

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/57

Estimativas de recalque por compressão sísmica de solos arenosos

Judith Yimena Ramos Arce

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, jramos_1909@hotmail.com

Celso Romanel

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, celso.romanel@gmail.com

RESUMO: Os vários métodos simplificados para determinação de deslocamentos permanentes causados por sismos em taludes de barragens de terra, mineração e encostas naturais baseados no modelo do bloco deslizante de Newmark estimam apenas os deslocamentos causados por deformações cisalhantes ao longo da potencial superfície de ruptura e no interior da massa deslizante de solo deformável. O deslocamento vertical permanente na crista da barragem ou talude devido à compressão sísmica não é capturado explicitamente pelo método de Newmark. O procedimento mais conhecido na engenharia geotécnica para estimativa de compressão sísmica foi apresentado com base em ensaios de laboratório por Tokimatsu e Seed (1987), para areias limpas, e estendido por Pradel (1998) e Stewart e Wang (2003). No presente trabalho estes métodos são utilizados para determinação do recalque na crista de uma barragem submetida a carregamento sísmico, sendo também comparados com os valores de recalque computados por simulação numérica 2D pelo método dos elementos finitos.

PALAVRAS-CHAVE: Compressão sísmica; recalque; solos arenosos; métodos simplificados

ABSTRACT: The various simplified methods for determination of permanent displacements in soil slopes (earth dams, mining dams, natural slopes) based on the Newmark sliding block model only yield the displacement caused by shear deformations along the potential rupture surface and inside the potential sliding mass of deformable soil. Permanent vertical displacement on the dam or slope crest due to seismic compression is not explicitly captured by the Newmark method. The best known procedure in geotechnical engineering for seismic compression deformation is based on laboratory tests by Tokimatsu and Seed (1987), for clean sands, further extended by Pradel (1998) and Stewart e Wang (2003). In the present work, these methods are used to determine the compression settlement on the crest of a dam submitted to different seismic loading. Their results are also compared with the compression settlement obtained through a 2D finite element analysis.

KEYWORDS: Seismic compression; settlement; sandy soils; simplified methods

1 INTRODUÇÃO

Uma das consequências de eventos sísmicos é o recalque da superfície de depósitos de solo arenosos. Deslocamentos verticais podem acontecer devido à densificação cíclica ou pela reconsolidação de solos saturados liquefeitos à medida que os excessos de poropressão induzidos pelo carregamento sísmico são dissipados. Vários procedimentos semi-empíricos, baseados em resultados de ensaios de laboratório, ensaios de campo e retroanálises de casos históricos, foram publicados na literatura para estimativa deste tipo de recalque, admitindo que as deformações laterais são nulas (formulação 1D) com as deformações volumétricas sendo portanto consideradas iguais às deformações verticais.

Se a deformação vertical em cada camada de solo for integrada em relação à profundidade, o resultado fornecerá um valor de recalque ρ conforme Eq. 1, onde a integração é aproximada por um somatório das deformações volumétricas ε_{vi} em n subcamadas de espessura Δz_i . No caso de ensaios SPT a posição do número de golpes medidos em campo corresponde ao centro de cada subcamada.

$$\rho = \sum_1^n \varepsilon_{vi} \Delta z_i \quad (1)$$

Solos arenosos fofos podem comprimir durante carregamento sísmico e, se estiverem na condição saturada, atingir o estado de liquefação e apresentar recalques com a dissipação dos excessos de poropressão sísmicamente induzidos. Em solos secos, ou parcialmente saturados, o carregamento sísmico pode resultar em compressão sísmica (densificação) que também leva ao surgimento de recalques na superfície. As deformações volumétricas geralmente causam menores valores de deslocamentos do que deformações cisalhantes cíclicas, mas é prudente verificar o valor do recalque induzido por compressão sísmica na crista de um talude.

Vários procedimentos semi-empíricos, baseados em resultados de ensaios de laboratório (Tokimatsu e Seed, 1987; Stewart e Whang, 2003) e ensaios de campo (Pradel, 1998; Robertson, 2010) foram publicados na literatura para estimativa deste tipo de recalque em solos arenosos. Alguns deles são apresentados a seguir.

