

Avaliação de Potencial de Liquefação Cíclica por Vibrações de Obra de Descaracterização de Barragem de Rejeitos

Evandro Cardoso Jardim

Geotécnico, Geoestável Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, evandro.jardim@geoestavel.com.br

Gustavo Lourenço Amorim Silva

Geotécnico, Geoestável Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, evandro.jardim@geoestavel.com.br

Maria Regina Moretti

Consultora, Geoestável Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, evandro.jardim@geoestavel.com.br

Leonardo Carvalho Ventura

Geotécnico, Geoestável Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, evandro.jardim@geoestavel.com.br

Valeria Ferreira Coelho Micheluzzi

Geotécnica, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, evandro.jardim@geoestavel.com.br

RESUMO: Uma das preocupações associadas ao projeto de descaracterização de uma barragem de rejeitos alteada para montante, é de que a vibração causada pelos equipamentos a serem utilizados na obra e pelas detonações realizadas em cavas no entorno, induzam a liquefação dos rejeitos susceptíveis a este fenômeno. Em uma primeira etapa, foi adotada uma metodologia baseada no parâmetro de velocidade de propagação da onda cisalhante (V_s), o qual pode ser obtido no ensaio Seismic Cone Penetration Test (SCPT), para definir a velocidade de pico da partícula (PPV) limite para que não haja geração de poropressões no rejeito e consequente aumento no risco de liquefação. Paralelamente, foram realizados experimentos de campo em uma área similar à da barragem em estudo para aferir, através do uso de sismógrafos de engenharia (geofones), os níveis de vibração gerados pelas atividades previstas na obra. A partir dos limites pré-determinados, foi desenvolvido e implantado um plano de instrumentação para aferição e controle das vibrações na área da barragem, associado ao monitoramento das poropressões no reservatório, possibilitando a execução da obra de forma mais segura.

PALAVRAS-CHAVE: barragem, rejeitos, liquefação, vibrações, SCPT.

ABSTRACT: One of the concerns associated with the project to de-characterize a tailings dam, is that the vibrations caused by the equipment to be used in the work and by the detonations carried out in pits around it, induce the liquefaction of the tailings susceptible to this phenomenon. In a first step, a methodology based on the shear wave velocity parameter (V_s) was adopted, which can be obtained in the Seismic Cone Penetration Test (SCPT), to define a peak particle velocity (PPV) limit so that there is no generation of pore pressures in the tailings and a consequent increase in the risk of liquefaction. At the same time, field experiments were carried out in an area similar to the dam was implemented, to assess, through the use of geophones, the levels of vibration generated by the activities programmed for the work. From the PPV pre-determined limits, an instrumentation plan was developed and implemented for measurement and control of vibrations in the dam area, associated with the monitoring of pore pressures in the reservoir, allowing the de-characterization works to be done in a safer way.

KEYWORDS: dam, tailings, liquefaction, vibration, SCPT.

1. Introdução

As causas de danos em barragens de terra sob carregamentos cíclicos estão frequentemente relacionadas à redução da resistência do material devido ao aumento cumulativo das poropressões geradas sob condições não drenadas. Em alguns casos esse processo pode ocasionar a ruptura da estrutura. É preciso considerar que materiais saturados e que se apresentam no campo em estado contrátil podem acumular poropressões quando submetidos a carregamentos cíclicos, sejam gerados por sismos naturais ou qualquer outra fonte, e que estes materiais podem sofrer uma perda significativa de resistência através do fenômeno denominado de liquefação.

Ao longo dos últimos 50 anos diversas metodologias foram desenvolvidas para avaliar o processo de liquefação cíclica. SEED e IDRISS (1971) propuseram o Método Simplificado para a avaliação da liquefação de campo para solos arenosos. O método baseia-se na correlação de resultados de ensaios de sondagem a percussão (SPT) a um parâmetro que representa o carregamento sísmico no solo, denominado razão de tensão cíclica (*cyclic stress ratio*; *CSR*).

$$CSR = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) r_d \quad (1)$$

Onde a_{max} = aceleração horizontal de pico na superfície; g = aceleração da gravidade; σ_{v0} = tensão vertical total; σ'_{v0} = tensão vertical efetiva; e r_d = coeficiente de redução de tensão.

