REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

APLICAÇÃO DE ENSAIOS CPTU NO PLANEJAMENTO DA REMOÇÃO DE REJEITOS DE LAVAGEM DE BAUXITA

APPLICATION OF CPTU TESTS IN PLANNING THE REMOVAL OF BAUXITE WASHING TAILINGS

Engenharias • 16/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/794560002

Jéssica Costa da Silva[1]

Ainoa Abigail Araújo Cardoso[2]

Gean Lopes Teixeira[3]

Rodrigo Monteiro Pinto[4]

Cássia Fernanda Freitas Gomes[5]

Marcelo Rassy Teixeira[6]

RESUMO

Depósitos de rejeitos de mineração podem apresentar heterogeneidade significativa de composição e comportamento, o que representa incertezas relevantes para o planejamento das operações de remoção. Este artigo avalia a aplicação de ensaios de piezocone (CPTu) na caracterização do comportamento de rejeitos de lavagem de bauxita e sua utilização como subsídio ao planejamento das operações de remoção, a partir de uma campanha realizada em três pontos de investigação em um depósito de rejeitos de lavagem de bauxita. Foram interpretadas a espessura das camadas (plataforma de acesso operacional, crosta e rejeito úmido), as condições de saturação e drenagem (por meio de ensaios de dissipação) e o comportamento dos materiais segundo os parâmetros normalizados Qt, Fr, Bq e o índice de comportamento Ic. Os resultados indicaram um padrão geral de crosta superficial mais consistente, camada intermediária de menor consistência e fundação argilosa pré-adensada de maior resistência, com variabilidade relevante entre os pontos investigados, especialmente quanto à espessura da crosta e ao tempo de dissipação T50. A discussão explora como essas informações podem subsidiar o planejamento das frentes de escavação, a definição de estratégias operacionais (incluindo estratégias de ressecamento do rejeito) e a redução de incertezas durante a execução, sem que se afirmem ganhos quantitativos de custo, tempo ou produtividade, uma vez que tais indicadores não constam dos dados disponíveis.

Conclui-se que a investigação por CPTu apresenta potencial de contribuição ao planejamento operacional da remoção de rejeitos, sobretudo por meio do aumento da previsibilidade e da redução de incertezas sobre as condições do depósito.

Palavras-chave: CPTu; Rejeitos de lavagem de bauxita; Investigação geotécnica; Planejamento de remoção; Variabilidade geotécnica.

ABSTRACT

Tailings deposits from mining operations can present significant heterogeneity in composition and behavior, representing relevant uncertainties for the planning of removal operations. This paper evaluates the application of piezocone (CPTu) tests in characterizing the behavior of bauxite washing tailings and their use as a basis for planning removal operations, based on a campaign carried out at three investigation points in a bauxite washing tailings deposit. The thickness of the layers (operational access platform, crust, and moist tailings) was interpreted, along with saturation and drainage conditions (through dissipation tests) and material behavior according to the normalized parameters Qt, Fr, Bq and the behavior index Ic. The results indicated a general pattern of a more consistent surface crust, an intermediate layer of lower consistency, and a pre-consolidated clayey foundation of higher resistance, with relevant variability among the investigated points, especially regarding crust thickness and dissipation time T50. The discussion explores how this information can support the planning of excavation fronts, the definition of operational strategies — including tailings desiccation strategies — and the reduction of uncertainties during execution, without asserting quantitative gains in cost, time, or productivity, since such indicators are not available in the data. It is concluded that CPTu investigation presents potential to contribute to the operational planning of tailings removal, mainly through increased predictability and reduced uncertainty regarding deposit conditions.

Keywords: CPTu; Bauxite washing tailings; Geotechnical investigation; Removal planning; Geotechnical variability.

1. INTRODUÇÃO

A geração e a disposição de rejeitos são etapas inerentes à atividade de mineração, e sua gestão adequada é condição essencial para a segurança operacional e ambiental dos empreendimentos minerais. No processo de beneficiamento da bauxita, a etapa de lavagem gera rejeitos que, uma vez dispostos em reservatórios, formam depósitos cujas características geotécnicas podem variar de forma significativa em função das condições de deposição, do histórico de saturação e da posição em relação à superfície e à fundação do depósito.

Depósitos de rejeitos, de forma geral, tendem a apresentar heterogeneidade vertical e horizontal relevante, com camadas de diferentes espessuras, consistências e comportamentos mecânicos. Essa heterogeneidade representa uma fonte importante de incerteza para as operações de remoção do material, uma vez que condições distintas de resistência, saturação e comportamento podem ser encontradas em pontos próximos do depósito, exigindo ajustes de estratégia durante a execução.

Nesse contexto, métodos de investigação geotécnica capazes de fornecer informações contínuas ao longo da profundidade assumem papel relevante na caracterização prévia do depósito. O ensaio de penetração de piezocone (CPTu) destaca-se por fornecer, de forma contínua, medidas de resistência de ponta, atrito lateral e poropressão, permitindo a identificação de camadas, a interpretação do comportamento do material e a avaliação das condições de saturação e drenagem.

A utilização dos resultados de investigação geotécnica não precisa se restringir à etapa de caracterização do depósito; esses resultados podem também subsidiar o planejamento das operações de remoção, ao fornecer informações prévias sobre a distribuição das

camadas, sobre zonas de diferentes condições de consistência e sobre a variabilidade espacial do material. Essa conexão entre investigação geotécnica e planejamento operacional constitui o eixo central deste artigo.

