

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/491

Análise de Liquefação em Rejeito de Minério de Ferro Hidraulicamente Disposto

Rian Lucas Porto

Geólogo, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, rian.porto@tractebel.engie.com

Wanessa Silva

Engenheira Civil, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, wanessa.silva@tractebel.engie.com

Amadeu Venturin

Engenheiro Civil, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, amadeu.venturin@tractebel.engie.com

Marcio Fernandes Leão

Geólogo, Tractebel/UFV, Belo Horizonte, Brasil, marcio.leao@tractebel.engie.com

RESUMO: Investigações com piezocone em solos naturais já ocorrem desde o século passado e suas correlações são amplamente conhecidas. Com o uso crescente de CPTu para determinar comportamentos de rejeitos oriundos da mineração, busca-se constantemente entender a aplicabilidade de suas correlações para esses materiais. Assim, o presente artigo buscou apresentar a susceptibilidade à liquefação de rejeitos por meio do parâmetro de comportamento contrátil/dilatante (CD), composto de forma mista pela resistência de ponta normalizada (Q_{tn}) e resistência de ponta normalizada corrigida (Q_{tn,cs}) para rejeitos de minérios de ferro. Foram avaliados 27 perfis de CPTu em uma cava de mineração exaurida e preenchida com rejeito de minério de ferro hidraulicamente disposto. Constatou-se diferenças significativas no comportamento do material considerando uma alteração na equação para calcular o CD. Buscou-se analisar o CD de forma distinta a depender da granulometria do material, dividindo-o em dois grandes grupos usando como delimitador o I_c de Robertson de 2,60. Conclui-se que a metodologia de cálculo apresentada demonstra um ganho significativo na qualidade do comportamento do material, sendo essa melhora ora observada na condição geral dos CPTus analisados, e ora possibilitando a separação de lentes com melhores comportamentos geotécnicos. De toda forma, dada a complexidade inerente a esse tipo de análise, recomenda-se que a classificação quanto a liquefação do material seja sempre realizada em conjunto com outras metodologias já consagradas na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Disposição hidráulica, Rejeito de minério de ferro, Quadrilátero Ferrífero, Investigação geotécnica

ABSTRACT: Investigations using piezocone tests (CPTu) in natural soils have been conducted since the last century, and their correlations are widely known. With the increasing use of CPTu to determine the behavior of mining tailings, there is a constant effort to understand the applicability of its correlations to these materials. Therefore, this article aims to present the liquefaction susceptibility of tailings through the contractile/dilating behavior parameter (CD), which is a composite of both normalized tip resistance (Q_{tn}) and corrected normalized tip resistance (Q_{tn,cs}) for iron ore tailings. A total of 27 CPTu soundings were evaluated in an exhausted mining pit filled with hydraulically disposed iron ore tailings. Significant differences in material behavior were observed when altering the equation used to calculate CD. The study analyzed CD differently based on the material's grain size, dividing it into two main groups using the I_c proposed by Robertson (with a threshold value of 2.60). It is concluded that the proposed calculation methodology significantly enhances the material's behavior quality. This improvement is observed both in the general condition of the analyzed CPTu soundings and in the ability to differentiate lenses with better geotechnical behaviors. Nevertheless, it is essential for the results of these tests to consider other inherent variables related to the analyzed materials.

KEYWORDS: Hydraulic disposition, Iron ore tailings, Quadrilátero Ferrífero, Geotechnical investigation

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os estudos quanto a análise do comportamento de materiais susceptíveis à liquefação tem sido um dos temas mais pesquisados, em busca de garantir a segurança das estruturas de contenção ou disposição de resíduos da mineração.

Diversos ensaios laboratoriais relativamente novos ao ambiente da mineração no Brasil, como o triaxial cíclico e o *direct simple shear*. Esses vêm sendo empregados na tentativa de melhor caracterizar os rejeitos e a sua linha de estado crítico dentro do que vem sendo conhecido como a Mecânica dos Rejeitos. A confirmação do comportamento desses materiais por diversas vias de análise é a forma mais efetiva de garantir a segurança das estruturas. Contudo, os ensaios laboratoriais esbarram em alguns entraves como o seu alto custo e demora nos resultados em virtude da alta demanda para poucos laboratórios capacitados a realizar os ensaios especiais.