Desde 1971, esse procedimento passou por várias revisões e atualizações (SEED, 1979; SEED e IDRISS, 1982; SEED et al., 1983, 1985). A Figura 1 apresenta a carta desenvolvida com as curvas que delimitam as zonas de liquefação conforme estudos apresentados por SEED et al. (1985) para sismos com magnitudes de momento $M_w = 7,5$.

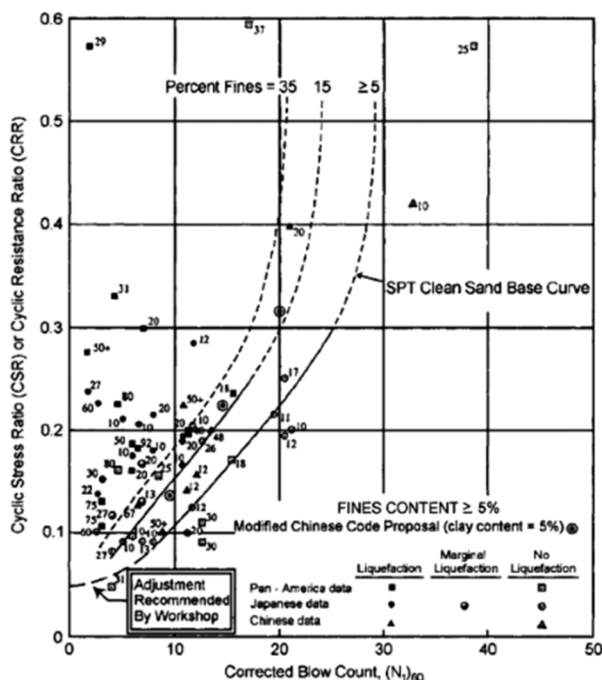


Figura 1 - Carta de liquefação para sismos de magnitude 7,5 com base no SPT (SEED et al., 1985).

Duas técnicas alternativas ao Método Simplificado foram comentadas por DOBRY e ABDOUN (2015), uma baseada no parâmetro de resistência de ponta normalizada do cone, q_{c1} , obtido no ensaio de penetração de cone (CPT), e outra na velocidade de propagação da onda de cisalhamento, V_{s1} , obtido por exemplo a partir do

ensaio de penetração do cone sísmico (SCPT) (ROBERTSON e WRIDE, 1998; ANDRUS e STOKOE, 2000), conforme apresentado na Figura 2.

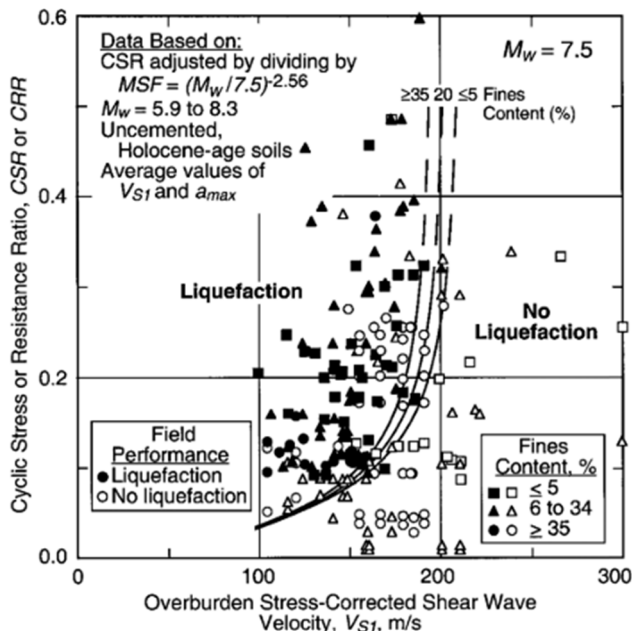


Figura 2 - Carta de liquefação para sismos de magnitude 7,5 com base no V_s (ANDRUS e STOKOE, 2000).

