

Breve Histórico Relacionado aos Fatores de Influência na Ocorrência da Liquefação Estática

Bruno Leite Ramires Saldanha

Doutorando, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, brunorsaldanha@gmail.com

Ágatha Ribeiro Hauck

Mestranda, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, agatha.hauck@samarco.com

Márcio Muniz de Farias

Professor Titular, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, muniz@unb.br

Amandda Lara Moreira Braga

Doutoranda, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, amanddalara@gmail.com

Manoel Porfírio Cordão Neto

Professor Adjunto, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, porfirio@unb.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho consiste em fornecer uma visão abrangente sobre os conceitos, causas e mecanismos associados à liquefação estática e apresentar os principais avanços relacionados a sua determinação pela comunidade geotécnica. A liquefação se caracteriza pela elevação da poropressão devido à aplicação de cargas monotônicas, reduzindo a tensão efetiva do material a valores próximos de zero, resultando em rápida perda de resistência e deformação do solo. A ocorrência da liquefação estática está intrinsecamente ligada a diversos incidentes de ruptura de barragens de rejeito no Brasil, como o caso das barragens do Fundão e do Córrego do Feijão, ressaltando a importância do tema para a geotecnia brasileira. Para a realização do trabalho foi realizada uma revisão de literatura, em conjunto com uma avaliação qualitativa, dos principais artigos referentes aos principais fatores e parâmetros que influenciam na resistência a liquefação estática. Observou-se que o fenômeno está diretamente relacionado ao histórico de tensões, ao índice de vazios inicial, a granulometria, a quantidade de argilominerais e ao grau de saturação das amostras, mas que ainda existe muito desconhecimento relacionado a real contribuição de cada fator para a sua ocorrência.

PALAVRAS-CHAVE: Liquefação Estática, Resistência à Liquefação, Rejeitos.

ABSTRACT: The objective of this paper this work is to provide a comprehensive overview of the concepts, causes, and mechanisms associated with static liquefaction and to present the main advances related to its determination by the geotechnical community. Liquefaction is characterized by the increase in pore pressure due to the application of monotonic loads, reducing the effective stress of the material to values close to zero, resulting in rapid loss of strength and soil deformation. The occurrence of static liquefaction is related to various incidents of tailings dam failures in Brazil, such as the cases of the Fundão and Córrego do Feijão, highlighting the importance of the topic for Brazilian geotechnics. A literature review was conducted, along with a qualitative assessment of the main articles concerning the key factors and parameters that influence static liquefaction resistance. It was observed that the phenomenon is directly related to the initial void ratio, grain size distribution, quantity of clay minerals and degree of saturation of the samples, but there is still much unknown regarding the real contribution of each of these factors to its occurrence.

KEYWORDS: Static Liquefaction, Liquefaction Resistance, Mine Tailings.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a liquefação se apresenta como uma das grandes preocupações da engenharia geotécnica devida a sua associação ao rompimento de grandes estruturas construídas em solos granulares. Essa ruptura geralmente ocorre de forma rápida nas seções críticas das estruturas, ocasionando em devastadoras consequências em grandes áreas decorrente do fluxo de material (Robertson, 2017).

O fenômeno é caracterizado pela perda da resistência e rigidez do solo, induzido por acréscimos de poropressão resultantes de carregamentos cíclicos ou monotônicos. Sua ocorrência é associada a materiais saturados que apresentam tendência de contração de volume, de modo que, ao serem solicitados na condição não drenada, apresentam aumento da poropressão e conseqüente redução da tensão efetiva, podendo chegar a valores iguais a zero, tornando o material em um líquido viscoso sem nenhuma resistência ao cisalhamento (Guillén, 2008).

A ocorrência da liquefação estática está intrinsecamente ligada a diversos incidentes de ruptura de barragens de rejeito no Brasil. Historicamente, o método de alteamento de barragens a montante predominou no país, apresentando como característica principal o alteamento por cima das camadas de rejeito depositado. Esses rejeitos são materiais provenientes do beneficiamento de minérios e apresentam grande suscetibilidade a liquefação por serem materiais granulares não coesivos e que se apresentam, convencionalmente, na condição saturada (Franks *et al.*, 2021).