2 MÉTODOS SIMPLIFICADOS PARA CÁLCULO DO RECALQUE POR COMPRESSÃO SÍSMICA

2.1 Tokimatsu e Seed (1987)

O método proposto por Tokimatsu e Seed (1987) é aplicável para areias limpas (teor de finos $FC \leq 5\%$), na condição total ou parcialmente saturada. O desenvolvimento foi feito por meio de correlações com resultados de ensaios cíclicos triaxiais e de cisalhamento direto e comparação com recalques de campo observados nos terremotos de Niigata, em 1964, Tokachioki e Miyagiken Oki, em 1968. O método fornece um gráfico (Fig. 1) para estimativa da deformação volumétrica em função da resistência à penetração $(N_1)_{60}$ do ensaio SPT e da razão de tensão cíclica CSR para terremoto com magnitude $M_w = 7,5$. As curvas em linha cheia representam a estimativa da deformação volumétrica para o solo saturado liquefeito enquanto que as curvas em linha tracejada se referem aos casos onde excessos de poropressão foram gerados, porém sem ocorrência de liquefação, com deformações volumétricas menores do que na condição saturada. Neste último caso, de acordo com GDP-9 (2015), se o fator de segurança contra liquefação FS_L for superior a 1,25 então o recalque de compressão sísmica pode ser considerado desprezível.

As curvas da Fig. 1 também podem ser aplicadas para eventos de diferentes magnitudes por meio da Tab. 1, que apresenta os efeitos da magnitude na razão de tensão cíclica CSR em função do fator de escala de magnitude r_m . Multiplicando os valores das ordenadas das curvas de igual deformação volumétrica pelo correspondente fator de escala (r_m) então gráficos semelhantes aos da Fig. 1 podem ser construídos para outras magnitudes de terremoto. Alternativamente, o valor da razão de tensão cíclica CSR para um terremoto com magnitude M_w (CSR_{M_w}) pode ser convertido para a razão de tensão cíclica para um terremoto $M_w = 7,5$ ($CSR_{M_w = 7,5}$) de acordo com a Eq. 2, com o objetivo de usar as curvas da Fig. 1 diretamente.

$$CSR_{M_w = 7,5} = \frac{CSR_{M_w}}{r_m} = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d \times \frac{1}{r_m} \quad (2)$$

onde σ_v e σ'_v são as tensões verticais total e efetiva, respectivamente, na profundidade z , a_{max} é a aceleração horizontal máxima na superfície do terreno, g representa a aceleração da gravidade e r_d é o fator de redução da tensão cisalhante cíclica com a profundidade.

Tabela 1 – Influência da magnitude do terremoto em CSR (adaptado de Tokimatsu e Seed, 1987)

Magnitude do terremoto	Fator de escala (r_m) em CSR
8,5	0,89
7,5	1,00
6,75	1,13
6	1,32
5,25	1,50

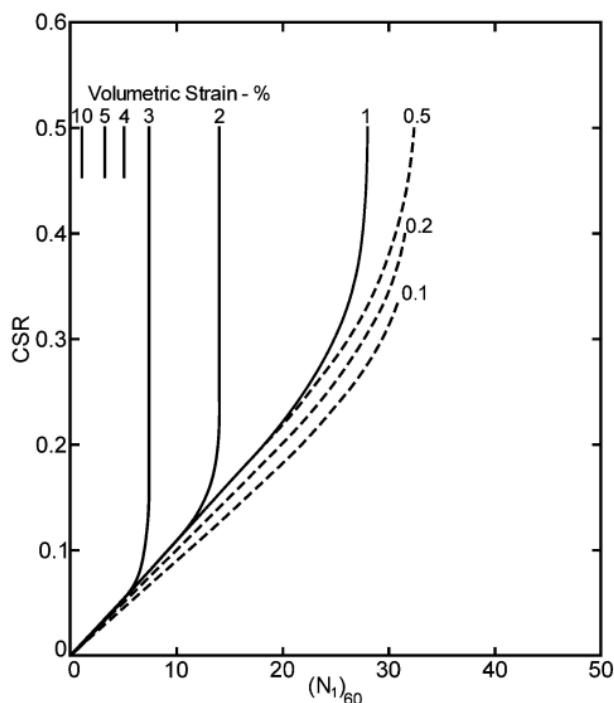


Figura 1 – Deformação volumétrica em areia limpa em função da razão de tensão cíclica $CSR_{MW=7,5}$ e do número de golpes $(N_1)_{60}$ (adaptado de Tokimatsu e Seed, 1987).

