta stima delle sovrappressioni neutre indotte dagli eventi sismici è importante per la previsione del comportamento del terreno e per la valutazione degli effetti sul costruito.

Tra i diversi modelli di previsione delle sovrappressioni neutre, i più innovativi risultano essere i modelli energetici. Nonostante i numerosi vantaggi, tali metodi sono ancora oggi poco usati a causa della difficoltà di calibrare i parametri. La presente ricerca pone come obiettivo quello di fornire delle correlazioni tra i parametri del modello energetico e i risultati di prove in sito (CPT o SPT) tali da poter essere utilizzati come strumento di calibrazione di questi modelli. Le correlazioni presentate sono state validate attraverso i risultati di una prova in centrifuga.

## 1. Introduzione

Un evento sismico o rapide forme di carico possono innescare condizioni non drenate anche in depositi permeabili come quelli sabbiosi. Il conseguente insorgere e il continuo svilupparsi di sovrappressioni neutre ( $\Delta u$ ) può determinare il completo annullamento delle tensioni efficaci ( $\sigma'$ ). La perdita di contatti tra le particelle fa sì che si verifichi un vero e proprio passaggio di fase del terreno da solido a liquido, da qui il nome di *liquefazione*. Tale fenomeno si sviluppa principalmente in terreni incoerenti (generalmente sabbie), sciolti, in condizione di completa saturazione.

La stima delle sovrappressioni neutre nei depositi sabbiosi è importante per prevedere la risposta sismica locale e i possibili effetti sul costruito. Diverse relazioni sono state proposte in letteratura per simulare correttamente l'insorgere di  $\Delta u$  indotte da carichi ciclici o dinamici. Questi modelli sono tradizionalmente divisi in tre gruppi: stress-based (Lee and Albaisa, 1974; Booker et al., 1976), strain-based (Dobry et al., 1985) and energy-based models (Berrill & Davis, 1985; Green et al., 2000). I modelli stress-based, calibrati sui risultati di prove cicliche a tensione controllata (triassiali o di taglio semplice),

legano il rapporto di sovrappressioni neutre  $r_u$  (definito come il rapporto tra le  $\Delta u$  e la tensione efficace verticale,  $\sigma'_{v0}$ ) e il rapporto  $N/N_{liq}$ , dove  $N$  è il numero dei cicli, mentre  $N_{liq}$  è il numero di cicli richiesto per attingere a liquefazione ( $r_u \approx 0.90$ ). I modelli strain-based, vengono invece calibrati sui risultati di prove a deformazione controllata. In questo caso, la generazione delle sovrappressioni neutre è regolata dall'ampiezza delle deformazioni e dal numero dei cicli di carico. Entrambi i modelli (stress e strain) richiedono la conversione della sollecitazione sismica in un numero di cicli equivalenti. Tale conversione è spesso complessa e poco affidabile. I modelli energy-based superano questo ostacolo, legando le sovrappressioni neutre all'energia dissipata per unità di volume del terreno soggetto a carichi ciclici. Tale energia viene chiamata energia deviatorica specifica ( $E_s$ ).  $E_s$  al generico ciclo  $i$  ( $N_i$ ) è calcolato come la somma delle aree sottese dalle curve tensione – deformazione, come mostrato in Figura 1. Inoltre,  $E_s$  viene formalmente scritto attraverso l'equazione 1.

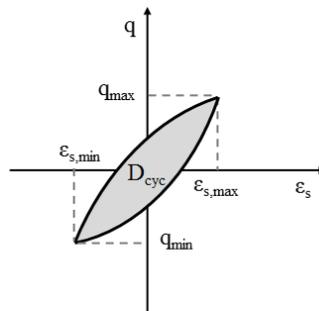


Fig 1. Cicli tensione- deformazione ed energia dissipata (Mele & Flora, 2019).

$$E_{s,i} = \sum_{N_{cyc}=1}^{N_{cyc}=N_i} \iint_{D_{cyc}} dq \cdot d\epsilon_s \quad (1) \quad (1)$$

Dove  $q$  è la tensione deviatorica e  $\epsilon_s$  è la deformazione distorsionale definita come  $2/3(\epsilon_a - \epsilon_r)$ . Partendo dal lavoro di Nemat-Nasser & Shokoh (1979), diversi studi sperimentali hanno mostrato come  $E_s$  valutato da prove triassiali, di taglio semplice o di taglio torsionale; attraverso l'eq. (1), è univocamente legato ad  $r_u$ . Il legame  $r_u - E_s$  sembra essere unico, indipendentemente dall'apparecchiatura utilizzata, dal tipo di prova o dalla forma del carico applicato (Polito et al., 2013; Lirer et al., 2020; Mele, 2020). Tutte queste evidenze sperimentali hanno contribuito allo sviluppo dei modelli energetici. Una delle espressioni più semplici è quella di Berrill & Davis (1985), riportata in eq. (2).

$$r_u = \alpha \cdot W_s^\beta \quad (2) \quad (2)$$

Dove  $W_s$  è l'energia dissipata per unità di volume del terreno normalizzata per la tensione efficace media ( $W_s = E_s/\sigma'_{v0}$ ), e  $\alpha$  e  $\beta$  sono parametri che vanno calibrati da prove di laboratorio. La semplicità di questi modelli ha fatto sì che fossero facilmente implementati in codici di calcolo, come ad esempio DEEPSOIL (Hashash et al., 2020). Sebbene il modello di Berrill & Davis (1985) dipenda solo da due parametri ( $\alpha$  e  $\beta$ ), la loro calibrazione non è immediata, limitandone notevolmente l'utilizzo.

Il principale obiettivo della presente ricerca è fornire al professionista un utile e semplice strumento di calibrazione per i parametri  $\alpha$  e  $\beta$  dell'eq. (2). La procedura proposta è stata poi validata attraverso una prova in centrifuga.

## 2. Dataset di laboratorio

Il dataset è composto da 43 prove triassiali cicliche non drenate su 6 diversi tipi di sabbie: Leighton Buzzard (frazione E) (LB); Sant'Agostino (SAS), Pieve di Cento (in due diverse frazioni granulometriche: PdC\_BSS e PdC\_GSS), Ticino (Ti) e una sabbia silicea (SS5). Le proprietà dei materiali sono riportate in Tabella 1.

Tab. 1. Proprietà dei terreni facente parte del dataset (Mele et al., 2021).

	LB	SAS	PdC BSS	PdC GSS	TiS	SS5
$G_s$	2.650	2.674	2.667	2.655	2.680	2.640
$e_{max}$	1.01	1.01	1.04	0.884	0.923	1.11
$e_{min}$	0.613	0.37	0.546	0.442	0.574	0.695
$D_{50}$ (mm)	0.10	0.20	0.18	0.30	0.53	0.47
$U_c$	1.0	16.7	2.67	5.0	1.3	1.9
FC (%)	0	20	8	11	0	0

Le prove sono state condotte in un'apparecchiatura triassiale di tipo Bishop & Wesley (Università di Napoli Federico II), applicando delle storie di carico sinusoidali con frequenza pari a 0.008 Hz per evitare fenomeni di backlash. I provini, preparati con la tecnica della *water sedimentation* e poi congelati, sono stati preparati a diverse  $D_r$ , variabile tra 24 e 75%. I provini sono stati consolidati applicando un range di tensioni compreso tra 25 e 100 kPa. Per ragioni di brevità non si riporta la tabella con i risultati delle prove, tuttavia maggiori informazioni possono essere trovati in Mele et al. (2021).

## 3. Modelli energetici per il calcolo delle sovrappressioni neutre

### 3.1 Risultati sperimentali

I risultati delle prove triassiali cicliche che compongono il dataset sono stati interpretati in termini energetici. In Figura 2 i risultati di alcune prove sono stati diagrammati nel piano  $W_s - r_u$ , dove  $W_s$  è stato calcolato dividendo  $E_s$  (eq. 1) per la tensione di consolidazione applicata.

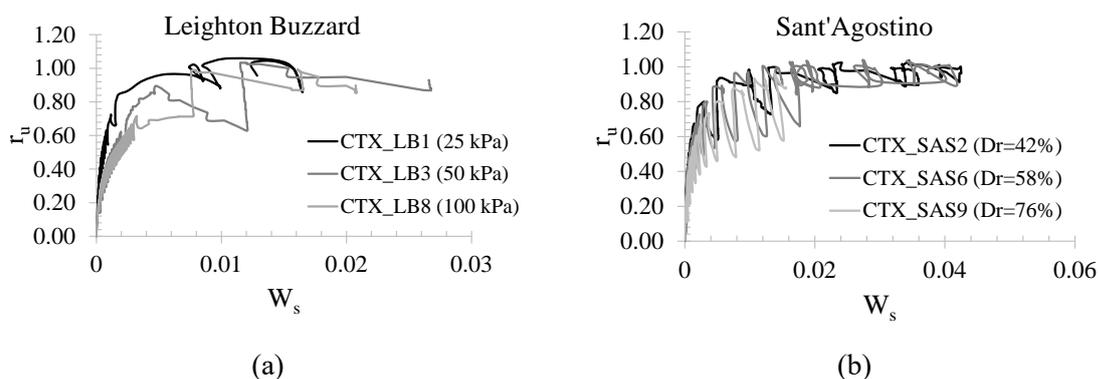


Fig 2. Energia dissipata normalizzata ( $W_s$ ) con rapporto di sovrappressione neutra ( $r_u$ ).

In accordo con i risultati sperimentali condotti da altri autori (Kokusho, 2013),  $W_s$  cresce al crescere di  $r_u$ . Inoltre, si può notare come il CSR non influenzi la relazione  $W_s - r_u$ , mentre i parametri di stato ( $D_r$  e  $\sigma'_c$ ) sembrano giocare un ruolo importante sulla correlazione (Fig. 2). Indipendentemente dai parametri che influenzano la relazione  $W_s - r_u$ , è evidente che il trend delle curve può essere descritto da una funzione potenza (eq. 2), i cui parametri  $\alpha$  e  $\beta$  dipendono dal tipo di terreno e dai suoi parametri di stato. Di seguito la dipendenza di  $\alpha$  e  $\beta$  dai parametri di stato sarà discussa.

### 3.2 Calibrazione del modello di Berrill & Davis (1985)

I parametri  $\alpha$  e  $\beta$  sono stati calibrati per tutte le prove che compongono il dataset. La calibrazione è stata effettuata attraverso la procedura dell'involuppo, così da avere il best fitting con i risultati sperimentali. Due esempi sono riportati in Fig. 3.

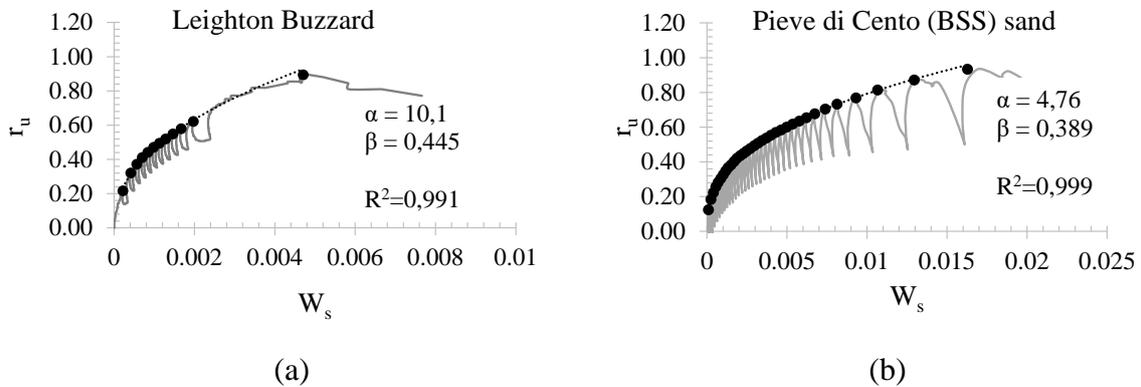


Fig 3. Calibrazione dei parametri  $\alpha$  e  $\beta$  dell'eq. (2).

Diagrammando i parametri  $\alpha$  e  $\beta$  in uno stesso piano (Fig. 4a), si nota come questi sembrano essere fortemente legati. L'equazione che lega i due parametri è un'esponenziale e presenta la seguente equazione:

$$\alpha = 0.75 \cdot \exp(5.29 \cdot \beta) \quad (3)$$

Questa evidenza sperimentale risulta estremamente importante, indicando che il modello dipende non da due ma da un unico parametro, semplificando notevolmente le procedure di calibrazione. Ciononostante, la calibrazione di anche un solo parametro potrebbe non essere immediata. Per facilitare ulteriormente la procedura di calibrazione un ulteriore sforzo è stato fatto per legare  $\alpha$  (o  $\beta$ ) ai risultati di prove in sito (CPT o SPT). Come osservato nel paragrafo 3.1 la relazione  $W_s - r_u$  dipende dal terreno, e dai parametri di stato ( $D_r$  e  $\sigma'_c$ ), per questo motivo si è deciso di legare i parametri  $\alpha$  e  $\beta$  ai valori di  $q_{c1Ncs}$  (per CPT test) e  $N_{1,60,cs}$  (per SPT test). I risultati delle prove di laboratorio sono stati trasformati in risultati di prove in sito utilizzando le ben note formule di Boulanger & Idriss (2014). Maggiori informazioni sulla procedura che ha consentito il passaggio tra i risultati di prove di laboratorio con quelli di prove in sito sono riportati in Mele et al. (2021). In Fig. 4b la relazione tra  $\beta$  e  $q_{c1Ncs}$  è stata mostrata.

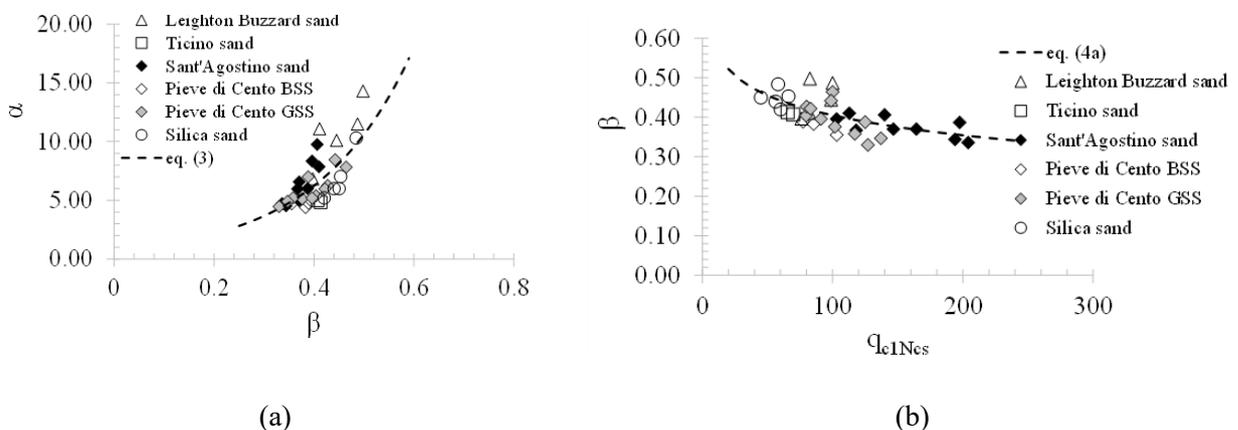


Fig 4. Legame tra i parametri  $\alpha$  e  $\beta$  (a) e  $\beta$  con  $q_{c1Ncs}$  (b).