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a aplicação de ensaios CPTu na caracterização do comportamento de rejeitos de lavagem de bauxita e sua utilização como subsídio ao planejamento das operações de remoção. Como objetivos específicos, buscou-se: caracterizar a espessura e a distribuição das camadas do depósito; avaliar as condições de saturação e drenagem; e discutir os potenciais ganhos em previsibilidade, planejamento das frentes de trabalho, definição de estratégias operacionais e eficiência na execução das atividades. A justificativa do trabalho reside na necessidade de reduzir incertezas geotécnicas que afetam diretamente a execução das escavações em depósitos de rejeitos, problema que se traduz na seguinte questão de pesquisa: como os resultados de ensaios CPTu podem contribuir para o planejamento das operações de remoção de rejeitos de lavagem de bauxita e quais potenciais ganhos operacionais podem ser obtidos a partir da redução das incertezas sobre as condições do depósito?

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Rejeitos de Mineração e Rejeitos de Lavagem de Bauxita

Rejeitos de mineração correspondem à fração de material sem interesse econômico direto gerada durante o beneficiamento do minério, sendo tipicamente dispostos em estruturas de contenção específicas. No caso do beneficiamento da bauxita, a etapa de lavagem gera rejeitos com características granulométricas e

mineralógicas próprias, cujo comportamento geotécnico ao longo do tempo tem sido objeto de estudos voltados à recuperação ambiental e ao reaproveitamento do material. Guimarães et al. (2018) avaliaram a qualidade física de rejeitos de lavagem de bauxita após período de recuperação ambiental, evidenciando alterações nas propriedades físicas do material ao longo do tempo de exposição e revegetação. Já Racanelli et al. (2020) investigaram o uso de rejeitos de lavagem de bauxita como matéria-prima para ligantes geopoliméricos, o que reforça o caráter predominantemente fino e a natureza argilosa desse tipo de rejeito, características que também se refletem no comportamento observado nos ensaios de campo.

2.2. Investigação Geotécnica Aplicada a Depósitos de Rejeitos

A investigação geotécnica de depósitos de rejeitos apresenta particularidades em relação à investigação de solos naturais, decorrentes da forma de deposição, da variabilidade das condições de saturação e da possível presença de camadas de diferentes idades e origens. Sousa e Gomes (2020) discutem a obtenção de parâmetros geotécnicos por meio de correlações entre ensaios geofísicos e CPT em barragens de rejeitos, destacando a utilidade do CPT como ferramenta de caracterização contínua desses materiais e a importância de correlações específicas para a interpretação adequada dos resultados em rejeitos, que frequentemente apresentam comportamento distinto do previsto para solos naturais sedimentares.

2.3. Ensaio CPTu

O ensaio de penetração de cone, particularmente em sua versão piezocone (CPTu), fornece medições contínuas de três parâmetros

brutos: a resistência de ponta do cone (qc), a resistência de atrito lateral (fs) e a poropressão gerada durante a cravação (u), esta última usualmente medida na posição imediatamente atrás da ponta cônica (u2). A norma ASTM D5778-20 descreve os procedimentos de execução e as correções necessárias para a obtenção desses parâmetros com precisão adequada.

Em razão da geração de poropressão na face da ponta do cone, a resistência de ponta medida (qc) deve ser corrigida para a obtenção da resistência de ponta total (qt), por meio da expressão qt = qc + (1-a)·u2, em que a é a razão de área líquida da ponta do cone, obtida por calibração específica do equipamento. Essa correção é particularmente relevante em materiais finos e saturados, como é o caso dos rejeitos investigados neste estudo.

2.4. Parâmetros Obtidos e Classificação do Comportamento

A interpretação dos dados brutos de CPTu é usualmente realizada por meio de parâmetros normalizados, que reduzem a influência da tensão de confinamento e permitem comparações mais consistentes entre diferentes profundidades e locais. Os parâmetros normalizados mais utilizados são a resistência de ponta normalizada (Qt), o atrito lateral normalizado (Fr) e a poropressão normalizada (Bq), calculados, respectivamente, como a razão entre a resistência de ponta líquida (qnet = qt - σv0) e a tensão vertical efetiva in situ, a razão entre fs e qnet, e a razão entre o excesso de poropressão gerado (u2 - u0) e qnet.

Robertson (1990) propôs ábacos de classificação comportamental do solo (Soil Behaviour Type, SBT) com base nas combinações Qt-Fr e Qt-Bq, posteriormente atualizados por Robertson (2009, 2016). O

próprio autor recomenda, de modo geral, a utilização preferencial do ábaco Qt-Fr, por apresentar menor dependência das leituras de u2, que podem ser comprometidas por interferências como perda de saturação do elemento poroso. Também é utilizado o índice de comportamento do solo (Ic), derivado desses parâmetros, que permite estimar de forma contínua a tendência de comportamento do material ao longo da profundidade, de granular a fino.

2.5. Variabilidade e Comportamento dos Rejeitos

A variabilidade de comportamento em depósitos de rejeitos, decorrente de fatores como sequência de deposição, segregação granulométrica e histórico de saturação, tem sido tratada na literatura geotécnica com o auxílio de ensaios CPTu. Dienstmann et al. (2026) discutem a incorporação da variabilidade inerente em simulações numéricas de rejeitos, a partir de um estudo de comportamento por CPTu em rejeitos de ouro. Cabe destacar que o material estudado por esses autores (rejeito de ouro) difere do rejeito de lavagem de bauxita analisado neste artigo; a referência é utilizada aqui exclusivamente quanto aos aspectos metodológicos de interpretação por CPTu e de tratamento da variabilidade comportamental, não quanto às propriedades específicas do material. Sousa e Gomes (2020) também reforçam que a variabilidade de comportamento em rejeitos pode ser mais bem compreendida por meio de investigações contínuas, como o CPT, em comparação com ensaios pontuais de amostragem.

2.6. Investigação Geotécnica Como Suporte Ao Planejamento da Remoção

Tradicionalmente, a investigação geotécnica de depósitos de rejeitos é empregada como etapa de caracterização, voltada à avaliação de estabilidade ou de propriedades de projeto. Entretanto, os mesmos resultados podem ser reinterpretados sob uma ótica operacional, como subsídio ao planejamento das atividades de remoção do material. A identificação prévia da distribuição de camadas, das condições de consistência e das zonas de comportamento distinto permite antecipar, ainda que qualitativamente, as condições que poderão ser encontradas durante a escavação, contribuindo para o planejamento das frentes de trabalho e para a definição de estratégias operacionais mais adequadas a cada situação.

