

Estudo Probabilístico da Resistência Liquefeita de Rejeitos Arenosos com Base em Ensaios Triaxiais Drenados

Saulo Gutemberg Silva Ribeiro

GeoFast Treinamento e Consultoria Empresarial Ltda., Ouro Preto, Brasil,
saalogft@hotmail.com

Luiz Eduardo Monteiro Marcelino

GeoFast Treinamento e Consultoria Empresarial Ltda., Ouro Preto, Brasil,
eduardomonteiro_m@hotmail.com

RESUMO: Pilhas e barragens de rejeitos arenosos podem ter uma grande variação nos perfis de índices de vazios, função da porcentagem de finos, do processo diferenciado de deposição e principalmente do ressecamento pós-lançamento hidráulico. Dados publicados mostram que boa parte dos rejeitos pode estar no estado medianamente compacto na zona superficial de deposição. Com os alteamentos das barragens era de se esperar que houvesse uma tendência de equalização dos índices de vazios com a profundidade, no entanto, este comportamento não é sempre verificado. Nestes casos, tem-se que a grande variação do índice de vazios inicial não é compensada com o aumento do nível de tensão durante as fases de alteamento das barragens. Este comportamento dificulta muito os estudos de potencial de liquefação, que são geralmente baseados no índice de vazios inicial (densidade relativa) associados ao nível de tensão de campo. O estudo em questão visa avaliar a influência deste comportamento no potencial estatístico de liquefação. Com base em ensaios triaxiais drenados tem-se determinada a posição da linha de estado crítico, neste caso, contemplado apenas os materiais inicialmente fofos. Entendendo que os materiais classificados por medianamente compactos ou compactos sofreram processo equivalente à compressão seguida de descompressão (ressecamento), a amostragem de perfis de índices de vazios em campo foi estimada adotando-se o coeficiente médio de recompressão. No espaço tensão efetiva octaédrica *versus* índice de vazios as zonas com potencial de liquefação foram classificadas de acordo com os parâmetros de estado sugerido na literatura. Aplicando o comportamento não drenado no cisalhamento, quando não há alteração do índice de vazios, tem-se determinada a tensão efetiva octaédrica na ruptura e quantificada a razão de resistência não drenada para cada nível de tensão efetiva e respectivo índice de vazios inicial. Com a amostragem de valores obtidos foi possível desenvolver uma proposta para estudos probabilísticos de resistência liquefeita de barragens de rejeitos arenosos.

PALAVRAS-CHAVE: liquefação, rejeito arenoso, probabilidade.

1 INTRODUÇÃO

As barragens de rejeitos arenosos mostram uma grande variação nos perfis de índices de vazios, função da porcentagem de finos, do processo diferenciado de deposição e, principalmente, do ressecamento pós-lançamento hidráulico. Boa parte dos rejeitos pode estar no estado medianamente compacto na zona superficial de

deposição. Com os alteamentos das barragens não se verifica uma equalização dos índices de vazios com a profundidade, ou seja, a variação do índice de vazios inicial não é compensada com o aumento do nível de tensão durante as fases de alteamento das barragens. Este comportamento dificulta muito os estudos de potencial de liquefação, que são geralmente baseados nos índices de vazios iniciais

associados aos níveis de tensão de campo. Em termos práticos tem-se ainda que salientar que a zona de susceptibilidade à liquefação está delimitada pela posição da linha freática e certa profundidade, referente ao estado de tensão e compacidade em que o processo não se aplica.

Atualmente os estudos de potencial de liquefação de rejeitos arenosos finos realizados no Brasil têm sido feitos predominantemente com base no SPT, método de Olson (2001), e CPTu, métodos de Olson (2001) e Robertson (2010). Ensaio de Vane Test podem ser úteis na determinação direta das razões de resistência não drenadas de pico e residual. Poucos estudos têm sido desenvolvidos com base nos ensaios triaxiais não drenados monotônicos e/ou cíclicos ou ensaios drenados.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta simples de avaliar a razão de resistência não drenada e o potencial de liquefação com base em ensaios triaxiais drenados e os índices de vazios determinados por amostragem na superfície das praias de rejeito.

2 PROCEDIMENTOS

Com os resultados dos ensaios triaxiais drenados tem-se determinada a linha de estado crítico. Sladen et al. (1985) menciona que o conceito de estado permanente de deformação é análogo ao conceito de estado crítico apresentado por Roscoe et al. (1958). Aquele autor cita as observações de Castro et al. (1982) que a distinção destes estados deve ser feita apenas para argilas. Assim, a resistência do solo arenoso no estado permanente pode ser definida em termos de tensões efetivas pelos parâmetros de resistência residual ou estado crítico.