Quando o intuito é analisar os materiais já dispostos, acrescenta em desfavor aos ensaios laboratoriais a dificuldade na coleta de amostras que sejam representativas e a distribuição espacial de seu comportamento geotécnico. Em virtude desse fato, o ensaio de piezocone (CPTu) vem sendo amplamente utilizado para esse fim por se mostrar o ensaio de campo com melhor capacidade de fornecer as respostas necessárias sobre o rejeito já disposto nas estruturas de contenção. Além disso, possui ampla gama de correlações possíveis a partir dos seus dados obtidos. Outra vantagem é a possibilidade de traçar diversas correlações que se derivam dos resultados obtidos no ensaio de CPTu, permitindo uma compreensão mais refinada sobre o comportamento do material ensaiado. Contudo, essas correlações só são confiáveis quando aplicados aos chamados solos ideais, ou seja, solos não cimentados (Robertson, 2009). Para solos com microestruturas, Robertson (2016) diz que modificações locais podem ser necessárias.

Apesar do CPTu ser uma investigação de campo amplamente utilizada, muito do conhecimento adquirido e das formulações desenvolvidas foram originalmente propostos para solos naturais não cimentados. A recente intensificação desse ensaio na mineração levanta debates sobre a validade das correlações tradicionais quando aplicadas aos materiais que são oriundos no processo de beneficiamento mineral.

Desta forma, o presente artigo buscou apresentar a susceptibilidade à liquefação de rejeitos de ferro hidráulicamente dispostos por meio do parâmetro de comportamento contrátil/dilatante (CD) composto de forma mista pela resistência de ponta normalizada (Q_{tn}) e pela resistência de ponta normalizada para areias puras ($Q_{tn,cs}$), a depender da granulometria do material. Foi utilizado, como delimitador do comportamento granulométrico, o índice de classificação comportamental do solo (I_c) de Robertson de 2,60.

2. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL ANALISADO

2.1 Propriedades inerentes ao método de disposição

Como a deposição hidráulica do rejeito no qual foram realizadas as investigações ocorreu por meio de espigotamento, a sua forma de disposição muito se assemelha à de deltas fluviais, ou seja, com a sua porção subaquosa sendo a região do lago. Entretanto, apesar dessa analogia ser válida e auxiliar a entender o comportamento previsto do rejeito ao longo da cava cabem destacar que existem diferenças a serem consideradas. Por exemplo, diferente dos ambientes deposicionais naturais, a parte subaquosa desses deltas não possuem retrabalho por ondas ou marés e, conseqüentemente, não apresentam a seleção e estratificações típicas desses processos.

Outra diferença importante entre a disposição hidráulica na cava com o ambiente natural análogo é sobre a existência de uma seleção mineralógica e granulométrica prévia no momento do desague inicial. Enquanto em um tradicional delta fluvial pode-se encontrar a mais variada mineralogia terrígena, em sua maioria siliciclástica, com pobre seleção no seu ponto inicial, o rejeito é um material que já passou por diversos processos na planta de beneficiamento mineral. Assim, o processo faz com que sua granulometria seja praticamente constante ao longo do tempo e não apresente nenhum material com granulometria superior a areia. Por ser sempre material proveniente da extração do minério, a sua mineralogia reflete a das rochas fonte, tendo presença majoritária de óxidos de ferro, quartzo e carbonato.

Além dos diversos fatores que podem influenciar a formação de um delta fluvial, Nichols (2009) elenca dois fatores de maior relevância para os deltas fluviais com deságue em ambiente subaquoso, que são: a predominância granulométrica (Figura 1) e o desnível do terreno (Figura 2).

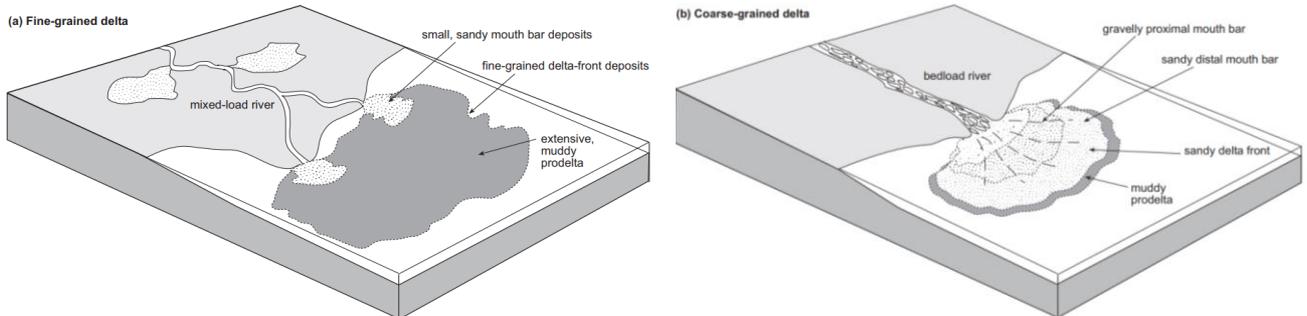


Figura 1. A influência da granulometria na morfologia do delta. Fonte: (Nichols, 2009).

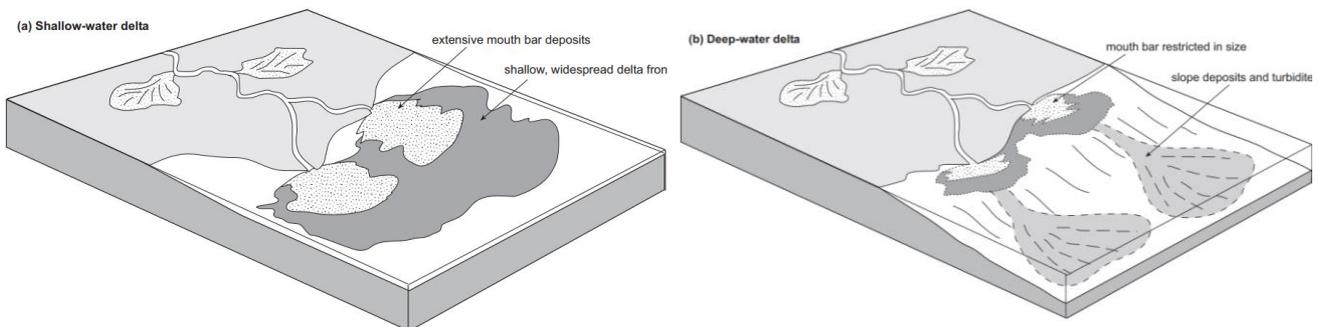


Figura 2. A influência do desnível do terreno subaquoso na formação final do delta. Fonte: Nichols (2009).

Dada a forma de preenchimento gradual da cava a partir do espigotamento, nota-se que muito se assemelha com a de um delta fluvial raso de granulometria fina. Desta forma, a região da praia seriam os bancos de areia e o lago, a parte onde ocorre a deposição subaquosa, sem desnível significativo entre eles.

Tendo a compreensão de como se comporta a disposição do material, com uma analogia ao sistema deposicional deltaico fluvial, é possível estimar a distribuição granulométrica geral da cava com base nas fácies características desse tipo de ambiente. Sendo a praia formada por barras de areia e o lago por sedimentos finos que ficam em suspensão no fluido, depositando na parte mais distal ao espigote. Assim, como é previsível que em um regime onde todas as partículas estão expostas a mesma viscosidade e turbulência, as principais variáveis que vão controlar a deposição são: o tamanho, a densidade e o formato das partículas. Dessa forma, quanto menos densa e placóide a partícula, por mais tempo ela se mantém em suspensão e tende a se depositar no fundo da cava.

Em contrapartida ao esperado pelo conceito sedimentológico acima analisado, Milonas (2006) ao simular a deposição hidráulica de um rejeito de minério de ferro em um equipamento apropriado, obteve como resultado uma deposição de finos na porção proximal. Isso se deve a característica mineralógica citada sobre o rejeito, constituído majoritariamente por quartzo e óxido de ferro. O óxido de ferro, por ter uma densidade maior e se concentrar nas frações mais finas, tende a se depositar primeiro. A alta seleção mineral, a granulometria, a diferença de densidade e baixa variabilidade mineralógica ocasionam, nesse caso, uma inversão da granulometria esperada, fazendo com que os finos sejam depositados majoritariamente na porção proximal. Esses fatores são responsáveis pela formação dos bancos na região da praia, enquanto o material mais grosseiro e silicoso concentra-se distal ao ponto de lançamento.

2.2 Averiguação quanto a cimentação

O ensaio de piezocone é uma das principais investigações capaz de fornecer respostas para os estudos de propensão a liquefação do material. Ele possui uma limitação inicial das correlações oriundas dos dados

obtidos em campo serem aplicáveis para solos não cimentados. Portanto, a utilização dessas correlações em rejeitos de mineração está em constante evolução, uma vez que esses materiais são compostos por finos sem plasticidade e, muitas das vezes, por materiais cimentantes, como o óxido de ferro.

Ao realizar o ensaio de CPTu para análise das características geotécnicas do rejeito de minério de ferro, oriundo de itabirito tipo Lago Superior, disposto hidraulicamente em uma cava, buscou-se paralelamente entender o grau de confiabilidade que as correlações teriam. Para isso, realizou-se uma avaliação quanto a apresentação microestrutura no material.

A cimentação em solos naturais é caracterizada pela agregação das partículas sólidas devido à presença de materiais chamados de agentes cimentantes, entre os quais se destaca o óxido de ferro.

Para o rejeito, foi considerado que o óxido de ferro, um agente cimentante, se acumula nas porções mais finas (Presotti, 2002) e que há uma gradação granulométrica controlada por um processo sedimentar análogo ao de um delta fluvial, com as características particulares apresentadas.

A Figura 3 e Figura 4 mostram, respectivamente, a cimentação dos materiais na praia e no lago, com dois furos para exemplificar cada caso, onde é possível observar que os furos na região do lago apresentam-se mais influenciados pela cimentação do que na praia.

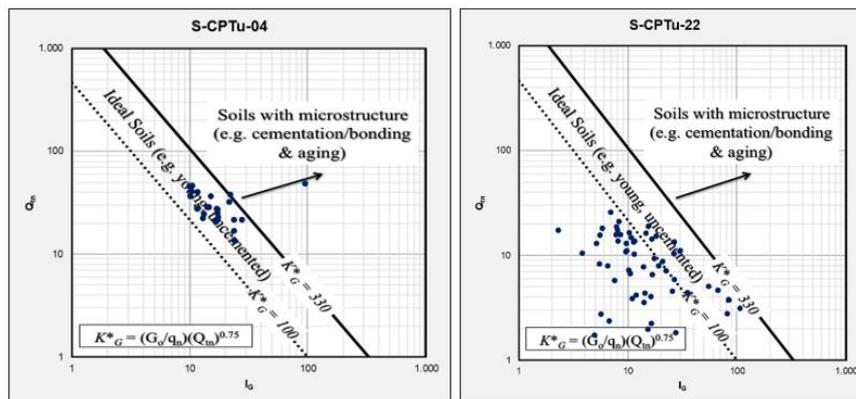


Figura 3. Análise da cimentação na região da praia.

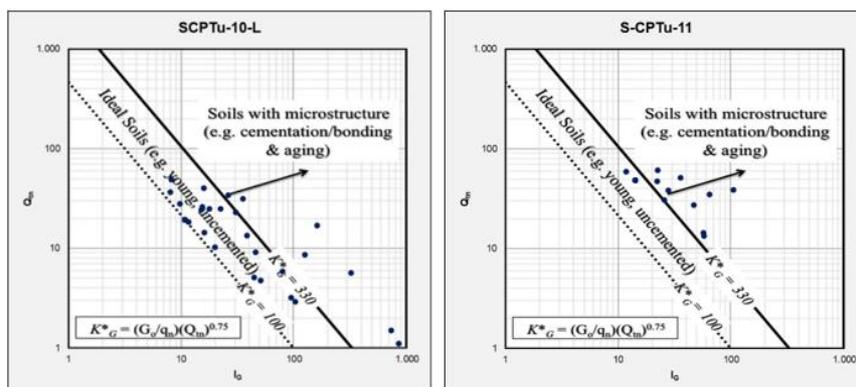


Figura 4. Análise da cimentação na região do lago.

3. METODOLOGIA

Foram avaliados 27 furos de CPTu (Figura 5) em uma campanha de investigação geológico-geotécnica realizada em uma cava de mineração exaurida, preenchida com rejeito de minério de ferro hidraulicamente disposto. A distribuição é tal que 14 furos se encontram na região da praia, proximal ao espigote, e 12 na área do lago. Destaca-se a grande variabilidade do rejeito em profundidade, não permitindo apresentar um padrão de comportamento possível de ser representado em mapas de calor. Ressalta-se que a disponibilidade de resultados espaçados para a área estudada (em torno de 1.200 ha) e a elevada variabilidade, limitaram análises complementares por meio de estatística.

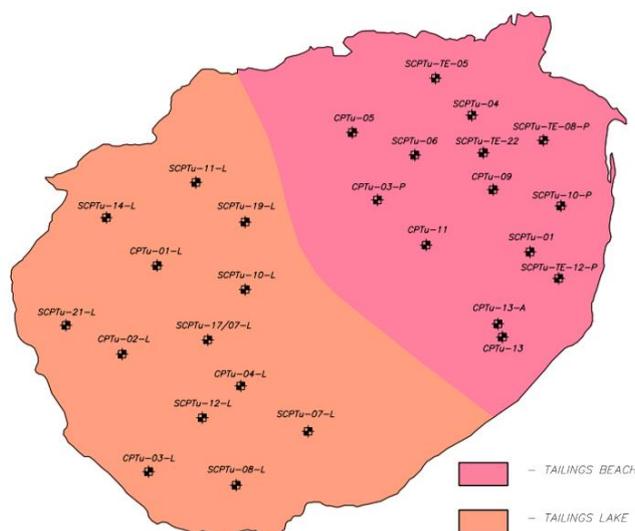


Figura 5. Localização das investigações realizadas.

Todos os ensaios apresentados foram realizados com uma velocidade de cravação de 2 cm/s e tiveram por intuito final a análise do material quanto a sua suscetibilidade a liquefação.

Dentre as diversas correlações possíveis de serem feitas para esse fim a partir dos dados brutos do CPTu, destaca-se, neste trabalho, o CD. Tradicionalmente encontrado no ábaco de Robertson (2016) de Q_{tn} x F_r como a linha que separa os materiais contráteis dos dilatantes quando igual a 70, sendo definida pela Equação 1:

$$CD = 70 = (Q_{tn} - 11)(1 + 006F_r)^{17} \quad (1)$$

Onde: Q_{tn} : resistência de ponta normalizada, que varia de acordo com o material e estado de tensão; F_r : razão de atrito normalizada

Apresenta-se também nesse artigo, a título de comparação, os resultados da análise de acordo com a metodologia de Jefferies e Beans (2016), que propõem uma separação do comportamento contrátil-dilatante do material com base no parâmetro de estado crítico (Ψ). De acordo com esses autores, é definido que quando $\Psi > -0,05$ o material tende a apresentar comportamento de *strain softening*.

Robertson (2016) relata que a delimitação com o CD é com base nos estudos de caso em que o $CD = 70$ é o limite superior, sendo ele ligeiramente conservador. O autor propõe ainda uma equação para o limite inferior, embora recomende utilizar a equação mais conservadora para a maioria dos casos.

Assim, apresenta-se os resultados quando o CD foi calculado de forma mista pelo Q_{tn} e pelo $Q_{tn,cs}$ para rejeitos de minérios de ferro. Embora o parâmetro Q_{tn} já seja uma normalização da resistência de ponta para materiais diversos, o CD assim calculado, não apresentou uma boa correlação com outros métodos avaliativos quando se trata desse tipo de rejeito, como, por exemplo, quando comparado com Jefferies e Beans (2016).

A proposta foi de analisar o parâmetro CD com uma simples modificação na sua equação a depender da granulometria do material, dividindo-o em dois grupos usando como delimitador o I_c de Robertson (Tabela 1) de 2,60. Ou seja, ao longo de uma mesma investigação, para os trechos que apresentaram resultados acima desse valor, os materiais foram considerados impuros, sendo utilizado o Q_{tn} no cálculo do CD. Para valores abaixo desse delimitador, utilizou-se o $Q_{tn,cs}$, considerando todos os materiais como areias puras. Para melhor distinção, o CD calculado dessa forma foi atribuído o termo CD_M no decorrer desse artigo.

O cálculo do CD_M , portanto, é definido como:
 Trechos onde $I_c > 2,60$ (Equação 2):

$$CD = 70 = (Q_{tn} - 11)(1 + 006F_r)^{17} \quad (2)$$

Trechos onde $I_c < 2,60$ (Equação 3):

$$CD = 70 = (Q_{tn, cs} - 11)(1 + 006Fr)^{17} \quad (3)$$

Essa generalização de areias puras para valores de I_c abaixo de 2,60 se justifica pelo conhecimento da natureza do material ensaiado, onde não é possível encontrar pedregulhos, solos sensitivos, nem mesmo argilominerais.

Tabela 1 . Tabela de classificação para os valores de I_c de Robertson e Write (1998).

Ic de Robertson e Write (1998)		
Classificação do solo	Zona	Índice $I_{c,min}$
Solos sensitivos	1	-
Argilas orgânicas	2	>3,6
Argilas	3	2,95 - 3,6
Misturas de siltes	4	2,6 - 2,95
Misturas de areias	5	2,05 - 2,6
Areias	6	1,31 - 2,05
Areias com pedregulhos	7	<1,31
Areia muito rígida a areia argilosa	8	-
Finos muito rígido	9	-

4. RESULTADOS

Ao comparar os resultados de CPTu realizada na cava com os métodos de Jefferies e Beans (2016) e Robertson (2016), observou-se que as classificações apontam comportamentos completamente distintos para o mesmo material, com o CD de Robertson (2016) apontando resultados mais conservadores e classificando quase todo o material com tendência a liquefação. Quando realizado a modificação condicional no CD, mudando a fórmula de cálculo a depender do I_c , os resultados se aproximam mais do proposto por Jefferies e Beans (2016). As Figura 6a e 6b apresentam dois exemplos para a região da praia e as Figura 6c e 6d para a região do lago, onde é possível a comparação entre as metodologias de avaliação, sendo as linhas verticais azuis a delimitação contrátil-dilatante de cada método.

Para a praia, na maior parte ao longo do trecho ensaiado o material apresenta comportamento granulométrico de mistura de areias (zona 5), portanto, com um I_c abaixo de 2,60. Por esse motivo, o CD_M apresenta uma melhora geral no comportamento contrátil-dilatante para o rejeito hidráulico de minério de ferro dessa cava, quando comparado com o CD convencional. Enquanto que no lago, se observa uma maior variabilidade de comportamento granulométrico, apresentando-se de forma intercalada, indicando que os finos têm tendência de concentração na porção distal ao espigote. Em ambas as regiões, é perceptível uma maior aderência do CD após a modificação aos resultados de Jefferies e Beans (2016).

A Tabela 2 mostra a redução da porcentagem de material contrátil, para a praia e para o lago, quando comparada a análise do CD com o CD_M .

Tabela 2. Comparativo total.

% Contrátil			
Local	CD	CD_M	Ψ Jefferies e Beans (2016)
Praia	91,85 %	32,06 %	23,70 %
Lago	92,70 %	61,43 %	45,51 %

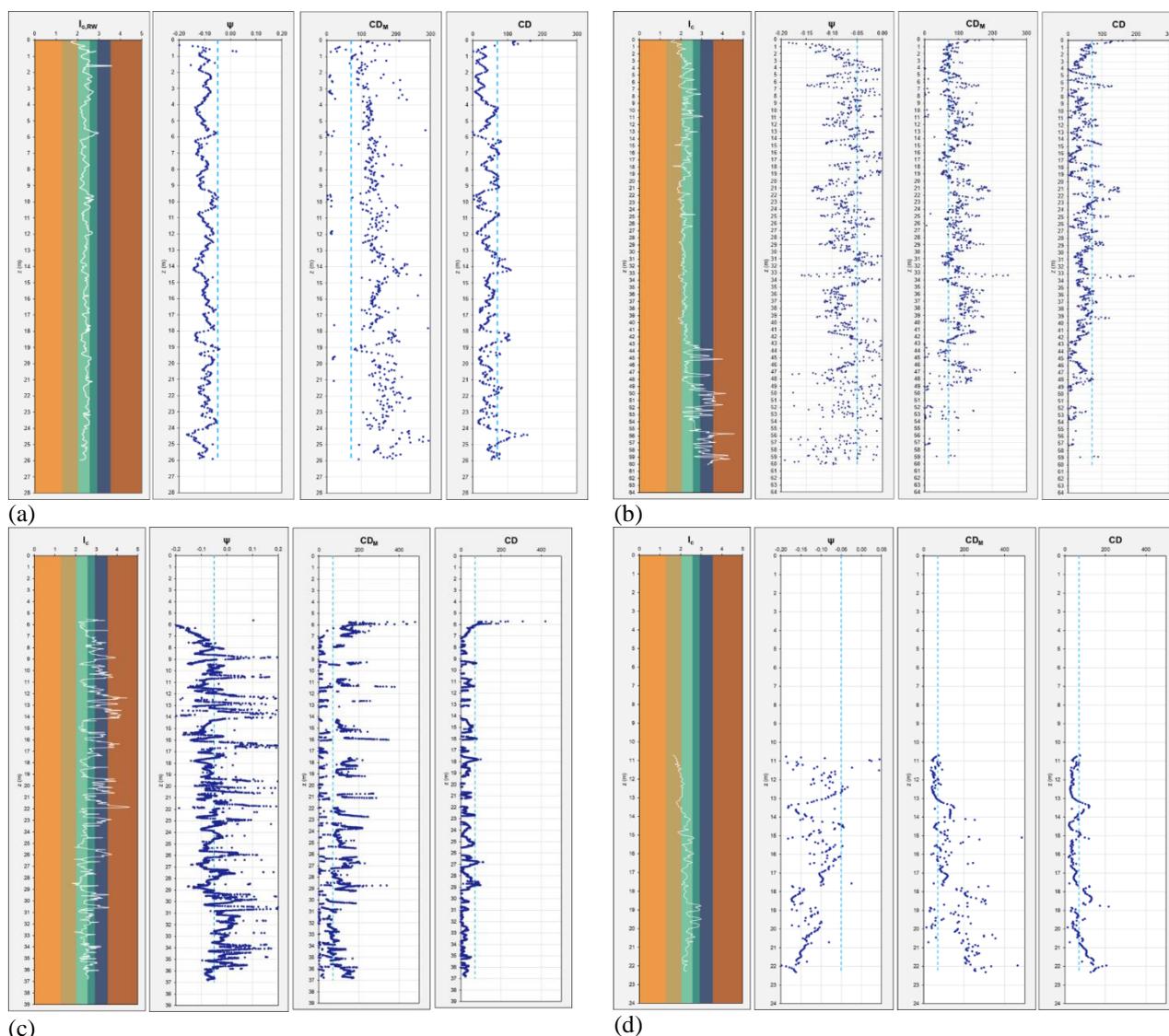


Figura 6 . Em (a), comparação entre os dados do CPTu-04 na praia. Em (b), comparação entre os dados do CPTu-22, na praia. Em (c), comparação entre os dados do SCPTU-10-L, no lago. Em (d), comparação entre os dados do SCPTU-11L, no lago.

A metodologia de cálculo apresentada demonstra um ganho significativo na qualidade do comportamento do material, sendo essa melhora ora observada na condição geral do CPTu analisado, ora possibilitando a separação de lentes com melhores comportamentos geotécnicos. Dessa forma, uma visão tridimensional de todas as investigações em conjunto pode auxiliar a compreender se essas lentes são representativas para o projeto de interesse na região. Além disso, um maior número de investigações contribuirá para abordagens adicionais, como por exemplo, estatística.

O CD_M calculado com a modificação proposta apresenta também uma tendência maior na confirmação dos resultados de comportamento do material obtidos por meio de outros métodos, confirmado na comparação com a metodologia de Jefferies e Beans (2016).

A disposição hidráulica em cavas mostra-se muito semelhante a um ambiente deltaico controlado por rio, cabendo discernir que existem vários dos tipos desses ambientes a depender da conjunção de fatores. Esses fatores são: a velocidade e viscosidade do fluido, a topografia do terreno abaixo do lago, a granulometria e a carga de sedimentos. Conforme observado, dentre os ambientes deltaicos conhecidos o que melhor se aproxima ao ambiente de deposição hidráulica em cava são de deltas fluviais rasos com deposição de finos.

Milonas (2006) encontrou uma inversão granulométrica ao simular a deposição hidráulica de rejeito de minério de ferro em laboratório. Fato esse justificado pela porção granulométrica mais fina apresentar alta

concentração de óxidos de ferro, que, por sua vez, apresentam densidade superior ao quartzo presente de forma majoritária na parte granulométrica restante do material. Dessa forma, os finos ricos em ferro depositaram-se próximos ao espigote enquanto o material com maior teor de sílica e de granulometria maior foram para a porção distal.

Os dados obtidos nesse artigo apresentaram resultados distintos do esperado da simulação em laboratório citado por Milonas (2006) e em linha com o modelo sedimentológico conceitual de um delta fluvial. Ressalta-se que o CPTu não fornece a informação granulométrica direta do material, mas sim o comportamento.

5. CONCLUSÃO

Compreende-se que, como uma boa prática geotécnica, o entendimento do comportamento do material deve ser avaliado sob uma conjunção de diversos métodos já consagrados na literatura, analisando tanto para casos estáticos quanto para a presença de sismos. Além disso, deve ser considerada a avaliação conjunta da mineralogia do rejeito, a sua granulometria e método e histórico de disposição.

Torna-se difícil distinguir o fator que fez com que a deposição na cava analisada se comportasse de forma distinta da esperada pelas simulações em laboratório. Algumas hipóteses, contudo, são elencadas: diferenças na velocidade do fluxo e no aporte sedimentológico, além de diferenças quanto ao tempo do material depositado. Enquanto em laboratório o reservatório pôde ser rapidamente preenchido dado a redução da escala que se faz necessária, a cava apresentou preenchimento gradual ao longo de décadas. O fato de o material ficar exposto por um período grande e o nível d'água se manter elevado cria-se um ambiente favorável para que tenha ocorrido um processo de carregamento do ferro abaixo do NA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Jefferies, M.G., and Been, K. (2016). *Soil liquefaction – a critical state approach*. Taylor & Francis, ISBN 0-419-16170-8. 478 pp.
- Milonas, J.G. (2006). *Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeitos de minério de ferro em aterro hidráulico*. Dissertação de mestrado. Publicação G.FM-148/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146 p.
- Nichols, Gary. *Sedimentology and stratigraphy*. 2. ed. West Sussex, UK: Wiley-Blackwell, 2009. 419 p.
- Presotti, E. S. (2002). *Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro*. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 153 p.
- Robertson, P.K. (2009). Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal* 49 (11): 1337-1355.
- Robertson, P.K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update. *Canadian Geotechnical Journal*, [S.L.], v. 53, n. 12, p. 1910-1927, 14 jul. 2016. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>.
- Robertson (2010), P. K.. Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering - Asce*, Reston, Va, v. 136, n. 6, p. 842-853, jun. 2010.
- Robertson, P.K. and Wride, C.E., (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, 35(3): 442-459.