3. METODOLOGIA

A área de estudo corresponde a um depósito de rejeitos de lavagem de bauxita de um empreendimento mineral, tratado neste artigo de forma genérica, sem identificação da empresa, da mina ou da estrutura de disposição, em conformidade com requisitos de confidencialidade. Não são reproduzidas coordenadas geográficas, códigos internos de identificação ou quaisquer outras informações que permitam identificar diretamente o empreendimento.

3.1. Generalidades do Ensaio CPTu

O ensaio de penetração de piezocone (CPTu) é um método de investigação geotécnica indireta, ou seja, não envolve a coleta de amostras físicas do material investigado; a caracterização do subsolo é obtida a partir da resposta mecânica e hidráulica do terreno à cravação contínua do cone instrumentado, complementada por interpretações teóricas e empíricas consolidadas na literatura. Essa natureza indireta é, ao mesmo tempo, uma vantagem operacional —

por permitir perfis contínuos com rapidez de execução — e uma limitação a ser considerada, na medida em que a acurácia das interpretações depende de correlações e critérios de classificação nem sempre calibrados especificamente para rejeitos de mineração.

O ensaio fornece três medidas fundamentais ao longo da profundidade: a resistência de ponta do cone (qc), a resistência de atrito lateral no manguito (fs) e a poropressão gerada durante a cravação (u), esta última medida por um transdutor de pressão associado a um elemento poroso saturado (pedra porosa). A norma ASTM D5778-20 admite o registro de poropressão em três posições possíveis ao longo do cone — u1, na face da ponta cônica; u2, imediatamente atrás da ponta, na base do cone; e u3, atrás do manguito de atrito. Nos equipamentos comerciais, a posição u2 é a mais amplamente adotada, por permitir tanto a correção da resistência de ponta medida (qc) para a resistência de ponta total (qt) quanto a interpretação das condições de drenagem do material, sendo também a posição utilizada nos ensaios da campanha aqui analisada. A integridade da saturação da pedra porosa nessa posição é determinante para a qualidade da leitura de poropressão: uma saturação incompleta ou a presença de bolhas de ar no sistema de medição pode gerar respostas amortecidas ou defasadas, comprometendo a interpretação de camadas finas e de ensaios de dissipação, razão pela qual os procedimentos de saturação do elemento poroso, antes da cravação, são etapa crítica da execução do ensaio.

Além das três medidas contínuas, o ensaio CPTu permite a execução de ensaios de dissipação de poropressões, nos quais a cravação é interrompida em uma profundidade de interesse e o decaimento (ou, eventualmente, o incremento) da poropressão é monitorado ao

longo do tempo até a estabilização. Esses ensaios complementares são essenciais para a avaliação das condições de drenagem do material e para a estimativa da poropressão de equilíbrio (u0), parâmetro utilizado na normalização da resistência de ponta e no cálculo dos demais parâmetros normalizados discutidos no item 2.4.

3.2. Contextualização do Problema Investigado

O problema investigado refere-se a um reservatório de rejeitos de lavagem de bauxita, constituído por material predominantemente argiloso e parcialmente adensado. Em superfície, esse material é recoberto por uma camada de plataforma de acesso operacional (forro); sob o forro, o próprio rejeito se organiza tipicamente em uma crosta superficial de maior consistência relativa e uma camada de rejeito úmido subjacente, de menor consistência, apoiada sobre um solo de fundação de natureza argilosa e pré-adensada. As condições internas de saturação, resistência e drenagem desse conjunto variam ao longo da profundidade e entre diferentes regiões do depósito. Para fins de planejamento das operações de escavação e remoção desse material, é necessário caracterizar, especificamente: o perfil de saturação ao longo da profundidade; a resistência do material em cada camada; as condições de drenagem, isto é, a velocidade com que eventuais excessos de poropressão gerados durante a própria cravação do cone se dissipam; e o comportamento mecânico geral do material (tendência contrátil ou dilatante) em cada camada identificada. Essas frentes de caracterização orientam diretamente a definição do programa experimental e dos procedimentos de análise descritos a seguir.

3.3. Programa Experimental

O programa experimental consistiu na execução de três ensaios de CPTu na área de estudo, aqui denominados Ponto 01, Ponto 02 e Ponto 03, com campanha realizada em 2025. Em razão da baixa capacidade de suporte da crosta superficial do rejeito, foi necessária a execução prévia de uma camada de plataforma de acesso operacional, destinada a viabilizar o acesso do equipamento e a cravação dos ensaios.

Em cada ponto, a cravação foi conduzida até profundidade compatível com a travessia de toda a camada de rejeito (englobando a crosta superficial e o rejeito úmido subjacente), avançando aproximadamente 0,5 m adicionais no solo de fundação, de modo a caracterizar também a transição rejeito–fundação e confirmar a natureza do material de apoio. Em cada ponto, foi executado um ensaio de dissipação de poropressões no ponto médio da espessura da camada de rejeito, posição escolhida por ser representativa das condições de saturação e drenagem do material ao longo da maior parte do perfil investigado, evitando efeitos de borda associados à proximidade da superfície ou da fundação.

3.4. Procedimentos de Análise dos Resultados

A análise dos resultados seguiu quatro procedimentos complementares. Em primeiro lugar, os perfis de qt (resistência de ponta corrigida), fs e u2 de cada ponto foram avaliados de forma comparativa, com o objetivo de definir faixas de valores e identificar a variação do comportamento ao longo da profundidade, distinguindo-se as camadas de crosta, rejeito úmido e fundação. Em segundo lugar, os ensaios de dissipação foram analisados para avaliar as condições de drenagem de cada ponto — por meio do

tempo de dissipação T50 — bem como o regime de poropressões de equilíbrio (u0), comparando-o com a condição hidrostática esperada.

