

# Influência da Granulometria na Suscetibilidade à Liquefação de Areias

Melissa Goulart de Carvalho

Aluno de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,  
melissanow@outlook.com

Bruno Teixeira Lima

Professor Adjunto, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Departamento de Estruturas e Fundações, Rio de Janeiro, Brasil, bruno.lima@eng.uerj.br

Yasmin Bolelli de Souza

Aluno de Graduação, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,  
boleliyasmin@outlook.com

**RESUMO:** Ao longo do tempo, importantes registros documentam diversos incidentes de colapsos devastadores em depósitos de solos arenosos, acarretando sérios danos financeiros, perda de vidas humanas e impactos sobre o meio ambiente, resultantes da liquefação de areias saturadas. A ocorrência da liquefação estática, investigada neste estudo, tem lugar em solos saturados ou altamente saturados que sofrem uma diminuição de resistência sob esforços de cisalhamento sem drenagem, sendo comum em terrenos arenosos, siltes extremamente porosos e argilas sensíveis. Esse fenômeno é essencialmente caracterizado pela perda de resistência e rigidez do solo, agravada pelo carregamento exercido. O propósito desta pesquisa é demonstrar como a distribuição granulométrica do solo pode impactar o índice de vazios e, por conseguinte, sua suscetibilidade à liquefação. Para isso foram desenvolvidos ensaios triaxiais não-drenados em dois tipos de amostras, puramente arenosa e arenosa com adição de finos, investigado seu ângulo de ruptura por meio de ensaios de cisalhamento direto e por fim apresentado a linha de estados críticos para ambas as amostras, moldadas por deposição úmida. Contudo não foi observado contribuição significativa da parcela de finos adicionada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Liquefação, Índice de vazios, Granulometria, Ensaio triaxial.

**ABSTRACT:** Over time, important records document several incidents of devastating collapses in sandy soil deposits, causing serious financial damage, loss of human life and impacts on the environment, resulting from the liquefaction of saturated sands. The occurrence of static liquefaction, investigated in this study, takes place in saturated or highly saturated soils that suffer a decrease in resistance under shear stresses without drainage, being common in sandy soils, extremely porous silts and sensitive clays. This phenomenon is essentially characterized by the loss of soil strength and stiffness, aggravated by the load exerted. The purpose of this research is to demonstrate how the particle size distribution of the soil can impact the void content and, consequently, its susceptibility to liquefaction. For this purpose, undrained triaxial tests were developed on two types of samples, purely sandy and sandy with the addition of fines, their rupture angle was investigated through direct shear tests and finally the line of critical states for both samples was presented, molded by wet deposition. However, no significant contribution was observed from the added portion of fines.

**KEYWORDS:** Liquefaction, Void index, Granulometry, Triaxial test.

## 1 INTRODUÇÃO

O termo "Liquefação", inicialmente introduzido por Mogami e Kubo (1953), foi empregado para descrever diversos fenômenos, incluindo a deformação do solo sob carga monotônica ou cíclica. Durante a ocorrência desse fenômeno, a resistência e rigidez do solo diminuem devido ao aumento da pressão neutra que contrabalança a tensão efetiva estabelecida. Essa situação ocorre em solos saturados, sem coesão, sob condições que não permitem a drenagem. A liquefação pode ser categorizada em dois tipos: liquefação estática e liquefação cíclica.

A liquefação, demonstrada na Figura 1, ocorre quando a estrutura do solo se desintegra devido a uma carga aplicada rapidamente. Partículas com baixa compactação tendem a se rearranjar em uma configuração mais densa, reduzindo o volume dos espaços vazios. No entanto, durante vibrações como um terremoto, não há tempo suficiente para a água nos espaços vazios ser expelida.

Antes de se empreender qualquer avaliação relacionada à liquefação do solo, é de extrema importância examinar a possível ocorrência desse fenômeno. Para atingir esse objetivo, torna-se imperativo avaliar a predisposição dos solos à liquefação. Em casos em que o solo não demonstra ser suscetível, a perspectiva de risco de liquefação se dissiparia, eliminando a necessidade de investigações adicionais. Em contraste, se a suscetibilidade for identificada, torna-se necessário aprofundar a análise do "início da liquefação", juntamente com a exploração das implicações decorrentes (Kramer, 1996).