Tanto o Método Simplificado quanto as demais técnicas citadas se baseiam nas acelerações geradas em um carregamento cíclico. Uma abordagem alternativa, tratada por DOBRY e SWILGER (1979), é a de que existe um limiar de deformação cisalhante γ_{tv} , abaixo da qual não há geração de poropressão em carregamentos cíclicos. Essa abordagem fornece uma avaliação conservadora, uma vez que a liquefação pode não ocorrer mesmo que as deformações excedam o limiar calculado e ocorra a geração de uma poropressão limitada (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1985).

2. Limiar de deformação cíclica

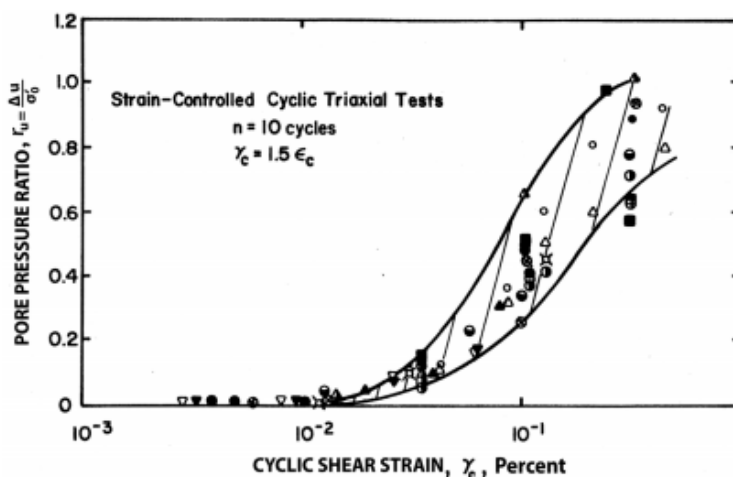
Conforme tratado por DOBRY e ABDOUN (2005), após avaliarem diversos solos arenosos e areno-siltosos submetidos a carregamentos cíclicos, observou-se que independentemente do número de ciclos de carregamento apenas há geração de excesso de poropressão após deformações cisalhantes superiores à 10^{-2} % (Figura 3).

DOBRY e ABDOUN, 2015 apresentam uma tabela (Tabela 1) com resultados de limiar de deformação cisalhante cíclica (γ_{tv}) obtidos para uma série de materiais e tipos de ensaio.

Tabela 1- Limiar de deformação cisalhante cíclica γ_{tv} (DOBRY e ABDOUN, 2015)

Solo	Tipo de Ensaio	γ_{tv} (%)
Dry Ottawa sand	Resonant column	$1 \sim 10^{-2}$
Dry Crystal Silica sand	Cyclic simple shear	$2 \sim 10^{-2}$
Dry and saturated Ottawa sand	Cyclic simple shear (drained)	$1 \sim 10^{-2}$
Dry Monterey sand	Cyclic simple shear	$1 \sim 10^{-2}$
Saturated nonplastic silt	Cyclic triaxial	$(0.5-0.6) \sim 10^{-2}$
Saturated Monterey sand	Cyclic triaxial	$1.2 \sim 10^{-2}$ (OCR=1); $2.9 \sim 10^{-2}$ (OCR=8)
Saturated Monterey Sand	Cyclic triaxial	$1.1 \sim 10^{-2}$
Saturated Banding Sand	Cyclic triaxial	$(0.8-0.9) \sim 10^{-2}$
Saturated Heber Road fine sand	Cyclic triaxial	$1 \sim 10^{-2}$
Several saturated sands	Cyclic triaxial	$1 \sim 10^{-2}$