Em terceiro lugar, foram calculados os parâmetros normalizados Qt (ou Qtn), Fr, Bq e U2, que balizam a análise comportamental ao considerar os efeitos do nível de confinamento sobre a resistência e a poropressão medidas, conforme discutido no item 2.4. Por fim, a classificação comportamental de cada camada foi realizada a partir das metodologias propostas por Robertson (2016) — priorizando-se, entre os critérios disponíveis, a combinação Qt-Fr, por sua menor sensibilidade a eventuais interferências na leitura de u2 — e complementada pela análise do índice de comportamento Ic, também proposto por Robertson, utilizado como ferramenta de interpretação contínua ao longo da profundidade. Para cada resultado relevante identificado por meio desses quatro procedimentos, buscou-se ainda estabelecer uma cadeia interpretativa que parte do resultado bruto de CPTu, passa pela interpretação geotécnica e pela identificação da incerteza associada, até a implicação prática para a operação de remoção e o correspondente potencial ganho operacional, abordagem detalhada no item 4.7 e na Tabela 4.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

4.1. Caracterização Geral dos Resultados

A Tabela 1 apresenta as características gerais dos três pontos de investigação. Os ensaios indicaram espessuras totais de rejeito entre 2,23 m e 2,44 m, com espessura de crosta variando de 0,40 m a 0,76 m, sendo mais espessa no Ponto 03, onde o material apresentou, segundo as observações de campo, maior resistência relativa. Os

valores de T50 variaram entre 660 s e 3.200 s, compatíveis com materiais de natureza predominantemente argilosa e baixa permeabilidade.

Tabela 1. Características gerais dos pontos de investigação.

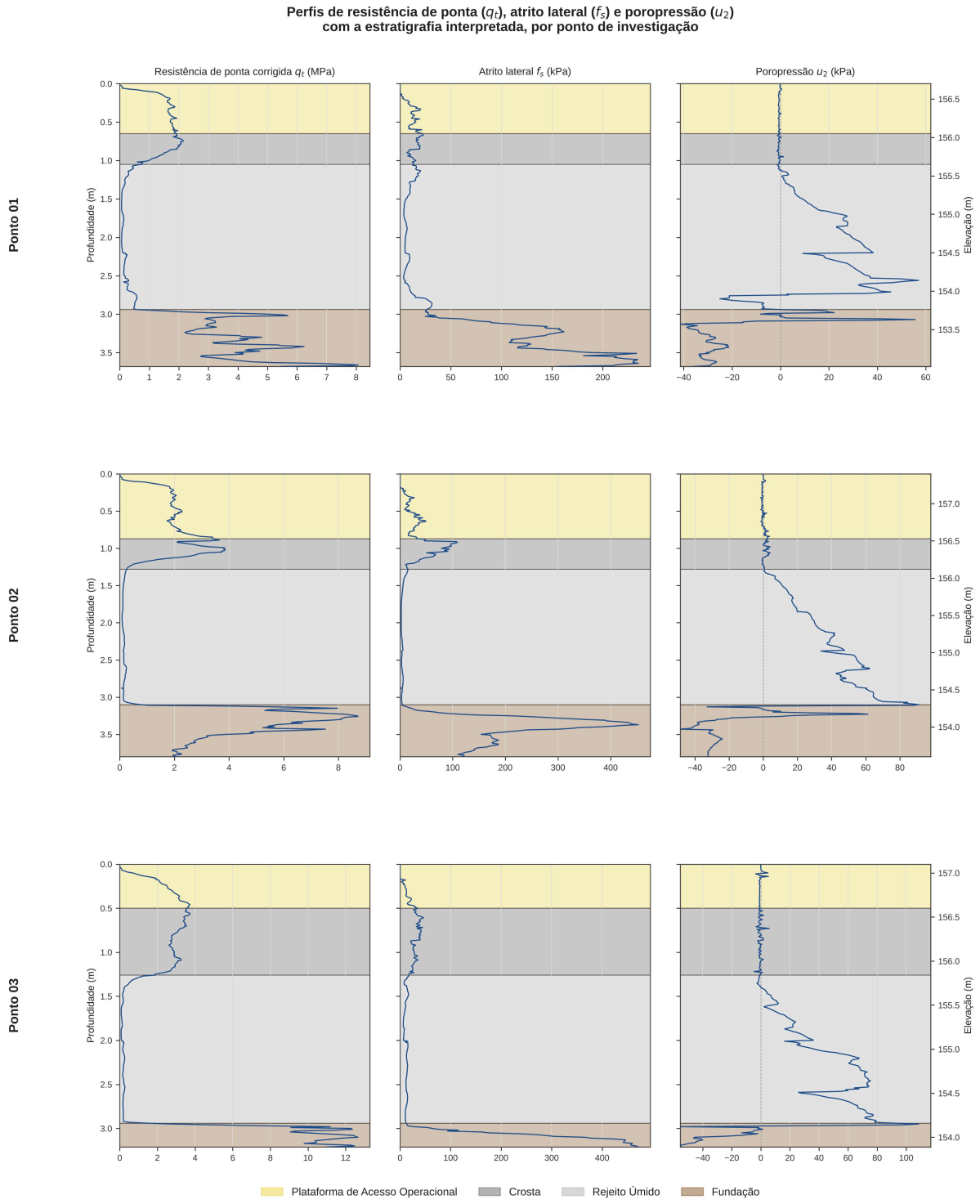
Ponto	Espessura total de rejeito (m)	Espessura da crosta (m)	Profundidade do NA (m)	T50 (s)
Ponto 01	2,29	0,40	0,8	3.200
Ponto 02	2,23	0,41	0,4	1.100 (sujeito a interferências)
Ponto 03	2,44	0,76	1,5	660