2.2 Pradel (1998)

Pradel (1998) apresentou uma adaptação do método de Tokimatsu e Seed (op.cit.) que consiste na utilização de um conjunto de equações, dispensando o uso de gráficos e tabelas, para prever o recalque de compressão sísmica induzido por terremoto em areia limpa seca ($FC \leq 5\%$). O método é composto dos seguintes 4 passos de cálculo:

a) determinação da tensão cisalhante cíclica média $\tau_{cic,média}$ de acordo com a Eq. 3 proposta por Seed e Idriss (1971).

$$\tau_{cic,média} = 0,65\tau_{cic,max} = 0,65 \frac{\gamma h}{g} a_{max} r_d = 0,65 \frac{\sigma_{v0}}{g} a_{max} r_d \quad (3)$$

onde o fator de redução de tensões r_d foi formulado por Seed e Idriss (1971).

b) obtenção do valor do módulo de cisalhamento máximo G_{max} mediante ensaio de campo (velocidade de propagação da onda S), ensaio de laboratório ou correlações com resultados de ensaios de penetração SPT ou CPT.

c) cálculo da deformação cisalhante uniforme equivalente (deformação efetiva) γ por meio da Eq. 4:

$$\gamma = \frac{\tau_{cic,média}}{G_{max}(G/G_{max})} \quad (4)$$

que depende da razão de degradação do módulo do módulo G/G_{max} .

Pradel (op.cit.) obteve a Eq. 5 relacionando G/G_{max} vs. γ com base na curva de degradação de módulo de cisalhamento proposta por Iwasaki et al. (1978).

$$\gamma = \left[\frac{1 + a \exp(b\tau_{cic,m\acute{e}dia}/G_{max})}{1 + a} \right] \frac{\tau_{cic,m\acute{e}dia}}{G_{max}} \quad (5a)$$

$$a = 0,0389(p/p_0) + 0,124 \quad b = 6400(p/p_0)^{-0,6} \quad (5b)$$

onde p é a tensão total média na profundidade z e p_0 representa a pressão atmosférica (100 kPa).

d) determinar a deformação volumétrica $\varepsilon_{vi}^{M_w=7,5}$, correspondente a um terremoto de magnitude $M_w = 7,5$ em função da deformação cisalhante efetiva γ :

$$\varepsilon_{vi}^{M_w=7,5} = \gamma(N_1/20)^{-1,2} \quad (6)$$

onde N_1 é o número de golpes SPT normalizado em relação à tensão vertical efetiva de 1 atm.

Por fim, a deformação volumétrica ε_{vi} induzida por um terremoto de magnitude M_w é estimada pela Eq. 7:

$$\varepsilon_{vi} = \varepsilon_{vi}^{M_w=15} (N_{eq M_w}/15) \quad (7a)$$

$$N_{eq M_w} = (M_w - 4)^{2,17} \quad (7b)$$

2.3 Stewart & Whang (2003)

Stewart e Whang (2003) atualizaram o procedimento de Tokimatsu e Seed (1987), originalmente aplicável apenas para areias limpas, estendendo-o para estimativa de recalque de compressão sísmica em areias siltsosas não plásticas e argilas de baixa plasticidade.

Este processo de atualização implicou em: a) utilização de um fator de redução de tensão cisalhante r_d com formulação mais abrangente, dependente da profundidade z , da magnitude do sismo M_w , da aceleração máxima na superfície a_{max} e da velocidade média de propagação de onda S nos 12 m superiores do depósito de solo (V_{S12}); b) consideração da curva de degradação do módulo de cisalhamento recomendada por Darendeli e Stokoe (2001) que incorpora efeitos da tensão de confinamento e do índice de plasticidade do material.

2.4 Observações:

a) É importante notar que os métodos simplificados de Tokimatsu e Seed (1987), Pradel (1998) e de Stewart e Whang (2003) foram baseados em resultados de ensaios de laboratório de cisalhamento cíclico unidirecional, enquanto que terremotos produzem acelerações multidirecionais em campo. Após a realização de ensaios em mesas vibratórias, Pyke et al. (1975) sugeriram que o recalque causado pela combinação das duas componentes de aceleração horizontal pode ser aproximado como a soma dos recalques causados por cada componente atuando separadamente. Isto significa que o recalque determinado pela Eq. 1 deve ser duplicado para consideração de efeitos de vibração bidirecional.

b) Os métodos de Tokimatsu e Seed (1987) e Pradel (1998) foram propostos para areias limpas, sendo porém razoável utilizá-los para areia siltsosa considerando a correção do número de golpes SPT em relação ao teor de finos $(N_1)_{60cs}$, mas o processo introduz mais incertezas no resultado final.

3 REGISTROS DE ACELERAÇÃO SÍSMICA

No presente estudo foram utilizados os acelerogramas dos terremotos de Atico (2001) com magnitude $M_w = 8,4$, de Lima (1966) com $M_w = 8,1$ e de Moquegua (2003) com $M_w = 7,0$, ocorridos no Peru, que apresentam mecanismos focais similares aos resultados obtidos no estudo de desagregação da ameaça sísmica probabilística. Os registros foram previamente tratados por correção da linha base e aplicação de um filtro passa-banda do tipo Butterworth no intervalo de 0,1 Hz a 25 Hz, utilizando o software SeismoSignal (SeismoSoft, 2016). A partir dos acelerogramas corrigidos, foram obtidos os terremotos de projeto (Fig. 2) pelo método de ajuste espectral considerando o espectro de acelerações determinado no estudo de ameaça sísmica probabilística para um período de retorno de 10.000 anos.

As acelerações horizontais máximas na crista do talude foram estimadas pela resposta 1D do depósito de solo com o programa computacional DEEPSOIL v7 (Hashash et al., 2020), conforme Tab. 2.

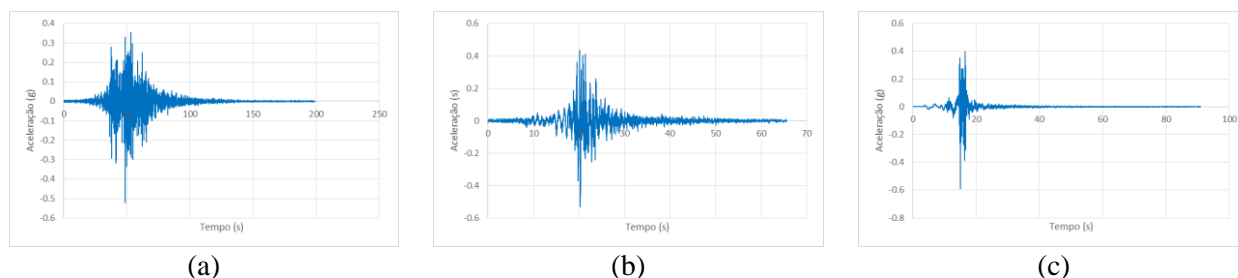


Figura 2. Acelerogramas dos terremotos de projeto: (a) Atico 2001; (b) Lima 1966; (c) Moquegua 2003.

Tabela 2 - Aceleração horizontal máxima na crista da barragem ao longo do furo de sondagem SPT-04

Sondagem	Acelerações na superfície do solo (g)		
	Atico 2001	Lima 1966	Moquegua 2003
SPT-04	0,78	0,72	0,66

4 ESTIMATIVA DE RECALQUES

4.1 Métodos simplificados 1D

A estimativa do recalque de compressão sísmica foi feita para o perfil geotécnico determinado ao longo do furo de sondagem SPT-04, posicionado na crista da barragem (Fig. 3), situada no Peru. Os resultados para os três sismos de projeto estão indicados na Tab. 4 onde se observa que o método de Stewart e Wang (op,cit) produziu os maiores valores de previsão de recalque na crista da barragem, para os três terremotos.

4.2 Método numérico 2D

Com o objetivo de analisar os resultados de recalque determinados com os métodos simplificados, foi também executada uma análise numérica 2D pelo método dos elementos finitos, no estado plano de deformação, utilizando o software Plaxis 2D v. 2020. A simulação do comportamento cíclico dos materiais foi feita com o modelo constitutivo elastoplástico PM4Sand (Boulanger e Ziotopoulou, 2017) cujos parâmetros foram determinados em ensaios de campo e de laboratório, conforme Tab. 3.

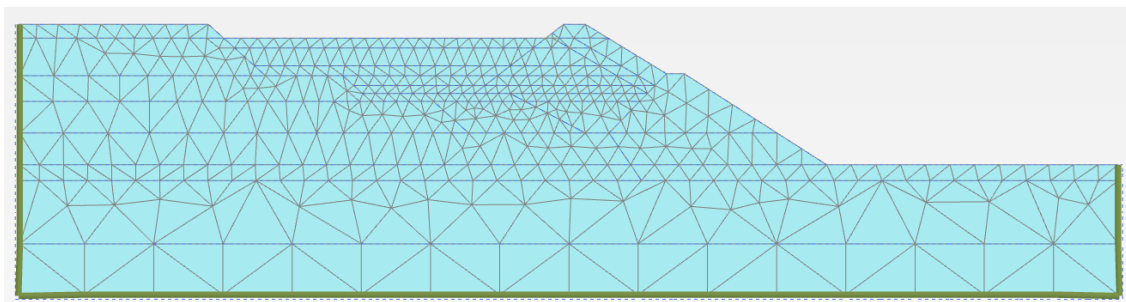


Figura 3 - Discretização de seção transversal da barragem

Tabela 3 - Parâmetros do modelo PM4Sand para análise dinâmica 2D da barragem.

Prof. (m)	Υ_{total} (kN/m ³)	$(N_1)_{60}$	D_{R0}	G_0 (MPa)	h_{p0}	e_{max}	e_{min}	nb	nd	phi_{cv}	nu	Q	R
0-2,5	16	6	0.36	486.88	2,68	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
2,5-4	17	10	0.47	590.43	3,09	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
4-5	16	6	0.36	486.88	2,68	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
5-6	17	9	0.44	566.32	2,99	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
6-8	17	10	0.47	590.43	3,09	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
8-10	17	9	0.44	566.32	2,99	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
10-15	17	9	0.44	566.32	2,99	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5

De acordo com os resultados da Fig. 4 e Tab. 4, os valores numéricos resultaram inferiores aos estimados pelos métodos simplificados. As diferenças têm várias causas, dentre as quais os modelos de comportamento mecânico adotados nos diferentes métodos (ensaios de laboratório, modelo constitutivo elastoplástico), tipo de formulação (semi-empírica, mecânica dos meios contínuos), cenários de análise (1D, 2D). Vale observar que os valores de recalque mostrados na Fig. 4 foram duplicados na Tab. 4, atendendo à recomendação de Pyke et al. (1975) mencionada na seção 2.4.

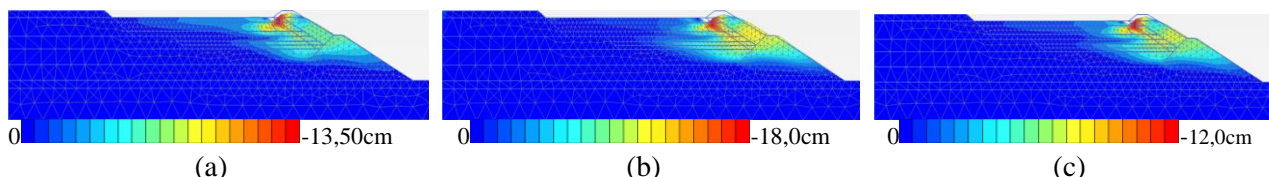


Figura 4 - Recalques induzidos pelos terremotos (a) Atico 2001 (b) Lima 1966;(c) Moquegua 2003.

Tabela 4 - Resumo dos recalques obtidos por métodos simplificados e elementos finitos.

Método	Recalque (cm)		
	Atico 2001	Lima 1966	Moquegua 2003
Tokimatsu e Seed (1987)	42,50	43,21	40,05
Pradel (1998)	40,80	55,67	34,95
Stewart e Whang (2003)	56,20	58,42	49,70
Plaxis 2D	27,00	36,00	24,00

5 CONCLUSÃO

Devido a dificuldades na determinação dos parâmetros de entrada em modelos constitutivos elastoplásticos para simulação do comportamento cíclico de solos por método numérico, a prática da engenharia muitas vezes recorre aos métodos simplificados para estimativa do recalque de compressão sísmica. Todavia, nenhum destes métodos parece conseguir prever com precisão aceitável o recalque final, com erros relativos podendo ser superiores a 100%.

Os métodos simplificados para estimativa de deslocamentos permanentes em taludes baseados na analogia do bloco deslizante de Newmark (Makdisi e Seed, 1978; Bray e Travasarou, 2007; Bray e Macedo, 2019) estimam os deslocamentos causados por deformações cisalhantes, i.e. o deslocamento de corpo rígido ao longo da potencial superfície de deslizamento mais o deslocamento permanente causado por deformações cisalhantes no interior da massa de solo deslizante deformável. Todavia, o movimento da crista de um talude natural ou barragem provocado por deformações cisalhantes é mecanicamente diferente do movimento da crista decorrente da compressão volumétrica dos materiais que formam o talude. Por esta razão, é importante contar com um método simplificado, mas confiável, para a estimativa do recalque por compressão causado por evento sísmico. Uma possibilidade, não explorada no presente trabalho, é a estimativa do recalque de compressão sísmica por meio de uma formulação probabilística, como a desenvolvida por Cetin et al. (2009) baseada em retroanálises de casos históricos de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boulanger, R. W. e Ziotopoulou, K. PM4Sand: a sand plasticity model for earthquake engineering applications. Report No. UCD/CGM-17/01, Center for Geotechnical Modeling, University of California at Davis, 2017.
- Bray, J.D. e Macedo, J. Procedure for estimating shear-induced seismic slope displacement for shallow crustal earthquakes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 145, n.12, 2019.
- Bray, J.D. e Travasarou, T. Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, n.4, pp. 381 – 392, 2007
- Cetin, K. O.; Bilge, H.T.; Wu, J.; Kammerer, A.M. e Seed, R. B. Probabilistic models for cyclic straining of saturated clean sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 135, n. 3, p. 371-386, 2009
- Darendeli, M. B. e Stokoe, K. H., II. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves, *Geotechnical Engineering Report GD01-1*, University of Texas at Austin, 2001
- GDP-9 Geotechnical Design Procedure: liquefaction potential of cohesionless soils, Revision 3, *Geotechnical Engineering Bureau*, Department of Transportation, State of New York, 2015.
- Hashash, Y.M.A.; Groholski, D.R.; Phillips, C.A.; Park, D. e Musgrove, M. DEEPSOIL v.7, Department of Civil and Environmental Engineering, Univ.Illinois at Urbana-Champaign, User Manual, 137 p., 2020.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F.; Tokida, K. e Yasuda, S. A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. *Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation*, San Francisco, California, p. 885-896, 1978
- Makdisi. F.I. e Seed, H.B. Simplified procedure for estimating dam and embankment response. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, v. 105, n.12, pp. 1427-1434, 1978.
- Pradel, D. Procedure to evaluate earthquake-induced settlements in dry sandy soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 124, n. 4. 364-368, 1998.
- Pyke, R.; Seed, H.B. e Chan, C.K. Settlements of sands under multidirectional shaking. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, v. 101, n. GT4, p. 379-398, 1975.
- Robertson, P. K. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, v.136, n.6, pp. 842-853, 2010.
- Seed, H.B. e Idriss, I.M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, v. 97, 1249-1273, 1971.
- Stewart, J. P. e Whang, D. H. Simplified procedure to estimate ground settlement from seismic compression in compacted soils. *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Los Angeles, CA, USA, 2003.
- Tokimatsu, K. e Seed, H. B. Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking. *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 113(8), 861-878, 1987.