Le equazioni che legano  $\beta$  a  $q_{c1Ncs}$  e  $N_{1,60cs}$  sono di seguito riportate:

$$\beta = -0.073 \cdot \ln(q_{c1Ncs}) + 0.74 \quad (4a)$$

$$\beta = -0.046 \cdot \ln((N_1)_{60cs}) + 0.52 \quad (4b)$$

Le equazioni proposte consentono di calibrare il modello di Berrill & Davis (1985) partendo dai risultati di prove in sito (CPT o SPT). Tale procedura è stata validata attraverso una prova in centrifuga.

#### 4. Validazione della procedura attraverso prove in centrifuga

L'efficacia della procedura di calibrazione proposta è stata valutata confrontando i risultati di una prova in centrifuga – in termini di  $r_u$  – con i valori di  $r_u$  ottenuti effettuando un'analisi non-lineare di risposta sismica locale (1D) utilizzando il codice di calcolo DEEPSOIL v7.0, all'interno del quale il modello di Berrill & Davis (1985) è già implementato.

##### 4.1 Sabbia di Nevada

La prova in centrifuga è parte del progetto VELACS (Elgamal et al., 1996). Il modello è costituito da sabbia di Nevada pluviata in una laminar box. Quattro piezometri (P1, P2, P3 e P4) sono posti alle seguenti profondità 1.45, 2.60, 5.0 and 7.5 m dalla superficie. L'accelerazione centrifuga applicata è di 50g. L'analisi numerica in DEEPSOIL è stata effettuata a scala del prototipo, che corrisponde ad una colonna di 10m ( $D_r=40\%$ ). L'input motion è applicato alla base modellata rigida e impermeabile. Ulteriori informazioni sul modello caricato in DEEPSOIL possono essere trovati in Mele et al. (2021). La colonna è stata assunta omogenea con un valore costante di  $q_{c1Ncs}$  ( $q_{c1Ncs} = 69.1$ ). Noto  $q_{c1Ncs}$ , il valore di  $\beta$  è stato ottenuto dall'eq. (4a) risultando pari a 0.432. Da  $\beta$  è stato possibile calcolare  $\alpha$  dall'eq. (3). Tale parametro risulta uguale a 7.39. In Figura 5 si riportano i confronti tra le misure sperimentali di  $r_u$  e i valori simulati con DEEPSOIL. Si può osservare un buon accordo tra i risultati sperimentali e quelli simulati, sebbene il piezometro P4 segnali valori di sovrappressione neutra maggiori rispetto a quelli simulati. Questo può dipendere da possibili fenomeni di filtrazione verso la parte superiore della colonna che non sono presi in considerazione dal modello.

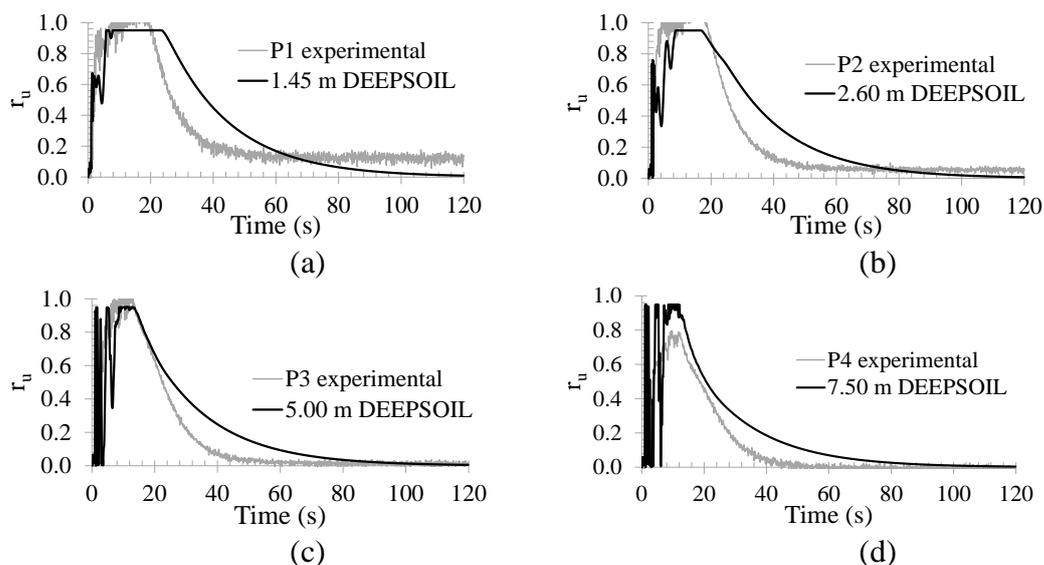


Fig 5. Confronto tra le storie temporali di  $r_u$  sperimentali e simulate con DEEPSOIL.