Desse modo, é de se esperar que os grandes acidentes que ocorreram no Brasil estão associados a ocorrência da liquefação em barragens alteadas pelo método de montante. Em 2015, ocorreu o rompimento da barragem do Fundão, em que um fluxo de mais de 50 milhões m³ de resíduo escoou por uma extensão de 540 km. Além desse, 4 anos depois a barragem da Mina Córrego do Feijão rompeu de forma súbita, causando a morte de 270 pessoas, e destruindo toda a zona no entorno, destacando a relevância do tema para o panorama da geotecnia brasileira (Arroyo & Gens, 2022).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho consiste em fornecer uma visão abrangente sobre os conceitos, causas e mecanismos associados à liquefação estática. Para isso, foi realizada uma revisão de literatura, compilando o estado atual da arte relacionado a esse fenômeno. Os principais artigos foram selecionados e foi realizada uma avaliação qualitativa dos principais fatores desencadeadores e parâmetros que influenciam a ocorrência da liquefação estática.

2 LIQUEFAÇÃO

O fenômeno da liquefação apresenta forte ligação com comportamento não drenado dos materiais. O primeiro trabalho que observou a sua ocorrência se deu por Castro (1969) em que foi demonstrado que amostras de areia fofa sob compressão triaxial não drenada apresentavam um pico de resistência seguido por um colapso súbito, acompanhado por um grande aumento da poropressão, grandes deslocamentos e uma tendência ao amolecimento pós pico. Na Figura 1 é apresentada a representação gráfica desse ensaio.

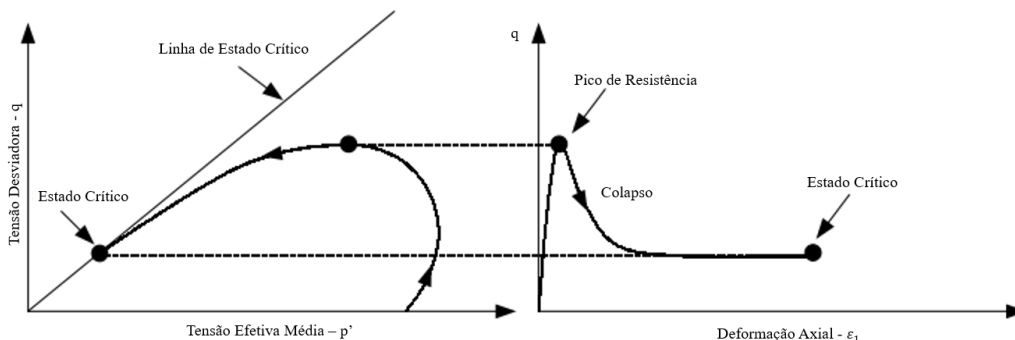


Figura 1. Liquefação Estática em amostras de areias fofas sob carregamentos não drenados. Adaptado de Yang (2002)

Trabalhos subsequentes apresentaram parâmetros mensuráveis para previsão desse comportamento. Vaid & Chern (1983), Lade & Pradel (1990) e Lade (1992) primeiramente observaram que amostras de solo contráteis totalmente saturadas podem apresentar perdas de estabilidade seguidas por um rápido acréscimo de deformações e aumento de poropressão, podendo essa instabilidade ocorrer abaixo da linha de ruptura por meio de uma linha definida pela razão entre a tensão média e desviadora (η) que controlava o início dessa instabilidade. Essa linha foi denominada linha de liquefação e define o início do processo de liquefação.

Been & Jefferies (1985) apresentaram o conceito de parâmetro de estado (ψ), definido como a diferença entre o índice de vazios iniciais (e_0) com o índice de vazios no estado crítico (e_c), que caracteriza a tendência dos solos granulares a liquefazer ou não.

A Figura 2 apresenta a representação visual da mudança de comportamento prevista para diferentes valores do parâmetro de estado. Para o índice de vazios inicial e_3 , o material apresenta ψ_3 negativo, e, conseqüentemente, tende a expandir, se comportando mecanicamente como uma areia densa. Com a aplicação de um carregamento, a tensão efetiva cresce, o índice de vazios vai para posição e_2 e o parâmetro de estado se torna positivo (ψ_2), iniciando-se, portanto, uma transição do comportamento volumétrico para o de areia fofa suscetível a liquefação. Carregamento subsequentes servem então somente para aumentar o valor do parâmetro de estado (ψ_1) e conseqüentemente a suscetibilidade a liquefação (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

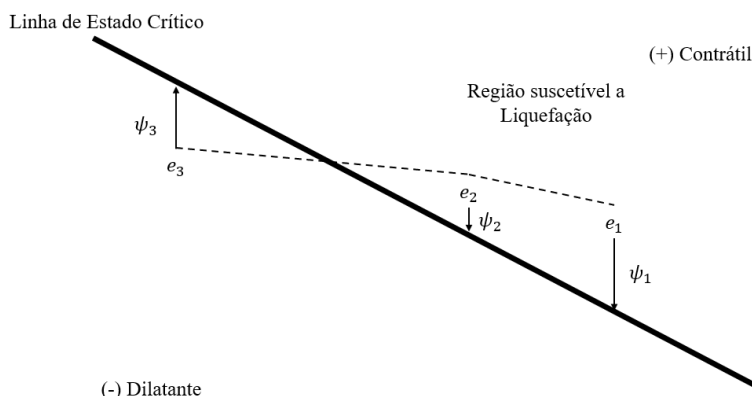


Figura 2. Representação gráfica das mudanças no parâmetro de estado. Adaptado de Morgenstern *et al.* (2016)

O comportamento volumétrico associado aos três índices de vazios da Figura 2 pode ser observado na Figura 3.

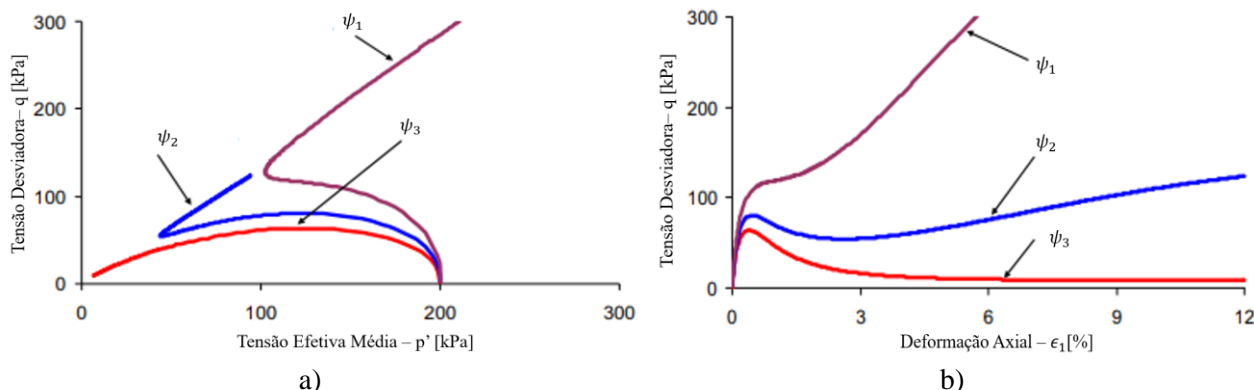


Figura 3. Representação gráfica das mudanças no parâmetro de estado. Adaptado de Lashkari (2015)

Amostras densas (ψ_3) apresentam forte tendência a dilatação e ao processo de endurecimento pós-pico até se alcançar o estado crítico, reduzindo a possibilidade de ocorrência da liquefação. Amostras de densidade intermediária (ψ_2) apresentam um pico de resistência seguido pelo processo de amolecimento, ao se aumentar os níveis de tensão o material apresenta uma transição, dilatando até se alcançar o estado final. Por fim, as

amostras fofas (ψ_3) apresentam pico de resistência seguido por um processo de amolecimento, sendo portanto os materiais mais suscetíveis a liquefação (Lashkari, 2015).

Kramer (1996) apresentou uma série de ensaios triaxiais adensados não drenados em amostras de areias com mesmo índice de vazios inicial, mas diferentes tensões confinantes, obtendo-se uma linha no plano $v \times p'$ denominada Linha de Estado Crítico (CSL). Essa linha, como mencionado anteriormente, é caracterizada por representar um estado no qual o solo flui continuamente sob tensão cisalhante, volume e velocidade constante. É possível observar também que ao se juntar os pontos de pico das trajetórias $p' - q$, obtém-se a chamada linha de liquefação (Corrêa, 2020). Na Figura 4 é apresentada a representação gráfica desses ensaios.

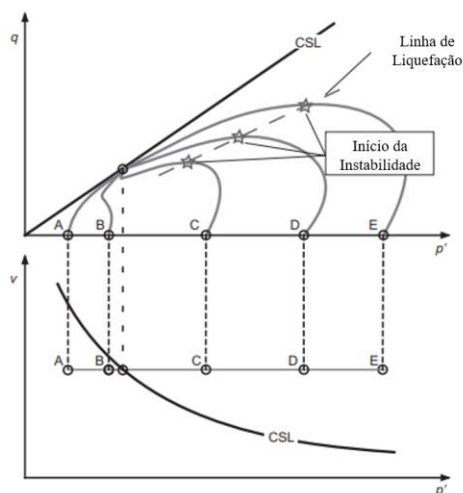


Figura 4. Representação gráfica dos ensaios realizados por Kramer (1996). Adaptado de Kramer (1996)

A obtenção experimental da linha de liquefação mostra-se como um grande avanço para o estudo do fenômeno, possibilitando explorar as diversas condições que influenciam a sua ocorrência. Sendo assim, será apresentado no próximo capítulo os principais fatores que influenciam a susceptibilidade a liquefação

3 PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUÊNCIAM A LIQUEFAÇÃO

A ocorrência da liquefação estática é medida laboratorialmente pela obtenção da linha de liquefação. Além do índice de vazios inicial, existem outros aspectos que interferem na sua obtenção, como por exemplo: histórico de tensões, distribuição granulométrica, formato dos grãos, grau de saturação e permeabilidade do material (Islam 2023).

3.1 Contribuições Relacionadas ao Histórico de Tensões

O primeiro estudo relacionado ao efeito do histórico de tensões na ocorrência a liquefação foi realizado por Tatsuoka *et al.* (1988). Os autores observaram que o aumento da razão de pré adensamento (OCR) ocasionava no aumento da resistência à liquefação, possibilitando então utilizar métodos de densificação do solo, como por exemplo a compactação, como forma de mitigar a sua ocorrência.

Estudos posteriores se basearam em identificar como o OCR e a tensão efetiva vertical influenciava na ocorrência do fenômeno. Vipulantham (2007) realizou ensaios triaxiais não drenados em amostras de areia com diferentes densidades relativas, e identificou que, para materiais com mesma densidade relativa, o aumento da tensão de confinamento resulta em um aumento nas tendências de contração do material, diminuindo a sua resistência a liquefação.

Toyota & Takada (2017) estudaram a influência do OCR tanto na liquefação como na reincidência da liquefação. Os autores observaram que a resistência a liquefação aumenta com o aumento da densidade relativa ocasionada pelo incremento do OCR. Além disso, os autores observaram que quando um material liquefaz, o seu histórico de tensões é anulado, tornando esses materiais mais suscetíveis a liquefação.

3.2 Contribuições Relacionadas a Distribuição Granulométrica

Os primeiros resultados experimentais que consideraram a composição granulométrica na ocorrência da liquefação foi o trabalho de Tsuchida (1970), em que foram realizados ensaios de granulometria em solos naturais com e sem susceptibilidade à liquefação. As principais conclusões obtidas pelo trabalho foram que a liquefação acontece, em geral, em materiais granulares e siltosos, de modo que quanto mais próxima a granulometria se aproxima de um material arenoso, maior a possibilidade de ocorrência.

Fourie *et al.* (2001), avaliou a ocorrência da liquefação em amostras com mesma compactidade, mas diferentes composições granulométricas. Foi observado que a presença de um teor maior de partículas finas implicava numa maior susceptibilidade à liquefação.

Carrera *et al.* (2011) realizaram ensaios triaxiais não drenados em misturas de areias e siltes, extraídas da região de rompimento da barragem de Stava, Itália. Os autores observaram que para as amostras de areia pura, a liquefação ocorreu somente para compactidades muito fofas, mas que ao se aumentar o teor de material siltoso, aumentou-se também a suscetibilidade ao fenômeno.

Estudos subsequentes se basearam em avaliar o quantitativo de argilominerais como uma forma mais condizente em se prever a possibilidade de ocorrência da liquefação. Sendo assim, os primeiros estudos se apoiaram em relacionar o limite de liquidez (LL) com o índice de plasticidade (IP) para criar zonas de suscetibilidade a liquefação.

Seed *et al.* (2001) e Seed *et al.* (2003), apresentou uma classificação para ocorrência da liquefação de modo que o IP de 10 era considerado o ponto máximo para ocorrência da liquefação, e os valores de IP entre 10 e 12 se encontravam em uma zona de possibilidade de ocorrência. Na Figura 5 é apresentada a classificação proposta por Seed *et al.* (2003), solos que se encontram dentro da Zona A possuem elevado potencial para a ocorrência de liquefação. Já para os solos que se encontram dentro da Zona B a suscetibilidade de vir a sofrerem com o fenômeno é menor.

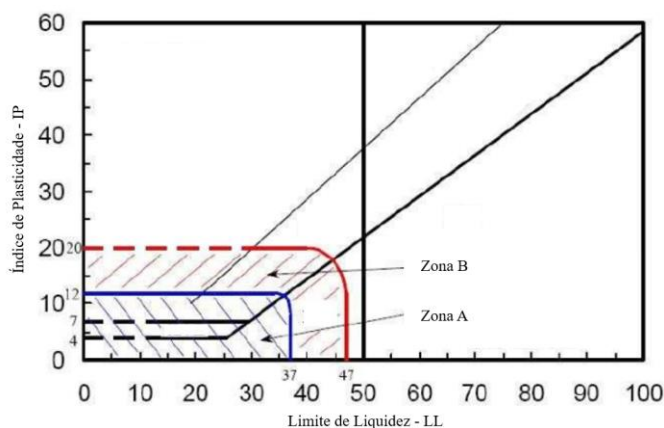


Figura 5. Classificação de ocorrência da liquefação em função do índice de plasticidade de limite de liquidez proposta por Seed *et al.* (2003). Adaptado de Seed *et al.* (2003)

Boulanger & Idriss (2006) apresentaram uma definição inicial em que solos com IP superior 7% sejam classificados como não suscetíveis à liquefação. Apesar disso, Bray & Sancio (2006) realizaram estudos empíricos e concluíram que um valor mais característico para segurança contra liquefação eram valores de IP acima de 18. Os autores ressaltaram esse critério deve ser utilizado com cautela, visto que o índice de vazios inicial, a mineralogia do solo entre outros fatores afeta também a ocorrência a liquefação.

3.3 Contribuições Relacionadas ao Grau de Saturação

A ocorrência da liquefação foi historicamente atrelada a materiais na condição saturada, sendo então possível que quanto maior o grau de saturação maior a possibilidade de ocorrência da liquefação. Apesar disso, estudos recentes observaram a ocorrência do fenômeno mesmo na condição não saturada.

Diversos autores observaram um aumento significativo na resistência a liquefação ao se reduzir o grau de saturação das amostras (Ishihara *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2014; Bouferra *et al.*, 2007). Os maiores ganhos

foram observados a valores próximos de 70% de saturação, sendo os ganhos de resistência abaixo desse valor insignificante.

Della (2010) realizou ensaios triaxiais drenados e não drenados em areias medianamente compactas variando o valor de B de 0,13 a 0,90, concluindo que a diminuição do parâmetro B tende a diminuir o comportamento contrátil do solo, e, conseqüentemente, aumentar a resistência à liquefação.

Vernay *et al.* (2016) realizou um estudo experimental realizando ensaios triaxiais não drenados em areias aplicando-se diferentes valores iniciais de grau de saturação. Os autores concluíram que a presença de ar aumenta a rigidez inicial do solo, e que a aplicação de qualquer valor de sucção acarreta em mudanças significativas na resistência à liquefação cíclica. Além disso, comprovou-se que a liquefação cíclica pode ocorrer independentemente do valor inicial do grau de saturação, ressaltando a possibilidade de ocorrência do fenômeno também em solos não saturados.

Carrera (2008) apresentou a caracterização hidromecânica do rejeito da Mina Stava, tendo como foco principal a ocorrência do fenômeno de liquefação estática em materiais siltosos saturados. O autor conclui que o fenômeno também tem grande ocorrência nesse tipo de material, comprovando a necessidade de estudos quanto a liquefação também em materiais siltosos, e não somente em materiais arenosos.

Bella (2017) deu então continuidade nos estudos de Carrera (2008) e realizou a caracterização não saturada do rejeito da Mina Stava, realizando um estudo de caracterização hidromecânica completo. O autor observou a ocorrência da liquefação estática mesmo com o material não saturado.

Sendo assim, observa-se que a redução do grau de saturação de uma amostra reduz significativamente a possibilidade de ocorrência a liquefação, podendo inclusive alterar o comportamento pós pico de um material. Apesar disso, ressalta-se que o fenômeno pode sim ocorrer sob essas condições.

3.4 Influência da Liquefação do Dimensionamento de Barragens de Rejeito

O fenômeno está historicamente associado aos principais acidentes em barragens de rejeito que ocorreram no Brasil, de modo que a nova Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2020) determinou a proibição da construção de barragens de mineração pelo método de alteamento a montante.

Aliado a isso, observa-se que atualmente existem diversos estudos relacionados aos possíveis gatilhos que ocasionam na ocorrência da liquefação. Nesse sentido, ANCOLD (2019) expressa a inviabilidade de avaliação de todos esses fatores no processo de dimensionamento de uma barragem, tornando necessário encontrar alternativas para a sua inclusão eficaz e viável.

A prática atual para avaliação da estabilidade de uma barragem consiste em admitir que qualquer material que possa liquefazer vai liquefazer. Aliado a isso, são utilizados modelos constitutivos que consigam expressar a perda de resistência ocasionada pela liquefação, como por exemplo os modelos NorSand (BEEN & JEFFERIES, 1985) e o *Clay and Sand Model* (CASM) (Yu, 1998), que em conjunto com softwares de análises numéricas, possibilitam aplicar diferentes condições impostas pelo meio, permitindo a identificação das vulnerabilidades da estrutura e facilitar tanto nos processos de remediação e monitoramento (Ledesma *et al.*, 2022).

4 CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi contribuir para a compreensão da liquefação estática, um fenômeno de grande interesse para a geotecnia brasileira devido à sua associação com grandes acidentes ocorridos no país.

Dentre os principais fatores que influenciam a ocorrência da liquefação destaca-se que: o fenômeno está associado a materiais arenosos e areno-siltosos, a inserção de material fino no material reduz a permeabilidade e conseqüentemente aumenta a possibilidade de ocorrência da liquefação e que a correlação da ocorrência da liquefação com o índice de plasticidade e o limite de liquidez é mais condizente do que com a granulometria. Destaca-se também que o aumento do OCR e a diminuição do grau de saturação aumenta a resistência a liquefação e que pode alterar o comportamento pós-pico do material

Ressalta-se também que apesar do consenso sobre a influência dos fatores mencionados, atualmente existem grandes incertezas relacionadas a contribuição efetiva de cada um dele, destacando a necessidade em se explorar o assunto.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade de Brasília pelo apoio ao trabalho e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANCOLD, 2019. *Guidelines on tailings dams— planning, design, construction, operation and closure*. revision 1. www.ancold.org.au
- Arroyo, M., Gens, A. (2022). *A Ruptura da Barragem de Rejeito de Brumadinho: A Montanha de Cristal*. XI Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica. Mieres, Asturias, Espanha. (Arroyo, Marcos & Gens, Antonio. (2022). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/360901513_La_rotura_de_la_presa_de_relaves_de_Brumadinho_la_montana_de_cristal
- Been, K., Jefferies, M. G. (1985). *A state parameter for sands*. *Géotechnique*, 35(2): 99- 112
- Bella, G. (2017). *Hydro-Mechanical Behaviour of Tailings in Unsaturated Conditions*. 305 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doctoral Program In Environmental Engineering, Politecnico di Torino, Torino
- Bouferra, R., Benseddiq, N., Shahrour, I. (2007). *Saturation preloading effects on the cyclic behaviour of sand*. *Int. J. Geomech.* 7(5):396–401
- Boulanger, R. W., Idriss, I. M. (2006). *Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 132(11), 2006, 1413-426
- Brasil. Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. *Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)*. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2020
- Bray, J. D., Sancio, R. B. (2006). *Assessment of The Liquefaction Susceptibility of Fine Grained Soil*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 132 (9), 2006, 1165–1177.
- Carrera, A. (2008). *Mechanical behaviour of Stava tailings*. Ph.D. thesis, Politecnico di Torino.
- Carrera, A., Coop, M., Lancellota, R. (2011). *Influence of grading on the mechanical behaviour of Stava tailings*. *Géotechnique*, v. 61, n. 11, p. 935-946
- Castro, G. (1969). *Liquefaction of Sands*. Harvard Soil Mechanics Series 81, Cambridge, MA: Harvard University
- Corrêa, A. A. (2020). *Determinação do potencial de liquefação estática de uma areia fina*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 103 p
- Della, N. (2010). *Laboratory testing of the Monotonic behavior of partially saturated sandy soil*. *Earth Sci. Res. S J*. Vol. 14, No. 2: 181-186
- Fourie, A. B., Blight, G. E., Papageorgiou, G. (2001). *Static Liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure*, *Canadian Geotechnical Journal*, v. 38, Joanesburgo
- Franks, D. M., Stringer, M., Torres-Cruz, L. A., Baker, E., Valenta, R., Thygesen, K., Mathewa, A., Howchin, J. & Barrie, S. (2021). *Tailings facility disclosures reveal stability risks*. *Sci Rep*, 11 (5353)
- Guillén, J. L. C. (2008). *Modelagem Elasto-plástica da Liquefação Dinâmica de Solos*. Tese de Doutorado, Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 246 p
- Ishihara, K., Tsuchiya, H., Huang, Y., Kamada, K. (2001). *Recent studies on liquefaction resistance of sand: effect of saturation*. *Proc., 4th Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, S. Prakash, ed., Missouri Univ. of Science and Technology, Rolla, MO

- Islam, S.. (2023). *A study on the mechanical behaviour of three different fine-grained mine tailings*. Journal Of King Saud University - Engineering Sciences, [S.L.], v. 35, n. 5, p. 335-341. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2021.04.001>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall
- Lade, P. V. (1992). *Static instability and liquefaction of loose fine sandy slopes*. Geotech, J. Eng, ASCE, 118(1): 51–71
- Lade, P. V., Pradel, D. (1990). *Instability and plastic flow of soils. I: Experimental observations*, J. Eng Mech. 116(11): 2532–2550
- Lashkari, A. (2015). *Prediction of flow liquefaction instability of clean and silty sands*. Acta Geotechnica, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 987-1014, 5 out. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-015-0413-9>
- Ledesma, O., Sfriso, A. & Manzanal, D. (2022). *Procedure for assessing the liquefaction vulnerability of tailings dams*. Computers And Geotechnics, [S.L.], v. 144, p. 104632. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104632>
- Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B, Watts, B. D. (2016). *Fundão Tailings Dam Review Panel: Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam*
- Robertson, P. (2017). *Evaluation of Flow Liquefaction: influence of high stresses*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318682041_Evaluation_of_Flow_Liquefaction_influence_of_high_stresses
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S. (2001). *Recent Advances in Soil Liquefaction Hazard Assessment*. 15th ICSMGEg, TC4 satellite conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, Istanbul, Turkey
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., Sancio, R. B., Bray, J. D., Kayen, R. E., Faris, A. (2003). *Recent advances in soil liquefaction engineering: A unified and consistent framework.* EERC-2003–06, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif
- Tatsuoka, F., Kato, H., Kimura, M., and Pradhan, T. B. S. (1988). *Liquefaction strength of sands subjected to sustained pressure*. Soils Found., 28(1), 119–131
- Toyota, H., Takada, S. (2017). *Variation of Liquefaction Strength Induced by Monotonic and Cyclic Loading Histories*. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, [S.L.], v. 143, n. 4. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001634](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001634)
- Tsuchida, H. (1970). *Evaluation of liquefaction potential of sandy deposits and measures against liquefaction induced damage*. In: Proc of the annual seminar of the Port and Harbour Research Institute, 1970 (3-1)-(3-33)
- Vaid, Y. P., Chern, J. C. (1983). *Effect of Static Shear on Resistance to Liquefaction*. Soils Foundation, JSSMFE 23(1): 47–60
- Vernay, M., Morvan, M., Breul, P. (2016). *Influence of saturation degree and role of suction in unsaturated soils behaviour: application to liquefaction*. E3S Web Of Conferences, 9: 14002
- Vipulanantham, M. (2011). *Initial Stress State and Stress History Effects on Liquefaction Susceptibility of Sands*. 2011. 180 f. Department Of Civil And Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa
- Yang, J., Wei, L. M., Dai, B. B. (2014). *State variables for silty sands: Global void ratio or skeleton void ratio?*. The Japanese geotechnical society, p 99-111, out, Hong Kong
- Yu H. (1998). *CASM: A unified state parameter model for clay and sand*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 22: 621-653.