Fonte: *elaborado pelos autores a partir dos dados da campanha de investigação CPTu (2025).*

4.2. Perfis de Resistência de Ponta, Atrito Lateral e Pressão de Poros

Os perfis de qt (resistência de ponta corrigida), fs (atrito lateral) e u2 (poropressão) dos três pontos investigados são apresentados na Figura 1, com a estratigrafia interpretada sobreposta (plataforma de acesso operacional, crosta, rejeito úmido e fundação). De modo geral, observou-se, nos três pontos, um padrão de resistência mais elevada na crosta superficial, redução da resistência no rejeito úmido subjacente e novo aumento de resistência ao se aproximar da camada de fundação, acompanhado de mudança no comportamento da poropressão gerada durante a cravação, mais acentuada no Ponto 01 e menos acentuada no Ponto 02.

Figura 1. Perfis de qt, fs e u2 com a estratigrafia interpretada, por ponto de investigação.



Fonte: *elaborado pelos autores a partir dos dados da campanha de investigação CPTu (2025).*

Na Figura 1, o eixo secundário de “Elevação” corresponde à referência vertical local do levantamento topográfico da área de estudo e é mantido apenas para preservar a escala relativa entre as

camadas; nenhuma coordenada horizontal ou identificação de estrutura é reproduzida nesses gráficos.

4.3. Identificação das Camadas

A interpretação estratigráfica identificou, nos três pontos, a mesma sequência de camadas: plataforma de acesso operacional (forro), crosta de rejeito, rejeito úmido e fundação argilosa pré-adensada. A Tabela 2 apresenta as espessuras identificadas para cada camada, evidenciando variabilidade tanto na espessura do forro (0,50 m a 0,87 m) quanto na espessura da crosta (0,40 m a 0,76 m) e do rejeito úmido (1,68 m a 1,89 m).

Tabela 2. Espessuras das camadas identificadas por ponto de investigação.

Ponto	Forro / plataforma de acesso operacional (m)	Crosta de rejeito (m)	Rejeito úmido (m)	Espessura total de rejeito (m)
Ponto 01	0,65	0,40	1,89	2,29
Ponto 02	0,87	0,41	1,82	2,23
Ponto 03	0,50	0,76	1,68	2,44

Fonte: *elaborado pelos autores a partir dos dados da campanha de investigação CPTu (2025).*

Em todos os pontos, observou-se comportamento de transição entre a crosta de rejeito e o rejeito úmido, e a distinção entre a plataforma de acesso operacional e a crosta mostrou-se sutil nos registros de

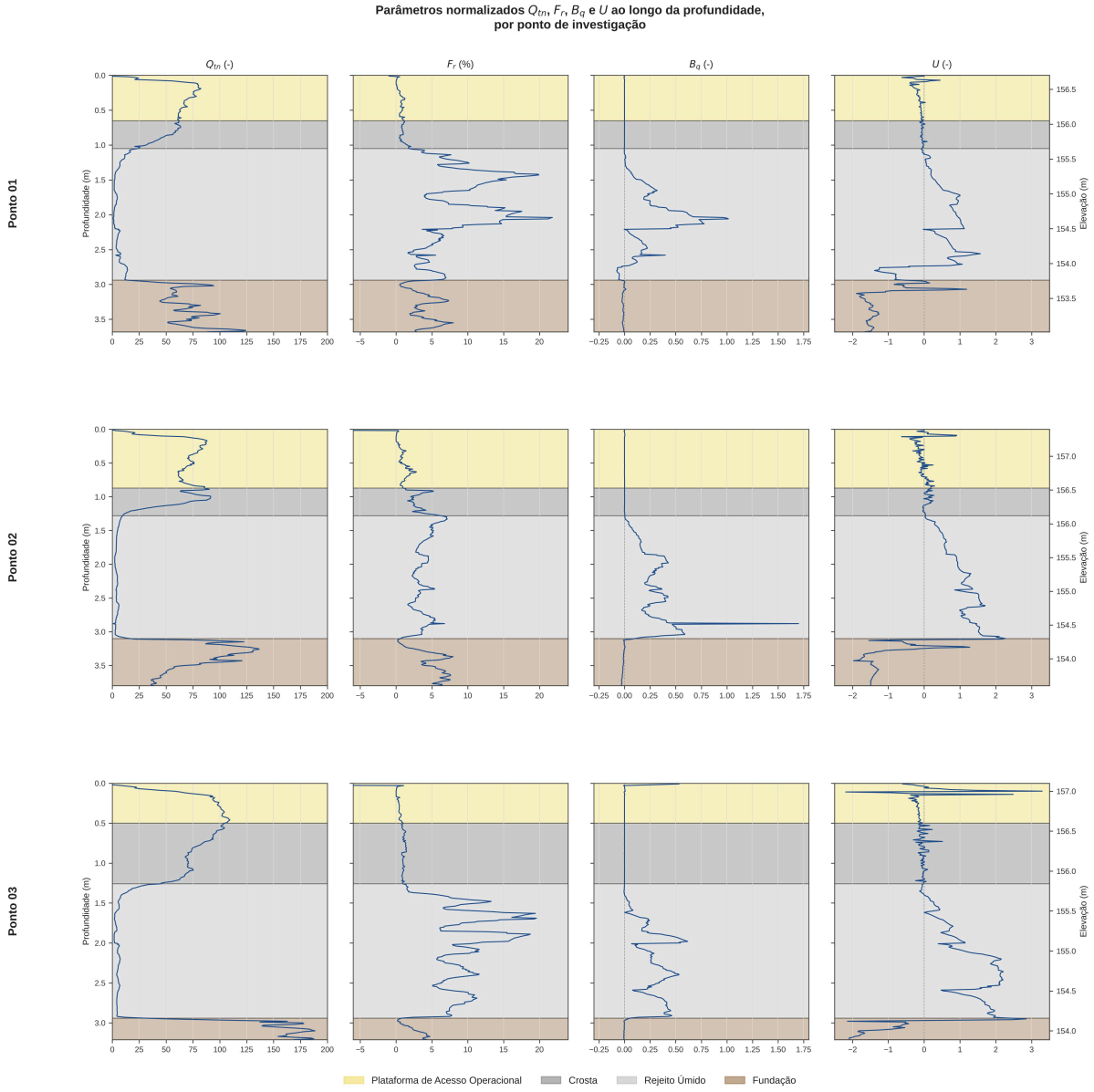
CPTu, sendo mais bem identificada por comparação com levantamentos topográficos da superfície do rejeito.

