

## Avaliação do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Ferrocromo

Guilherme Henrique da Silva Pinto

Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima – MG, Brasil

[guilherme.henrique@pimentadeavila.com.br](mailto:guilherme.henrique@pimentadeavila.com.br)

Luana Alves do Carmo

Engenheira Geotécnica, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima – MG, Brasil

[luana.alves@pimentadeavila.com.br](mailto:luana.alves@pimentadeavila.com.br)

André de Oliveira Faria

Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima – MG, Brasil

[andre.faria@pimentadeavila.com.br](mailto:andre.faria@pimentadeavila.com.br)

Mauro Pio dos Santos Junior

Coordenador de Geotecnia, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima – MG, Brasil

[mauro.junior@pimentadeavila.com.br](mailto:mauro.junior@pimentadeavila.com.br)

**RESUMO:** As recentes rupturas de barragens de mineração no Brasil, como a Barragem de Fundão em 2015 e Barragem B1 em 2019, ilustram a importância da avaliação do potencial de liquefação. Dessa forma, este artigo propõe a avaliação do fenômeno em rejeitos de ferrocromo por meio de ensaios de CPTu e ensaios de caracterização de laboratório. No que tange aos ensaios de campo, a suscetibilidade à liquefação foi avaliada utilizando ensaios de CPTu através: i) do parâmetro alfa ( $\alpha$ ) adaptado de Shuttle & Cuning (2008); ii) do parâmetro de estado ( $\psi$ ) por Robertson (2010); iii) da resistência de ponta normalizada ( $Q_{tncs}$ ), bem como o parâmetro Contrátil Dilatante (CD), propostos por Robertson (2016, 2022); e iv) pela razão de pré-adensamento do material (*Yield Stress Ratio*) por Mayne e Sharp (2019). Já para os ensaios de laboratório, foram coletadas amostras em profundidade próximas aos ensaios de piezocone, sendo aplicadas as metodologias baseadas em: i) caracterização granulométrica, segundo Ishihara *et al.* (1980) e Carneiro *et al.* (2021); e ii) plasticidade, segundo Andrews e Martin (2000) e Seed *et al.* (2003). Dentre os resultados obtidos, foi observado o potencial de liquefação dos rejeitos seja com base nos ensaios de campo ou nos ensaios de caracterização.

**PALAVRAS-CHAVE:** CPTu, Liquefação, Rejeitos, Ensaios de Caracterização de laboratório.

**ABSTRACT:** Recent mining dam failures in Brazil, such as the Fundão Dam in 2015 and B1 Dam in 2019, illustrate the importance of assessing liquefaction potential. Therefore, this article proposes the evaluation of the phenomenon in ferrochrome tailings through CPTu tests and laboratory characterization tests. Regarding field tests, susceptibility to liquefaction was evaluated using CPTu tests through: i) the alpha parameter ( $\alpha$ ) adapted from Shuttle & Cuning (2008); ii) the state parameter ( $\psi$ ) by Robertson (2010); iii) the normalized tip resistance ( $Q_{tncs}$ ), as well as the Contractile Dilatant (CD) parameter, proposed by Robertson (2016, 2022); and iv) by the material Yield Stress Ratio by Mayne e Sharp (2019). For the laboratory tests, samples were collected at a depth close to the piezocone tests, and methodologies based on: i) granulometric characterization, according to Ishihara *et al.* (1980) and Carneiro *et al.* (2021); and ii) plasticity, according to Andrews and Martin (2000) and Seed *et al.* (2003). Among the results obtained, the tailings potential for liquefaction was observed whether based on field tests or characterization tests.

**KEYWORDS:** CPTu, Liquefaction, Tailings, Laboratory characterization assessment

## 1 INTRODUÇÃO

A avaliação do potencial de liquefação é de grande importância no meio geotécnico, como destacado pelas rupturas recentes de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019. No contexto brasileiro, a avaliação do potencial de liquefação comumente é associada à condição estática. Dos Santos Junior (2021) explica que a liquefação pode ser definida como uma perda abrupta de resistência ao cisalhamento em condições não drenadas, experimentada por solos de comportamento arenoso a siltoso (de baixa plasticidade em geral), em condições saturadas ou com elevado grau de saturação. A redução da resistência ao cisalhamento é tal que a massa de solo flui, se espalhando até que a tensão cisalhante atuante no interior dessa massa se torne tão pequena que a mesma se torne compatível à resistência ao cisalhamento liquefeita do material.