Figura 1. Liquefação em solo arenoso (Fonte: Amanda Fuccio (2019)).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo se concentra na análise da areia da Praia Rasa, localizada em Búzios, cuja curva granulométrica sugere um alto potencial para a ocorrência de liquefação. Para determinar se esse fenômeno ocorre ou não, foram conduzidos ensaios triaxiais não drenados, envolvendo fases de adensamento e carregamento axial. Somado a isso, corpos de prova com diferentes densidades relativas foram moldados através do método de deposição úmida, o qual será abordado ao longo do artigo.

Foram utilizados dois tipos de solos distintos, onde em um primeiro momento foram realizados ensaios para o solo 1, amostra arenosa (Figura 2a), e após a qualificação da suscetibilidade ou não à liquefação, foi adicionado parcela de finos oriundos do Solo 2, amostra siltosa (Figura 2b). A adição de finos a amostra puramente arenosa resulta do objetivo de apresentar como a granulometria de uma determinada amostra pode influenciar na sua propensão a se liquefazer.

### 2.1 Caracterização Física do Material

Para fins de visualização do formato dos grãos do solo existente, foi utilizado um microscópio eletrônico simples. Após análise das imagens constatou-se que se trata de um solo com partículas arredondadas. Esse tipo de característica torna o material ainda mais propício a liquefação já que possui tendência de atingir menores valores de densidade relativa (Figura 2a).



(a)

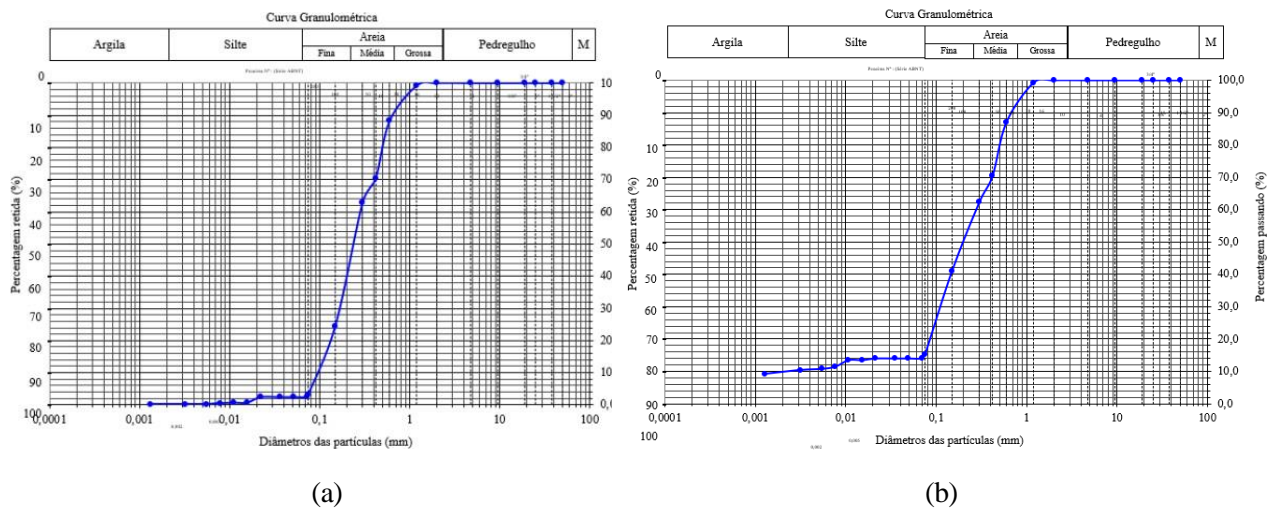


(b)

Figura 2. (a) Areia observada em Microscópio, (b) Silte Passante na peneira # 200.

### 2.1.1 Análise Granulométrica

O ensaio para caracterização do solo e obtenção da sua análise granulométrica foi baseado na NBR 7181/2016. O ensaio de granulometria é utilizado para determinar a porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. Para análise dos dados obtidos a partir da curva granulométrica, foram determinados os coeficientes de não uniformidade, CNU, e o coeficiente de curvatura, CC.



(a)

(b)

Figura 3. (a) Curva Granulométrica da Amostra Arenosa, (b) Curva Granulométrica da Amostra arenosa com adição de 10% de finos.

Desta forma quando comparado com Tsuchida (1970), pode-se constatar que se trata de um solo com granulometria considerada suscetível à liquefação (Figura 3).

### 2.1.2 Índice de Vazios Máximo e Mínimo

Para obtenção do índice de vazios máximo foram realizados ensaios de acordo com a NBR 16840 (ABNT, 2020). Foram realizados os dois métodos previstos em norma, descritos como método A e método B.

Para obtenção do índice de vazios mínimo foi utilizado o método de pluviação sobre peneiras. Para a realização do método de pluviação sobre peneiras, foram utilizados funis com aberturas de 10 mm a 90 mm de diâmetro do bocal, variando em intervalos de 10 mm. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Índice de vazios máximo e mínimo para areia de Búzios

|           | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 |
|-----------|----------|----------|----------|
| $e_{Máx}$ | 0,91     | 0,9      | 0,9      |
| $e_{Mín}$ | 0,75     | 0,74     | 0,75     |

Segundo Lambe & Whitman (1969), solos fofos apresentam densidade relativa (DR) abaixo de 35%, o que apresenta ser um grande desafio para a pesquisa em questão, já que o intervalo entre o índice de vazios máximo e mínimo é relativamente pequeno.

## 2.2 Deposição Úmida (“Moisty Tamping”)

O método de moldagem dos corpos de prova utilizados se baseou no método de deposição úmida, pois dentre os métodos estudados foi o mais eficaz na produção de amostras de baixa densidade relativa, de acordo com (Arthur 2020). A metodologia se baseia na preparação do solo seco em estufa, onde foi adicionado uma quantidade de água destilada que fizesse o solo atingir aproximadamente 6% de umidade, e em seguida colocado em 4 fases dentro do molde.

Assim foram separadas 5 amostras, das quais 4 tinham o mesmo peso para confecção do corpo de prova, e a quinta tem por objetivo a confirmação da umidade do material utilizado. Cada camada foi colocada e compactada dentro do molde bipartido por um compactador padrão (Figura 4). O molde utilizado foi desenvolvido pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), e se mostrou eficaz na produção de corpos de prova de areia em condição fofa, como apresentado em PEREIRA (2005)

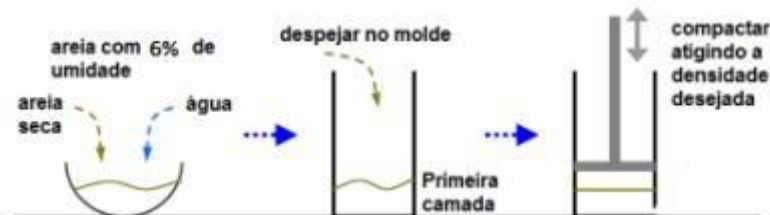


Figura 4. Método de deposição úmida

## 2.3 Saturação do Corpo de Prova

Na etapa de saturação utilizou-se saturação por percolação e por contrapressão. A saturação por percolação foi realizada com utilização de fluxo de água destilada ascendente sendo o valor da diferença de pressão entre topo e base igual a 5,0 kPa. A água percolava pelo corpo de prova e era então descartada.

A saturação por contrapressão foi realizada com pressão uniforme, sendo que o valor da tensão confinante aplicada excedia o valor da contrapressão em 10kPa. Por fim, a saturação foi verificada por meio do cálculo do parâmetro B de Skempton, cujo valor não poderia ser inferior à 0,97.

Esse limite mínimo de saturação foi sugerido por Jefferies & Been (2016). O teste do parâmetro B é feito fechando a linha de drenagem do corpo de prova, aumentando a pressão hidrostática confinante (câmara triaxial) de um certo valor ( $\Delta\sigma$ ) e medindo a variação correspondente na poropressão ( $\Delta u$ ).

## 2.4 Velocidade do Ensaio

A velocidade de cisalhamento do ensaio triaxial sob condições não drenadas deve ser estabelecida para garantir a equalização dos excessos de poropressão no interior do corpo de prova. A definição da velocidade de cisalhamento foi baseada na sugestão de Head (1986).

Head (1986) afirma ainda que o menor valor usado para o tempo mínimo de ruptura em minutos ( $t_f$ ) deve ser de 120 minutos, assim como a deformações axial estimada na ruptura ( $\epsilon_{af}$ ), que no caso de areias fofas, saturadas e cisalhadas de maneira não drenada, deve ser igualada a um valor entre 12 e 18%, resultando em uma velocidade de 0,08 mm/min.

As velocidades adotadas por outros pesquisadores que também desenvolveram ensaios similares foram de 0,04 mm/min e 0,08 mm/min, Abreu (2012) e Pereira (2005), respectivamente.

### 3 RESULTADOS E ANÁLISES

Dentro dos testes realizados no programa experimental, foram desenvolvidos ensaios não drenados moldados através do método de deposição úmida. Os valores de tensão confinante aplicados foram limitados a uma faixa de 30 a 100 kPa, considerando que o fenômeno da liquefação ocorre para baixas tensões.

Ensaio triaxiais não drenados em areias muito fofas tem sido usados com preferência para a determinação de parâmetros de estado permanente. Amostras muito fofas são contrativas durante o cisalhamento e exibem aumento contínuo de poropressão sob condições não drenadas. Isso minimiza o desenvolvimento de não uniformidade dentro da amostra (Sladen et al., 1985).

#### 3.1 Ensaio de Cisalhamento Direto

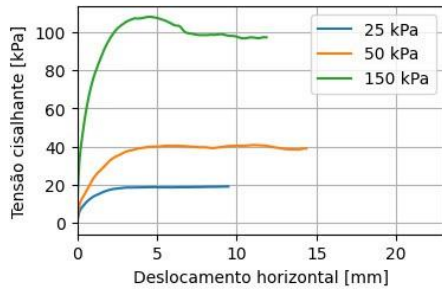
Inicialmente, com o objetivo de entender o comportamento da areia e obter o ângulo de atrito ( $\phi$ ), foram realizados ensaios de cisalhamento direto tanto para areia pura quanto para a mistura de areia com finos (Tabela 2). Desta forma, considerando o maior valor de tensão na ruptura obteve-se o ângulo de atrito da amostra, o que facilitou o entendimento do comportamento desse solo estudado e auxiliou no traçado da linha de ruptura para esses materiais.

As tensões utilizadas para esse ensaio bem como sua velocidade foram as mesmas utilizados nos ensaios triaxiais, para que seu ângulo, quando cisalhado, fosse próximo nos dois ensaios e pudesse embasar a linha de ruptura.

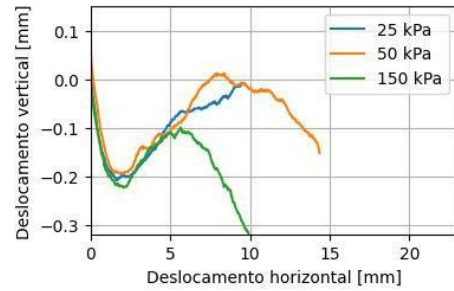
Tabela 2. Ângulo de atrito obtido em ensaio de cisalhamento direto para areia fofa

| Ensaio                                    | Tensão normal corrigida (kPa) | Tensão ruptura maior (kPa) | $\sigma_{ff}/\tau_{ff}$ | $\phi$ |
|---|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------|
| Cisalhamento areia pura_25kPa             | 25,72                         | 18,47                      | 0,74                    | 36,54  |
| Cisalhamento areia pura_50kPa             | 52,45                         | 40,33                      | 0,72                    | 35,7   |
| Cisalhamento areia pura_150kPa            | 157,27                        | 107                        | 0,68                    | 34,22  |
| Cisalhamento areia com 10% de finos_25kPa | 27,42                         | 26                         | 0,92                    | 42     |
| Cisalhamento areia com 10% de finos_50kPa | 53,69                         | 45                         | 0,84                    | 40     |

Na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos para o cisalhamento direto em areia pura. Foi possível perceber que as amostras ensaiadas para tensões de 25 e 50kPa apresentaram comportamento fofo durante o ensaio, caracterizado pela ausência de picos de resistência (Figura 5a) e pela baixa deformação nos valores negativos no deslocamento vertical (Figura 5b), enquanto para tensão de 150kPa apresentaram um leve pico durante o ensaio.



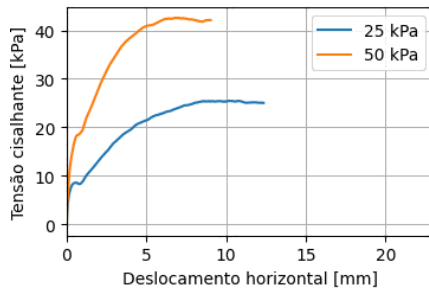
(a)



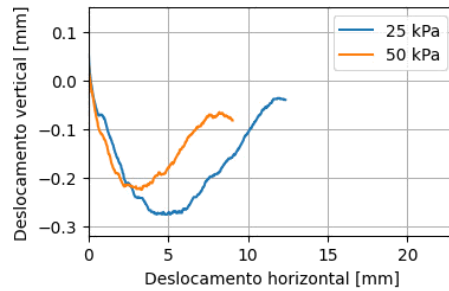
(b)

Figura 5. Ensaio de cisalhamento direto em amostra fofo sob tensões variadas para solo puramente arenoso.

As amostras com adição de silte (Figura 6) também apresentaram comportamento fofo durante o cisalhamento, possibilitando assim a utilização do seu ângulo de atrito ( $\phi$ ) na fase de ensaios triaxiais.



(a)



(b)

Figura 6. Ensaio de cisalhamento direto em amostra fofo sob tensões variadas para solo arenoso com adição de 10% de finos.

### 3.2 Ensaios não Drenados (CIU)

Ensaios foram realizados, como demonstrado na Tabela 3, para areias puras e com adição de finos, e como resultado obtiveram se liquefação limitada e liquefação completa para amostras com baixa densidade relativa, enquanto para amostras compostas de areia com finos não foi possível alcançar o mesmo fenômeno.

Tabela 3. Dados amostras de Areia pura e com fração de finos ensaiadas

| Amostra     | Dados de entrada |                |         |           | Adensamento                    |      |                 |
|-------------|------------------|----------------|---------|-----------|--------------------------------|------|-----------------|
|             | h(mm)            | $\Phi$ méd(mm) | Peso(g) | e inicial | $\Delta$ Vol(mm <sup>3</sup> ) | e    | p' ruptura(kPa) |
| CU_AP_TE37  | 80               | 35,5           | 92,2    | 1,48      | 8087                           | 1,22 | 50              |
| CU_AP_TE77  | 80               | 35,5           | 96,4    | 1,44      | 10871                          | 0,98 | 10              |
| CU_AP_TE30  | 80               | 35,5           | 101,54  | 1,27      | 1000                           | 1,25 | 8               |
| CU1_AS_TE30 | 80               | 35,5           | 98,5    | 1,37      | 300                            | 1,36 | 12              |
| CU2_AS_TE30 | 80               | 35,5           | 99,1    | 1,33      | 500                            | 1,32 | 13              |
| CU_AP_TE80  | 80               | 35,5           | 104,2   | 1,22      | 5966                           | 1,05 | 160             |
| CU3_AS_TE50 | 80               | 35,5           | 99,76   | 1,30      | 730                            | 1,28 | 20              |

A fase de ensaios não drenados teve por objetivo alcançar liquefação total da amostra, tanto para a amostra arenosa quanto para amostra com parcela de finos. Inicialmente foram ensaiados corpos de prova de areia pura (Figura 7). Os resultados obtidos demonstram que somente a amostra CU-AP-TE30 (Tabela 3), amostra essa puramente arenosa, ensaiada para uma tensão efetiva de 30kPa apresenta perda total de resistência (Figura 7a), com seu gráfico de trajetória de tensões ( $p'$  vs  $q$ ) se encaminhando de encontro a origem, apresentando a liquefação completa como descrito por Carrera et al. (2011). A amostra CU-AP-TE77 (Tabela 3), também puramente arenosa e ensaiada para uma tensão de 77kPa apresenta comportamento similar inicialmente, porém observa-se que a tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) se recupera e apresenta novamente aumento do seu valor, caracterizando o fenômeno de liquefação limitada. As outras amostras não apresentam liquefação se encaminhando somente para linha de ruptura representado pela linha tracejada, e apresentando ganho de resistência (Figura 7c).

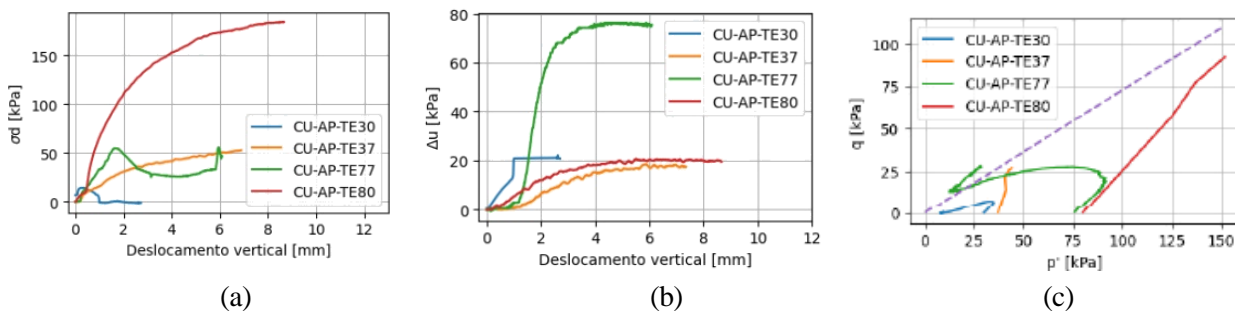


Figura 7. Ensaio triaxial não drenado para diversas tensões em solo puramente arenoso.

Posteriormente foram ensaiados os corpos de prova com adição de silte (Figura 8), com o objetivo de entender a contribuição da parcela de finos ao material puramente arenoso. Após diversos ensaios pode-se concluir que nenhum dos corpos de prova apresentaram liquefação completa de seu material.

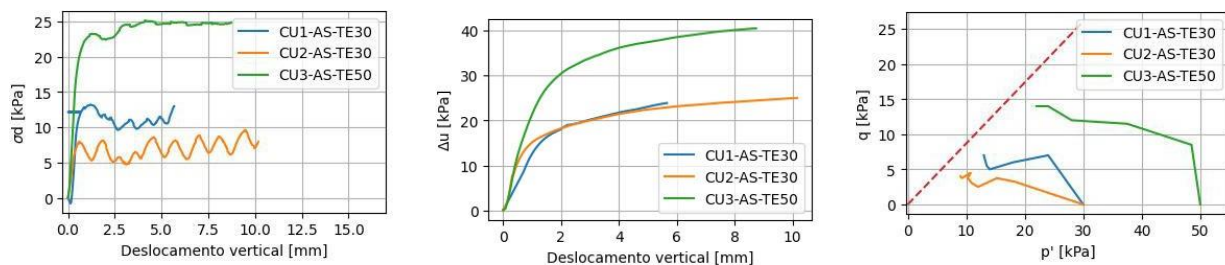


Figura 8. Ensaio Triaxial Não Drenado para Diversas Tensões em solo arenoso com 10% de finos.

Com base nos resultados apresentados foi possível concluir que as linhas de estado crítico para areais puras e para areias com parcelas de finos tem comportamentos diferentes, afetando assim diretamente na sua suscetibilidade à liquefação. A linha de estados críticos para areias, tracejada azul e para areia com adição de finos, tracejada laranja, demonstram a relação índice de vazios ( $e$ ) vs  $p'$  para as amostras ensaiadas (Figura 9).

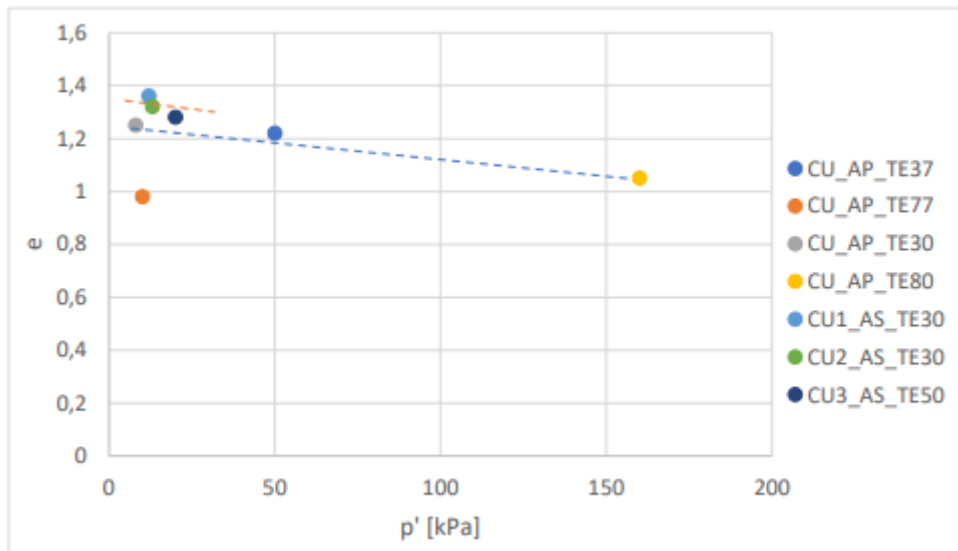


Figura 9. Linha de estado crítico para areias puras e com adição de silte.

#### 4 CONCLUSÕES

Conforme destacado na literatura técnica, o teor de finos nos materiais não é considerado uma variável decisiva para desencadear o fenômeno de liquefação, o que foi corroborado pelos resultados obtidos neste estudo. No entanto, não foi possível estabelecer uma correlação direta entre esse teor e a suscetibilidade à liquefação do material estudado. É essencial ressaltar que a presença de finos pode influenciar significativamente a efetivação desse fenômeno, especialmente no que diz respeito à capacidade de dissipação das poropressões geradas durante os carregamentos cíclicos. De fato, os finos tendem a reduzir as taxas de dissipação das poropressões induzidas, o que pode aumentar o risco de liquefação em certos contextos geotécnicos.

Além disso, é importante considerar que amostras com uma quantidade reduzida de partículas finas geralmente exibem maior condutividade hidráulica. Isso não apenas facilita a permeabilidade do material, mas também pode contribuir para uma dissipação mais eficiente das poropressões geradas por carregamentos dinâmicos, diminuindo assim a probabilidade de ocorrência de liquefação. Portanto, entender como a distribuição e o comportamento dos finos afetam a resposta geotécnica dos materiais é crucial para avaliar e mitigar os riscos associados à liquefação em estruturas e obras geotécnicas.

Com base nos resultados apresentados foi possível concluir que as linhas de estado crítico para areias puras e para areias com parcelas de finos tem comportamentos diferentes, afetando assim diretamente na sua suscetibilidade à liquefação.

Ensaios foram realizados, como demonstrado (Figura 9), para areias puras e com adição de silte, e como resultado obtiveram-se liquefação limitada e liquefação completa para amostras com baixa densidade relativa puramente arenosas, enquanto para amostras compostas de areia com finos não foi possível alcançar o mesmo fenômeno.

Assim conclui-se que a adição de 10% de finos, como apresentado na presente pesquisa, em uma amostra arenosa não contribuiu com o aumento da sua tendência a se liquefazer. Para um melhor entendimento de como o silte pode contribuir com esse potencial é aconselhável testar outros métodos de moldagem para um intervalo maior de amostras, com densidades relativas e tensões efetivas diferentes.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e a Universidade Pontifícia Católica (PUC RIO), bem como a todos professores e orientadores que possibilitaram a presente pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, E. J. A. Estudo das Condições de Liquefação da Areia de Coimbra em Triaxial Estático e Cíclico. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.
- AMANDA FUCCIO. Liquefação dos solos: um dos grandes responsáveis pelo rompimento de barragens de rejeito. Disponível em: <<https://www.minasjr.com.br/liquefacao-dos-solos-rompimento-de-barragens/>>. Acesso em: 05/01/2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, NBR. 7181: 2016 Análise Granulométrica. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR, ABNT. NBR 16840. Solo—Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 2020.
- CORREIA, ARTHUR AMARAL et al. Determinação do potencial de liquefação estática de uma areia fina. 2020.
- CARRERA, A.; COOP, M.; LANCELLOTTA, R. Influence of grading on the mechanical behaviour of Stava tailings. Géotechnique, v. 61, n. 11, p. 935-946, nov/2011.
- HEAD, K. H. Manual of soil laboratory test. London: Pentech Press, 1986.
- JEFFERIES, M.; BEEN, K. Soil Liquefaction - A Critical State Approach. Florida: CRC Press, 2016.
- KRAMER, S. L.; SIDERAS, S. S.; GREENFIELD, M. W. The timing of liquefaction and its utility in liquefaction hazard evaluation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 91, p. 133-146, 2016.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V.; Soil mechanics. John Wiley & Sons, Inc. Editorial, New York, 1969. p. 29-39.
- PEREIRA, E. L. Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- SLADEN, J.A.; D'HOLLANDER, R.D. & KRAHN, J. The liquefaction of sands, a collapse surface approach. Canadian Geotechnical Journal, 22, 1985, p. 564-578
- TSUCHIDA, H. Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits. In: Abstract of the seminar in the Port and Harbor Research Institute. 1970. p. 31-333.