4.4. Caracterização do Comportamento dos Rejeitos

A análise pelos ábacos de classificação comportamental (SBT) e pelo índice Ic evidenciou diferenças entre as camadas em todos os pontos. No Ponto 01, a crosta de rejeito apresentou menor teor de umidade e maior consistência relativa, com resposta limítrofe entre comportamento contrátil e dilatante. No Ponto 02, a crosta apresentou comportamento majoritariamente dilatante, com um trecho de resposta limítrofe entre contrátil e dilatante. No Ponto 03, a crosta apresentou maior resistência e maior espessura em relação aos demais pontos, com diferença mais sutil de comportamento em relação à camada de plataforma de acesso operacional subjacente. Em todos os pontos, o rejeito úmido em profundidade, apesar de apresentar a mesma composição granulométrica e mineralógica da crosta, comportou-se como material fino de baixa consistência, com resposta predominantemente contrátil.

A fundação apresentou, nos três pontos, comportamento dilatante e maior resistência relativa, sendo classificada, pela análise de Ic, inicialmente como sugestiva de areia limpa a areia siltosa nos Pontos 01 e 02; contudo, a análise pelo ábaco comportamental de Robertson indicou tratar-se, na realidade, de um solo argiloso com alta razão de pré-adensamento (overconsolidation ratio, OCR), o que ilustra a importância de não interpretar o Ic de forma isolada, sem cruzamento com os ábacos de classificação. No Ponto 03, a interpretação da fundação foi mais consistente entre os dois critérios, indicando solo fino (silte argiloso) pré-adensado tanto pelo Ic quanto pelo ábaco de Robertson.

Figura 2. Parâmetros normalizados Qtn, Fr, Bq e U2 ao longo da profundidade, por ponto de investigação.



Fonte: *elaborado pelos autores a partir dos dados da campanha de investigação CPTu (2025).*

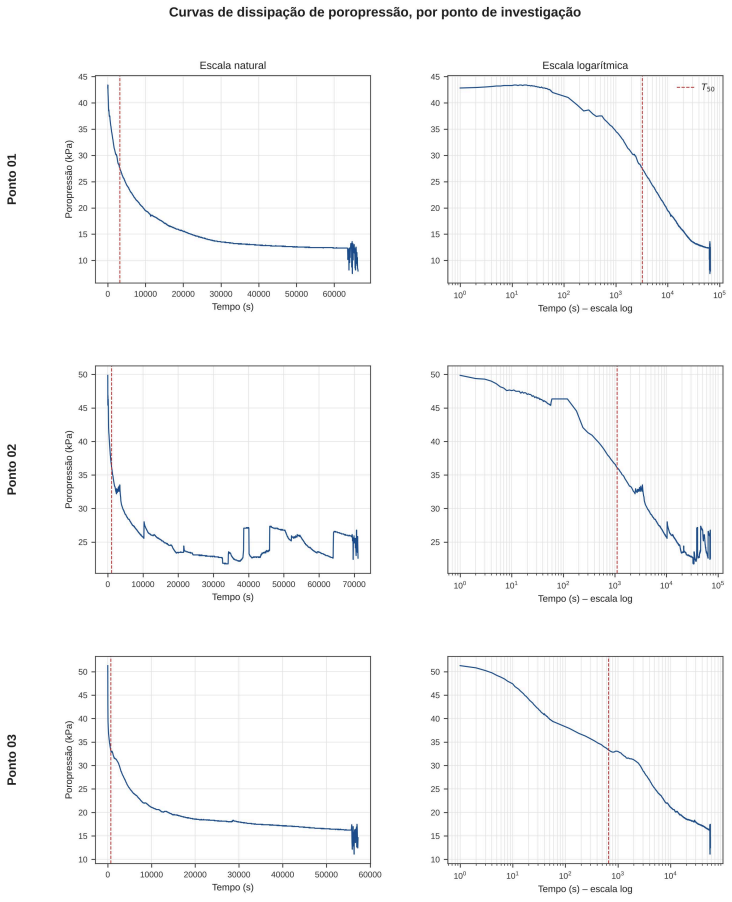
4.5. Resultados dos Ensaios de Dissipação

Os ensaios de dissipação realizados na camada de rejeito apresentaram, nos Pontos 01 e 03, decaimento monotônico da poropressão, compatível com o comportamento esperado para material fino não consolidado, com formação de patamar a partir de aproximadamente 40.000 s, indicando dissipação praticamente completa do excesso de poropressão gerado na cravação. O Ponto 01

apresentou T50 de aproximadamente 3.200 s e poropressão de equilíbrio próxima à condição hidrostática; o Ponto 03 apresentou T50 de aproximadamente 660 s — o menor entre os três pontos — e poropressão de equilíbrio levemente acima da hidrostática, sugerindo condições de drenagem relativamente mais favoráveis nessa região.

O ensaio de dissipação do Ponto 02 apresentou indícios de interferências locais nas medições de poropressão, com T50 de aproximadamente 1.100 s e poropressão de equilíbrio acima da hidrostática. Em função dessas interferências, esse valor específico é tratado, neste artigo, como referência aproximada.