## 5. Conclusioni

L'articolo presenta una semplice procedura di calibrazione di modelli energy-based per la stima delle sovrappressioni neutre. Il modello energetico considerato è quello di Berrill & Davis (1985), che dipende solo da due parametri  $\alpha$  e  $\beta$ . I risultati sperimentali di un dataset di 43 prove triassiali cicliche non drenate mostrano non solo una dipendenza tra i due parametri (trasformando il modello in uno ad un solo parametro) ma anche una dipendenza di  $\beta$  dal tipo di terreno e dalle sue proprietà, parametri sintetizzati dai ben noti  $q_{c1Ncs}$  e  $N_{1,60,cs}$ , derivanti dall'elaborazione di prove in sito (CPT e SPT). Pertanto, noti i parametri  $q_{c1Ncs}$  e  $N_{1,60,cs}$  è possibile ricavare  $\beta$  e  $\alpha$ . Tale procedura è stata validata attraverso una prova in centrifuga.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano i tecnici del laboratorio di Geotecnica dell'Università di Napoli Federico II (Antonio Cammarota ed Alfredo Ponzo) per l'indispensabile aiuto nella realizzazione delle prove triassiali cicliche.

## Bibliografia

- Berrill, J. B., & Davis, R. O. (1985). "Energy dissipation and seismic liquefaction of sands: revised model". *Soils and Foundations*, 25(2), 106-118.
- Booker JR, Rahman MS, Seed HB (1976). GADFLEA - A computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cyclic or earthquake loading. Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley.
- Boulanger RW and Idriss IM (2014). CPT and SPT liquefaction triggering procedures. Report No UCD/GCM-14/01, University of California at Davis, California, USA.
- Elgamal, A., Zeghal, M., Taboada, V., & Dobry, R. (1996). "Analysis of site liquefaction and lateral spreading using centrifuge testing records". *Soils and Foundations*, 36(2), 111-121.
- Green, R. A., Mitchell, J. K., & Polito, C. P. (2000, November). An energy-based excess pore pressure generation model for cohesionless soils. In Proceedings of the John Booker Memorial Symposium, Sidney Australia, AA Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2020) "DEEPSOIL 7.0, User Manual". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Kokusho, T. (2013). "Liquefaction potential evaluations: energy-based method versus stress-based method". *Canadian Geotechnical Journal*, 50(10), 1088-1099.
- Lee, K. L., Albaisa, A. (1974). "Earthquake induced settlements in saturated sands". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 100(Proc Paper 10496).
- Lirer, S., Chiaradonna, A., & Mele, L. (2020). "Soil liquefaction: from mechanisms to effects on the built environment". *Rivista Italiana di Geotecnica*, 3, 2020.
- Mele L. (2020). Experimental and theoretical investigation on cyclic liquefaction and on the effects of some mitigation techniques. PhD Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italy.
- Mele, L., & Flora, A. (2019). "On the prediction of liquefaction resistance of unsaturated sands". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105689.
- Mele, L., Lirer S., Flora, A. (2021). "A simple procedure to calibrate a pore pressure energy-based model from in situ tests". *Bulletin of Earthquake Engineering* (Under review).
- Nemat-Nasser S, Shokoh A. (1979). "A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing". *Canadian Geotechnical Journal*;16(4):659-78.
- Polito, C., Green, R. A., Dillon, E., & Sohn, C. (2013). "Effect of load shape on relationship between dissipated energy and residual excess pore pressure generation in cyclic triaxial tests". *Canadian Geotechnical Journal*, 50(11), 1118-1128.