DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/18

Avaliação da suscetibilidade a liquefação de rejeitos de minério de ferro baseado em CPTu

Maurício José Azevedo Pinto dos Santos
Professor e Mestre em Geotecnia, IFF, Rio de Janeiro, Brasil, mauriciojaps@hotmail.com

Brooke Ashley de Souza Batista
Engenheira Civil, Centro Universitário La Salle, Niterói, Rio de Janeiro, batistabrooke@live.com

RESUMO: O presente trabalho apresenta uma avaliação da suscetibilidade a liquefação de rejeitos de minério de ferro, depositados em um determinado reservatório de uma barragem, com base nos ensaios de piezocones (CPTu) realizados, e a partir das metodologias indicadas por Olson (2001), Robertson (2010) modificado por Jefferies e Been (2016) e Roberson (2016). A caracterização realizada em amostras desse rejeito mostra um material com porções silto arenosas e silto argilosas. Os resultados quanto a susceptibilidade a liquefação, utilizando as metodologias indicadas, apresentaram boa correlação entre em si, com trechos de comportamento contrátil bastante similares a partir da interpretação dos ensaios de campo.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de Rejeito, Rejeitos de Minério de Ferro, Ensaio de Piezocone, Liquefação.

ABSTRACT: This paper presents an evaluation of the liquefaction susceptibility of iron ore tailings, deposited within a particular dam reservoir, based on piezocone penetration tests (CPTu) performed, and from the methodologies indicated by Olson (2001), Robertson (2010) modified by Jefferies and Been (2016) and Robertson (2016). The soil characterization performed on the samples of these tailings shows a material composed of sandy silt and clayey silt. The liquefaction susceptibility results, obtained using the indicated methodologies, exhibited a strong correlation and showed fairly similar contractive behavior based on the interpretation of the field tests.

KEYWORDS: Tailings Dam, Iron Ore Tailings, Piezocone Penetration Test, Liquefaction.

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da liquefação está associado a perda de resistência abrupta do solo, que ocorre associado a uma variação volumétrica durante o cisalhamento, sendo aspecto extremamente importante em obras ou estruturas que estejam assentadas sobre o material em que possa ter essa ocorrência. Esse fenômeno é provocado pela tendência do solo em se deformar, com redução de volume, durante o cisalhamento, provocando variação das poropressões positivas durante um determinado carregamento.

A liquefação ocorre quando a poropressão atinge valores elevados que se equipara à tensão total aplicada, fazendo com que a tensão efetiva tenda a um valor próximo de zero, levando o material a perder a sua resistência e a se comportar inteiramente como um fluido. Em outras palavras, a liquefação é um comportamento observado em materiais saturados ou próximos a saturação, que apresentam um comportamento de amolecimento durante o cisalhamento não drenado devido à sua tendência contrátil, sendo observado principalmente em areias e siltes arenosos.

No caso de depósitos de rejeitos de minérios, a avaliação quanto a susceptibilidade torna-se particularmente importante em virtude do processo de deposição desses materiais, que, em geral, geram depósitos de materiais com alta saturação e elevados índices de vazios. Esse contexto torna ainda mais relevante no caso de barragens com sistemas de alteamento que se apoiem sobre esse material, que é o caso de barragens com alteamentos por linha de centro ou alteamentos a montante.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

A avaliação do potencial de liquefação de um determinado material pode ser realizada por meio de metodologias que utilizam resultados de ensaios de campo e laboratório, obtendo as características físicas e condições do material, podendo-se definir o potencial de ocorrência da liquefação.

Na verificação quanto a suscetibilidade a liquefação de um certo material, a sua distribuição granulométrica, obtida nos ensaios de caracterização, pode sinalizar seu potencial de liquefação. Solos bem graduados mostram menor suscetibilidade, visto que apresentam melhor preenchimento dos vazios que resulta numa menor variação volumétrica, e com isso, menores poropressões geradas. Por outro lado, os depósitos de solos com granulometria mais uniforme tendem a ser mais suscetíveis à liquefação e representam a maioria dos casos históricos de ruptura por liquefação.