Considerando o contexto minerário brasileiro, é comum a disposição hidráulica de rejeitos de mineração em barragens de contenção de rejeitos. Devido a tal processo, os materiais são lançados no interior da estrutura em suspensão e por meio aquoso, gerando depósitos em condição fofa e saturados (ou com elevado grau de saturação). Dessa forma, têm-se as condições básicas para a ocorrência do fenômeno de liquefação.

Tendo em vista a baixa plasticidade dos rejeitos, torna-se desafiador a obtenção de amostras representativas e de boa qualidade para a realização de ensaios triaxiais e avaliação direta do fenômeno em laboratório. Nesses casos, a avaliação do potencial de liquefação comumente é realizada com métodos baseados em ensaios de campo como o piezocone (CPTu) como os trabalhos de Dos Santos Junior *et al.*, 2022a, 2022b, Faria *et al.*, 2023 e ensaios de caracterização (granulometria e plasticidade).

Sendo assim, o presente artigo tem por objetivo avaliar o potencial de liquefação de um rejeito de ferrocromo disposto hidráulicamente em uma estrutura de contenção de rejeitos, considerando as metodologias de: i) do parâmetro alfa ( $\alpha$ ) adaptado de Shuttle e Cuning (2008); ii) do parâmetro de estado ( $\psi$ ) por Robertson (2010); iii) da resistência de ponta normalizada ( $Q_{incs}$ ), bem como o parâmetro Contrátil Dilatante (CD), propostos por Robertson (2016, 2022); e iv) pela razão de pré-adensamento do material (*Yield Stress Ratio*) por Mayne e Sharp (2019). Além disso, foram avaliadas também as metodologias baseadas em ensaios de caracterização do material, segundo: i) Ishihara *et al.* (1980) e Carneiro *et al.* (2021) para a caracterização granulométrica; e ii) Andrews e Martin (2000) e Seed *et al.* (2003) segundo a plasticidade dos rejeitos.

Como banco de dados foram realizados 7 ensaios de CPTu executados conforme a norma 22476-1 (ISO, 2022) distribuídos ao longo da estrutura. Além disso, nos mesmos furos nos quais foram realizados ensaios de CPTu, foram coletadas 20 amostras em profundidade para a execução de ensaios de granulometria e plasticidade conforme as normas americanas D422-63 (ASTM, 2007) e D4318-17 (ASTM, 2018).

## 2 METODOLOGIAS BASEADAS EM ENSAIOS DE CPTU

### 2.2 Dados Base do Ensaio de CPTu

Para a avaliação comportamental dos rejeitos, foram considerados os parâmetros base medidos pelo ensaio de CPTu ( $q_t$ ,  $f_s$  e  $u_2$ ), bem como a razão de atrito normalizada ( $F_R$ ) e o parâmetro normalizado de poropressão ( $B_q$ ). Tais parâmetros, calculados segundo as Equações 1 e 2, são recomendados por Robertson (2016) para avaliação comportamental devido à influência dos parâmetros base do cone pelo confinamento.

$$F_R = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \times 100\% \quad (1)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (2)$$

Para determinar a poropressão de equilíbrio do meio ( $u_{100\%}$ ) foram executados ensaios de dissipação de poropressão (DDP) em profundidade. A partir dos resultados obtidos nos ensaios de dissipação, foi observado que os rejeitos ficam abaixo do N.A. estimado e que o perfil de poropressão encontra-se similar a uma hidrostática. A Figura 1 apresenta exemplos de ensaios realizados de diferentes verticais.

As Figuras 1 e 2 apresentam a classificação comportamental dos rejeitos de ferrocromo considerando os comportamentos observados nos 7 ensaios realizados. Dessa forma, foram observados rejeitos com comportamento arenoso (*sand-like*) em verde, rejeitos de comportamento siltoso (*transicional*) em azul e em

vermelho o rejeito de comportamento argiloso (*clay-like*), segundo a classificação comportamental proposta por Robertson (2016), descrita em sequência. Como pode ser observado, o rejeito argiloso apresenta a menor resistência de ponta e a maior excesso poropressão e parâmetro  $B_q$  (comportamento típico de material argiloso). Já o rejeito arenoso se mostra com alta resistência de ponta e  $B_q$  igual a zero indicando que o material não gera excesso de poropressão significativo, sendo observado que o perfil de  $u_2$  coincide com as DDPs (poropressão de equilíbrio). Por fim o rejeito transicional apresenta resistência de ponta intermediária sem excessos significativos de poropressão.