Solo	Tipo de Ensaio	γ_{tv} (%)
Saturated Monterey sand	Resonant column	$1.2 \sim 10^{-2}$
Saturated Monterey sand	Cyclic triaxial	$(1-2) \sim 10^{-2}$
Saturated Folsom gravel	Cyclic triaxial	$(0.3-0.6) \sim 10^{-2}$
Dry Nevada sand	Cyclic simple shear	$(1.3-1.7) \sim 10^{-2}$
Partially saturated La Cienaga silty sand	Cyclic simple shear	$(1.1-1.6) \sim 10^{-2}$
Saturated clean aggregate sand	Pore pressure generation	$(0.5-1.0) \sim 10^{-2}$
Saturated Monterey sand	Cyclic simple shear	$1 \sim 10^{-2}$



Symbol	Sand	σ'_0 (psf)	D_r (%)	Samples/Fabric	Measured u Peak (P) or Residual (R)
○	Crystal Silica	2,000	60	Dry Vibration	P
△	" "	2,000	60	Wet Rodding	P
▲	" "	2,000	60	Dry Vibration	P
▽	Sand No. 1	2,800	60	Moist Tamping	P
▽	" "	1,400	60	" "	P
○	Monterey No. 0	2,000	60	" "	P
○	" "	2,000	80	" "	P
□	" "	2,000	45	" "	P
□	" "	2,000	45	" "	R
□	" "	533	60	" "	P
⊕	" "	4,000	60	" "	P
⊕	" "	2,000	20	" "	R
●	Banding	2,000	60	" "	R
●	" "	2,000	40	" "	R
●	" "	2,000	20	" "	R
●	Heber Road Point Bar	2,000	Dense	Tube Sample	R
●	Heber Road Channel Fill	2,000	Loose	" "	R
⊗	Ovi Island	2,000	40	Moist Tamping	R
⊗	" "	1,500	40	" "	R
⊗	" "	2,000	Medium Dense	Tube Sample	R
⊗	Mt. St. Helen Debris	2,000-4,000	50	Moist Tamping	R

Figura 3 - Resumo dos resultados de ensaios com controle de deformação em areias normalmente adensadas utilizando diferentes técnicas de preparação (DOBRY, 1985 apud DOBRY e ABDOUN, 2015).

Observa-se que todos os resultados apresentados relataram que deformações inferiores a 10^{-2} % não induziram mudanças na densidade dos materiais ensaiados, mesmo quando um grande número de ciclos foi aplicado (DOBRY e ABDOUN, 2015).

3. Limiar de velocidade de partícula

A propagação de uma onda em um meio elástico provoca um movimento instantâneo das partículas do material com uma velocidade V_p . As tensões geradas durante esse movimento podem ocasionar deformações

diretamente proporcionais à velocidade V_p (TIMOSHENKO e GOODIER, 1970; DOBRY et al., 1982) de acordo com a seguinte equação:

$$\gamma = V/V_S \quad (2)$$

Onde: γ = deformação cisalhante; V = velocidade de partícula da onda transversal; e V_S = velocidade da onda de cisalhamento (pode ser medida no SCPTU ou SDMT).

A partir da Equação (2), sabendo-se do limite de deformação cisalhante associado à não geração de poropressão, de 10⁻²% e a velocidade de propagação da onda de cisalhamento (V_S), é possível definir uma velocidade de pico de partícula (V) limite para não geração de poropressão.

4. Vibrações derivadas de equipamentos de construção

Quando uma fonte vibratória, como o tráfego de um equipamento ou a ação de um rolo vibratório, interage com o solo, a energia é transferida a partir da fonte em forma de ondas sísmicas. Um complexo padrão de ondas é criado à medida que a energia reflete e refrata entre materiais diferentes, forçando as partículas do solo a se moverem tridimensionalmente (TRANSPORT AGENCY, N. Research report 485 Ground vibration from road construction. [s.l: s.n.]). Existem dois tipos básicos de ondas que se propagam em meio terrestre: ondas de corpo e ondas de superfície.

Segundo DAY (2012) as ondas de corpo possuem essa denominação pois podem se propagar pelo interior da Terra, e são subdivididas em: (a) Onda P - também denominada de onda primária, de compressão ou longitudinal. Ondas P podem propagar em meios sólidos e líquidos, possuem a propagação mais rápida entre os tipos de onda, causa uma série de movimentos de dilatação e contração do material, contudo, não provocam grande impacto em solos e rochas devido à relativa resistência desses materiais aos efeitos desse tipo de onda. (b) Onda S – também denominada de onda secundária, de cisalhamento ou transversal. Como líquidos não possuem resistência ao cisalhamento, ondas S propagam-se apenas em meios sólidos e em velocidades inferiores à das ondas P. Os solos geralmente possuem baixa resistência ao cisalhamento, portanto, esse tipo de onda possui maior impacto em análises geotécnicas.

As ondas de superfície resultam da interação entre as ondas do corpo e os materiais superficiais e são subdivididas em ondas Love e ondas Rayleigh. Geralmente, para fins de análise geotécnica, o interesse primário é saber efeito combinado das ondas em termos da aceleração de pico da partícula (PPV), sendo a Onda S responsável pela maior influência na velocidade de pico na maioria dos casos (DAY, 2012; LANE e PELHAM, 2012).

5. Velocidade de propagação da onda de cisalhamento (V_S)

A velocidade da onda de cisalhamento (Onda S), V_S , é uma propriedade mecânica do solo, dada em metros/segundo (m/s), que pode ser medida tanto no campo quanto no laboratório. Conforme HUSSIEN (2016) V_S pode ser considerado um parâmetro de tensão efetiva já que pode ser diretamente relacionado à rigidez do material:

$$G_{max} = \rho V_S^2 \quad (3)$$

Onde: G_{max} = módulo de cisalhamento ; e ρ = densidade do solo.

USBR (2015) comenta que uso de V_S para determinar a resistência à liquefação é bem fundamentado, pois ambos, V_S e resistência à liquefação, são influenciados por diversos fatores em comum. Estudos de laboratório mostraram que a tensão confinante, o tipo de solo / plasticidade e o índice de vazios / densidade relativa são

os fatores mais importantes que influenciam a variação do módulo de cisalhamento, ou da velocidade da onda de cisalhamento.

O parâmetro V_s pode ser medido *in situ* através de uma série de ensaios incluindo, dentre outros: *cross-hole* (CH), *down-hole* (DH), cone sísmico (SCPT) e análise espectral de ondas de superfície (SASW). A precisão de cada método de teste depende de fatores com equipamentos, procedimentos, condições do solo e técnicas de interpretação. Atualmente, nos projetos em desenvolvimento na área de mineração no Brasil, tem-se observado um interesse maior no método SCPT devido principalmente à sua facilidade de execução e baixo custo.

6. Estudo de Caso - Descaracterização de Barragem

O objetivo dos estudos realizados foi definir o limite de vibração, medido pela velocidade de pico da partícula (PPV) na superfície do terreno, que poderia ser gerada durante as atividades da obra de descaracterização de uma barragem de rejeitos alteada para montante e também no entorno da mina para que, a favor da segurança, não houvesse a geração de poropressões e um possível gatilho para o processo de liquefação.

A metodologia adotada foi baseada na Equação (2), a qual estabelece um limite de deformação associado à geração de poropressão. Para definição do parâmetro de velocidade da onda de cisalhamento (V_s), foram avaliados 2 ensaios de penetração do cone sísmico (SCPT) realizados no reservatório da barragem. Apesar da média dos valores de V_s encontrada ter sido em torno de 250 m/s, de maneira conservadora, foi adotado o menor valor observado, de 150 m/s.

Considerando a deformação limite para não geração de poropressões, de $10^{-2}\%$, e a velocidade de propagação da onda de cisalhamento V_s , de 150 m/s, a velocidade de pico de partícula (V_p) limite calculada foi de 0,015 m/s, ou 15 mm/s.

Considerando que foram realizados apenas dois ensaios SCPT no reservatório, que a barragem em questão encontra-se em uma condição marginal de segurança e que, devido à essa situação, não é permitida a realização de mais ensaios de campo, adotou-se um fator de segurança de 3,0, obtendo-se assim um limite de velocidade de partícula aceitável de 5 mm/s. Este limite está alinhado com a sugestão de TRIPATHY e SHIRKE (2010), que sinalizam critérios conservadores, indicando uma faixa de trabalho variando de 5mm/s a 15mm/s.

Além do monitoramento das vibrações, estão sendo controlados também a piezometria e as deformações na barragem em questão, os quais não são objeto de discussão do presente artigo.

Paralelamente, foram realizados experimentos de campo em uma área com litologia similar à da área onde está prevista a execução das obras de reforço, na região crítica da barragem. Os experimentos consistiram em: posicionar uma série de sismógrafos de engenharia (geofones) em distâncias pré-definidas, variando entre 3 e 25 metros, da área de ação dos equipamentos, para simular e aferir as vibrações geradas pelas atividades previstas na obra como: tráfego de equipamentos, basculamento de blocos de rocha, espalhamento com tratores de esteira, entre outros, em situações extremas de trabalho. Os equipamentos utilizados nos testes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Equipamentos utilizados nos testes de campo.

Equipamento	Peso (t)
Trator de esteira	20,4
Caminhão Basculante	32,0
Pá-Carregadeira	11,6
Escavadeira Hidráulica	36,0
Motoniveladora	19,0
Placa Vibratória	0,20
Rolo compactador	11,0

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos valores máximos obtidos para os testes realizados. Ressalta-se que para as atividades de tráfego carregamento/descarregamento as atividades foram simuladas com capacidade de 50%, 75% e 100% e variando-se também a velocidade de tráfego desde marcha lenta até o limite superior permitido pelo empreendedor responsável pela barragem.

Observou-se que as vibrações geradas em todas as atividades simuladas foram inferiores ao limite estabelecido, de 5 mm/s, com exceção da passagem de rolo vibratório compactador, atividade que não está prevista e foi inclusa nos testes apenas para conhecimento.

Tabela 3- Resumo dos resultados obtidos em testes de vibração realizados em campo

Equipamento/Atividade	Pico de leitura resultante (mm/s)
Tráfego/frenagem de trator de esteira	2,88
Descarregamento de caminhão (blocos de rochas)	1,18
Carregamento de caminhão (blocos de rocha) com carregadeira	0,40
Tráfego/frenagem de caminhão	0,35
Circulação de carregadeira	0,35
Descarregamento de Pá carregadeira (blocos de rocha)	1,10
Descarregamento de escavadeira hidráulica (blocos de rocha)	2,20
Espalhamento de material com escavadeira hidráulica	2,00
Limpeza superficial com escavadeira hidráulica	3,00
Operação conjunta de trator, carregadeira e caminhão para carregamento	2,80
Motoniveladora operando na superfície de solo residual	2,96
Placa vibratória	3,49
Rolo compactador	5,80
Perfuratriz furo 8" para execução de poço profundo	3,10

Para o monitoramento das vibrações geradas durante a execução das obras previstas, foi desenvolvido um programa que contempla a instalação de sismógrafos de engenharia (geofones) nos locais de maior interesse, considerando a estabilidade da estrutura. Estes equipamentos foram posicionados entre o rejeito detectado como susceptível à liquefação e as fontes principais de vibração previstas durante as obras. O sistema de aquisição de dados é conectado a um sistema de alerta, para que os responsáveis pelas obras sejam comunicados automaticamente via e-mail e mensagens de celular caso as vibrações geradas atinjam o limite calculado como seguro. Caso este limite seja alcançado, as obras devem ser paralisadas temporariamente para que se possa entender a causa do excesso medido e seja elaborado um plano de ação para adequação das atividades respeitando o limite de vibrações.

7. Comentários finais

A liquefação devida a ações dinâmicas referentes a procedimentos de construção na área de influência de barragens de rejeito alteadas para montante, é um assunto pouco discutido no meio da mineração brasileira. Após os eventos recentes de rupturas de barragens de mineração alteadas para montante ocorridos no Brasil, as atenções para causas de gatilho de liquefação, como por exemplo vibração, começam a ser discutidas com maior frequência.

No contexto atual em que barragens alteadas para montante devem ser descaracterizadas dentro de prazos estipulados pelos reguladores, a metodologia sugerida neste artigo pode auxiliar na definição de limites aceitáveis de vibrações, geradas por obras necessárias para melhorar a segurança de barragens que se encontram em nível de emergência máximo em que o acesso à área foi interdito e é necessário adotar uma metodologia conservadora, limitada aos dados previamente existentes, contudo, com as devidas particularidades.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à VALE, GEOESTÁVEL e BARBOSA MELLO por terem possibilitado a execução dos testes de campo e disponibilizado os dados para desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRUS, R. D.; STOKOE, K. H.; JUANG, C. H. Guide for shear-wave-based liquefaction potential evaluation. *Earthquake Spectra*, v. 20, n. 2, p. 285–308, 2004.
- Charlie, W.A. and Veyera, G. (1985), "Explosive Induced Porewater Pressure Increases," *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pp. 997-1000.
- Dobry, R., Ladd, R. S., Yokel, F. Y., Chung, R. M., and Powell, D. (1982). "Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method." *NBS Building Science Series 138*, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD.
- Dobry, R., Stokoe, K. H., II, Ladd, R. S., and Youd, T. L. (1981a). "Liquefaction susceptibility from S-wave velocity." *Proc., ASCE National Convention, In Situ Tests to Evaluate Liquefaction Susceptibility*, ASCE, Reston, VA.
- Dobry, R. and Swiger, W. (1979), "Threshold Strain and Cyclic Behavior of Cohesionless Soils," *Proceedings Third Engineering Mechanics Division Specialty Conference*, University of Texas at Austin, Austin, Texas, September 17-19, pp. 521-525.
- HUSSEIN, M. N.; KARRAY, M. Shear wave velocity as a geotechnical parameter: An overview. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 53, n. 2, p. 252–272, 2016.
- Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008). "Soil liquefaction during earthquakes." *Monograph MNO-12*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- LANE, R.; PELHAM, K. *Ground Vibrations Emanating from Construction Equipment*. 2012.
- National Research Council (U.S.). *Committee on Earthquake Engineering Research & National Research Council (U.S.). Committee on Earthquake Engineering & National Research Council (U.S.) 1985, Liquefaction of soils during earthquakes*, National Academy Press, Washington, D.C.
- Robertson, P. K., and Wride, C. E. (1998). "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test." *Can. Geotech. J.*, 35(3), 442–459.
- Seed, H. B., 1979. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes, *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, 105 (GT2), 201–255.
- Seed, H. B., and Idriss, I. M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, 97 (SM9), 1249–1273.
- Seed, H. B., and Idriss, I. M., 1982. *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA, 134 pp.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, I., 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data, *J. Geotech. Eng., ASCE*, 109 (3), 458–482.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M., 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations, *J. Geotech. Eng., ASCE*, 111 (12), 1425–1445.
- TRIPATHY, G. R.; WATER, C. *Assessment of safety of earthen dams against ground vibrations due to mining blasts*. n. August, 2017.
- USBR. *Embankment Dams Chapter 13: Seismic Analysis and Design*. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. USBR, Washington, DC, USA, chapter 13 (phase 4), n. 13, 2015.