De acordo com Terzaghi et. al (1996), depósitos de solos não coesivos são suscetíveis à liquefação quando apresentam, basicamente, duas condições associadas importantes. A primeira condição ocorre quando o índice de vazios é alto o suficiente para que o cisalhamento do solo apresente um comportamento contrátil. A segunda condição ocorre quando a permeabilidade desse material é baixa o suficiente para que durante um carregamento, estático ou dinâmico, não ocorra a drenagem do depósito ou que a drenagem seja relativamente muito baixa, gerando excesso de poropressão.

Terzaghi et. al (1996) classifica rejeitos arenosos como altamente suscetíveis a liquefação, mesmo que estes apresentem porcentagem de finos maior que 5% passante na peneira n º 200, e desde que estes finos sejam compostos por materiais de características não plásticas. Com base na análise da granulometria, Tsuchida (1970), apud. Terzaghi et. al (1996), propôs curvas granulométricas para a avaliação do potencial de liquefação, como mostrado na Figura 1.

Além disso, os ensaios de campo têm sido amplamente utilizados para avaliar o potencial de liquefação devido à sua capacidade de avaliar as condições *in situ* do material em grandes profundidades, associado, também a dificuldade de retirada de amostras indeformadas desses materiais a determinadas profundidades. Os métodos como o de Olson (2001) e Robertson (2010) podem ser utilizados para a avaliação do potencial de liquefação a partir dos resultados dos ensaios de piezocone (CPTu) realizados em campo.

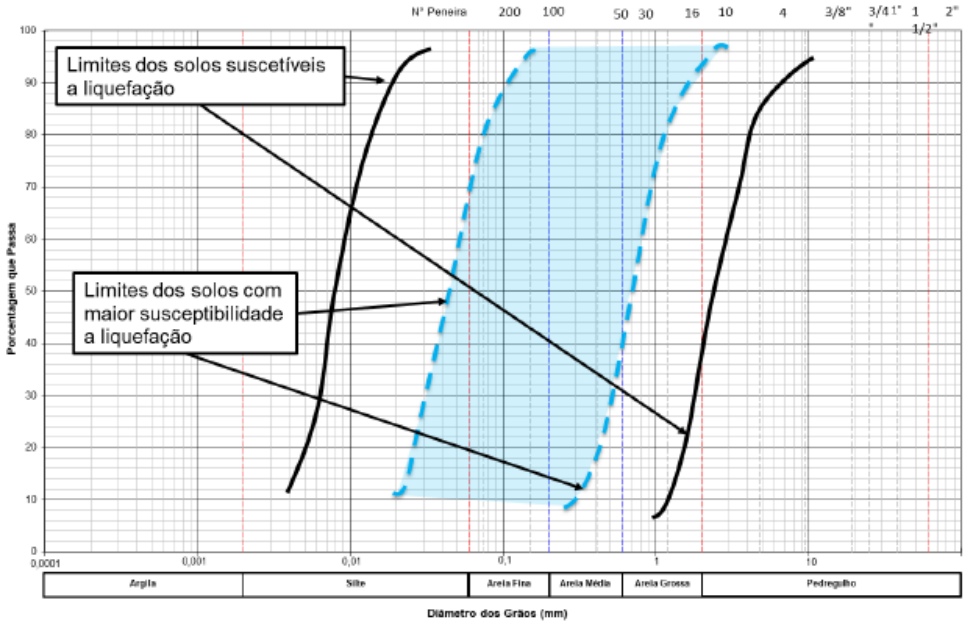


Figura 1 – Avaliacao do Potencial de Liquefacao – Metodo de Tsuchida (1970) apud. Terzaghi *et. al* (1996)

Olson (2001) propôs uma metodologia de análise do potencial de liquefação baseada na retro análise da ruptura de 33 casos cujo modo de falha atribuído foi de liquefação. O comportamento contrátil ou dilatante dos materiais é determinado por meio de correlações entre os parâmetros obtidos nos ensaios de cone (CPT) ou piezocone (CPTu). Olson (2001) propôs a aplicação da envoltória de Fear e Robertson (1995), que está mostrada na equação 1:

$$(\sigma'_{v0})_{ENV} = 1{,}1047.10^{-2}.q_{c1}^{4{,}7863} \quad (1)$$

Onde:
σ'_{v0} = tensão vertical efetiva dada em kPa
q_{c1} = resistência de ponta normalizada pela tensão vertical efetiva, dada em Mpa.

A resistência de ponta corrigida (q_{c1}) pode ser determinada com base na resistência de ponta medida durante a penetração da ponteira cônica (q_c) no ensaio CPT ou CPTU, conforme apresentado na equação 2. O termo C_q corresponde ao fator de correção do nível de tensões proposta por Seed et al. (1983) e está indicado na equação 3. Contudo, esse parâmetro é limitado ao valor de 2, conforme proposto por Olson (2001).

$$q_{c1} = q_c.C_q \quad (2)$$

$$C_q = \frac{1{,}8}{0{,}8+\frac{\sigma'_{v0}}{pa}} \quad (3)$$

A classificação do comportamento do material como contrátil ou dilatante pode ser feita através da comparação do parâmetro q_c, obtido no ensaio de cone, confrontando-se com a envoltória obtida por Fear e Robertson (1995) para o estado de tensões in situ. Quando o valor medido for menor do que o valor de q_{c1} da envoltória, o material é classificado como contrátil, sendo potencialmente susceptível a liquefação. Caso contrário, quando q_{c1} medido for maior que o otido na envoltória, o material é classificado como dilatante, não sendo, portanto, susceptível a liquefação.

Outro modo de se avaliar a susceptibilidade a liquefação é através do parâmetro de estado ψ, que é definido pela diferença entre o índice de vazios do solo in situ e o índice de vazios no estado crítico para uma mesma tensão efetiva média, conforme Equação 4. Jefferies e Been (2016) apresentam uma fronteira correspondente ao valor de ψ = -0,05. Valores superiores a essa fronteira indicam comportamento de

amolecimento e susceptibildiade a liqueção, enquanto valores inferores estão associados à materiais com comportamento dilatante, não susceptível a liquefação.

$$\psi = e_0 - e_{cs} \quad (4)$$

O parâmetro de estado pode ser obtido através de correlações com os dados de ensaios CPTu, como mostrado na Equação 5. Robertson (2010) definiu a correlação para a obtenção do parâmetro de estado (ψ) que faz relação com Qtn,cs (resistência de ponta normalizada corrigida).

$$\psi = 0{,}56 - 0{,}33\log\left(Q_{tn,cs}\right) \quad (5)$$

Ainda, a partir dos ensaios de piezocone, de acordo com a metodologia de Robertson (2016), a qual é baseada na classificação SBT ("*Soil Behaviour Type*") do solo, e é dada em função do seu comportamento mecânico durante a cravação da ponteira cônica. De posse da resistência de ponta normalizada (Q_{tn}) e da razão de atrito (Fr) é possível verificar sua suscetibilidade a liquefação por comparação com a classificação SBT de casos históricos em que ocorreram rupturas por liquefação.

Robertson (2016) propôs um diagrama separando os solos por comportamento contrátil e dilatante utilizando o limite CD = 70, como apresentado na Figura 2. A equação 4 representa o limite CD=70 que indica um contorno para diferenciar solos que são contrativos e dilatantes.

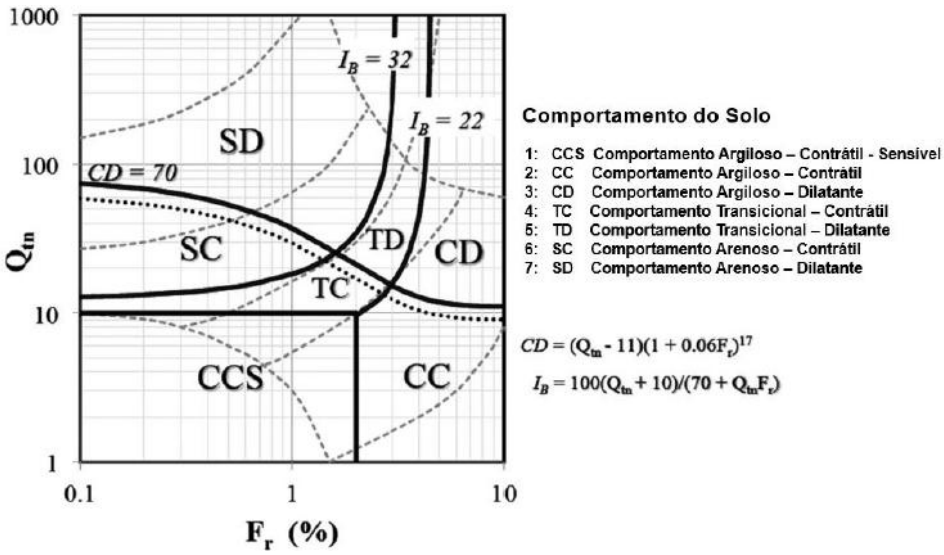


Figura 2 – Atualização do diagrama SBTn baseado em Q_t-F_r
Adaptado de Robertson (2016)

$$CD = 70 = (Q_{tn} - 11)(1 + 0.06 * F_r)^{16} \quad (4)$$

3 SUSCEPTIBILIDADE A LIQUEFAÇÃO

O presente trabalho trata de apresentar abordagens disponíveis na literatura técnica para a avaliação da suscetibilidade a liquefação de rejeitos de minério de ferro, depositados em um determinado reservatório de uma barragem, alteada por linha de centro. As metodologias consideradas inicialmente no presente estudo, com base nos ensaios de piezocones realizados, foram as indicadas por Olson (2001).

Com base em cinco ensaios de piezocone realizados no rejeito, e de acordo com a metodologia proposta por Olson (2001), o material é predominantemente contrátil, como apresentado na Figura 3. As cores indicam os cinco diferentes resultados de resistência de ponta medida durante a execução dos CPTUs ao longo da profundidade. As curvas do gráfico da esquerda da Figura 3 indicam os valores de q_{c1}, em MPa, para CPTUs dentro do reservatório, situados mais afatados da crista, enquanto o gráfico da direita da Figura 3 indicam os resultados obtidos para os ensaios realizados ainda no reservatório mas mais próximos da crista da barragem. Ambos ensaios apresentaram camadas de materiais predominantemente contráteis.

Posteriormente, avaliou-se o comportamento do material com relação a susceptibilidade à liquefação pelas metodologias propostas por Robertson (2010), modificado por Jefferies e Been (2016), e Robertson (2016), que também indicaram que o rejeito é predominantemente contrátil. As Figura 5 e Figura 5 apresentam as avaliações com relação a suscpetibilidade ao longo do perfil ensaiado a partir dos parâmetros de estado calculado propostos por Robertson (2010), modificado por Jefferies e Been (2016), e Robertson (2016), respectivamente.

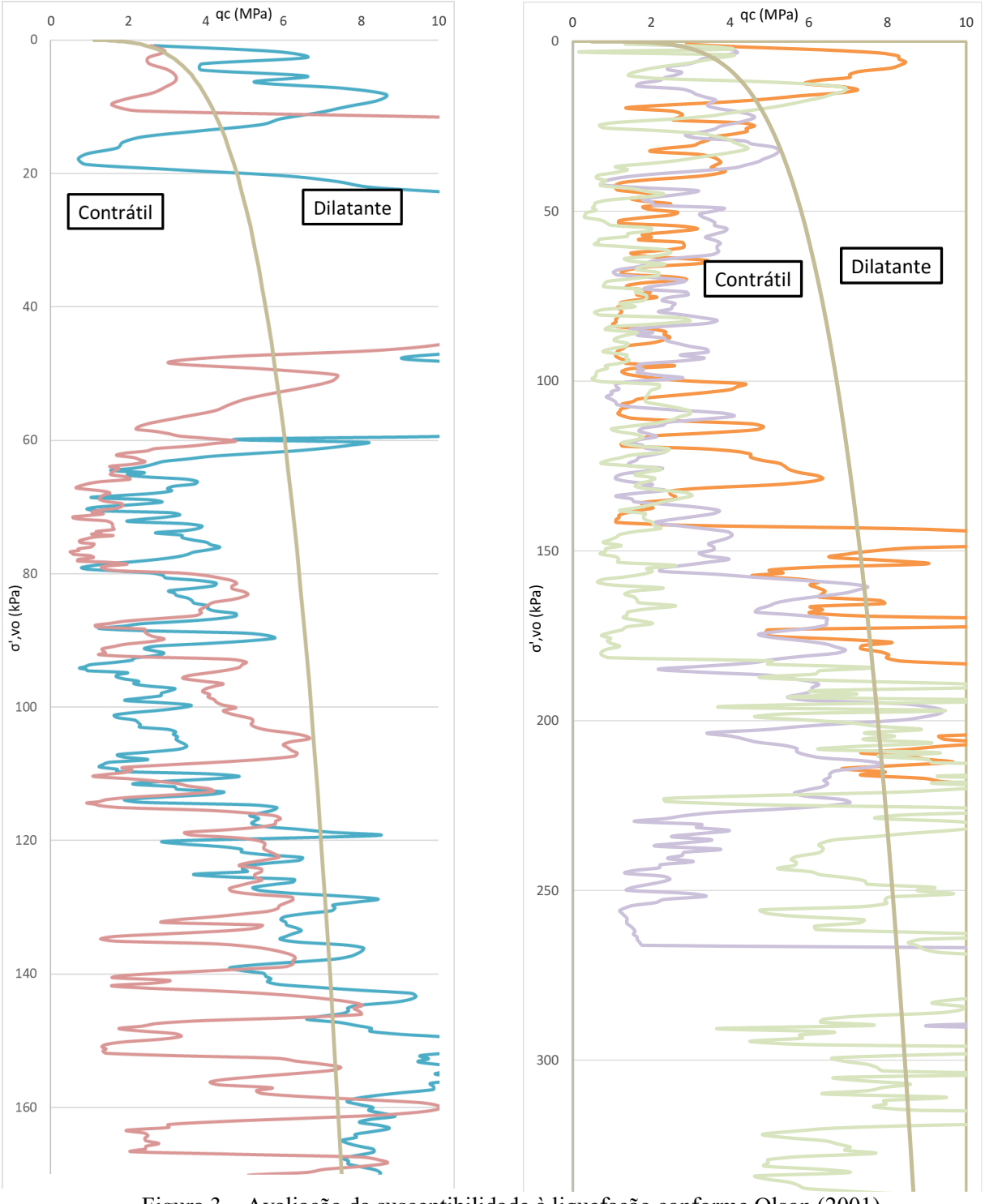


Figura 3 – Avaliação da susceptibilidade à liquefação conforme Olson (2001)

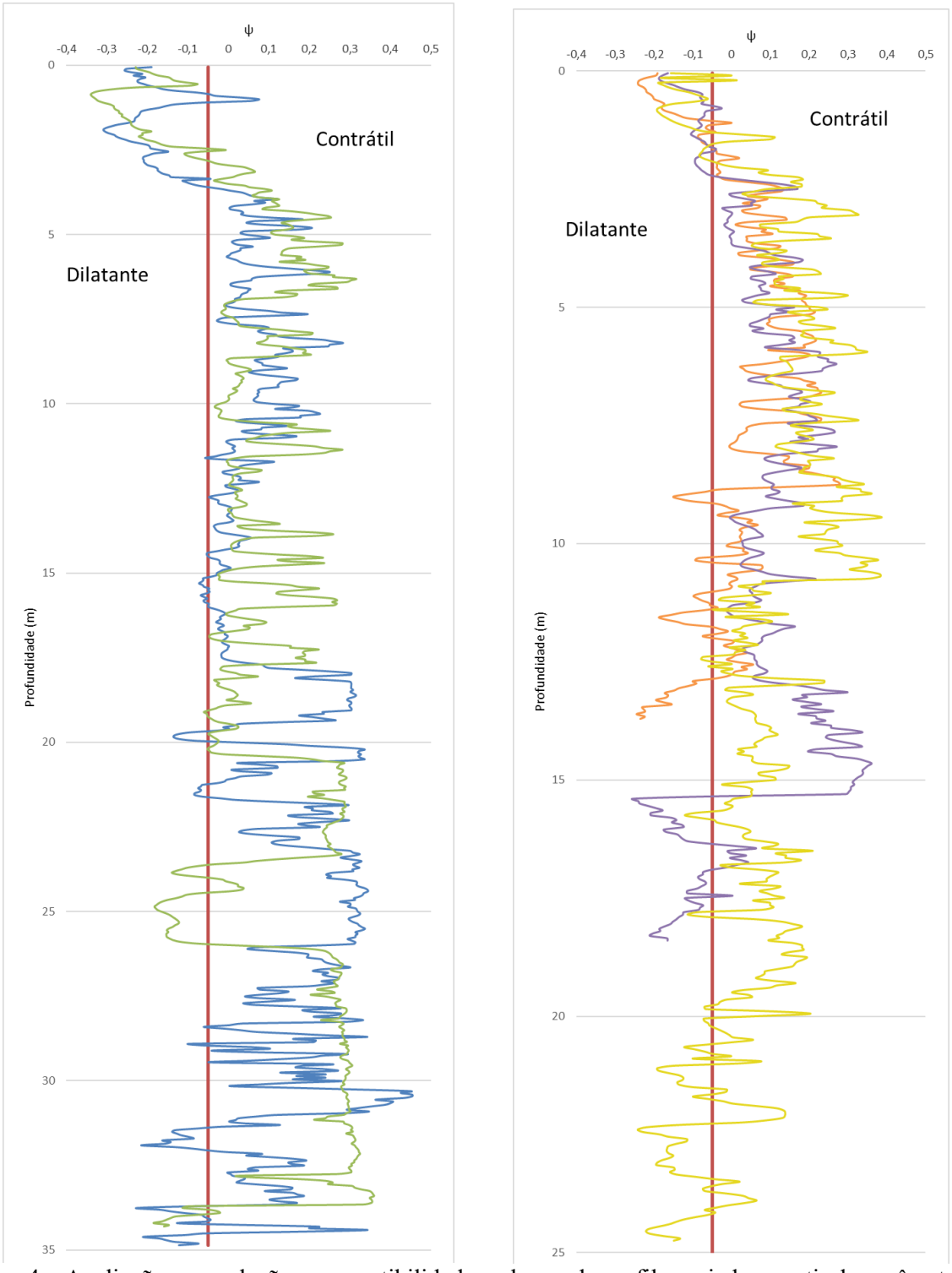


Figura 4 – Avaliação com relação a suscpetibilidade ao longo do perfil ensaiado a partir do parâmetro de estado calculado pelo método de Robertson (2010), modificado por Jefferies e Been (2016).

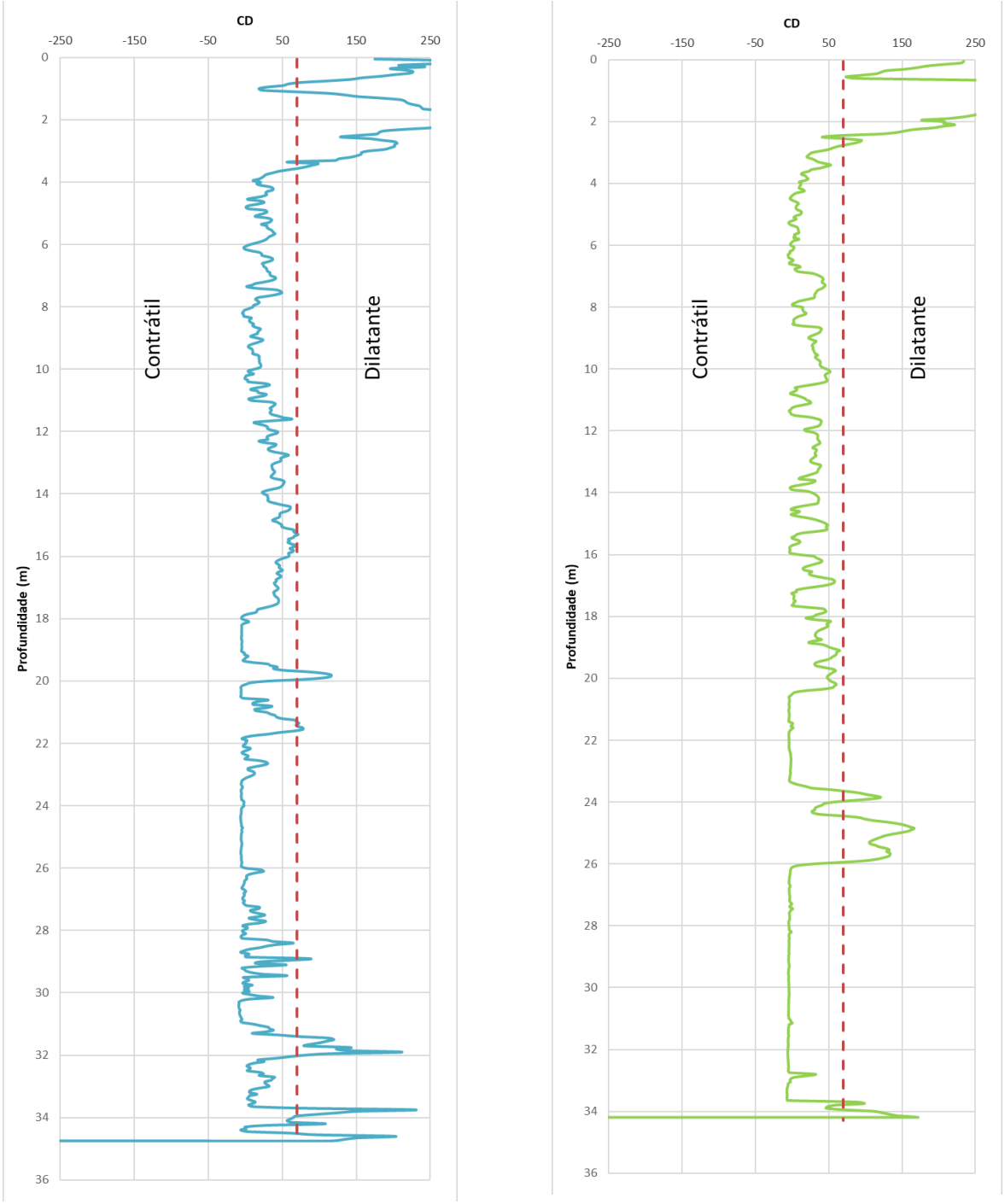


Figura 5 – Avaliação com relação a suscpetibilidade ao longo do perfil ensaiado a partir do parâmetro proposto por Robertson (2016)

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo apresentar a avaliação da susceptibilidade a liquefação de rejeitos de minério de ferro, depositados em um determinado reservatório de uma barragem, com base nos ensaios de piezocones (CPTu) realizados.

Os ensaios de caracterização realizados nas amostras coletadas desse rejeito sugerem a avaliação quanto ao potencial de liquefação dada a sua granulometria areno-siltosa. Com base nos ensaios de piezocone realizados no rejeito e a partir das metodologias indicadas por Olson (2001), Robertson (2010) modificado por Jefferies e Been (2016) e Roberston (2016), observa-se comportamento predominantemente contrátil, típico de material potencialmente liquefeito. Além disso, pode-se observar que os resultados quanto a susceptibilidade a liquefação pelas diferentes metodologias, baseadas nos CPTUs, apresentaram boa correlação entre em si, com trechos de comportamento contrátil bastante similares a partir da interpretação dos ensaios de campo, corroborando a indicação quanto ao potencial de liquefação.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a inclusão da avaliação quanto ao potencial de liquefação desse material a partir dos resultados de caracterização granulométrica disponíveis. Além disso, recomenda-se também a apresentação da obtenção da resistência não drenada de pico e a razão de resistência liquefeita por meio de diferentes metodologias técnicas disponíveis, especialmente incluindo o trabalho mais recente sobre o assunto de Robertson (2020).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FEAR, C.E., and ROBERTSON, P.K. 1995. Estimating the undrained strength of sand: a theoretical framework. Canadian Geotechnical Journal, 32(5), 859-870.

OLSON, S. M. (2001). “Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetrat.

JEFFERIES, M., and K. Been. 2016. *Soil Liquefaction: A Critical State Approach*.

ROBERTSON, P. K. (2010). “Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 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. https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044.

ROBERTSON, P. K. (2020). “Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using CPT – An Update.”

SEED, H. B and IDRISS, I. M (1983). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif., 134.

TERZAGHI, K., PECK, R.B., MESRI, G. (1996) – “Soil Mechanics in Engineering Practice” 3ª Edição, 516. New York, NY.

TSUCHIDA, H. (1970). “Evaluation of liquefaction potential of sandy deposits and measures against liquefaction induced damage.” Proceedings of the annual seminar of the Port and Harbour Research Institute. (3-1)-(3-33)