Figura 3. Curvas de dissipação de poropressão (escalas log e natural), por ponto de investigação.



Fonte: *elaborado pelos autores a partir dos dados da campanha de investigação CPTu (2025).*

4.6. Variabilidade Entre os Pontos Investigados

A comparação entre os três pontos investigados evidencia variabilidade espacial relevante no depósito, tanto em termos de espessura das camadas quanto de condições de drenagem. A espessura da crosta variou em quase o dobro entre o Ponto 01/02 (cerca de 0,40 m) e o Ponto 03 (0,76 m), e o T50 variou em quase cinco vezes entre o Ponto 03 (660 s) e o Ponto 01 (3.200 s). Essa variabilidade indica que as condições encontradas durante a escavação do depósito não são uniformes, mesmo em uma área relativamente restrita, reforçando a necessidade de tratar o depósito como um meio heterogêneo tanto na vertical quanto na horizontal.

4.7. Implicações dos Resultados para o Planejamento da Remoção

Seguindo a sequência resultado CPTu → interpretação geotécnica → incerteza identificada → implicação para a remoção → potencial ganho operacional, alguns exemplos ilustram a conexão entre os resultados obtidos e o planejamento das operações.

A identificação de diferentes espessuras de crosta entre os pontos investigados demonstra variabilidade espacial relevante. Essa variabilidade pode indicar que as condições encontradas durante a escavação não são uniformes ao longo da área do depósito. Consequentemente, informações prévias sobre a distribuição dessas camadas podem subsidiar o planejamento das frentes de remoção e a preparação para diferentes condições de material em diferentes setores do depósito, o que pode resultar em maior previsibilidade operacional.

De modo semelhante, a diferença nos valores de T50 entre os pontos sugere condições de drenagem distintas ao longo do depósito, com a região do Ponto 03 apresentando comportamento mais favorável à dissipação de poropressões do que a região do Ponto 01. Essa informação, embora pontual, apresenta potencial para subsidiar a definição de sequências de escavação que considerem as condições de saturação esperadas em diferentes setores, sem que se possa, a partir dos dados atuais, extrapolar quantitativamente essas condições para toda a extensão do depósito.

A observação de menor consistência relativa e resposta predominantemente contrátil no rejeito úmido, em contraste com o comportamento mais consistente da crosta e da fundação, indica que a maior parte da coluna de rejeito corresponde a um material de menor resistência relativa. Esse resultado indica que a remoção da camada intermediária de rejeito úmido tende a ser mais desafiadora do que a da crosta superficial ou da camada próxima à fundação, o que pode orientar a definição de métodos e sequências de escavação específicos para cada camada.

4.8. Potenciais Ganhos Operacionais Associados à Investigação CPTu

O conhecimento prévio das espessuras de camadas, das condições de saturação e da variabilidade entre pontos apresenta potencial para aumentar a previsibilidade das condições encontradas durante a remoção e para apoiar o planejamento das frentes de trabalho, ao indicar setores do depósito com maior ou menor espessura de material e diferentes consistências. Não há, contudo, indicadores

quantitativos disponíveis que permitam mensurar esse ganho em termos de custo, tempo ou produtividade.

As diferentes condições de comportamento identificadas — crosta mais consistente, camada intermediária de menor consistência e fundação pré-adensada de maior resistência — sugerem que diferentes estratégias ou sequências operacionais podem ser necessárias para cada camada, especialmente quanto ao método de escavação e ao manuseio do material mais úmido. O conhecimento prévio do perfil de saturação e das condições de drenagem de cada setor também apresenta potencial para subsidiar estratégias de ressecamento do rejeito previamente à remoção, sem que se possa, a partir dos dados atuais, quantificar o tempo ou a eficiência desse processo.

A obtenção de perfis contínuos de resistência, atrito e poropressão, complementados por ensaios de dissipação, apresenta potencial para reduzir incertezas sobre as condições do depósito antes da execução das atividades de remoção, ao substituir suposições genéricas por informações específicas de cada ponto investigado. Os resultados obtidos também evidenciam a variabilidade espacial do depósito, informação que pode ser incorporada ao planejamento das operações de remoção de forma cada vez mais fundamentada em dados.

A Tabela 3 sintetiza as condições identificadas em cada ponto e suas possíveis implicações para o planejamento da remoção, e a Tabela 4 relaciona, de forma objetiva, as informações obtidas pelo CPTu, sua interpretação geotécnica, a aplicação no planejamento e o correspondente potencial ganho, reforçando a distinção entre

resultado medido, interpretação técnica e potencial aplicação operacional.

Tabela 3. Comparação das condições identificadas por ponto e possíveis implicações para o planejamento da remoção.

Ponto	Condição identificada	Possível implicação para o planejamento da remoção
Ponto 01	Crosta mais delgada (0,40 m); T50 mais elevado (3.200 s); maior mudança de poropressão perto da fundação	Setor com indícios de drenagem mais lenta; pode requerer maior atenção ao manuseio do rejeito úmido
Ponto 02	Espessura de forro maior (0,87 m); ensaio de dissipação sujeito a interferências locais	Interpretação de drenagem sujeita a incerteza adicional nesse ponto
Ponto 03	Crosta mais espessa e resistente (0,76 m); T50 mais baixo (660 s)	Setor com potencial de melhores condições de drenagem e maior resistência superficial; pode subsidiar priorização de frentes

Fonte: *elaborado pelos autores a partir dos dados da campanha de investigação CPTu (2025).*

Tabela 4. Relação entre informação obtida pelo CPTu, interpretação, aplicação no planejamento e potencial ganho operacional.