Com base na fase de adensamento dos ensaios drenados é possível avaliar o coeficiente de compressão representativo do rejeito arenoso. Com a coleta em grande escala e representativa de amostras na praia de rejeitos e a respectiva determinação dos índices de vazios é possível avaliar os estados de densificação da disposição hidráulica em campo com apoio de $e_{máx}$ e $e_{mín}$.

Com a amostragem dos índices de vazios na

superfície é possível estimar estatisticamente perfis de índice de vazios, função do alteamento da barragem.

Na curva de compressão é possível delimitar uma zona potencial de liquefação função dos índices de vazios esperados nos perfis amostrados e com base nos níveis de tensões efetivas de campo. No primeiro caso tem-se determinado os parâmetros de estado. No segundo caso o limite inferior estaria associado à tensão efetiva na cota de saturação (linha freática) e/ou elevada umidade (zona muito úmida suscetível à liquefação); o limite superior associado ao nível de tensão efetiva que se variado não gera compressão significativa no rejeito. Este nível de tensão pode ser obtido, preferencialmente, em ensaios de compressão edométrica.

A razão de resistência não drenada é obtida com base na premissa que durante a mobilização não drenada não há variação do índice de vazios, logo, com base na envoltória de resistência em estado crítico ou permanente é possível obter a resistência liquefeita e não drenada.

3 ENVOLTÓRIA DE ESTADO CRÍTICO

Foram selecionados quatro locais de amostragem na praia de rejeitos. As amostras foram removidas de forma indeformada em valas rasas. A partir de quatro campanhas de ensaios adensados drenados de resistência à compressão triaxial foram obtidos os parâmetros de resistência em estado crítico. Os resultados estão ilustrados na Figura 1. Adotando-se a configuração s' versus t , em que s' é igual a $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ e t igual a $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$, foram obtidos $\phi'_{cs}=32,6^\circ$ e $c'_{cs}=17,1\text{kPa}$. As campanhas de ensaios foram realizadas com tensões confinantes de 75, 150, 300 e 550kPa. Apresenta-se na Figura 2 o índice de vazios de cada amostra depois de finalizada a fase de adensamento, ou seja, antes de iniciar o cisalhamento. Neste gráfico o índice de vazios no final da fase de adensamento foi correlacionado com a respectiva tensão efetiva octaédrica, nesta fase do ensaio, igual à tensão confinante.

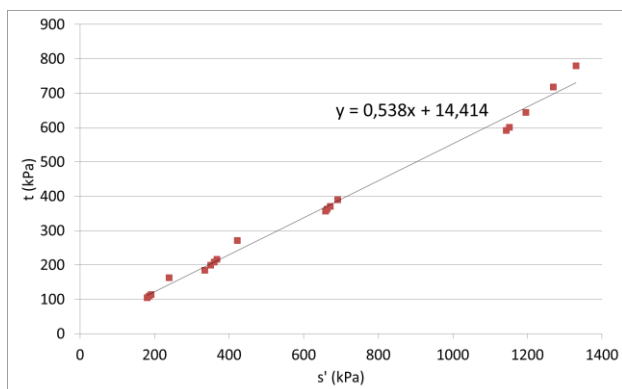


Figura 1. Envoltória de resistência em estado crítico.

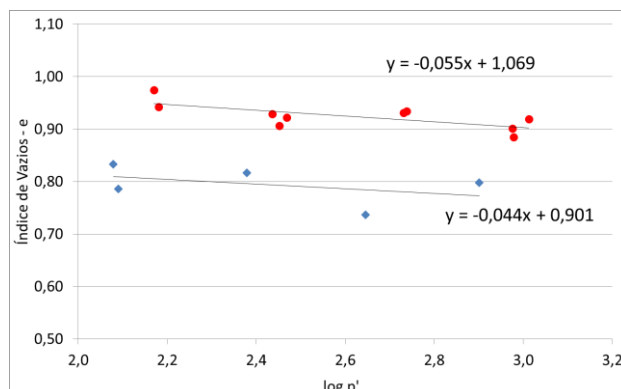


Figura 3. Estimativa de C_{ss} .

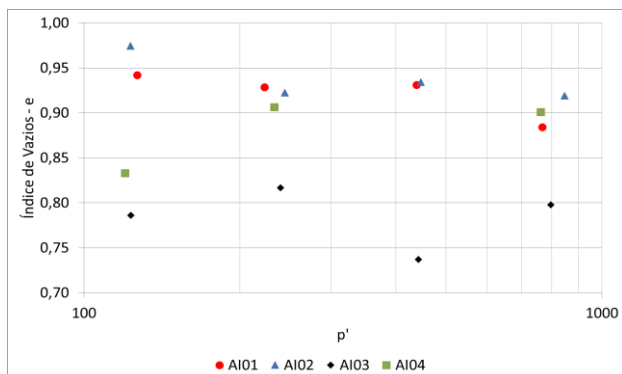


Figura 2. Índice de vazios versus tensão efetiva.

4 COEFICIENTES DE COMPRESSÃO

Como apresentado na Figura 2 não há uma relação entre as tensões confinantes no final da fase de adensamento das amostras e o índice de vazios. Este comportamento pode estar associado ao fato de que algumas amostras se encontram no estado compacto em campo, mesmo na superfície (zona amostrada). Assim, os pontos mostrados na Figura 2 foram divididos em dois grupos, um superior (de amostras fofas) e outro inferior (de amostras compactas). Adotando-se este critério de separação foram estimados os coeficientes de compressão no estado permanente, C_{ss} , dos dois grupos (Figura 3).

Os valores estimados de C_{ss} para os grupos de amostras fofas e compactas foram, respectivamente, 0,055 e 0,044. Adotou-se, neste trabalho, o valor de $C_{ss}=0,055$ e o índice de vazios inicial no estado permanente, $e_{0ss}=1,069$.

5 COEFICIENTES DE RECOMPRESSÃO

Uma vez que os índices de vazios iniciais das amostras coletadas próximo da superfície foram inferiores aos índices de vazios esperados para amostras fofas, lançadas por aterro hidráulico, foi entendido que as amostras na superfície sofrem algum tipo de retração no processo de ressecamento. Este ressecamento pode ser mais agudo ou não existir. As tensões proporcionadas por este ressecamento podem então induzir um efeito de “pré-adensamento” nos materiais arenosos lançados à barragem. Assim, o valor do coeficiente de recompressão, C_s , foi calculado a partir da fase de adensamento dos ensaios triaxiais supracitados. Os valores calculados em cada amostra estão mostrados na Tabela 1. Importante observar que há um aumento do índice de recompressão com o aumento do nível de tensão. Tomando-se como base a média dos valores obtidos para os níveis mais altos de tensão, o coeficiente de recompressão foi estimado em 0,015.

Tabela 1. Coeficiente de recompressão – C_s

Ensaio	Coeficiente de recompressão – c_s			
	$\sigma_c = 75\text{kPa}$	$\sigma_c = 150\text{kPa}$	$\sigma_c = 300\text{kPa}$	$\sigma_c = 550\text{kPa}$
AI 01	0,005	0,007	0,011	0,013
AI 02	0,006	0,005	0,014	0,019
AI 03	0,008	0,011	0,016	0,018
AI 04	0,006	0,009	0,014	0,013
Média	0,006	0,008	0,014	0,016
Valor adotado			0,015	

6 MODELO DE COMPORTAMENTO

De posse dos valores de e_{0ss} , C_{ss} , C_s , pode-se proceder como esquematizado na Figura 4, em que são mostradas duas amostras distintas. A amostra representada por um círculo vermelho tem um índice de vazio de campo e_{1campo} e uma tensão efetiva octaédrica de campo p'_1 . Na ruptura não-drenada a amostra segue horizontalmente até linha de estado permanente sem variar o índice de vazios, $e_{1ss} = e_{1campo}$. Sua ruptura se dará na envoltória do diagrama $p'-q$, cuja inclinação é M , $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ e $q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$. A inclinação M é função de ϕ' e dada por $M = 6 \cdot \tan \phi' / (3 - \tan \phi')$. Na ruptura, a amostra terá uma tensão efetiva octaédrica no estado permanente p'_{1ss} maior que p'_1 . Isso indica que há uma geração de poropressão negativa na amostra a qual, portanto, não seria tecnicamente suscetível à liquefação. Processo análogo ocorre com a amostra representada por um quadrado azul, entretanto sua tensão efetiva octaédrica no estado permanente p'_{2ss} é menor que a p'_2 , indicando que há geração positiva de poropressão. Neste caso tem-se suscetibilidade à liquefação.

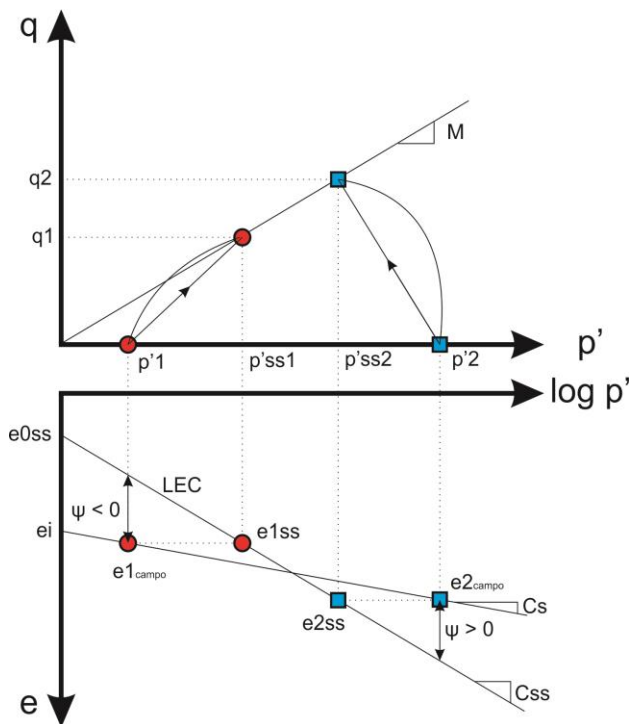


Figura 4. Comportamento não drenado do solo fofo e denso.

Da Figura 4, pode-se definir o parâmetro de

estado ψ , que é a diferença entre o índice de vazios no campo e o índice de vazios no estado permanente. Valores positivos do parâmetro de estado são indicativos de suscetibilidade à liquefação. Pode-se, entretanto, adotar-se um valor negativo como o valor a partir do qual a amostra é considerada suscetível, como por exemplo, Been & Jefferies (2015), $\psi < -0,05$.

$$\psi = e_{campo} - e_{ss} \quad (1)$$

7 PERFIS DE ÍNDICE DE VAZIOS – ZONA POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO

Na Figura 5 é apresentada uma amostragem contendo os índices de vazios de rejeito arenoso quantificados próximo da superfície da praia de rejeitos, onde foram extraídas as amostras dos ensaios triaxiais apresentados anteriormente. Foram quantificados 37 diferentes índices de vazios em campo, com magnitude variando de 0,72 a 1,09. Importante observar que esta faixa é consistente com os valores de índices de vazios identificados nas amostras indeformadas coletadas para os ensaios triaxiais (Figura 2). Ainda sobre o tema, a determinação de índices de vazios de amostras indeformadas é passível de erros. Neste sentido, é fortemente recomendado a realização de uma boa amostragem, para que seja possível estabelecer critérios seguros de descarte.

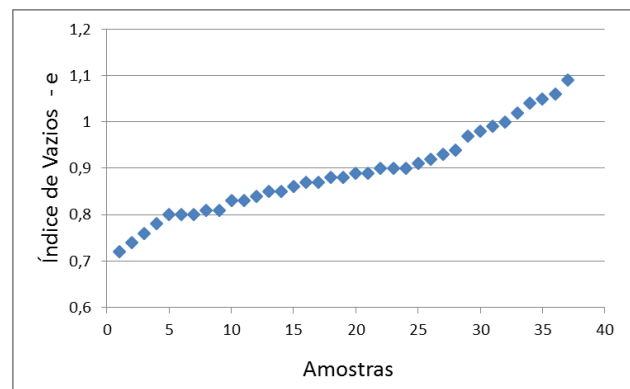


Figura 5. Distribuição dos índices de vazios na superfície.

Como estes índices de vazios foram obtidos em amostras localizadas próximo à superfície, foi atribuído a estes a tensão p' igual a 1kPa (congruente com zero). Com base na posição

estimada para linha freática em campo e no comportamento deste material em ensaios de compressão edométrica, foi aqui sugerido que a faixa de tensão com susceptibilidade à liquefação está entre 300 e 500kPa. Variando-se p' de 10 em 10kPa, dentro deste intervalo, foi possível estimar os índices de vazios em campo como esquematizado na Figura 6. Foi adotado um valor de ψ igual a -0,05, a partir do qual a amostra é considerada suscetível à liquefação (Been & Jefferies, 2015).

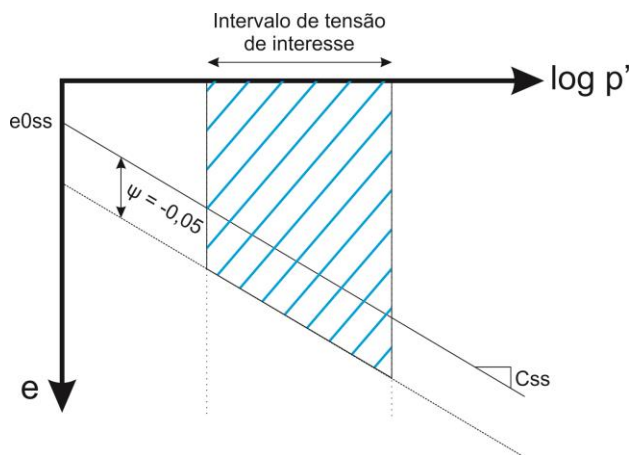


Figura 6. Faixa de susceptibilidade à liquefação.

8 DISTRIBUIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ESTADO

Dividindo-se o intervalo interesse (entre 300 e 500kPa) de 10 em 10 kPa obtém-se 21 divisões, uma vez que há 37 valores de índices de vazios máximos, obtém-se um universo (amostragem) de 777 pares de p' e e_{campo} . Calcularam-se os valores de ψ para cada par. Essa distribuição é mostrada na Figura 7.

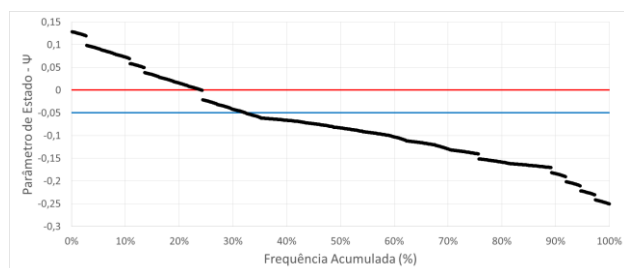


Figura 7. Distribuição dos valores de ψ no intervalo de interesse.

Adotaram-se três intervalos cujo risco à liquefação varia entre muito baixo, baixo e alto. A Tabela 2 mostra os as frequências de ψ e os

intervalos adotados.

Tabela 2. Intervalos do parâmetro de estado.

Intervalo de ψ	Risco	Frequência (%)
$\psi \leq -0,05$	Muito Baixo	68%
$-0,05 < \psi \leq 0$	Baixo	8%
$\psi > 0$	Alto	24%

O resultado mostra que apesar do material estudado ter potencial de liquefação, apenas 24% da zona potencial, delimitada na Figura 6, tem potencial alto, devido à tendência de contração no cisalhamento.

9 DISTRIBUIÇÃO DA RESISTÊNCIA LIQUEFEITA

A razão de resistência não drenada ou liquefeita pode ser determinada pela equação 2.

$$\frac{S_u}{s'} = \tan \alpha \quad (2)$$

Em que α é a inclinação do diagrama s' xt da Figura 1, sendo o intercepto desprezado. Para expressar a razão de resistência em termos da tensão efetiva vertical, σ'_v , considerou-se equivalente à tensão efetiva principal maior do ensaio, σ'_1 . A partir dessa consideração, obtém-se a equação 3.

$$\frac{S_u}{\sigma'_{v \max}} = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha + 1} \quad (3)$$

O valor encontrado para $S_u/\sigma'_{v \max}$ foi de 0,443. Entre o universo de 777 pontos, 188 (24%) apresentaram valor de S_u/σ'_v menor que 0,443, o que respeita o registrado na Tabela 2. A frequência acumulada de S_u/σ'_v é mostrada na Figura 8.

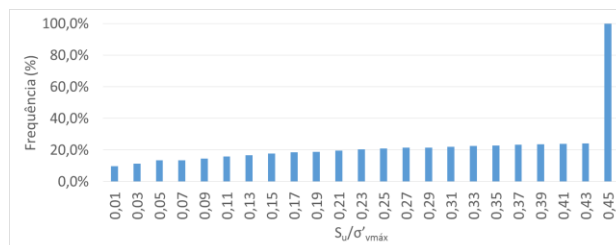


Figura 8. Frequência acumulada de S_u/σ'_v .

O comportamento apresentado na Figura 8 deixa evidências de como é difícil atribuir um valor da razão de resistência não drenada ou liquefeita ao rejeito. O valor médio das razões de resistência para a zona classificada com risco alto de liquefação é 0,105. Mas este valor só se aplica para esta zona.

Cabe ressaltar que como o estudo aqui desenvolvido foi realizado com base em ensaios drenados, não houve como identificar o comportamento não drenado dúctil ou frágil (liquefeito) das amostras. Martin et al. (2002) sugerem que para $S_u/p' > 0,2$ ($S_u/\sigma'_v > 0,13$) tem-se comportamento não drenado dúctil ao cisalhamento, sendo atribuído à condição de ruptura não drenada, com base no estado permanente, apenas as razões S_u/p' iguais ou inferiores a 0,15 ($S_u/\sigma'_v > 0,10$).

Com base nos valores encontrados para o parâmetro de estado no intervalo de interesse ($\psi > 0$; Figura 7), é possível plotar o gráfico da variação desses valores de ψ versus a razão de resistência não drenada (Figura 9). A relação entre S_u/σ'_v e ψ pode ser expressa por meio da Equação 4 (e.g. Been & Jefferies, 2015), considerando $\sigma'_v \approx 1,5.p'$ ($K_0=0,5$).

$$\frac{S_u}{p'} = \frac{M \cdot e^{\frac{-\psi}{\lambda}}}{2} \quad (4)$$

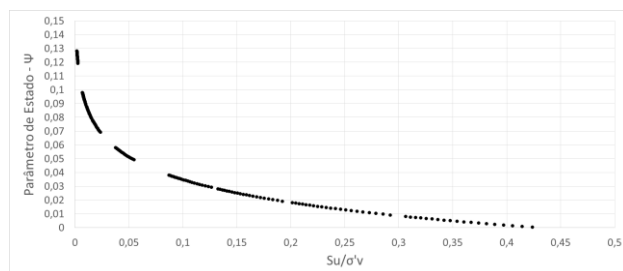


Figura 9. Razão de resistência não drenada em função do parâmetro de estado.

Com base no proposto por Martin et al. (2002), como ilustrado na Figura 9, para o rejeito com parâmetros de estado menores que 0,02, tem-se comportamento não drenado dúctil, sendo o comportamento não drenado, com base no estado permanente, comportamento liquefeito, atribuído aos parâmetros de estado maiores que 0,02.

10 CONCLUSÕES

O processo de ressecamento e/ou drenagem dos rejeitos depositados por aterro hidráulico gera contração do mesmo induzindo efeitos similares ao pré-adensamento. Assim, no nível da praia a densidade dos rejeitos não se assemelha plenamente a de um material no estado fofo. No caso em questão a predominância foi de materiais medianamente compactos. Este efeito tem grande influência nos perfis de índice de vazios das barragens de rejeitos arenosos. Os perfis absorvem esta história de tensões aleatória e por este motivo é muito difícil prever os estados de compactidade com a profundidade, função dos alteamentos das barragens. No estudo aqui apresentado apenas 24% do rejeito tinha características de contração no cisalhamento. Deste percentual, a resistência liquefeita ou não drenada (S_u/σ'_v) variou de 0,002 a 0,443, sendo o valor médio igual a 0,105. Neste sentido, a determinação de um valor único para resistência liquefeita parece não proceder, sendo necessário atribuir uma avaliação estatística nos estudos de estabilidade em obras com potencial de liquefação.

BIBLIOGRAFIA

- Been, K. (1999), The Critical State Line and Its Application to the Soil Liquefaction. Physics and Mechanics of Soil Liquefaction, Lade and Yamamuro (eds) Balkema 195-204.
- Been, K. e Jefferies, M. G. (2015). Soil Liquefaction: A Critical State Approach – 2ª Edição, 690p.
- Castro, G., Enos, J. L., France, J. W., Poulos, S. J. (1982). Liquefaction Induced by Cycle Loading. Report to National Science Foundation, Washington, DC, No. NSF/CEE-82018.
- Olson, S. M. (2001). Liquefaction Analysis of Level and Sloping Ground Using Field Case Histories and Penetration Resistance. Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana.
- Robertson, P. K. (2010). Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, June 2010.
- Roscoe, K. H., Schofield, A. N., Wroth, C. P. (1958). On the Yielding of Soils. Géotechnique, 8(1), pp. 22-52.
- Sladen, J. A., D'Hollander, R. D., Krahn, J. (1985), The Liquefaction of Sands, a Collapse Surface Approach. Canadian Geotechnical Journal, vol. 22, 564-578.