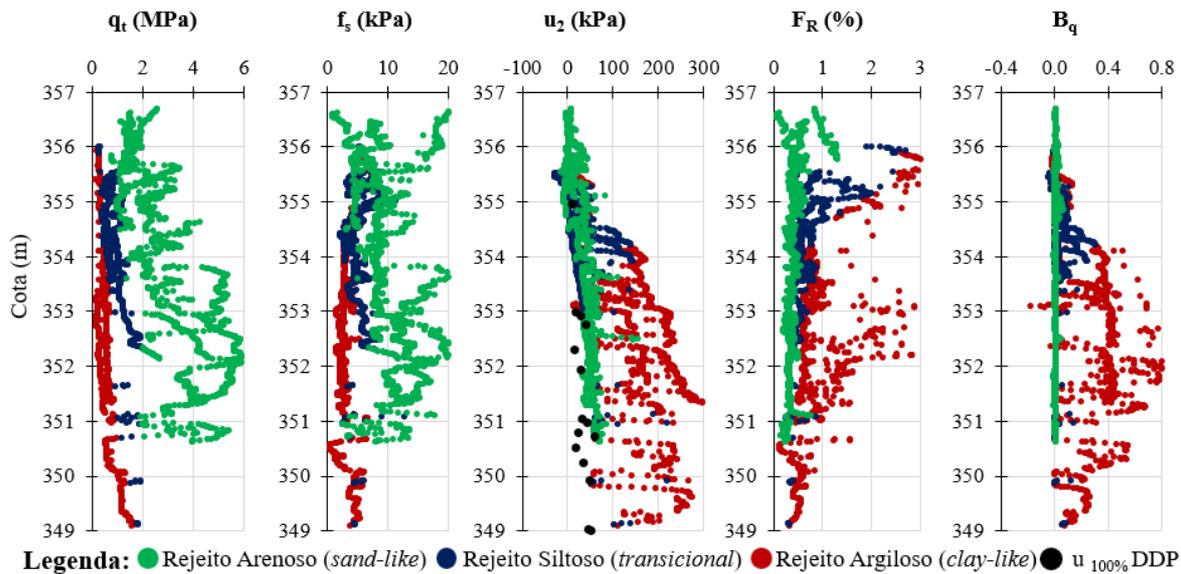


Figura 1. Parâmetros base e parâmetros normalizados obtido pelo ensaio de CPTu.

Além dos parâmetros base do cone, foi aplicada a metodologia proposta por Robertson (2016) para a avaliação comportamental. O autor propõe a utilização da resistência de ponta normalizada ( $Q_t$ ), a resistência de ponta normalizada pela pressão atmosférica ( $Q_{tn}$ ), o índice de comportamento ( $I_B$ ) e do parâmetro contrátil dilatante (CD) para classificação de geomateriais quanto ao comportamento e resposta ao cisalhamento. Dessa forma, é sugerido pelo autor que solos com comportamento arenoso (*sand-like*) apresentem parâmetro  $I_B$  maior que 32, solos de comportamento siltoso (*transitional*) apresentem valores de  $I_B$  entre 22 e 32, e solos de comportamento argiloso (*clay-like*) apresentem valores de  $I_B$  menor que 22. Já a resposta ao cisalhamento pode ser observada pelo parâmetro CD, sendo valores menores que 70 um indicativo de comportamento contrátil e valores superiores a 70 um comportamento dilatante. Tal critério foi determinado a partir do parâmetro de estado igual a -0,05 ( $\psi = -0,05$ ) para materiais de comportamento arenoso e OCR igual a 4 para materiais de comportamento argiloso. Os parâmetros supracitados são calculados segundo as Equações 3 a 8 abaixo.

$$Q_t = \left( \frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \right) \quad (3)$$

$$Q_{tn} = \left( \frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \right) \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (4)$$

$$n = 0,381I_c + 0,05 \left( \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right) - 0,15 \leq 1 \quad (5)$$

$$I_c = \sqrt{[(3,47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1,22)^2]} \quad (6)$$

$$I_B = 100 \frac{Q_{tn} + 10}{Q_{tn} \cdot F_r + 70} \quad (7)$$

$$CD = 70 = (Q_{tn} - 11)(1 + 0,06F_r)^{17} \quad (8)$$

O resultado da classificação comportamental é apresentado na Figura 2, sendo diferenciado os três tipos comportamentais dos rejeito de ferrocromo observados. Como pode ser notado, independente da classificação

comportamental, todos os rejeitos apresentam comportamento majoritariamente contrátil, com valores do parâmetro CD menores que 70, seja para a fração de comportamento arenoso ou de comportamento argiloso.

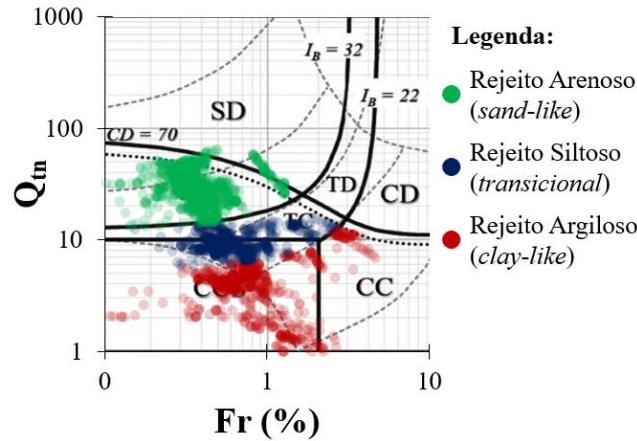


Figura 2. Ábaco de Classificação Comportamental Proposto por Robertson (2016).

## 2.2 Avaliação do Potencial de Liquefação por ensaio de CPTu

### 2.2.1 Shuttle e Cuning (2008)

Shuttle e Cuning (2008) apresentaram no seu trabalho uma envoltória para classificação comportamental ao cisalhamento, a partir de simulações em elementos finitos utilizando a metodologia de expansão da cavidade e o modelo *Norsand* para determinar o parâmetro de estado de um rejeito siltoso contrátil (*Rose Creek Tailings*). Valores abaixo da envoltória apresentariam um comportamento contrátil e valores acima o comportamento dilatante. Tendo em vista que os autores não apresentam no trabalho original a equação proposta, foi utilizado como referência o trabalho de Dos Santos Junior (2021) para a avaliação da metodologia. Dessa forma, é apresentado no trabalho do autor o parâmetro alfa ( $\alpha$ ) o qual calcula a distância entre o ponto analisado e a envoltória. Sendo assim, valores positivos de  $\alpha$  indicam que o contorno está acima do ponto analisado e dessa forma, o material apresentaria comportamento contrátil (i.e. possivelmente suscetível à liquefação). O parâmetro  $\alpha$  e o contorno podem ser calculados segundo a Equação 9.

$$\alpha = 2,35 + \frac{93,15}{\left(1 + \left(\frac{F_R}{25,40}\right)^{0,634}\right)^{9,93}} - [Q_t(1 - B_q) + 1] \quad (9)$$

### 2.2.3 Robertson (2010)

Uma das formas de determinar o potencial de liquefação segundo Robertson (2010) seria a avaliação do parâmetro de estado ( $\psi$ ). Para valores maiores que 0,05 ( $\psi > -0,05$ ) o material apresentaria comportamento contrátil (redução do índice de vazios até o estado crítico) e dessa forma seria potencialmente suscetível à liquefação. Tal parâmetro pode ser calculado segundo a Equação 10. O cálculo do parâmetro  $Q_{tncs}$  é descrito em sequência.

$$\psi = 0,56 - 0,33 \log_{10}(Q_{tncs}) \quad (10)$$

### 2.2.2 Robertson (2016, 2022)

A avaliação do potencial de liquefação também pode ser realizada por meio do parâmetro  $Q_{tncs}$  (*clean equivalent cone resistance*). Para valores de  $Q_{tncs}$  menores que 70 os materiais de comportamento arenoso a transicional apresentaria comportamento contrátil ao cisalhamento e assim, classificados como suscetíveis a liquefação. Para calcular tal parâmetro, Robertson (2022) propõe as Equações 11 e 12 apresentadas abaixo, sendo a Equação 12 a proposta de atualização do parâmetro  $K_c$  pelo autor, válido apenas para  $I_c < 3,0$ .

$$Q_{tncs} = K_c Q_{tn} \quad (11)$$

$$K_c = 1,8346I_c^5 + 23,673I_c^4 + 124,02I_c^3 - 320,616I_c^2 + 405,821I_c - 199,97 \quad (12)$$

### 2.2.2 Mayne e Sharp (2019)

Para a avaliação do potencial de liquefação, Mayne e Sharp (2019) utilizam o conceito de *Yield Stress Ratio* (YSR). Para valores de YSR acima do limite crítico (YSR<sub>CSL</sub>) seria observado um comportamento dilatante ao cisalhamento (i.e. não suscetível à liquefação) e valores inferiores ao contorno um comportamento contrátil e possivelmente suscetível à liquefação. A determinação dos valores do YSR pode ser obtida pelas Equações 13 e 14. Já a avaliação do contorno pode ser realizada por meio da Equação 15, sendo os ângulos de atrito de pico calculados segundo a Equação 16, aplicável para solos argilosos a transicionais e a Equação 17 aplicável para materiais de comportamento arenoso (Mayne e Sharp 2019).

$$YSR = 0,33 \left( \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right)^m \quad (13)$$

$$m = 1 - \frac{0,28}{\left( 1 + \left( \frac{I_c}{2,6} \right)^{25} \right)} \quad (14)$$

$$YSR_{CSL} = \left( \frac{2}{\cos \phi'} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (15)$$

$$\phi' = 29,5 B_q^{0,121} [0,256 + 0,366 B_q + \log Q_t] \quad (16)$$

$$\phi' = 17,6 + 11 \log(Q_{tn}) \quad (17)$$

### 2.2.4 Resultados Obtidos

A Figura 3 apresenta a avaliação do potencial de liquefação do rejeito de comportamento arenoso aplicando as metodologias supracitadas. Como pode ser observado, apenas a metodologia proposta por Mayne e Sharp (2019) indicou um comportamento dilatante. As demais metodologias apresentaram o comportamento contrátil do material. Possivelmente, a divergência da metodologia pode estar associada a alta resistência de ponta do material que elevam os valores do YSR (Equação 13), visto que o valor do contorno encontra-se próximo ao valor esperado conforme indicado pelos autores (YSR<sub>CSL</sub> ≈ 3,0).

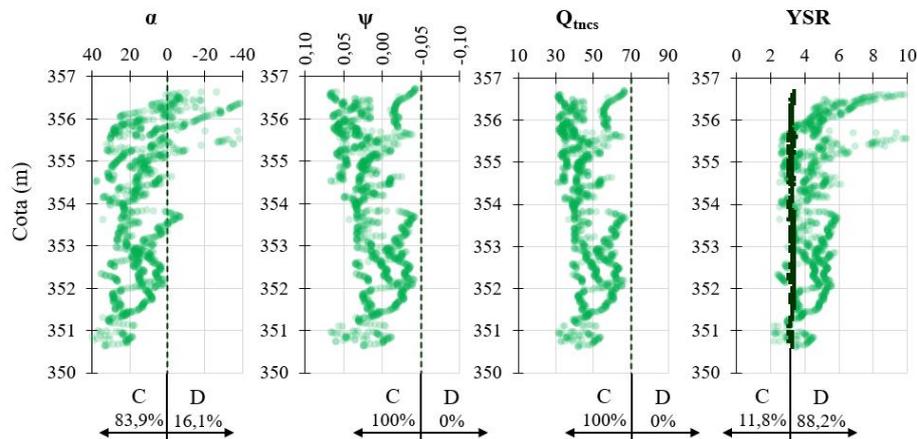


Figura 3. Avaliação do Potencial de Liquefação do Rejeito de Comportamento Arenoso.

Já a Figura 4 apresenta a avaliação do potencial de liquefação do rejeito de comportamento transicional em profundidade. Avaliando o percentual majoritário, todas as metodologias indicam que o litotipo apresenta comportamento contrátil ao cisalhamento e, dessa forma, conclui-se que o material seria potencialmente suscetível à liquefação, tendo em vista que os rejeitos encontram-se abaixo do N.A. (i.e. saturados).

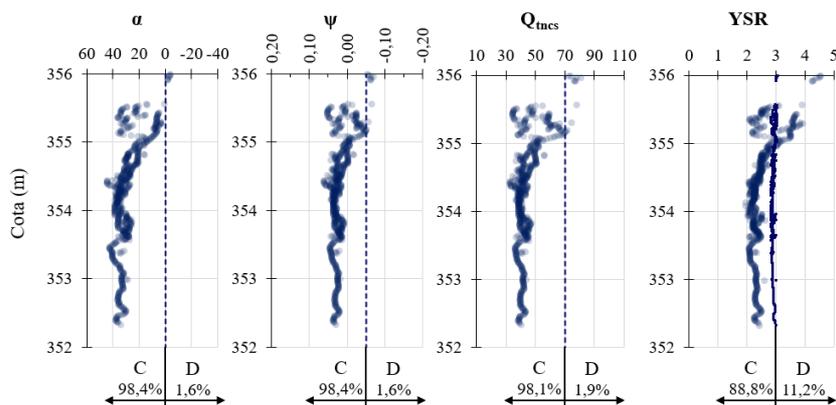


Figura 4. Avaliação do Potencial de Liquefação do Rejeito de Comportamento Transicional.

Por fim, a Figura 5 apresenta a avaliação do potencial de liquefação do rejeito de comportamento argiloso. Nota-se que de forma similar ao rejeito de comportamento transicional, o rejeito *clay-like* apresenta comportamento contrátil ao cisalhamento e dessa forma, suscetível à liquefação. Cabe destacar que devido a limitação apresentada por Robertson (2022) para o parâmetro  $K_c$  para valores de  $I_c$  menores que 3,0, foram obtidos poucos pontos para o  $Q_{tncs}$  e para o parâmetro de estado ( $\psi$ ).

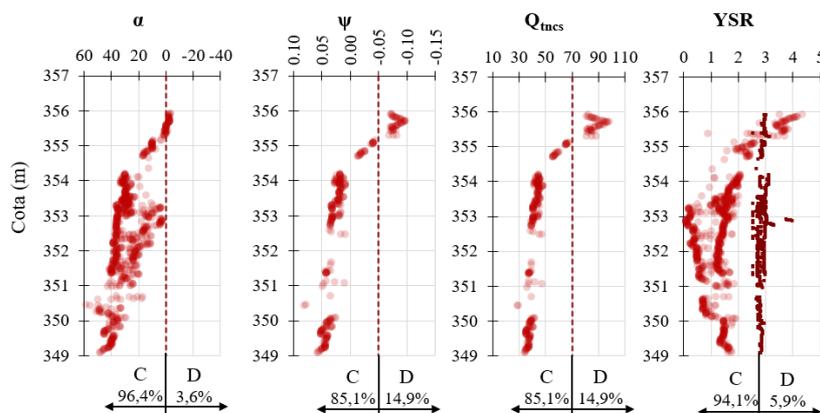


Figura 5. Avaliação do Potencial de Liquefação do Rejeito de Comportamento Argiloso.

### 3 METODOLOGIAS BASEADAS EM ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Em complemento aos ensaios de campo, também foram realizados ensaios de caracterização em profundidade para a avaliação da distribuição granulométrica e plasticidade. As amostras foram coletadas em profundidade em locais próximos aos ensaios de CPTu, sendo os resultados agrupados conforme a classificação comportamental apresentada anteriormente. Em complemento, foram realizados ensaios para a determinação da massa específica dos grãos conforme a norma D792-20 (ASTM, 2020), sendo obtido um valor médio geral (independentemente do tipo de rejeito) de  $\rho_s$  de 2,823 g/cm<sup>3</sup> sem dispersão significativa.

#### 3.1 Ensaios de Granulometria

As avaliações do potencial de liquefação por ensaios de granulometria foram realizadas a partir das metodologias de Ishihara *et al.* (1980) e Carneiro (2021), ambas desenvolvidas para rejeitos de mineração. Para determinar o potencial de ocorrência do fenômeno, os autores propõem intervalos de ocorrência e comparam com as curvas granulométricas obtidas a partir dos ensaios de laboratório.

A Figura 6a e Figura 6b apresentam os resultados obtidos, considerando as metodologias supracitadas para os três comportamentos dos rejeitos. Como pode ser observado, as curvas granulométricas dos três rejeitos se enquadraram em ambos os limites propostos por Ishihara *et al.* (1980) e Carneiro (2021). Desta forma, pela análise granulométrica, as amostras ensaiadas dos rejeitos apresentaram suscetibilidade à liquefação, independentemente do tipo de comportamento do material.

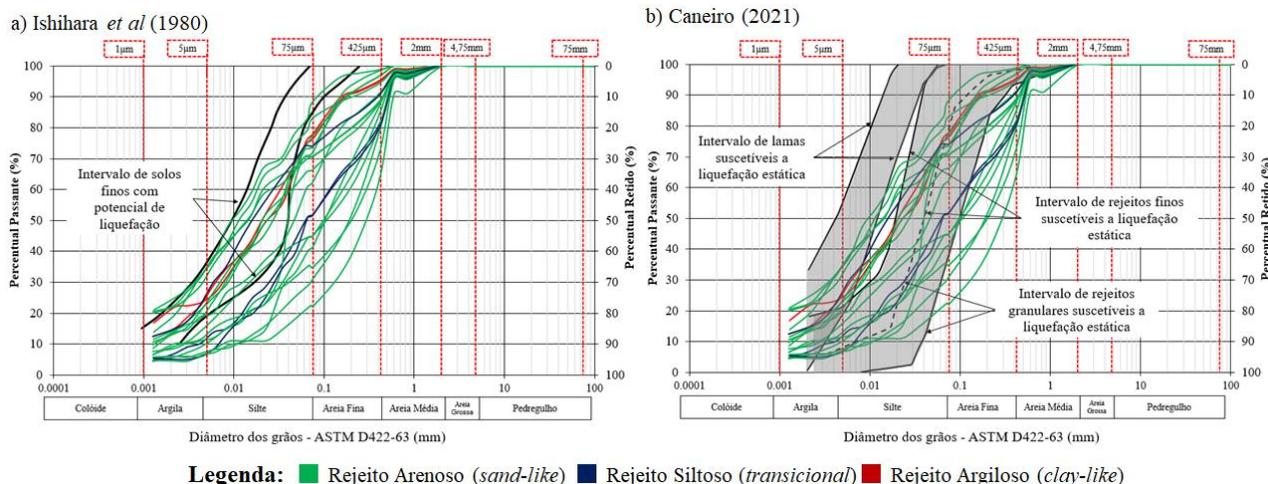


Figura 6. Avaliação do Potencial de Liquefação por Curvas Granulométricas: a) Ishihara *et al* (1980); e b) Carneiro (2021).

### 3.2 Ensaios de Plasticidade

As avaliações do potencial de liquefação a partir dos limites de consistência foram realizadas conforme as metodologias propostas por Andrews e Martin (2000) e Seed *et al.* (2003). De forma geral, os autores avaliaram a suscetibilidade à liquefação dinâmica para amostras com diferentes valores de limites de consistência, diferentes frações de finos e combinações dos dados medidos.

A partir das metodologias citadas, é apresentado na Figura 7 o resultado obtido. Como pode ser observado, a grande maioria dos dados indica o potencial de liquefação, independentemente do tipo comportamental de rejeito analisado. Além disso, 7 amostras do total de 20 ensaios indicaram o comportamento Não Líquido (NL), Não Plástico (NP), corroborando com a hipótese do potencial de liquefação devido a baixa plasticidade dos rejeitos de ferrocromo aqui estudados.

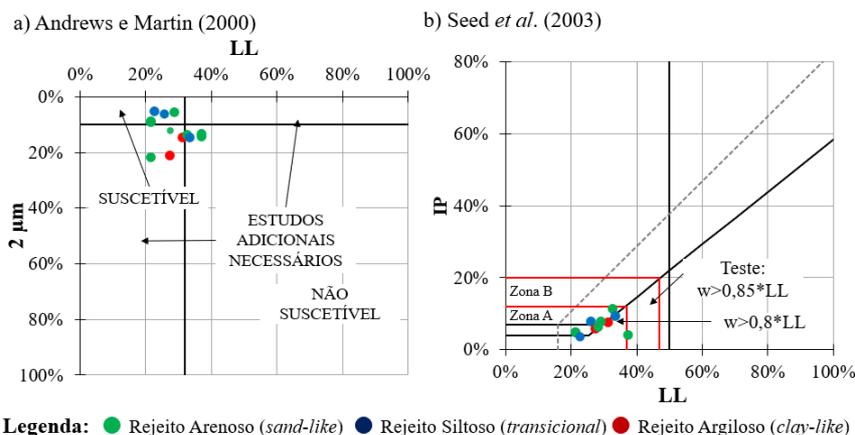


Figura 7. Avaliação do Potencial de Liquefação por Ensaios de Plasticidade e granulometria: a) Andrews e Martin (2000); e b) Seed *et al.* (2003).

## 4 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a aplicação de diferentes metodologias para a avaliação do potencial de liquefação por meio de ensaio de piezocone e ensaios de caracterização. A aplicação de tais metodologias, apesar de serem consideradas como análises iniciais, são úteis em situações em que a obtenção de amostras indeformadas de boa qualidade para a realização de ensaios triaxiais é dificultada, como a condição do rejeito de ferrocromo aqui estudado.

Conforme discutido, a aplicação das metodologias indicou a suscetibilidade da liquefação para o rejeito de ferrocromo, seja pelo ensaio de CPTu pela maioria das metodologias analisadas, independente do

comportamento observado (*sand-like*, *transicional* ou *clay-like*), sendo corroborado pelos ensaios de laboratório. Vale ressaltar que as metodologias utilizadas neste artigo são ferramentas de triagem inicial (*screening tools*) para avaliar a suscetibilidade à liquefação, as quais por si só não são suficientes para determinar se os rejeitos em avaliação apresentam comportamento de amolecimento (*strain-softening*) e fragilidade sob o cisalhamento não drenado, condições as quais são essenciais para a conclusão sobre a suscetibilidade do fenômeno. Tal condição pode ser avaliada apenas por ensaios triaxiais em amostras indeformadas e representativas do material em avaliação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Pimenta de Ávila pelo apoio e incentivo na elaboração deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrews, D. C. e Martin, G. R. (2000). Criteria for liquefaction of silty soils. In Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering. Upper Hutt, New Zealand: NZ Soc. for EQ Engrg
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2007). D422-63: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2018). D4318-17e1: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2020). D792-20: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.
- Carneiro, J. (2021). Characterization and behaviour of iron ore tailings: the effect of compaction and stresses. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa.
- Dos Santos Junior, M. (2021) Avaliação da Susceptibilidade à Liquefação Estática de um Rejeito Silto-Arenoso com Base em Ensaio CPTu. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).
- Dos Santos Junior, M. P., A. O. Faria, M. V. L. Dias, and F. B. Dias. (2022a) “Evaluation of flow liquefaction susceptibility and liquefied strength – a case study”, In: Tailings and Mine Waste 2022, Denver, USA, pp. 274–285.
- Dos Santos Junior, M. P., R. César Gomes, S. G. Silva Ribeiro, and B. G. Delgado. (2022b) “Evaluation of flow liquefaction susceptibility of a sandy-silt tailings using the CPTu”, In: Cone Penetration Testing 2022, Bologna, Italy, 2022, pp. 913–919. <https://doi.org/10.1201/9781003308829-136>
- Faria, A. O., J. J. V. Carneiro, M. P. dos Santos Junior, and L. V. O. Costa. (2023) “Evaluation of the susceptibility to flow liquefaction of a bauxite tailings”, In: Tailings 2023, Santiago, Chile, 2023, pp. 1–9.
- International Organization for Standardization - ISO 22476-1. (2022): Geotechnical investigation and testing — Field testing — Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.
- Ishihara, K., Troncoso, J., Kawase, Y. e Takahashi, Y. (1980). Cyclic strength characteristics of tailings materials. *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 20 (4), p. 127-142.
- Mayne, P. W., & Sharp, J. (2019). CPT approach to evaluating flow liquefaction using yield stress ratio.
- Robertson, P. K. (2010). Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(6), 842-853.
- Robertson, P.K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — An update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12): 1910–1927. doi:10.1139/cgj-2016-0044
- Robertson, P. K. (2022). Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test: An update. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(4), 620-624.
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., & Faris, A. (2003). *Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework*. In Proceedings of the 26<sup>th</sup> Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA.
- Shuttle, D.A. & Cunning, J. (2008). Reply to the discussion by Robertson on “Liquefaction potential of silts from CPTu.” *Canadian Geotechnical Journal*, 45(1): 142–145. doi:10.1139/T07-119