Informação obtida	Interpretação	Aplicação no planejamento	Potencial ganho
Espessura de crosta, forro e	Heterogeneidade vertical e	Setorização do depósito para	Maior previsibilidade das condições

rejeito úmido por ponto	horizontal do depósito	fins de escavação	de material por setor
Valores de T50 por ponto	Condições de drenagem variáveis (mais rápida no Ponto 03, mais lenta no Ponto 01)	Priorização/sequenciamento de frentes conforme condição esperada	Potencial redução de incertezas durante a escavação
Classificação SBT e Ic por camada	Camada intermediária de menor consistência; crosta e fundação de maior resistência	Definição de métodos de escavação adequados a cada camada	Potencial melhoria da eficiência por adequação do método ao material
Comportamento da poropressão próximo à fundação	Transição de comportamento na interface rejeito–fundação	Atenção redobrada ao se aproximar da fundação durante a escavação	Potencial redução de riscos operacionais associados a essa transição

Fonte: *elaborado pelos autores a partir dos dados da campanha de investigação CPTu (2025).*

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise conjunta dos três pontos de investigação permitiu identificar um padrão de comportamento comum entre as diferentes verticais ensaiadas, ainda que com variações relevantes em sua magnitude, possibilitando reconhecer, para cada vertical, o perfil de saturação, a espessura da crosta superficial e as condições de drenagem do rejeito. Essas informações constituem subsídio direto ao planejamento das escavações e à definição de estratégias voltadas à otimização do ressecamento do rejeito, na medida em

que indicam, previamente, em quais setores e profundidades a saturação e a drenagem tendem a ser mais ou menos favoráveis a esse processo. A comparação entre os pontos também permitiu evidenciar diferenças comportamentais entre regiões distintas do reservatório, confirmando que o depósito não se comporta como um meio homogêneo.

Os ensaios CPTu realizados nos três pontos de investigação permitiram identificar a sequência estratigráfica do depósito de rejeitos de lavagem de bauxita (plataforma de acesso operacional, crosta, rejeito úmido e fundação), suas espessuras e o comportamento predominante de cada camada. Foi evidenciada variabilidade relevante entre os pontos, tanto na espessura da crosta (0,40 m a 0,76 m) quanto nas condições de drenagem, expressas pelo tempo de dissipação T50 (660 s a 3.200 s), confirmando a heterogeneidade do depósito investigado.

A investigação CPTu fornece informações sobre as condições e a variabilidade do depósito que podem ser incorporadas ao planejamento das operações de remoção, contribuindo para maior previsibilidade e suporte à tomada de decisões operacionais. Essas informações apresentam potencial para subsidiar o planejamento das frentes de escavação, a definição de estratégias operacionais adequadas a cada camada — incluindo estratégias de ressecamento do rejeito — e a redução de incertezas durante a execução, sem que se possa, com os dados atualmente disponíveis, afirmar ganhos quantitativos de custo, produtividade ou tempo de execução, uma vez que tais indicadores não constam do material analisado.

Como limitações do estudo, destacam-se: a apresentação dos perfis de qc, fs e u2 exclusivamente em forma gráfica, sem valores

numéricos discretos tabulados; os indícios de interferências locais no ensaio de dissipação do Ponto 02, que reduzem a confiabilidade do respectivo valor de T50; e a malha de apenas três pontos, que, embora suficiente para evidenciar a heterogeneidade do depósito, ainda é limitada para representar integralmente sua variabilidade espacial.

De modo geral, os resultados obtidos ilustram como a investigação por CPTu pode ser interpretada sob uma ótica de planejamento operacional, complementando seu uso tradicional como etapa de caracterização geotécnica de depósitos de rejeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D5778-20. Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

DIENSTMANN, G.; MEIER, A. L.; CAMPOS, J. P.; ZIESMANN, N. Incorporating inherent variability into numerical simulations of velocity effects: a behavior-based CPTu study on gold tailings. Soil and Rocks, v. 49, n. 2, 2026. DOI: 10.28927/SR.2026.013525.

GUIMARÃES, L. A. O. P.; DIAS, L. E.; ROCHA, G. C.; ASSIS, I. R.; FERNANDES, R. B. A. Physical quality of bauxite tailing after a decade of environmental recovery. Revista Ciência Agronômica, v. 49, n. 2, p. 192-200, 2018. DOI: 10.5935/1806-6690.20180022.

RACANELLI, L. A.; OLIVEIRA, R. C.; BRITO, W. S.; SOUZA, J. A. S. Uso de rejeito de lavagem de bauxita para a fabricação de ligantes geopoliméricos. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 1, e-12595, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200001.0921.

ROBERTSON, P. K. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update. Canadian Geotechnical Journal, v. 53, n. 12, p. 1910-1927, 2016.

ROBERTSON, P. K. Interpretation of cone penetration tests — a unified approach. Canadian Geotechnical Journal, v. 46, n. 11, p. 1337-1355, 2009.

ROBERTSON, P. K. Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, v. 27, n. 1, p. 151-158, 1990.

SCHNAID, F. In Situ Testing in Geomechanics: The Main Tests. Londres: Spon Press, 2009.

SOUSA, G. M.; GOMES, R. C. Obtaining geotechnical parameters from correlations between geophysics and CPT tests in tailings dams. REM - International Engineering Journal, v. 73, n. 4, p. 453-462, 2020. DOI: 10.1590/0370-44672019730114.

---

[1] Mestranda em Engenharia de Barragens e Segurança Ambiental na Universidade Federal do Pará (UFPA) Campus Tucuruí. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[2] Mestranda em Engenharia de Barragens e Segurança Ambiental na Universidade Federal do Pará (UFPA) Campus Tucuruí. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[3] Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e Professor convidado da disciplina de mecânica dos solos na UFMG. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[4] Mestrando em Engenharia de Barragens e Segurança Ambiental na Universidade Federal do Pará (UFPA) Campus Tucuruí. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[5] Mestranda em Engenharia de Barragens e Segurança Ambiental na Universidade Federal do Pará (UFPA) Campus Tucuruí. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[6] Pós-doutor em Geologia e Geotecnia na Universidade Federal do Pará (UFPA). E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail