

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

KYMBERLY RAMOS MARTINS FELTZ

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA NÃO DRENADA EM DEPÓSITOS DE
REJEITOS DE MINERAÇÃO DE BAUXITA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PALHETA E
CPT_u**

Joinville

2022

KYMBERLY RAMOS MARTINS FELTZ

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA NÃO DRENADA EM DEPÓSITOS DE REJEITOS
DE MINERAÇÃO DE BAUXITA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PALHETA E CPT_u

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dra. Helena Nierwinski

Joinville

2022

KYMBERLY RAMOS MARTINS FELTZ

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA NÃO DRENADA EM DEPÓSITOS DE REJEITOS
DE MINERAÇÃO DE BAUXITA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PALHETA E CPT_u

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 18 de março de 2022.

Banca Examinadora:

Dra Helena Nierwinski
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Marcelo Heidemann
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Julián Asdrubal Buriticá García
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico a meu filho Benjamin, fonte inesgotável
de inspiração e motivação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que mesmo em sua infinita grandeza se importou com cada detalhe em minha vida, pelo dom da vida, renovo e suporte diário, por nunca ter deixado faltar as condições para continuar e pela sua misericórdia para com a minha vida, assim como diz o salmista no capítulo 126 e versículo 3, “Grandes coisas fez o Senhor por nós e por isso estamos alegres!”.

Ao meu esposo Abner, que me deu o suporte financeiro em grande parte da faculdade, por não me deixar desistir mesmo nos mais obscuros dias. Aos meus pais Peter e Diair e meu irmão Jam, que nunca me permitiram desistir e me deram todo o suporte financeiro e emocional até o casamento, pelos valores repassados a mim, os quais pretendo nunca esquecer. Aos meus familiares, que sempre me incentivaram e ajudaram do modo como podiam, em especial os tios Vanderlei, Tereza (*em memória*), Stela, Rosita e Jadson, que muitas vezes ajudaram financeiramente para chegar até a faculdade.

À minha orientadora Helena, primeiramente por passar paz. Por se importar comigo e ser minha amiga, por ser solícita e tirar o melhor de mim. Por sua paciência e grande capacidade a mim investidos.

Aos meus irmãos em Cristo na faculdade, *Chi alpha*, por serem uma embaixada do reino de Deus na faculdade e compartilharem comigo desta árdua jornada, juntos somos mais fortes.

Aos demais professores da Universidade Federal de Santa Catarina que transmitiram seus conhecimentos de forma sublime e essencial à minha formação, aos demais funcionários que me atenderam da melhor forma que puderam.

Muito obrigada.

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso!
Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus,
estará com você por onde você andar”.

Josué 1:9

RESUMO

O rejeito de mineração de bauxita é um material sem valor comercial que advém do beneficiamento da mesma. A forma mais econômica de estoque deste produto é a deposição por meio de barragens, estas que conforme vão alcançando seus limites, vão sendo alteadas a fim de receber mais material vindo do processo de beneficiamento. Para o desenvolvimento de projetos seguros destas estruturas de contenção, uma das propriedades geotécnicas frequentemente avaliada é a resistência não-drenada (S_u) dos rejeitos, considerando que tais materiais se encontram saturados e muitas vezes submetidos a carregamentos rápidos (resposta não drenada). A resistência não drenada pode ser obtida através de ensaios de campo como o ensaio de palheta e o CPTu. O ensaio de palheta fornece o valor de S_u de forma direta, por meio da rotação de uma palheta cruciforme no interior do maciço. Entretanto, o ensaio de palheta é realizado pontualmente, não retornando um perfil contínuo de S_u , o que pode torná-lo oneroso caso informações mais detalhadas forem demandadas. Neste sentido, o ensaio CPTu pode fornecer o valor de S_u por meio de correlações empíricas com a resistência de ponta ao longo de toda a profundidade. Assim sendo, o objetivo do presente trabalho é comparar a resistência não drenada obtida através do ensaio de palheta com a resistência não drenada calibrada, através do fator Nkt , estimada pelo CPTu e verificar a porcentagem de erro com o intuito de avaliar a aplicabilidade do ensaio CPTu para traçar perfis contínuos de resistência não drenada. A análise dos resultados demonstrou que os valores de Nkt que fornecem os valores de S_u mais próximos aos obtidos pelo ensaio de palheta variam muito de ensaio para ensaio e de obra para obra, mesmo se tratando do mesmo tipo de material. Desta forma, conclui-se que especialmente em depósitos de rejeitos de mineração de bauxita, a avaliação de S_u com base em ensaios CPTu e com a adoção de valores de Nkt tipicamente indicados pela literatura, deve ser realizada de forma bastante criteriosa para o uso em projetos de engenharia.

Palavras-chave: Rejeito de mineração de bauxita. Resistência não drenada. Ensaio de palheta. Ensaio de piezocone.

ABSTRACT

Bauxite mining waste is a material with no commercial value that comes from its processing. The most economical way of storing this product is deposition through dams, which as they reach their limits, are raised in order to receive more material from the beneficiation process. For the development of safe designs of these containment structures, one of the geotechnical properties frequently evaluated is the undrained strength (S_u) of the tailings, considering that such materials are saturated and often subjected to rapid loading (undrained response). Undrained strength can be obtained through field tests such as the vane test and the CPTu. The vane test provides the value of S_u directly, through the rotation of a cruciform vane inside the massif. However, the vane test is performed punctually, not returning a continuous profile of S_u , which can make it expensive if more detailed information is required. In this sense, the CPTu test can provide the value of S_u through empirical correlations with the tip resistance along the entire depth. In this sense, the objective of the present work is to compare the undrained strength obtained through the vane test with the calibrated undrained strength, through N_{kt} , estimated by the CPTu and to verify the percentage of error in order to evaluate the applicability of the CPTu test to plot continuous undrained strength profiles. The analysis of the results showed that the N_{kt} values that provide the S_u values closest to those obtained by the vane test vary greatly from test to test and from work to work, even when dealing with the same type of material. In this way, it is concluded that, especially in bauxite mining tailings deposits, the evaluation of S_u based on CPTu tests and with the adoption of N_{kt} values typically indicated in the literature, must be carried out very carefully for use in engineering projects.

Keywords: Bauxite mining tailings. Undrained resistance. Vane test. CPTu test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas granulométricas típicas de rejeito de mineração de bauxita: Parcelas de lama vermelha e areia vermelha.....	6
Figura 2 – Processo simplificado de obtenção dos produtos da indústria mineradora.....	7
Figura 3 – Processo de beneficiamento da bauxita.....	9
Figura 4 – S_u versus rotação angular com medida de atrito das hastes.....	13
Figura 5 – Curva Torque x Rotação.....	14
Figura 6 – Resultado típico de bateria de ensaios de Palheta no Rio de Janeiro.....	15
Figura 7 – Determinação do fator de correção de Bjerrum.....	16
Figura 8 – Diferentes posições de medida poropressão no ensaio CPTu.....	18
Figura 9 – Ensaio CPTu apresentado pela literatura.....	20
Figura 10 – Classificação de solos ao utilizar as grandezas normalizadas Q_t e B_q	20
Figura 11 – Classificação de solos ao utilizar as grandezas normalizadas Q_t e F_r	21
Figura 12 – Etapas do estudo.....	24
Figura 13 – Exemplo de resultado do ensaio de palheta executado na Obra 1.....	27
Figura 14 – Resultado de ensaio de palheta com curva contínua, obtida para a Obra 1.....	27
Figura 15 – Exemplo de resultado de ensaio CPTu executado na obra 3.....	28
Figura 16 – Classificação quanto ao comportamento do rejeito de mineração de bauxita utilizando as grandezas B_q e Q_t – Obra 1.....	30
Figura 17 - Classificação quanto ao comportamento do rejeito de mineração de bauxita utilizando as grandezas F_r e Q_t – Obra 1.....	30
Figura 18 – IC (<i>material classification index</i>) para Obra 1.....	31
Figura 19 – Compilado dos resultados dos ensaios de palheta efetuados na obra 1.....	32
Figura 20 – Sensibilidade do material ensaiado na Obra 1.....	32
Figura 21 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2= 12$ e $Nkt_1= 16$, para o CPTu 17.....	35
Figura 22 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2= 12$ e $Nkt_1= 16$, para o CPTu 19.....	36
Figura 23 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2= 12$ e $Nkt_1= 16$, para o CPTu 21.....	37
Figura 24 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2= 12$ e $Nkt_1= 16$, para o CPTu 23.....	39

Figura 25 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2= 12$ e $Nkt_1= 16$, para o CPTu 28.....	40
Figura 26 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2= 12$ e $Nkt_1= 16$, para o CPTu 32.....	41
Figura 27 - Dispersão de resultados de ensaios em rejeito de mineração de bauxita na obra 2 utilizando as grandezas Bq e Qt de acordo com Robertson (1990).....	42
Figura 28 - Dispersão de resultados de ensaios em rejeito de mineração de bauxita da obra 2 utilizando as grandezas Fr e Qt de acordo com Robertson (1990).....	43
Figura 29 – IC (<i>material classification index</i>) para Obra 2.....	44
Figura 30 – Compilado dos ensaios de palheta efetuados na obra 2.....	45
Figura 31 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2= 11$ e $Nkt_1= 17$, para o CPTu 1.....	47
Figura 32 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2= 11$ e $Nkt_1= 17$, para o CPTu 3.....	48
Figura 33 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2= 11$ e $Nkt_1= 17$, para o CPTu 4.....	49
Figura 34 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt = 20$ e $Nkt_1= 17$, para o CPTu 5.....	51
Figura 35 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt = 20$ e $Nkt_1= 17$, para o CPTu 6.....	52
Figura 36 - Dispersão de resultados de ensaios em rejeito de mineração de bauxita na obra 3 utilizando as grandezas Bq e Qt de acordo com Robertson (1990).....	53
Figura 37 - Dispersão de resultados de ensaios em rejeito de mineração de bauxita da obra 3 utilizando as grandezas Fr e Qt de acordo com Robertson (1990).....	54
Figura 38 – IC (<i>material classification index</i>) para Obra 3.....	54
Figura 39 – Compilado dos ensaios de palheta efetuados na obra 3.....	55
Figura 40 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt = 20$ e $Nkt_1= 10$, para o CPTu 1.....	57
Figura 41 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt = 20$ e $Nkt_1= 10$, para o CPTu 2.....	58
Figura 42 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_1= 14$ e $Nkt= 10$, para o CPTu 5.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Envolvimento dos minérios no faturamento da mineração no Brasil.....	4
Tabela 2 – Relação de volume de minério extraído e rejeito produzido de acordo com o material.....	7
Tabela 3 – Características dos métodos de disposição de rejeitos em barragens de alteamento.....	10
Tabela 4 - Resistência não drenada de alguns materiais do Brasil.....	12
Tabela 5 – Fator de Bjerrum típicos aproximados.....	16
Tabela 6 – Classificação de argilas de acordo com a sua sensibilidade.....	17
Tabela 7 – Classificação de solos por zonas.....	21
Tabela 8 – Classificação dos solos de acordo com o IC.....	22
Tabela 9: Resumo do banco de dados da Obra 1.....	25
Tabela 10: Resumo do banco de dados da Obra 2.....	26
Tabela 11: Resumo do banco de dados da Obra 3.....	26
Tabela 12 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 17.....	34
Tabela 13 – Diferenças em pontos percentuais entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio 19.....	35
Tabela 14 – Diferenças em pontos percentuais entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 21.....	37
Tabela 15 – Diferenças em pontos percentuais entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio 23.....	38
Tabela 16 – Diferenças em pontos percentuais entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio 28.....	39
Tabela 17 – Diferenças em pontos percentuais entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio 32.....	41
Tabela 18 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 1.....	46
Tabela 19 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 3.....	47
Tabela 20– Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 4.....	49

Tabela 21 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 5.....	50
Tabela 22 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 6.....	51
Tabela 23 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 1.....	56
Tabela 24 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 2.....	58
Tabela 25 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 5.....	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	PROCESSO DE MINERAÇÃO E REJEITOS DE MINERAÇÃO	16
2.2	PROCESSO DE BENEFICIAMENTO E DEPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE BAUXITA.....	20
2.3	RESISTÊNCIA NÃO DRENADA	23
2.4	OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA NÃO-DRENADA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CAMPO.....	24
2.4.1	ENSAIO DE PALHETA	25
2.4.2	CPT_u.....	29
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	ETAPAS DO ESTUDO.....	36
3.2	LOCAIS DE ESTUDO E ENSAIOS ANALISADOS.....	37
3.2.1	OBRA 1.....	37
3.2.2	OBRA 2.....	37
3.2.3	OBRA 3.....	38
3.3	INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE PALHETA.....	38
3.4	INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS CPTU	40
4	RESULTADOS	41
4.1	OBRA 1	41
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL POR MEIO DOS RESULTADOS DO ENSAIO CPT_u.....	41
4.1.2	INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE PALHETA.....	43

4.1.3	INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO CPTU E COMPARATIVO COM VALORES DE <i>SU</i> OBTIDOS PELO ENSAIO DE PALHETA.....	45
4.2	OBRA 2	54
4.2.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	54
4.2.2	INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE PALHETA.....	56
4.2.3	INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO CPTU E COMPARATIVO COM VALORES DE <i>SU</i> OBTIDOS PELO ENSAIO DE PALHETA.....	57
4.3	OBRA 3	65
4.3.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	65
4.3.2	INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE PALHETA.....	67
4.3.3	INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO CPTU E COMPARATIVO COM VALORES DE <i>SU</i> OBTIDOS PELO ENSAIO DE PALHETA.....	68
5.	CONCLUSÃO.....	75
	APÊNDICE A – RESUMO DO ENSAIO DE PALHETA DA OBRA 1	85
	APÊNDICE B – ESTIMATIVA DO NKT_1	86
	APÊNDICE C – ESTIMATIVA DO NKT_2	86
	APÊNDICE D – RESUMO DO ENSAIO DE PALHETA DA OBRA 2	87
	APÊNDICE E – RESUMO DO ENSAIO DE PALHETA DA OBRA 3.....	88

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um metal de ampla utilização mundial devido algumas de suas propriedades tais como: baixo peso específico, alta ductibilidade e grande possibilidade de reciclagem. De acordo com o *U.S. Geological Survey* (2020), a produção anual mundial de bauxita (mineral precursor do alumínio) é superior a 350 milhões de toneladas, sendo o Brasil o terceiro país com a maior produção em nível mundial, com cerca de 29 mil toneladas, em 2018. Segundo a Associação brasileira do alumínio (2017), a bauxita representou mais de 25% do faturamento das exportações do país em 2014.

A descoberta do alumínio é uma das mais recentes no tocante aos minerais, isto porque não é possível encontrar o material livre na natureza. O alumínio somente se torna utilizável por meio do processo denominado de eletrólise, sendo que entre os elementos necessários para a sua fabricação está a bauxita (FERREIRA, 1999). De acordo com Ferreira (1999), a eletrólise foi criada em 1886, na França, por Héroult e, em paralelo, por Hall nos Estados Unidos, viabilizando a obtenção do alumínio a partir dos minérios, sendo utilizada em seu refino até os dias de hoje.

Previamente à eletrólise, a bauxita precisa passar por um processo de beneficiamento, para obtenção de alumina (Al_2O_3). De acordo com Miura (2016), o processo de refino da bauxita é chamado de método Bayer, onde é utilizada soda cáustica para a obtenção da alumina. Este processo de beneficiamento da bauxita, segundo Nierwinski (2019), promove um aumento na produtividade de alumina, no entanto, ao mesmo tempo gera uma avultada quantidade de rejeitos. Rejeito este, que conforme IBRAM (2016) e Edraki *et al* (2014) é basicamente formado por partículas finas, encharcadas e com metais dissolvidos e reagentes utilizados no beneficiamento.

De acordo com Rodrigues (2017), o aumento substancial na geração de rejeitos de mineração exige a adoção de metodologias de armazenamento seguras e estáveis, capazes de armazenar todo o quantitativo produzido. Consoante com Nierwinski (2019), a disposição de rejeitos módica atual é através de barragens de alteamento, que podem ser construídas até mesmo com o próprio rejeito, o que torna o método atrativo pela economia e facilidade de execução.

Por outro lado, tragédias associadas ao rompimento de barragem de rejeitos, como aconteceu em 2015, em Minas Gerais, com o episódio da barragem de Fundão e, em 2019, também em Minas Gerais, na barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho, tem chamado

a atenção da comunidade técnica para um melhor entendimento do comportamento de rejeitos de mineração e estabilidade destas estruturas. Pereira (2005) acende um alerta para a necessidade de implementação de estudos sistemáticos relacionados à caracterização tecnológica dos rejeitos para se estabelecer, de forma criteriosa, as premissas de projeto de suas estruturas de contenção.

De acordo com Vick (1983), os rejeitos de mineração são dispostos em barragens por via aquosa, estando assim, saturados. Em função de sua granulometria fina, costumam também apresentar permeabilidade intermediária (NIERWINSKI, 2019). Desta forma, em muitas situações de projeto, o material pode receber solicitações nas quais seu comportamento será não-drenado. Segundo Klahold (2013), um parâmetro fundamental para análises de estabilidade em condições de carregamento não drenado é a resistência não drenada (S_u). A resistência não-drenada reflete o maior esforço cisalhante que um solo saturado pode suportar sem apresentar rompimento ou deformação excessiva (condições não-drenadas).

Segundo Almeida e Marques (2010), os ensaios de campo mais recomendados para a obtenção da resistência não drenada são o ensaio de palheta e o ensaio de piezocone graças à boa relação custo-benefício. Consoante à ABNT (1989), no que tange ao ensaio de palheta, é possível obter a resistência não-drenada do material ensaiado de forma direta, através do torque obtido na profundidade de interesse. Já o piezocone, de acordo com a ABNT (1991), tem o objetivo de medir a resistência do solo à penetração de uma ponteira padronizada com uma velocidade constante de 20mm/s, com uma precisão de ± 5 mm/s. Empiricamente, por meio de correlações, a resistência de ponta do cone pode ser utilizada para estimativa da resistência não drenada do material, fornecendo um perfil contínuo desta propriedade.

Como o ensaio de palheta torna-se oneroso para ser feito em todas as profundidades de interesse, o uso do ensaio CPTu para a obtenção de S_u torna-se atrativo. No entanto, por utilizar formulações empíricas, desenvolvidas através de banco de dados de ensaios realizados em solos naturais, o valor de S_u obtido por meio do ensaio CPTu em rejeitos de mineração pode gerar incertezas. Desta forma, pretende-se nesta pesquisa realizar uma avaliação dos valores de S_u obtidos por meio de ensaios de palheta, comparativamente a valores estimados por meio do ensaio CPTu, com o auxílio do fator de capacidade de carga N_{kt} . Schnaid (2012) afirma ser um intervalo aceitável para N_{kt} no Brasil, entre 10 e 20 e que 12 é um valor corriqueiro no que tange solos moles brasileiros. No entanto, Randolph *et al.* (1998) reitera que o erro ao estimar o N_{kt} seja da ordem de 20% a 40%. Desta forma, pretende-se comparar e avaliar as possíveis divergências entre os valores de S_u obtidos nos diferentes ensaios e, verificar se valores de N_{kt}

tipicamente indicados pela literatura para definição de S_u a partir do CPTu, em solos naturais, são aplicáveis ao estudo do comportamento do rejeito de mineração de bauxita.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste TCC.

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo analisar a variação da resistência não drenada por meio de resultados de ensaios de palheta e CPTu executados em depósitos de rejeitos de mineração de bauxita.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Reunir dados de ensaios de Palheta e ensaio CPTu realizados em depósitos de rejeito de mineração de bauxita brasileiros;
- Definir os valores de S_u para o rejeito de mineração de bauxita, pela interpretação de ensaios de palheta e CPTu;
- Analisar a aplicabilidade de valores de N_{kt} 's indicados pela literatura para solos naturais brasileiros, para a obtenção de valores da resistência não drenada pelo ensaio CPTu, comparativamente aos valores encontrados pelo ensaio de palheta;
- Comparar os valores de S_u obtidos por cada ensaio e avaliar possíveis divergências.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados conceitos fundamentais para o entendimento da presente pesquisa. Primeiramente serão apresentados aspectos relacionados à mineração, rejeitos de mineração e seus métodos de disposição. Em seguida, serão abordados conceitos relacionados à resistência não drenada e avaliação de comportamento de solos através da correta interpretação de ensaios de palheta e penetração de cone (CPTu).

2.1 PROCESSO DE MINERAÇÃO E REJEITOS DE MINERAÇÃO

Mineração é o termo empregado para a atividade de extração de minerais que possuam valor econômico. A produção mundial necessita de recursos minerais como matéria-prima, sendo assim, essa atividade continua atuando de forma vultuosa para o desenvolvimento da humanidade (NUNES, 2010). Os minerais apresentam-se como matéria-prima para muitas linhas de produção mundiais, estabelecendo um vínculo com avanços na indústria e tecnologia.

De acordo com o IBRAM (2021), a participação no faturamento da indústria da mineração de alguns elementos em especial, como o ferro, ocorre de forma bastante vultuosa, com 72,2% do faturamento da mineração em nível Brasil, e a extração de alumínio ocupando a quarta posição, conforme apresentado na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Envolvimento dos minérios no faturamento da mineração no Brasil

Minério	Participação no Faturamento - Nível Brasil
Ferro	72,20%
Ouro	9,20%
Cobre	5,50%
Alumínio	1,80%
Calcário	1,40%
Água Mineral	1,30%
Granito	1,30%
Areia	0,80%
Fosfato	0,70%
Níquel	0,70%
Nióbio	0,30%
Manganês	0,20%

Fonte: IBRAM (2021).

A mineração, enquanto atividade extrativa é uma das principais áreas de atuação que movimentam o cenário econômico brasileiro. Atualmente, o setor mineral registrou alta de 95% no faturamento em relação ao ano anterior, alcançando R\$ 70 bilhões no primeiro trimestre de 2021(excluindo-se petróleo e gás) e geração de 2 milhões de empregos indiretos (IBRAM, 2021). Mancini e Sala (2018) também afirmam que a mineração é uma das principais atividades produtoras de matéria-prima para o sustento do bem-estar da população e funcionamento da economia global.

Entretanto, também é inquestionável que a atividade mineradora produza alterações no cenário no qual é instalada, ao causar os impactos ambientais determinados pelo CONAMA, por meio da Resolução nº 1 de 23 de janeiro de 1986, como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas¹.

Além dos danos causados ao prospectar o material, é importante destacar que a indústria mineral é a maior produtora mundial de descartes, produzindo cerca de 65 bilhões de toneladas/ano, dos quais 14 bilhões são rejeitos, constituídos majoritariamente por partículas finas, menores que 150µm (JONES E BORGER, 2012).

De acordo com IBRAM (2016), os rejeitos de mineração constituem-se por partículas finas, cuja granulometria varia entre areia fina e argila, sem valor comercial, obtidas durante o processo de beneficiamento. Edraki *et al.* (2014) complementa que os rejeitos são caracterizados pela presença de água, metais dissolvidos e reagentes utilizados no processo de beneficiamento. Lozano (2006), por sua vez, ressalta que os rejeitos de mineração são os principais responsáveis pelo impacto gerado pelas mineradoras. Kossof *et al.* (2014) cita

¹ Art. 1º - Para efeito desta Resolução, considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

- I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II - as atividades sociais e econômicas;
- III - a biota;
- IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V - a qualidade dos recursos ambientais.

rejeitos de mineração como uma mistura de rocha fragmentada e fluidos do beneficiamento, com formato angular.

A Figura 1 apresenta a curva granulométrica de um rejeito de mineração de bauxita do estado do Maranhão. São caracterizadas duas parcelas do material denominadas de lama e areia vermelha. Verifica-se que em ambas as curvas a maior porcentagem de material passante é composta por finos, com predominância de partículas do tamanho de silte e argila.

Figura 2 - Curvas granulométricas típicas de rejeito de mineração de bauxita: Parcelas de lama vermelha e areia vermelha.

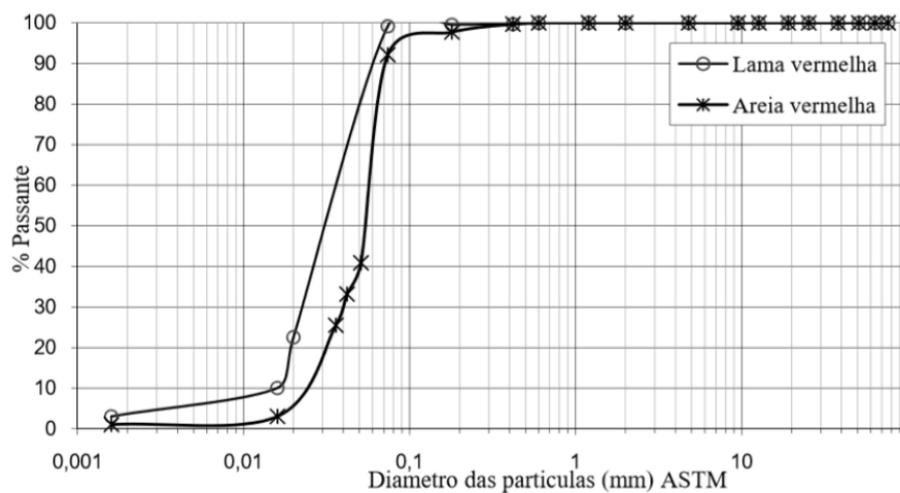
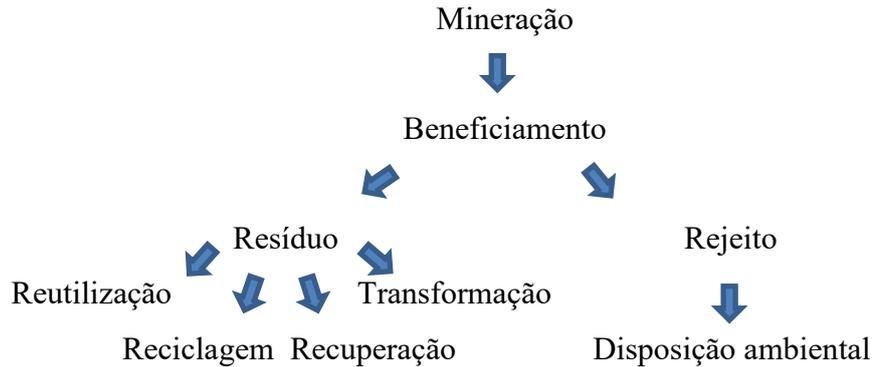


Figura 2 – Processo simplificado de obtenção dos produtos da indústria mineradora.



Fonte: Adaptado de Ferla (2016).

Os resíduos gerados na mineração podem ser reutilizados como preenchimento de minas desativadas, utilização em obras de infraestrutura ou dispostos em pilhas secas, cuja estabilização não é comprometida (IBRAM, 2021). Por outro lado, a geração de rejeitos ainda é vultuosa e este material está fadado à correta e planejada disposição ambiental. Abraão (1987) pontua que existe disparidade na porcentagem de geração de rejeitos na mineração, conforme o mineral extraído, como é visto na Tabela 2. A Tabela 2 evidencia que, por exemplo, que para a extração de uma unidade de alumina (bauxita) são geradas de 0,3 a 2,5 unidades de rejeitos. Já para o caso da extração de ouro, são produzidas 1000 unidades de rejeito para cada unidade de mineral de valor comercial. Todo o montante de rejeito produzido deverá ter uma destinação final adequada e segura.

Tabela 2 – Relação de volume de minério extraído e rejeito produzido de acordo com o material

Material	Minério	Rejeito
Carvão	1	3
Fosfato	1	5
Cobre	1	30
Alumina (bauxita)	1	0,3-2,5
Ouro	1	10000

Fonte:(adaptado de Abraão, 1987)

Observa-se que se faz necessário investir fortemente em tecnologia para diminuir a geração de rejeitos do refino e modos eficientes para alocar os rejeitos com o menor dano ambiental possível (MARTINS, 2017).

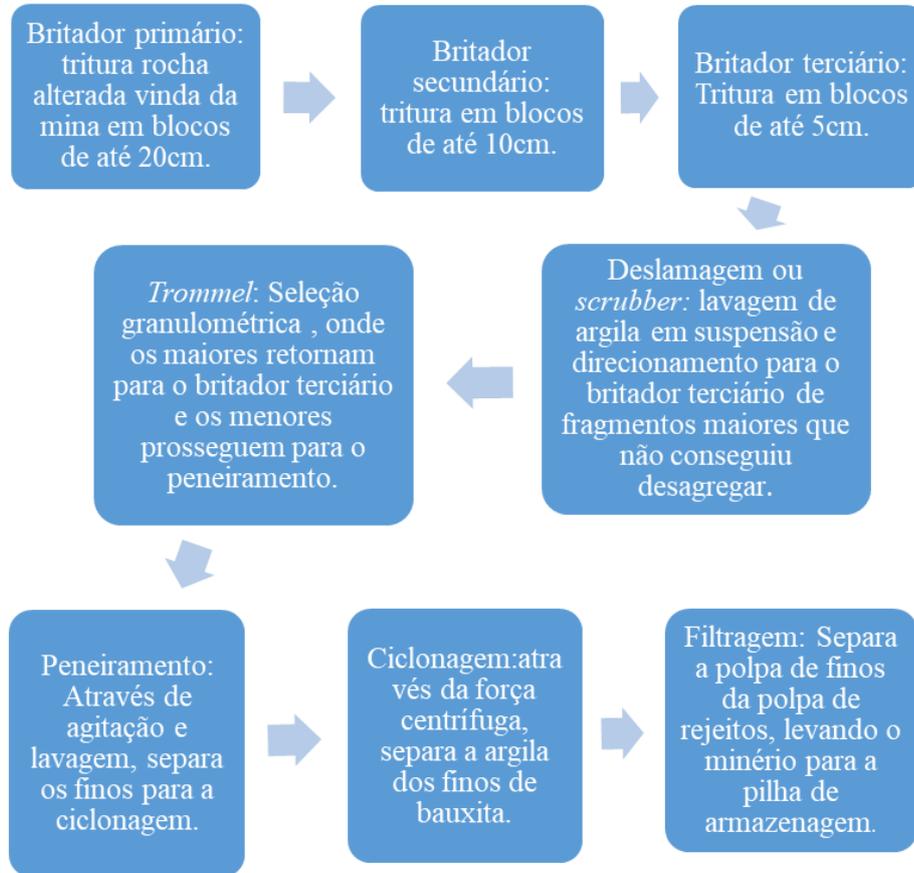
2.2 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO E DEPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE BAUXITA

Segundo Luz *et al.* (2004) e Pereira (2013), beneficiar um minério é utilizar um conjunto de operações aplicadas aos bens minerais para modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma. Ferrante (2014) dita que o beneficiamento de minérios é o tratamento industrial que transforma o minério em uma granulometria adequada, purifica a matéria-prima ao utilizar métodos físicos ou químicos, sem alteração da constituição química dos minerais.

O beneficiamento do minério é composto de uma série de etapas com o objetivo de separar o minério dos resíduos e rejeitos e concentrá-lo para se obter um material mais puro (GRUPO VISION, 2017). Este processo varia de autor para autor e de usina para usina. Para o caso do processo de beneficiamento da bauxita, Silva (2020), comenta que o mesmo possui cerca de oito etapas, sendo elas apresentadas de forma resumida na Figura 3.

A primeira etapa do beneficiamento de bauxita consiste na diminuição do tamanho do bloco feita por britadores primário, secundário e terciário. Logo após passa para a etapa da deslamagem, que consiste na lavagem dos finos e direcionamento dos blocos maiores que 5 cm para o britador terciário. Em seguida, o material passa para a seleção granulométrica, primeiramente no *Trommel*, onde havendo grãos maiores por ventura ainda, estes são direcionados para o britador terciário, e a outra parte para o peneiramento. No processo de peneiramento, o material é obviamente peneirado, mas também é lavado, a fim de preparar os grãos para a ciclonagem. A ciclonagem consiste em outra etapa que serve para separar a argila dos pequenos grãos de bauxita através da força centrífuga. Por último neste processo ocorre a filtração, que serve para separar a polpa de argila da polpa de minério que ainda resta.

Figura 3 – Processo de beneficiamento da bauxita.



Fonte: Adaptado de Silva (2020).

Dada a necessidade da utilização dos minérios cada vez maior, ocorre um aumento substancial na produtividade necessária no processo de beneficiamento e, por consequência, na geração de rejeitos. Como, de acordo com as normativas nacionais, o único fim para os rejeitos é a disposição ambiental, ir-se-á apontar a seguir os tipos de estocagem de rejeitos de mineração mais comuns no Brasil.

Um dos métodos rotineiramente utilizados para o armazenamento de rejeitos de mineração de bauxita no Brasil, são as barragens de rejeito. De acordo com Cardozo (2019), os três métodos mais utilizados para construção de barragens de rejeitos se dão pela direção de construção do barramento após o dique inicial, podendo seguir à montante, à jusante, manter a linha de equilíbrio no centro, ou ainda, combinações destes métodos.

Apresenta-se a seguir uma tabela-síntese (Tabela 3) que apresenta características dos métodos de disposição de rejeitos em barragens de alteamento. O método de alteamento à montante se destaca pela economia, pois utiliza menos material e menor área, porém possui uma menor segurança e suscetibilidade à liquefação. Já o método de alteamento à jusante se

sobressai no que tange a segurança, já que torna possível a compactação da barragem, no entanto, necessita de uma área muito grande para a saia do aterro, o que torna este método dispendioso. Por último, o método do alteamento da linha de centro se apresenta como seguro até a sismos, porém a quantidade de material utilizada pode se tornar um problema econômico se houver a necessidade de muitos alteamentos.

Tabela 3 – Características dos métodos de disposição de rejeitos em barragens de alteamento.

Tipo de alteamento	Montante	Jusante	Linha de centro
Descrição	Maior adesão das mineradoras, dique inicial forma praia de rejeitos que formam a fundação para o próximo dique.	Dique inicial com depósitos de resíduos após o dique, requer drenagem no aterro de contenção.	Dique inicial com acréscimos de rejeitos na crista do dique, mantendo-se a linha de centro coincidente com a anterior.
Vantagens	Baixo custo, simples execução, utilizado onde há restrição de área.	Maior segurança, possibilidade de compactação do corpo da barragem.	Possibilidade de drenagem interna, boa resistência à sismos e flexibilidade construtiva.
Desvantagens	Baixa segurança, susceptibilidade à liquefação, <i>piping</i> , taxa de aumento dos aterros é limitada.	Necessidade de grande área para a saia do aterro e grande quantidade de material para o aterro de contenção, além de proteção do talude à jusante na configuração final.	A quantidade de material pode se tornar um problema após grandes sequências de alteamentos e possui necessidade de eficiente sistema de drenagem.
Tipo de rejeito	Necessário rejeito de baixa densidade para que ocorra segregação.	Qualquer	Areias de lamas de baixa plasticidade.
Armazenamento de água	Não recomendável.	Bom	Aceitável
Resistência a abalos sísmicos	Baixa	Boa	Aceitável
Restrição de alteamentos	Menos que 10m/ano	Nenhuma restrição	Pouca restrição

Fonte: Adaptado de Niewinski (2013), Cardozo e Pimenta e Zingano (2016).

De acordo com Mafra (2016), para a construção dos diques de barramento para as barragens pode ser utilizado material de empréstimo, estéril ou a forma mais comum, que é a utilização do próprio rejeito do beneficiamento. Rejeito este que nem sempre tem seu comportamento previsto de maneira adequada, o que pode gerar uma diminuição do fator de segurança, ou até o rompimento da estrutura.

Cabe destacar, ainda, os impactos decorrentes do rompimento de barragens de rejeito, como ocorridos nos acidentes acontecidos em Mariana e Brumadinho, cujo fim foi desastroso. De acordo com o CNHD (2017), o rompimento da barragem de Fundão em Mariana ocasionou

17 mortes, 600 desabrigados, interrupção no abastecimento de água a milhares de pessoas, além de extensos danos ambientais e socioeconômicos à Bacia do Rio Doce. Estes episódios enfatizam a necessidade de estudos e entendimento do comportamento dos rejeitos de mineração, com vistas a evitar tais tragédias.

Lottermoser (2010) afirma que para construções seguras de barragens de rejeito exige uma caracterização geotécnica eficaz dos rejeitos. Para tal, amplia-se a necessidade de estudos com o objetivo de caracterizar os tipos de rejeitos. Neste trabalho será dada ênfase à avaliação da resistência não drenada (S_u) destes rejeitos, conforme será discutido nos itens a seguir.

2.3 RESISTÊNCIA NÃO DRENADA

Terzaghi (1996) afirma que a resistência não drenada, S_u , é a resistência empregada quando a ruptura do solo ocorre antes da possibilidade de dissipação da poropressão induzida, ou seja, a resistência não drenada é a maior pressão aplicada rapidamente, que um solo com baixa permeabilidade pode suportar, sem deformar excessivamente ou romper (PINTO, 2006).

Das (2014) apresenta o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, que apresenta o colapso de um material como uma combinação de forças de cisalhamento e normal, ao apresentar a equação 1:

$$\tau = c + \sigma' \cdot \text{tg}\Phi \quad (1)$$

Onde:

τ = Resistência ao cisalhamento;

c = coesão;

σ = Tensão normal efetiva no plano de ruptura;

Φ = Ângulo de atrito interno.

No que tange às argilas e solos finos saturados, o ângulo de atrito é nulo e a resistência ao cisalhamento fica igual à coesão, que será a resistência não drenada no caso de carregamentos rápidos, sem drenagem.

Na Tabela 4 a seguir, são apresentadas algumas faixas de variação para valores de S_u para alguns depósitos brasileiros. Observa-se uma grande variabilidade nos valores do parâmetro, alterando de acordo com o depósito e localização.

Tabela 4 - Resistência não drenada de alguns materiais do Brasil.

Material	Local	Su - faixa de variação (kpa)	Referência
Depósito de solos moles e muito moles	Barra da tijuca e recreio (RJ) - área 1	3-38	Almeida e Marques (2014)
	Barra da tijuca e recreio (RJ) - área 2	4-18	Almeida et al. (2008b)
	Barra da tijuca e recreio (RJ) - área 3	7-41*	Almeida e Marques (2014)
	Barra da tijuca e recreio (RJ) - área 4	3-19	Crespo Neto (2004)
	Barra da tijuca e recreio (RJ) - área 5	3-23	Macedo (2004), Sandroni e Deotti (2008)
	Barra da tijuca e recreio (RJ) - área 6	2-23	Baroni (2010)
	Barra da tijuca e recreio (RJ) - área 7	2-19	Almeida e Marques (2014)
	Barra da tijuca e recreio (RJ) - área 8	4-22	Baroni (2010)
	Barra da tijuca (RJ)	1-22	Bedeschi (2004)
	SESC/SENAC (RJ)	7-19	Almeida et al. (2001), Crespo Neto (2004)
	Aeroporto internacional salgado filho (RS)	10-30	Schnaid et al. (2001), Schnaid e Nacci (2000)
	Aterro experimental próximo ao rio Sarapuí (RJ)	1-14	Collet (1978)
	Áreas de baixada de Belém (PA)	10-30	Alencar et al. (2001)
	Recife (PE)	2-40	Gusmão filho (1986), Ferreira, Amorim e Coutinho (1986), Coutinho e Ferreira (1988)
	Santos (SP)	10-60	Samara et al. (1982), Árabe (1995a), Massad (1985)
Rejeito de mineração de ferro	Quadrilátero ferrífero	16,2-105,9	Oliveira (2020)
Rejeito de mineração de bauxita	São Luís (MA)	14,4-35	Bedin (2006)

Fonte: Adaptado de Almeida e Marques (2014), Almeida et al. (2008b), Crespo Neto (2004), Macedo (2004), Sandroni e Deotti (2008), Baroni (2010), Bedeschi (2004), Almeida et al. (2001), Schnaid et al. (2001), Schnaid e Nacci (2000), Collet (1978), Alencar et al. (2001), Gusmão Filho (1986), Ferreira, Amorim e Coutinho (1986), Coutinho e Ferreira (1988), Samara et al. (1982), Árabe (1995a), Massad (1985), Oliveira (2020) e Bedin (2006).

2.4 OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA NÃO-DRENADA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CAMPO

Considerando a realização de ensaios de campo, atualmente, é frequente o uso do ensaio de palheta para obtenção da resistência não-drenada em profundidades pré-determinadas, em depósitos saturados de material de baixa resistência. Os resultados do ensaio CPTu (piezocone), por sua vez, também podem ser utilizados para a estimativa de valores de S_u , retornando perfis contínuos do parâmetro. No entanto, é necessário definir um fator Nkt

para se ter a estimativa de S_u . O fator N_{kt} varia com as propriedades do material, incluindo empiricismo na obtenção da resistência não-drenada pelo ensaio CPTu, o qual deve ser avaliado com parcimônia para a adoção de parâmetros de projeto.

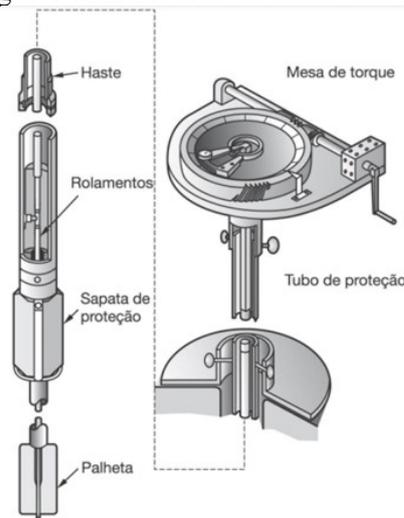
Nos itens a seguir são descritos os ensaios de palheta e CPTu, que serão avaliados neste trabalho, destacando as formulações adotadas para a definição de S_u em cada caso.

2.4.1 ENSAIO DE PALHETA

De acordo com Chandler (1988), o ensaio de palheta, também conhecido como *Field Vane Test* (FVT), foi criado pelo sueco John Olsson, em 1919. Este é o ensaio mais utilizado para obtenção da resistência não drenada. Aplica-se a solos argilosos, moles a rijos, saturados ou parcialmente saturados (OLIVEIRA, 2015).

As hipóteses admitidas para o cálculo da resistência não drenada (S_u) através do ensaio de palheta são condição não drenada, solo isotrópico e resistência constante no entorno da palheta (ALMEIDA; MARQUES, 2014). Consoante à ABNT (1989), é possível obter a resistência não-drenada do material ensaiado através de um primeiro procedimento que mede o torque obtido ao rotacionar na profundidade de interesse uma palheta cruciforme, de acordo com a Figura 4, com velocidade de $(6 \pm 0,6)^\circ/\text{min}$.

Figura 4 – S_u versus rotação angular com medida de atrito das hastes.

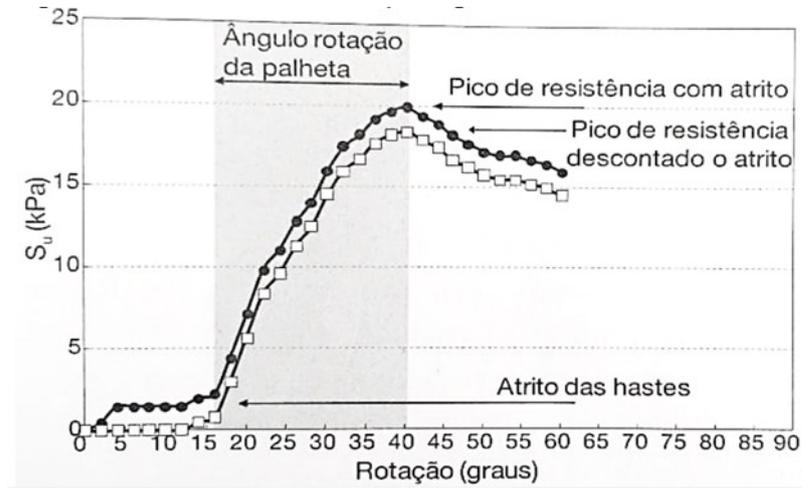


Fonte: (Schnaid e Odebrecht, 2012).

O resultado obtido no ensaio é uma curva torque *versus* rotação da palheta nas condições inicial e após o primeiro procedimento, também chamadas de condições indeformada

e amolgada de acordo com ABNT (1989). Um exemplo desta curva é apresentado pela Figura 5 a seguir, que apresenta a correção necessária devido ao atrito que acontece haste – solo.

Figura 5 – Curva Torque x Rotação



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

Conforme ABNT (1989), a resistência não drenada indeformada (S_u) e amolgada (S_{ur}) podem ser obtidas através da equação 2:

$$S = 0,86 T / \pi D^3 \quad (2)$$

Onde:

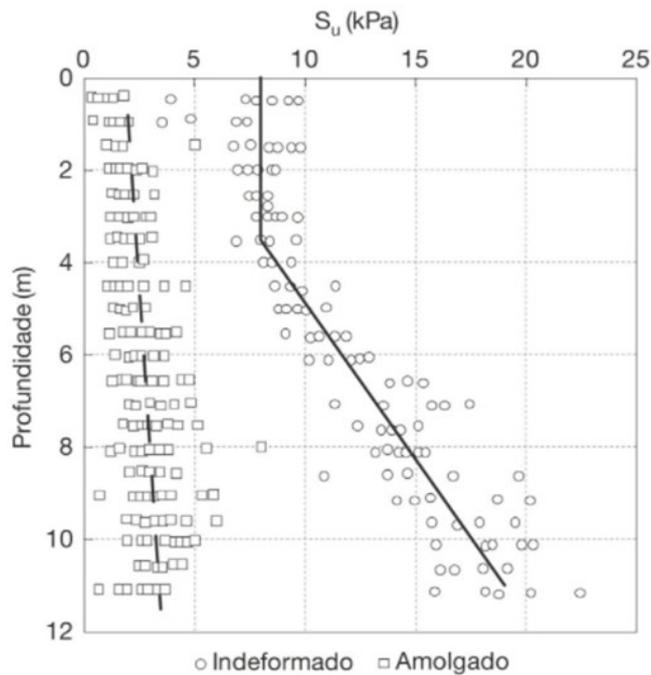
S = Resistência não drenada em cada situação (KN/m²)

T = Torque máximo medido (KNm)

D = Diâmetro da palheta (m)

Ortigão e Collet (1986) explicitam na Figura 6 a seguir uma bateria de ensaios de palheta em condição indeformada e deformada, ensaiados no Rio de Janeiro. Verifica-se a diferença de comportamento no que tange ao tipo de ensaio (indeformado e amolgado) e, ainda, o comportamento típico do perfil ao longo da profundidade.

Figura 6 – Resultado típico de bateria de ensaios de Palheta no Rio de Janeiro.



Fonte: Ortigão e Collet (1986)

Oliveira (2015) pontua ainda que entre as vantagens do ensaio de palheta estão a rapidez, simplicidade, custo baixo dependendo o número de pontos ensaiados e precisão.

Porém, para utilização em argilas moles, Bjerrum (1972) propõe uma correção do valor da resistência não drenada, obtida diretamente através do ensaio de palheta. Para tanto, é sugerido o uso da equação a seguir (Equação 3), devido à diferença de velocidade de deformação cisalhante do ensaio de palheta e da aplicação do carregamento na obra (por exemplo a construção de um aterro), além de efeitos de anisotropia que ocorrem na argila (MASSOCCO, 2013).

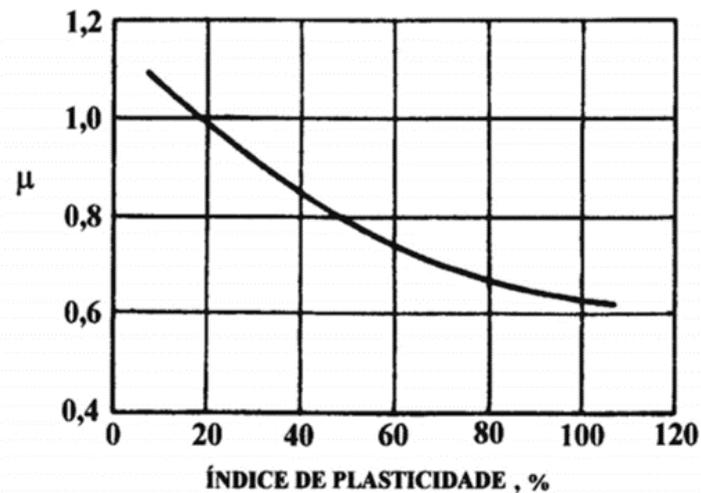
$$S_{uprojeto} = \mu \cdot S_{upalheta} \quad (3)$$

Onde:

μ = Fator de correção

A Figura 7 a seguir apresenta como pode ser obtido o fator de correção de Bjerrum, sendo este inversamente proporcional ao índice de plasticidade do material ensaiado (BJERRUM,1973).

Figura 7 – Determinação do fator de correção de Bjerrum



Fonte: Bjerrum (1973)

Na Tabela 5 seguir, são apresentados alguns valores de μ indicados pela literatura para diferentes materiais e regiões.

Tabela 5 – Fator de Bjerrum típicos aproximados.

Material	Local	Fator de correção aproximado (μ)	Referência
Solos moles	Média brasileira	0,65	Ortigão, 1980; coutinho, 1986; ortigão; collet, 1987; ortigão; almeida, 1988; sandroni, 1993; massad, 1999; bello, 2004; magnani, 2006; almeida; marques; lima, 2010
Solos moles com matéria orgânica	Juturnaíba(rj)	1	Coutinho; bello, 2010.
Rejeito de mineração de bauxita	Reino unido	1	Newson et al. (2006)
Rejeito de mineração de bauxita	Maranhão	1	Bedin (2010)

Fonte: Adaptado de Ortigão, 1980; Coutinho, 1986; Ortigão; Collet, 1987; Ortigão; Almeida, 1988; Sandroni, 1993; Massad, 1999; Bello, 2004; Magnani, 2006; Almeida; Marques; Lima, 2010; Coutinho; Bello, 2010; Newson et al. (2006) e Bedin (2010).

De acordo com Massocco (2013), também é factível obter a sensibilidade (S_t) das argilas, sendo esta a relação entre S_u/S_{ur} . Segundo Coutinho e Oliveira (2000), a sensibilidade trata da perda de resistência da argila após a deformação e uma das classificações das argilas se dá de acordo com a sua sensibilidade, como foi proposto por Skempton e Northey (1952) (Tabela 6).

Tabela 6 – Classificação de argilas de acordo com a sua sensibilidade

Sensibilidade (st)	Classificação
1	Argilas insensíveis
1,0-2,0	Argilas de baixa sensibilidade
2,0-4,0	Argilas de média sensibilidade
4,0-8,0	Argilas sensíveis
8,0-16,0	Argilas extrassensíveis
Maior que 16	<i>Quick clays</i>

Fonte: Skempton e Nortthey (1952)

Pode-se afirmar que o ensaio de palheta apresenta com clareza a resistência não drenada nas profundidades nas quais o ensaio é executado, porém não fornece um perfil contínuo. Desta forma, o ensaio CPTu pode auxiliar a obter um perfil mais detalhado de S_u , quando o ensaio de palheta não está disponível. Detalhes sobre o ensaio CPTu são discutidos no item a seguir.

2.4.2 CPTu

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), o CPTu originou-se na Holanda em 1930 e no Brasil o piezocone é usado desde 1950. Atualmente o ensaio é utilizado principalmente em investigação de solos compressíveis e de baixa resistência. O ensaio CPTu pode ser utilizado para definição do perfil contínuo de resistência não drenada (de forma indireta, ao utilizar o N_{kt} , aliado à resistência de ponta corrigida), obtenção de coeficientes de adensamento do solo, a partir do ensaio de dissipação e caracterização do solo através de ábacos de classificação de comportamento (ALMEIDA E MARQUES, 2010).

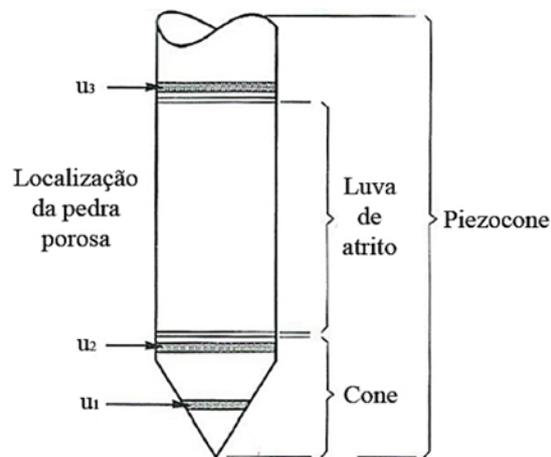
Para Schnaid e Odebrecht (2012), o CPTu caracteriza-se como um dos melhores ensaios, pois possibilita a determinação da estratigrafia do solo e de várias propriedades dos materiais prospectados, particularmente em depósitos de argilas moles. O CPTu é um ensaio consagrado e reconhecido internacionalmente, além de ser um ensaio rápido, relativamente econômico e com boa repetibilidade (ROBERTSON, 2009).

De acordo com a ABNT (1991) o CPTu tem o objetivo de medir a resistência do solo à penetração de uma ponteira padronizada, com uma velocidade constante de 20mm/s com uma precisão de ± 5 mm/s. Este ensaio fornece medidas contínuas, de 2 em 2cm, da resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s) e medida de poropressão (u). De acordo com Fuhr (2017), o

procedimento se dá ao posicionar um cone na extremidade de uma série de hastes, sendo o conjunto cravado no solo, com velocidade constante, para que aconteçam medições intermitentes dos valores supracitados.

Fuhr (2017) também afirma que o registro de poropressões no interior do solo pode ser realizado de três formas distintas, dependendo da posição do sensor de poropressão e pedras porosas. A Figura 8 mostra as três posições possíveis, sendo estas: no corpo do cone (sendo a medida denominada de u_1), na base do cone (sendo a medida denominada de u_2 e sendo a rotineiramente medida) ou acima do fuste (sendo denominada de u_3).

Figura 8 –Diferentes posições de medida poropressão no ensaio CPTu



Fonte: LUNNE, ROBERTSON, POWELL (1997) APUD FUHR (2017)

Durante o ensaio CPTu é possível também realizar o denominado ensaio de dissipação, ocorrendo ao interromper a cravação em uma profundidade pré-estabelecida, por cerca de uma hora, ou até dissipar 50% do excesso de poropressão e monitorar a dissipação das pressões neutras durante este período (SCHNAID E ODEBRECHT, 2012). Este ensaio permite, por exemplo, a definição de parâmetros de consolidação do solo.

Segundo Almeida e Marques (2014), é necessário corrigir a resistência de ponta do cone, pois a poropressão atua de forma desigual na ponta e na base. Então, têm-se a resistência de ponta corrigida, denominada de q_t , obtida pela Equação 4.

$$q_t = q_c + (1 - a)u_2 \quad (4)$$

Onde:

q_c : Resistência de ponta medida no cone;

u_2 : Poropressão medida na base do cone;

a : Relação entre a área da região interna da pedra porosa e a área de ponta do cone.

Tipicamente os resultados do CPTu são apresentados de forma gráfica, que expressa as medidas diretas do ensaio e duas grandezas derivadas: a razão de atrito F_r (Equação 5) e o parâmetro de poropressão B_q (Equação 6). Os valores das grandezas derivadas auxiliam na classificação do comportamento do solo atrelados a uma terceira grandeza normalizada Q_t (Equação 7), já que o ensaio do cone não permite a coleta de amostras (ROBERTSON, 2009).

$$F_r = (f_s 100\%) / (q_t - \sigma_{vo}) \quad (5)$$

Onde:

F_r – Razão de atrito;

f_s – Resistência por atrito lateral medida no cone (kPa)

$$B_q = (u_2 - u_0) / (q_t - \sigma_{vo}) \quad (6)$$

Onde:

B_q – Índice de poropressão;

u_2 – Poropressão medida na base do cone [kPa]

$$Q_t = (q_t - \sigma_{vo}) / (\sigma_{vo} - u_0) \quad (7)$$

Onde:

Q_t – Resistência de ponta normalizada;

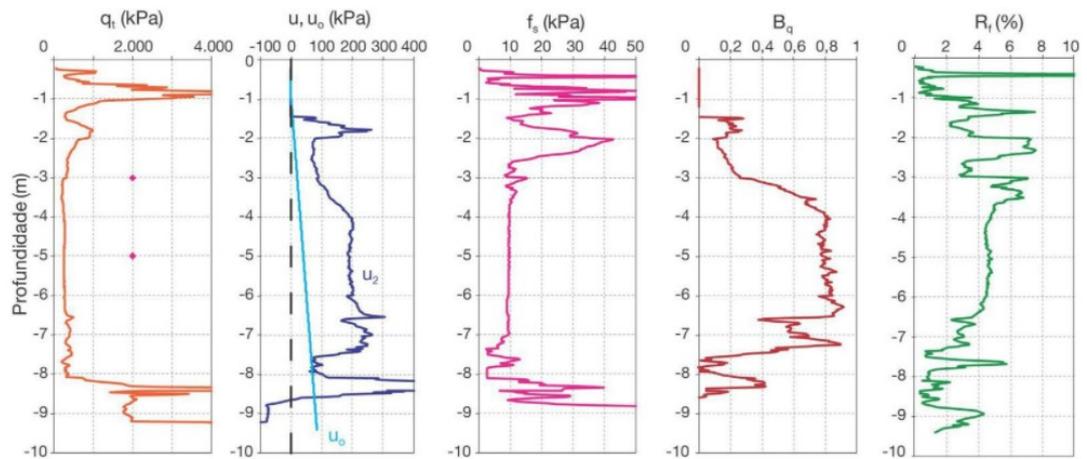
q_t – Resistência de ponta corrigida [kPa]

u_0 – Poropressão hidrostática na profundidade do ensaio [kPa]

σ_{vo} – Tensão vertical total na profundidade do ensaio [kPa]

Um resultado típico do ensaio de CPTu é apresentado pela Figura 9. Geralmente são apresentados 4 gráficos, onde o primeiro apresenta a resistência de ponta corrigida (q_t) de acordo com a profundidade, o segundo mostra a poropressão hidrostática e a medida de poropressão do cone (u_2), o terceiro evidencia o atrito lateral (f_s) de acordo com a profundidade e os dois últimos os parâmetros derivados B_q e R_f .

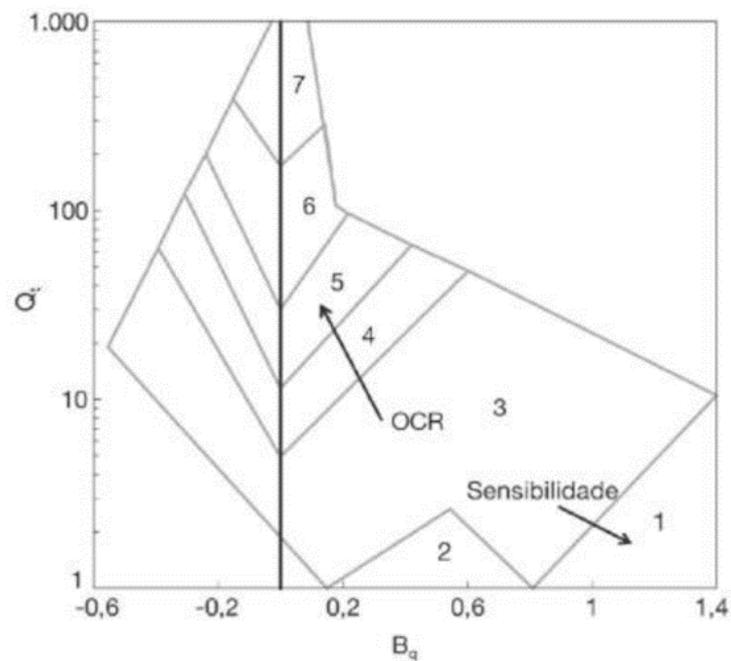
Figura 9 – Ensaio CPTu apresentado pela literatura



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

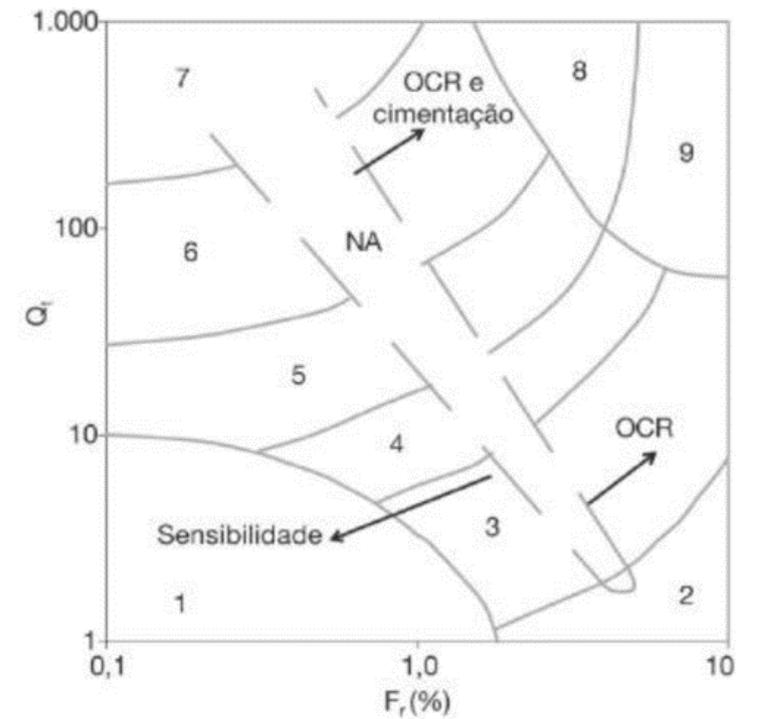
Os valores de F_r , B_q e Q_t , conforme citado anteriormente, podem ser utilizados para classificar os solos por meio de gráficos de comportamento dos solos, como demonstrados nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 – Classificação de solos ao utilizar as grandezas normalizadas Q_t e B_q



Fonte: (ODEBRECHT; SCHNAID, 2012)

Figura 11 – Classificação de solos ao utilizar as grandezas normalizadas Q_t e F_r



Fonte: (ODEBRECHT; SCHNAID, 2012)

Esta metodologia de classificação permite enquadrar o solo ensaiado em nove zonas que representam o comportamento típico do material, como é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Classificação de solos por zonas

Zona	Caracterização do material
1	Solo fino sensível
2	Solo orgânico e turfas
3	Argilas – argilas siltosas
4	Argila siltosa – silte argiloso
5	Silte arenoso – areia siltosa
6	Areia limpa – areia siltosa
7	Areia com pedregulho - areia
8	Areia – areia limpa
9	Areia fina rígida

Fonte: Adaptado de Robertson (1990)

Jefferies e Davies (1993) incrementaram a proposta de Robertson (1990) ao introduzir o IC (*material classification index*), o qual permite a classificação mais direta, por meio da equação (8) e faixas indicadas na Tabela 8 a seguir:

$$IC = \sqrt{\{3 - \log(Q_t) \cdot [1 - Bq]\}^2 + \{1,5 + 1,3 \cdot \log(Fr)\}^2} \quad (8)$$

Tabela 8 – Classificação dos solos de acordo com o IC

Classificação do solo	Índice IC
Argila orgânica	IC > 3,22
Argila	2,82 > IC > 3,23
Mistura de siltes	2,54 > IC > 2,82
Mistura de areias	1,90 > IC > 2,54
Areias	1,25 > IC > 1,90
Areias com pedregulhos	IC < 1,25

Fonte: (modificado de SCHNAID E ODEBRECHT, 2012)

Para o caso de avaliação da resistência não drenada dos solos, Coutinho e Schnaid (2010) afirmam que corriqueiramente no Brasil os valores de resistência não drenada obtidos a partir de ensaios CPTu, são usados junto com os dados de resistência não drenada obtidos com o ensaio de palheta, para obter uma correta avaliação do parâmetro. Segundo Schnaid e Odebrecht (2012) o fator de correção denominado de Nkt_1 (Equação 9) é utilizado para “calibrar” o resultado do ensaio CPTu de acordo com o ensaio de palheta, e é chamado de fator de capacidade de carga. As relações entre Nkt_1 e Su utilizadas para a avaliação a partir de resultados do ensaio de cone apresentadas pelas equações 9 e 10, respectivamente.

$$Nkt_1 = (qt - \sigma_{vo}) / S_{palheta} \quad (9)$$

$$S_{cptu} = (qt - \sigma_{vo}) / Nkt \quad (10)$$

Onde:

σ_{vo} : Estado de tensão vertical inicial do solo;

Nkt : Fator de capacidade de carga, calibrado por meio de ensaios de palheta.

Outra formulação para Nkt_2 foi proposta por Robertson (2012), a qual somente utiliza parâmetros obtidos do ensaio CPTu, como pode-se ver na Equação 11 a seguir.

$$Nkt_2 = 10,5 + 7 \cdot \log(Fr) \quad (11)$$

Onde:

Fr : Razão de atrito.

Schnaid e Odebrecht (2012) apresenta como intervalo aceitável para solos no Brasil, um Nkt entre 10 e 20 e também reitera que os valores de Nkt são inversamente proporcionais ao índice de plasticidade do material envolvido. No entanto, Randolph *et al.* (1998) comenta

que o erro ao estimar o Nkt seja da ordem de 20% a 40%, o que torna a acurácia deste método questionável. Tendo em vista estas incertezas, o presente trabalho buscará apresentar uma análise sobre este fator.

3 METODOLOGIA

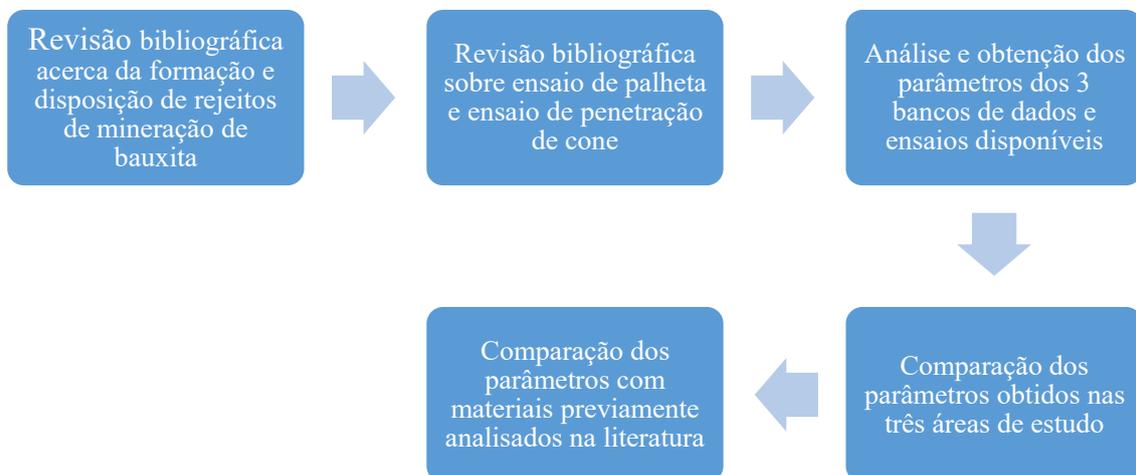
Nesta seção são apresentados os cálculos e fatores adotados durante a análise dos ensaios para este estudo, ou seja, os ensaios propriamente ditos e os métodos utilizados durante a análise.

A metodologia utilizada neste estudo consiste na interpretação e comparação de bancos de dados de ensaios disponibilizados para estudo, mediante sigilo sobre o local exato de sua execução.

3.1 ETAPAS DO ESTUDO

A Figura 12 apresenta o fluxo de trabalho empregado no presente estudo, que consiste na revisão bibliográfica acerca da formação e disposição dos rejeitos de mineração e dos ensaios, análise dos ensaios e obtenção dos parâmetros em estudo. Por fim será efetuada a comparação dos parâmetros obtidos, referentes a 3 áreas entre si e, com dados da literatura.

Figura 12 – Etapas do estudo



Fonte: Autora (2022)

3.2 LOCAIS DE ESTUDO E ENSAIOS ANALISADOS

Em função do sigilo exigido quanto à real localização dos reservatórios de rejeitos, nos quais os ensaios avaliados foram realizados, neste trabalho os locais serão chamados apenas pelas nomenclaturas “Obra 1”, “Obra 2” e “Obra 3”. Estes locais caracterizam-se por barragens de rejeito de mineração de bauxita, localizados em território brasileiro e os ensaios foram efetuados no corpo destas barragens. Os ensaios disponibilizados para cada um dos reservatórios são apresentados nos itens a seguir.

3.2.1 OBRA 1

Este banco de dados é composto por 39 ensaios de palheta, realizados em profundidades diversas. Também foram fornecidas 16 sondagens de ensaios CPTu. Entretanto, como o objetivo do trabalho é comparar a resistência não drenada obtida com o ensaio de palheta, com a resistência não drenada calibrada obtida com o ensaio CPTu, somente foram analisados os ensaios CPTu que apresentavam correspondência com ensaios de palheta realizados no mesmo local. A Tabela 9 apresenta o resumo de profundidade atingida pelos ensaios CPTu e profundidade dos ensaios de palheta correspondentes a cada vertical.

Tabela 9: Resumo do banco de dados da Obra 1

Ensaio CPTu	Prof. CPTu (m)	Prof. Ensaio de Palheta
17	20,0	2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,0; 14,0; 16,0; 18,0
19	7,0	3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0
21	12,0	2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,0
23	9,3	2,0; 3,0; 4,0; 6,0; 7,0; 8,0
28	15,0	2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,0; 14,0
32	6,0	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0

Fonte: Autora (2022)

3.2.2 OBRA 2

O banco de dados referente à Obra 2 é composta por 20 ensaios de palheta, realizados em profundidades diversas e, por 5 verticais de ensaios CPTu. O resumo dos ensaios disponíveis para este local é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Resumo do banco de dados da Obra 2

Ensaio CPTu	Prof. CPTu (m)	Prof. Ensaio de Palheta
1	5,0	2,0; 4,0
3	8,78	1,0; 3,0; 5,0; 7,0
4	5,0	3,0; 4,0; 6,0; 8,0
5	9,0	1,0; 3,0; 5,0; 7,0
6	8,0	2,0; 5,8

Fonte: Autora (2022)

3.2.3 OBRA 3

O banco de dados referente à Obra 3 é composto por 30 ensaios de palheta e por 3 ensaios CPTU. A Tabela 11 apresenta o resumo do banco de dados disponível para a Obra 3.

Tabela 11: Resumo do banco de dados da Obra 3

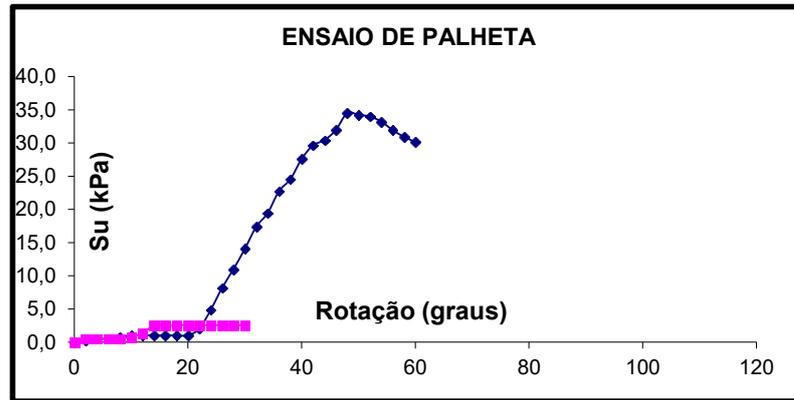
Ensaio CPTu	Prof. CPTu (m)	Prof. Ensaio de Palheta
1	7,1	1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0
2	12,6	1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0; 11,0
3	12,0	1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0; 11,0; 12,0

Fonte: Autora (2022)

3.3 INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE PALHETA

Para a interpretação dos resultados dos ensaios de palheta, descontou-se o valor do atrito do solo com as hastes do maquinário utilizado (quando necessário, vide Figuras 13 e 14), e a partir dos valores plotados graficamente da resistência não-drenada, definiu-se o valor máximo de S_u indeformado e após a perturbação. Nos ensaios de palheta foi necessário verificar se existia a necessidade de descontar o atrito com as hastes, e essa necessidade se dá pela presença ou não de um “degrau” que evidencia o aumento, em graus, da rotação, sem o aumento da resistência como pode-se ver na Figura 13.

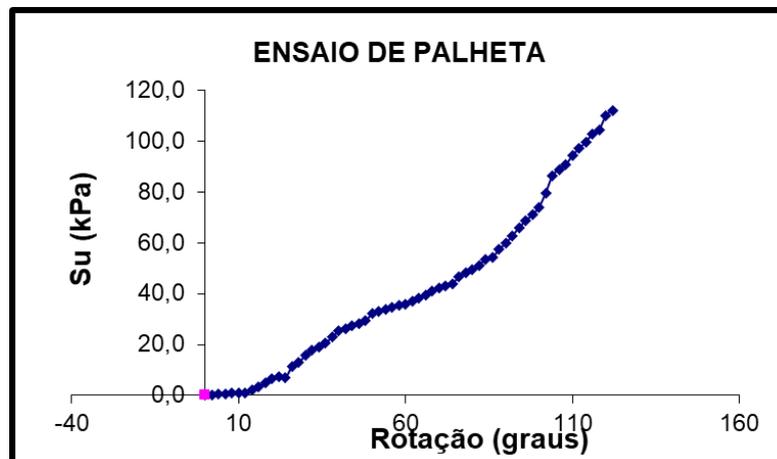
Figura 13 – Exemplo de resultado do ensaio de palheta executado na Obra 1



Fonte: Empresa fornecedora dos dados (2021)

Por outro lado, quando a curva de S_u em relação ao torque se mostrou contínua não se fez necessário descontar nenhum valor, pois indica um valor de atrito irrelevante, como é possível verificar na Figura 14.

Figura 14 – Resultado de ensaio de palheta com curva contínua, obtida para a Obra 1



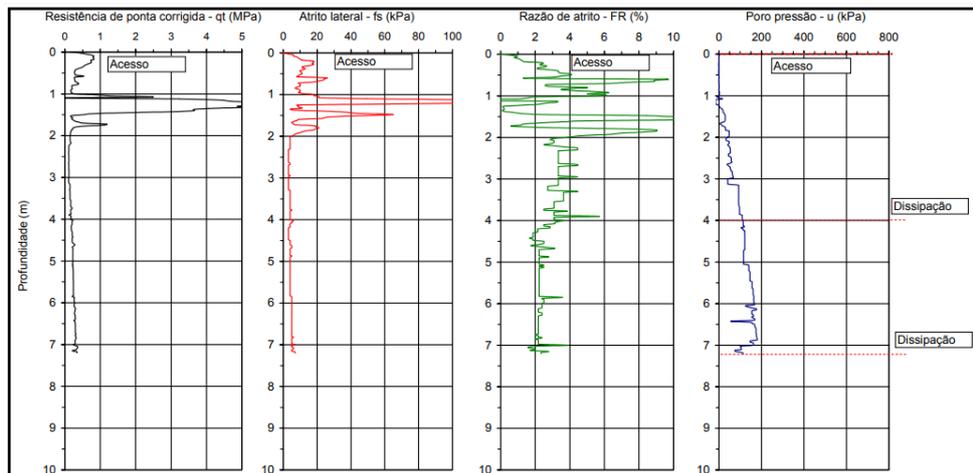
Fonte: Empresa fornecedora dos dados (2021)

Caso o material apresente plasticidade é necessário corrigir o valor da resistência obtida no ensaio, com o fator de Bjerrum, de acordo com a explicação feita no item 2.6.1. Porém, como apresentado na tabela 5, devido a plasticidade real nula ou muito baixa dos rejeitos de mineração de bauxita, por conta da inexistência dos argilominerais naturais, o fator de Bjerrum será considerado igual a 1.

3.4 INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS CPTU

Para a estimativa da resistência não drenada através dos ensaios CPTu's foi necessário estimar o valor do fator Nkt para cada ensaio de cada obra e chegar a uma média para cada obra, por se tratar do mesmo material. A estimativa foi realizada conforme equacionamentos apresentados no item 2.6.2 deste trabalho. De maneira geral, foram disponibilizados os gráficos de resistência de ponta corrigida (qt), atrito lateral (fs), razão de atrito (Rf) e poropressão (u_2), permitindo a estimativa de Su ao longo da profundidade. A Figura 15 apresenta um exemplo dos resultados dos ensaios CPTu concedidos pela empresa responsável.

Figura 15 – Exemplo de resultado de ensaio CPTu executado na obra 3.



Fonte: Empresa fornecedora de dados (2021)

4 RESULTADOS

Neste capítulo, será apresentada a interpretação dos resultados de ensaios de palheta e CPTu de 3 barragens de rejeito de mineração de bauxita brasileiros. Os materiais de cada obra foram caracterizados a partir dos resultados dos ensaios CPTu e aplicação dos gráficos de classificação de comportamento, apresentados no referencial teórico. Na sequência serão comparados os valores de resistência não drenada (S_u) para todas as campanhas estudadas, estimados por ensaio CPTu ao aplicar o fator N_{kt} , e os valores de S_u obtidos pelo ensaio de palheta, considerado referência na obtenção deste parâmetro.

As tabelas complementares às análises estão apresentadas no Apêndice.

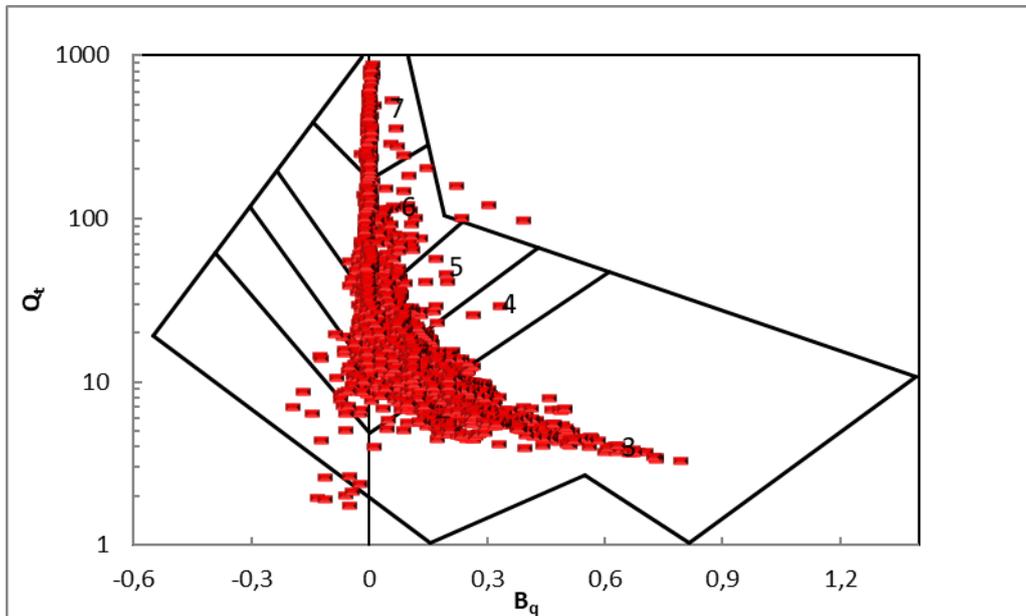
4.1 OBRA 1

4.1.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL POR MEIO DOS RESULTADOS DO ENSAIO CPTu

A seguir serão apresentadas as formas de classificação de solos aplicadas aos rejeitos de mineração de bauxita, a fim de verificar a sua tendência de comportamento do material.

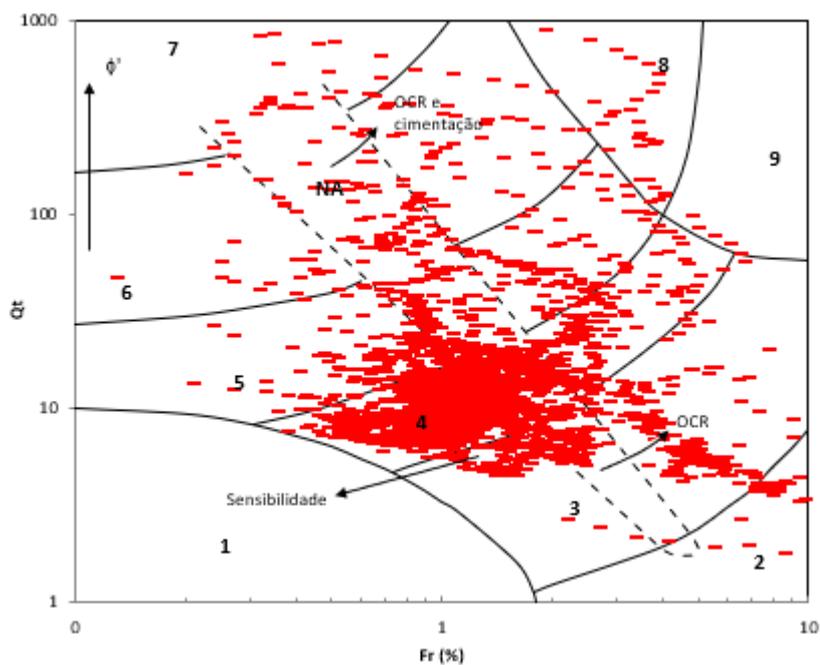
As Figuras 16 e 17 ilustram a distribuição da combinação dos resultados dos ensaios CPTu realizados na obra 1, quando classificados de acordo com a proposta de Robertson (1990). Observa-se que existe uma dispersão relevante dos resultados, mas há uma tendência de concentração de pontos juntos às regiões cujos comportamentos são caracterizados desde argila até silte argilo-arenoso, com uma predominância de material com comportamento de argila siltosa.

Figura 16 – Classificação quanto ao comportamento do rejeito de mineração de bauxita utilizando as grandezas B_q e Q_t – Obra 1



Fonte: Autora (2022)

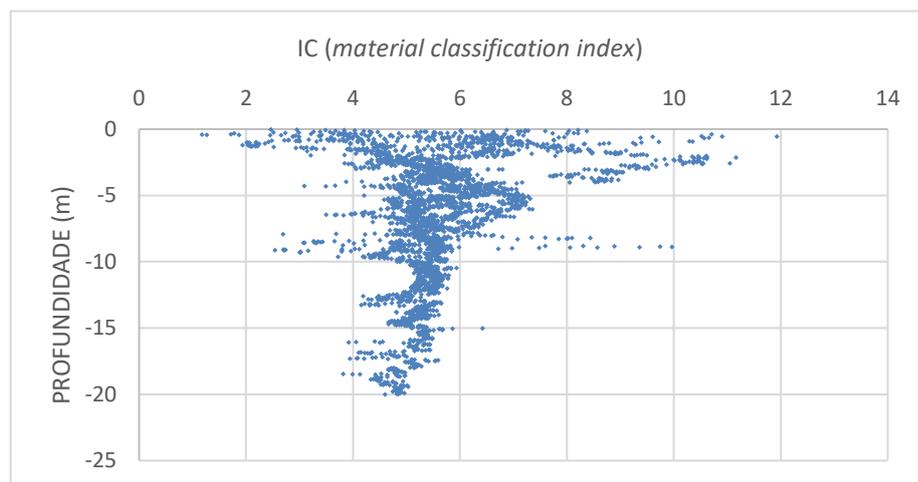
Figura 17 - Classificação quanto ao comportamento do rejeito de mineração de bauxita utilizando as grandezas F_r e Q_t – Obra 1



Fonte: Autora (2022)

De acordo com a classificação de Jefferies e Davies (1993), com base no valor de IC, é possível caracterizar o perfil ao longo da profundidade por meio da Figura 18. Nesta metodologia de classificação, o material da obra 1 foi classificado como um material que tem comportamento característico entre misturas de areias e argila orgânica de 0 a 5 metros de profundidade por estar incluído na faixa de valor de IC entre aproximadamente 2 e 11, conforme apresentado no item 2.4.2 deste trabalho. Já a porção que compreende 5 a 10 metros de profundidade, o material tem comportamento que oscila entre argila e argila orgânica por apresentar IC entre aproximadamente 3 e 10. E a parte final, que compreende dos 10 a 20 metros de profundidade, o comportamento se caracteriza como argila orgânica por apresentar IC maior que 3,22. De modo geral, observa-se que o IC indica que o material tem comportamento de um material sensível e de baixa resistência.

Figura 18 – IC (*material classification index*) para Obra 1.



Fonte: Autora (2022)

4.1.2 INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE PALHETA

Após a obtenção dos valores de S_u de todos os ensaios de palheta, os dados foram tabulados (Apêndice A). Então, construiu-se um gráfico para mostrar o comportamento da resistência não drenada indeformada e deformada de acordo com a profundidade.

É possível verificar uma tendência de que a resistência não drenada indeformada aumente com a profundidade, chegando a alcançar o valor mínimo de 8,18kPa e, valor máximo de 111,18kPa, em profundidades de 2m e 18m, respectivamente. Já a resistência não drenada amolgada oscila entre 0 e 11,76kPa, como é possível observar na Figura 19 a seguir.

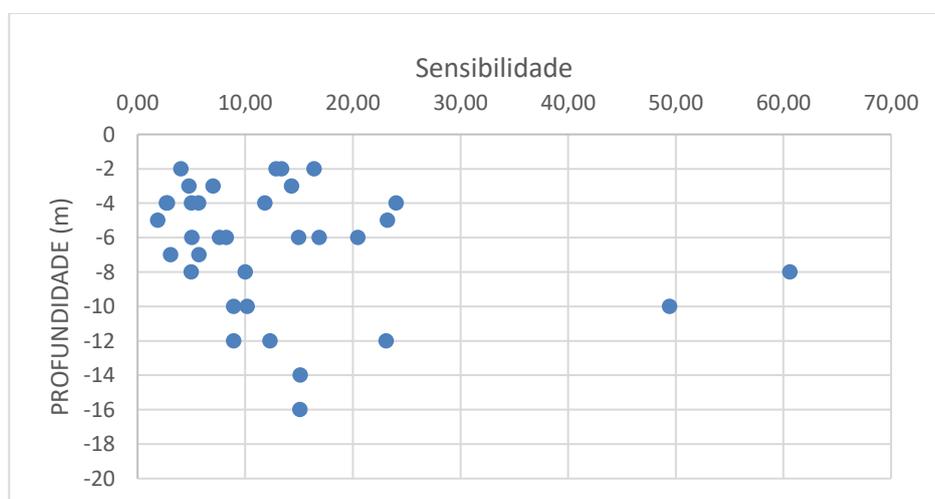
Figura 19 – Compilado dos resultados dos ensaios de palheta efetuados na obra 1.



Fonte: Autora (2022)

Logo após, determinou-se a sensibilidade deste material. A Figura 20 apresenta a variação da sensibilidade de acordo com a profundidade, sendo que esta oscila de 2 até 25 e, segundo Skempton e Northey (1952), de acordo com estes valores, seria um material com comportamento que pode variar entre argilas de baixa sensibilidade até *quick clays*, fato que corrobora com a classificação realizada do material com base no CPTu, indicando um material sensível e com baixa resistência.

Figura 20 – Sensibilidade do material ensaiado na Obra 1.



Fonte: Autora (2022)

4.1.3 INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO CPTU E COMPARATIVO COM VALORES DE S_u OBTIDOS PELO ENSAIO DE PALHETA

Para estimar o perfil da resistência não drenada de cada ensaio foi estimado um Nkt_1 médio, de acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), ao utilizar a subtração da tensão vertical da resistência de ponta corrigida em relação a resistência não drenada obtida no ensaio de palheta. Também foi feita a estimativa do Nkt_2 , de acordo com Robertson (2012), o qual não utiliza nenhum dado de ensaio de palheta, somente uma correlação empírica com o atrito lateral (F_s) obtido do ensaio CPTu.

As tabelas com a estimativa do Nkt_1 e Nkt_2 para cada ensaio estão expostas no apêndice B e C, sendo que o valor médio de Nkt_1 adotado para a obra 1 foi 16 e o valor médio de Nkt_2 adotado para a obra 1 foi 12.

Os valores de S_u foram estimados na Tabela 12 a partir dos resultados dos ensaios CPTu foram obtidos utilizando-se os valores de Nkt_1 e Nkt_2 e também os limites superior e inferior para o Nkt , indicados pela literatura, que são 20 e 10 respectivamente.

Para os valores de S_u , obtidos para cada perfil de CPTu avaliado, foram determinados os respectivos erros, tendo sempre como referência o valor de S_u obtido no ensaio de palheta. Estes erros foram calculados de acordo com a Equação 11 pra cada profundidade e, logo após, foram calculados os erros médios para cada uma das estimativas realizadas, com base no valor de Nkt .

$$Erro (\%) = \frac{|Supalheta - Sucptu|}{Supalheta} \quad (11)$$

A Tabela 12 apresenta um resumo dos valores correspondente à análise referente ao ensaio CPTu 17. Os resultados mostram que o valor de S_u estimado a partir do ensaio CPTu, utilizando-se os valores de Nkt correspondente ao limite inferior, apresenta um erro médio de cerca de 38%, em relação ao valor de S_u fornecido pela palheta. Já os valores de S_u definidos com base no Nkt_2 , apresentaram um erro médio de aproximadamente 24%. Para o Nkt_1 o erro médio foi em torno de 26% e para o Nkt correspondente ao limite superior indicado pela literatura, um erro médio de cerca de 36%. Então, o Nkt que melhor representou o perfil de resistência não drenada ao comparar com o ensaio de palheta foi aquele obtido com o Nkt_2 , estimado através do método de Robertson (2012), que resultou no valor de 12.

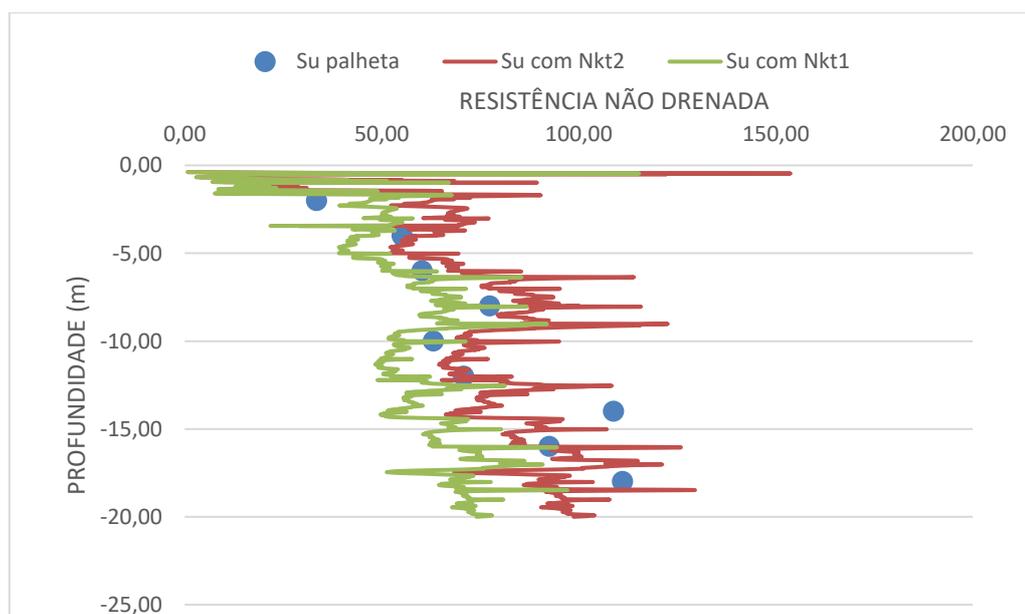
Tabela 12 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 17.

Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt_2=12$	% diferença	Su com $Nkt_1=16$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença
-2	33,48	75,42	125,26	62,85	87,71	47,14	40,78	37,71	12,63
-4	55,20	76,33	38,26	63,61	15,22	47,70	13,59	38,16	30,87
-6	60,32	80,17	32,91	66,81	10,76	50,10	16,93	40,08	33,54
-8	77,44	120,16	55,16	100,13	29,30	75,10	3,02	60,08	22,42
-10	63,13	88,68	40,48	73,90	17,07	55,43	12,20	44,34	29,76
-12	70,80	83,74	18,29	69,79	1,43	52,34	26,07	41,87	40,86
-14	108,88	84,38	22,50	70,32	35,41	52,74	51,56	42,19	61,25
-16	92,52	100,54	8,67	83,79	9,44	62,84	32,08	50,27	45,66
-18	111,18	112,85	1,51	94,05	15,41	70,53	36,56	56,43	49,25
Erro médio			38,12	24,64		25,87		36,25	

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 21 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt_2=12$ e $Nkt_1=16$, para o CPTu 17. Observa-se que não há uma diferença muito relevante de ajuste das curvas estimadas com os valores de Su da palheta, fato que também pode ser observado na pequena diferença entre os erros médios definidos na Tabela 12.

Figura 21 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2=12$ e $Nkt_1=16$, para o CPTu 17.



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 13 mostra os resultados obtidos para o CPTu 19. Observa-se que em relação ao Nkt correspondente ao limite inferior definido pela literatura, ocorre um erro médio de cerca de 84%. Em relação ao Nkt_2 um erro médio de aproximadamente 54%, para o Nkt_1 em torno de 13% e para o Nkt correspondente ao limite superior indicado pela literatura, um erro médio de cerca de 15%. Então, verifica-se que o Nkt que melhor calibrou o perfil de resistência não drenada gerado no ensaio CPTu foi o Nkt_1 , obtido através do método proposto por Schnaid e Odebrecht (2012) e, neste caso, tem por valor 16.

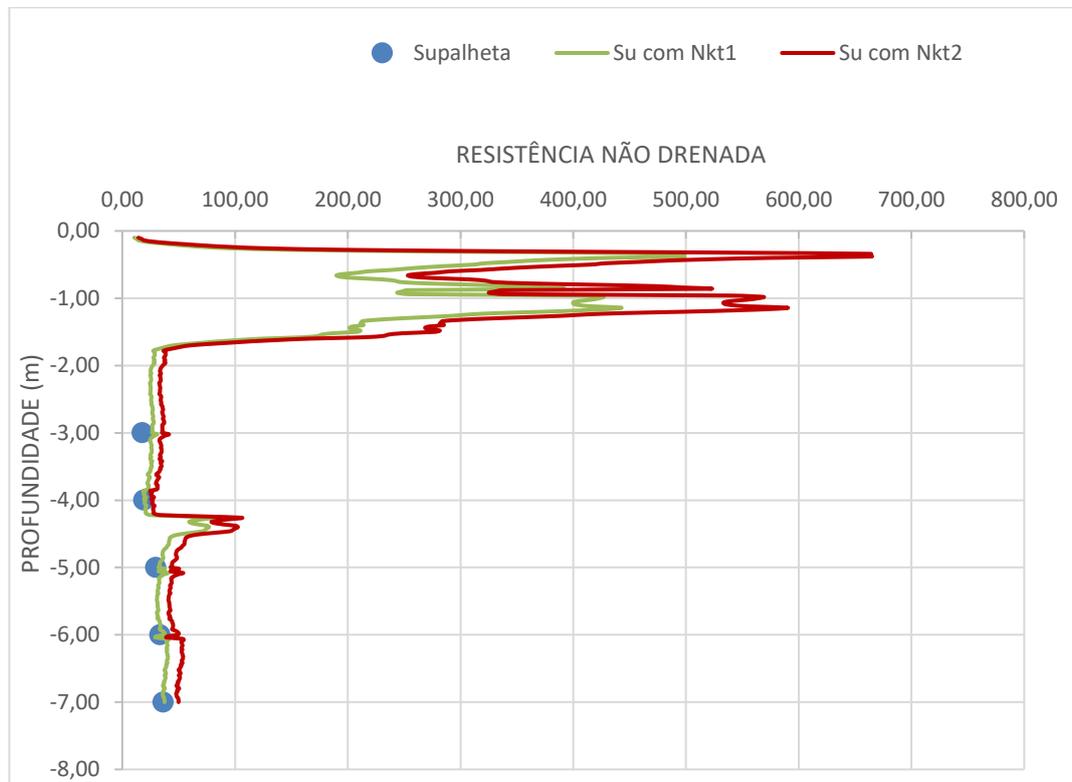
Tabela 13 – Diferenças em pontos percentuais entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio 19.

Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt_2=12$	% diferença	Su com $Nkt_1=16$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença	
-3	17,89	42,35	136,73	35,29	97,27	26,47	47,96	21,18	18,36	
-4	19,17	32,35	68,76	26,96	40,64	20,22	6,24	16,17	15,62	
-5	29,65	51,67	74,28	43,06	45,24	32,29	3,18	25,84	12,86	
-6	33,48	59,25	76,96	49,37	47,47	37,03	1,69	29,62	11,52	
-7	36,29	59,89	65,02	49,91	37,52	37,43	8,32	29,95	17,49	
Erro médio			84,35				53,63	13,48	15,17	

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 19 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt_2=12$ e $Nkt_1=16$, para o ensaio 19. Neste caso, como indicam os valores do erro médio calculado, a curva referente aos valores de Su estimado para o Nkt de 16 se aproxima bem mais dos valores obtidos pelo ensaio de palheta.

Figura 22 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2 = 12$ e $Nkt_1 = 16$, para o CPTu 19.



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 14 mostra os resultados obtidos para o CPTu 21. Verifica-se que em relação ao Nkt correspondente ao limite inferior definido pela literatura, apresenta-se um erro médio de cerca de 58%. Em relação ao Nkt_2 ocorre um erro médio de aproximadamente 20%, para o Nkt_1 em torno de 32% e para o Nkt definido como limite superior, um erro médio de cerca de 38%. Então, observa-se que o Nkt que melhor calibrou o perfil de resistência não drenada gerado no ensaio CPTu foi o Nkt_1 , obtido através do método proposto por Schnaid e Odebrecht (2012) e, neste caso, tem por valor 16.

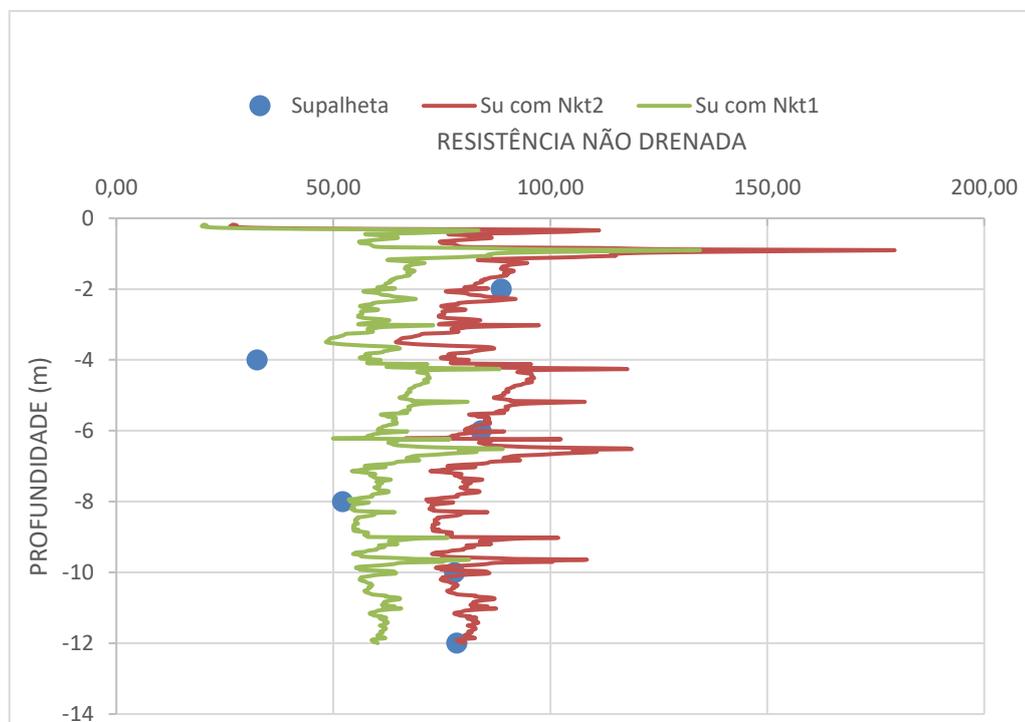
Tabela 14 – Diferenças em pontos percentuais entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 21.

Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt=12$	% diferença	Su com $Nkt=16$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença
-2	88,72	100,48	13,25	83,73	5,62	62,80	29,22	50,24	43,37
-4	32,46	97,41	200,12	81,18	59,43	60,88	87,57	48,71	50,06
-6	84,09	96,82	15,14	80,68	4,05	60,51	28,04	48,41	42,43
-8	52,14	86,12	65,18	71,77	37,65	53,83	3,24	43,06	17,41
-10	77,95	102,42	31,39	85,35	9,49	64,01	17,88	51,21	34,30
-12	78,46	96,35	22,80	80,30	2,34	60,22	23,25	48,18	38,60
Erro médio			57,98		19,76		31,53		37,69

Fonte: Autora (2022).

A fim de visualização plotou-se na Figura 20 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt_2=12$ e $Nkt_1=16$, para o ensaio 21. Observa-se que, considerando o conjunto de resultados de Su do ensaio de palheta, a curva correspondente às estimativas com Nkt igual a 12, se aproximam mais dos valores.

Figura 23 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2=12$ e $Nkt_1=16$, para o CPTu 21.



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 15 mostra os resultados obtidos para o CPTu 23. Observa-se que em relação ao Nkt referente ao limite inferior, apresenta-se um erro médio de cerca de 38%. Já em relação ao Nkt_2 ocorre um erro médio de aproximadamente 26%. Para o Nkt_1 em torno de 25% e para o Nkt referente ao limite superior, um erro médio de cerca de 36%. Então, o Nkt que melhor calibrou o perfil de resistência não drenada gerado no ensaio CPTu foi o Nkt_1 , obtido através do método proposto por Schnaid e Odebrecht (2012) e, neste caso, tem por valor 16.

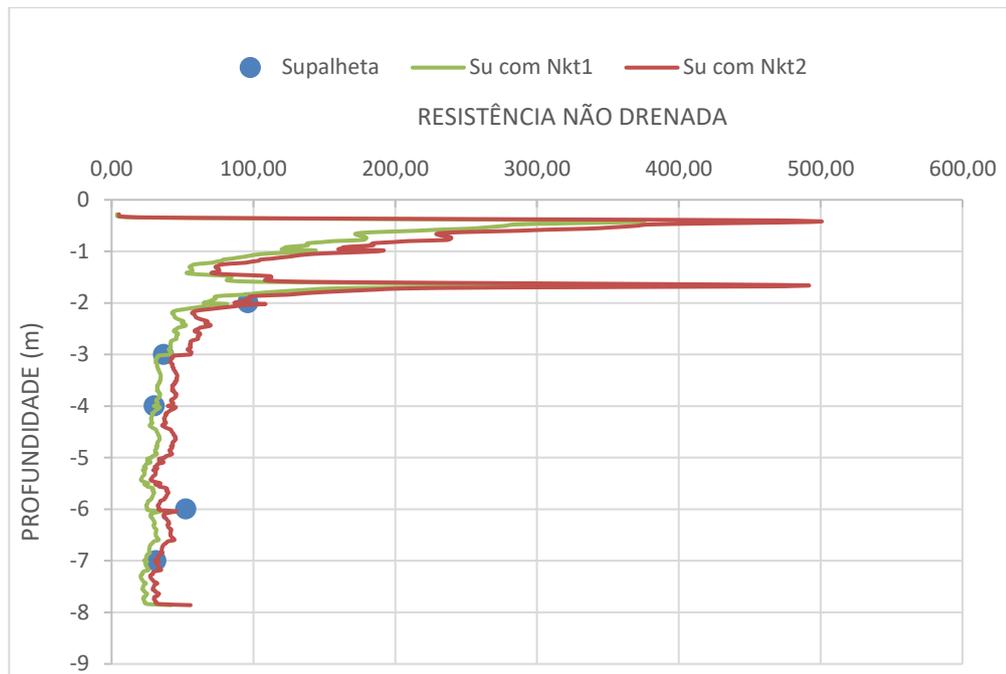
Tabela 15 – Diferenças em pontos percentuais entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio 23.

Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt_2=12$	% diferença	Su com $Nkt_1=16$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença
-2,00	96,10	104,29	8,53	86,91	9,56	65,18	32,17	52,15	45,74
-3,00	36,55	66,88	83,00	55,74	52,50	41,80	14,38	33,44	8,50
-4,00	30,16	47,68	58,08	39,73	31,73	29,80	1,20	23,84	20,96
-6,00	52,39	39,71	24,21	33,09	36,84	24,82	52,63	19,86	62,10
-7,00	31,18	36,69	17,68	30,58	1,93	22,93	26,45	18,35	41,16
Erro médio			38,30		26,51		25,37		35,69

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 24 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt_2 = 12$ e $Nkt_1 = 16$, para o ensaio 23. Verifica-se que assim como indicado na Tabela 15, a diferença de erros médios entre os dois valores de Nkt não é relevante, logo as curvas de estimativas também são ambas próximas aos valores de Su da palheta.

Figura 24 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2 = 12$ e $Nkt_1 = 16$, para o CPTu 23.



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 16 mostra os resultados obtidos para o CPTu 28. Pode-se observar que em relação ao Nkt referente ao limite inferior, apresenta-se um erro médio de cerca de 75%. Em relação ao Nkt_2 um erro médio de aproximadamente 48%, para o Nkt_1 em torno de 37% e para o Nkt referente ao limite superior, um erro médio de cerca de 40%. Então, o Nkt que melhor calibrou o perfil de resistência não drenada gerado no ensaio CPTu foi o Nkt_1 , obtido através do método proposto por Schnaid e Odebrecht (2012) e, neste caso, tem por valor 16.

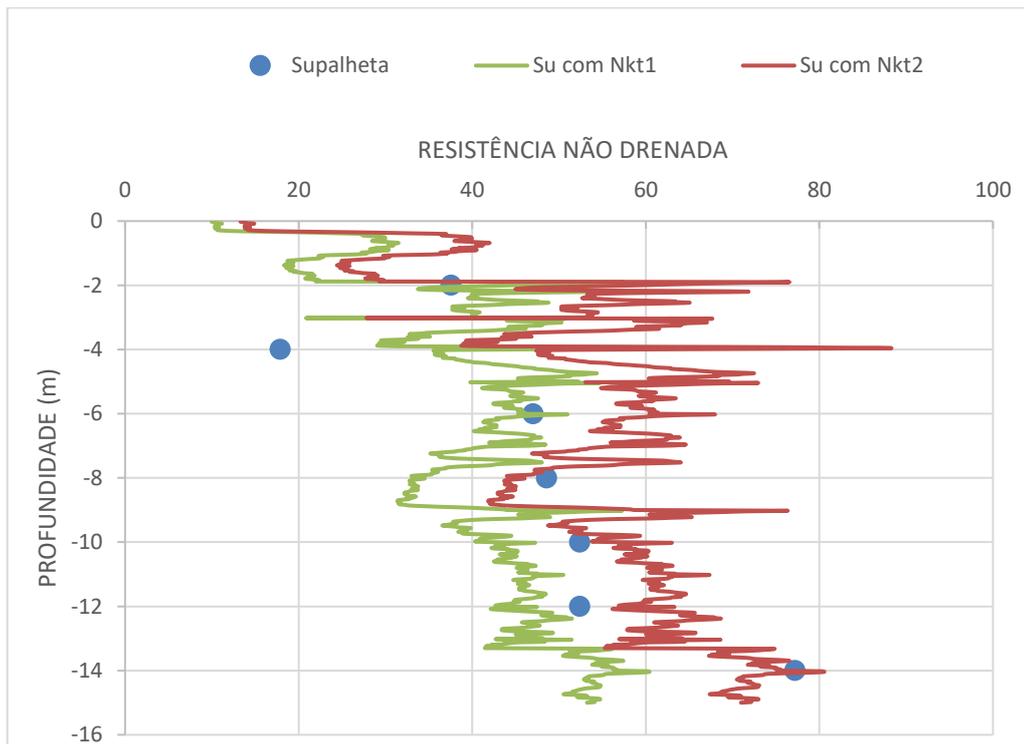
Tabela 16 – Diferenças em pontos percentuais entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio 28.

Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt_2=12$	% diferença	Su com $Nkt_1=16$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença
-2	37,571	71,24	89,62	59,37	58,02	44,53	18,52	35,62	5,19
-4	17,89	69,93	290,91	58,28	225,76	43,71	144,32	34,97	95,46
-6	47,027	72,49	54,14	60,41	28,45	45,31	3,66	36,24	22,93
-8	48,56	55,10	13,47	45,92	5,44	34,44	29,08	27,55	43,26
-10	52,393	67,92	29,64	56,60	8,03	42,45	18,98	33,96	35,18
-12	52,39	69,51	32,68	57,93	10,56	43,45	17,08	34,76	33,66
-14	77,185	90,14	16,78	75,11	2,68	56,33	27,01	45,07	41,61
Erro médio			75,32		48,42		36,95		39,61

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 25 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt_2 = 12$ e $Nkt_1 = 16$, para o ensaio 28. Verifica-se que a curva de valores estimados para o Nkt de 16 fica mais próxima aos valores de Su da palheta.

Figura 25 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2 = 12$ e $Nkt_1 = 16$, para o CPTu 28.



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 17 mostra os resultados obtidos para o CPTu 32. Observa-se que em relação ao Nkt referente ao limite inferior, apresenta-se um erro médio de cerca de 54%. Em relação ao Nkt_2 um erro médio de aproximadamente 43%, para o Nkt_1 em torno de 29% e para o Nkt referente ao limite superior, um erro médio de cerca de 35%. Então, o Nkt que melhor calibrou o perfil de resistência não drenada gerado no ensaio CPTu foi o Nkt_1 , obtido através do método proposto por Schnaid e Odebrecht (2012) e, neste caso, tem por valor 16.

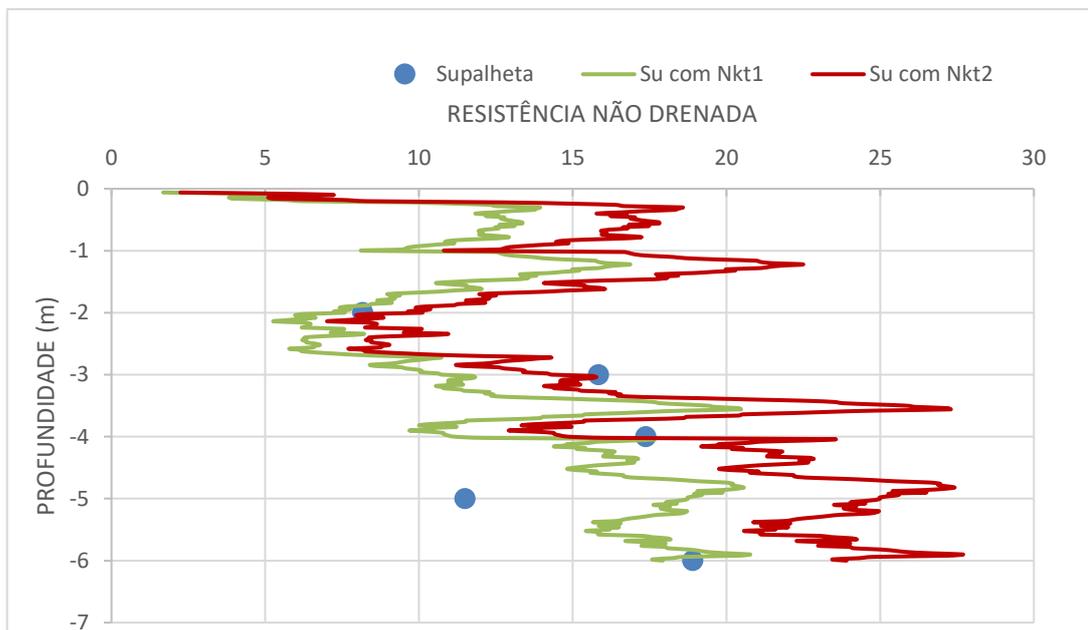
Tabela 17 – Diferenças em pontos percentuais entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio 32.

Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt_2=12$	% diferença	Su com $Nkt_1=16$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença
-2	8,178	12,10	47,93	10,08	47,93	7,56	7,55	6,05	26,04
-3	15,846	17,20	8,52	14,33	8,52	10,75	32,17	8,60	45,74
-4	17,38	17,82	2,53	14,85	14,56	11,14	35,92	8,91	48,74
-5	11,501	30,00	160,83	25,00	117,36	18,75	63,02	15,00	30,41
-6	18,913	28,69	51,68	23,91	26,40	17,93	5,20	14,34	24,16
Erro médio			54,30		42,95		28,77		35,02

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 26 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt_2 = 12$ e $Nkt_1 = 16$, para o ensaio 32. Verifica-se que a curva de valores estimados para o Nkt de 16 fica mais próxima aos valores de Su da palheta.

Figura 26 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2 = 12$ e $Nkt_1 = 16$, para o CPTu 32.



Fonte: Autora (2022)

Importante salientar que para esta obra, o erro ao utilizar os fatores de cone Nkt_1 se situou entre 14 e 37% e para o Nkt_2 se situou entre 20 e 54 %, respectivamente. Apesar da alta variabilidade observada, verifica-se que a resistência não drenada média dos rejeitos não ultrapassa 500 kPa.

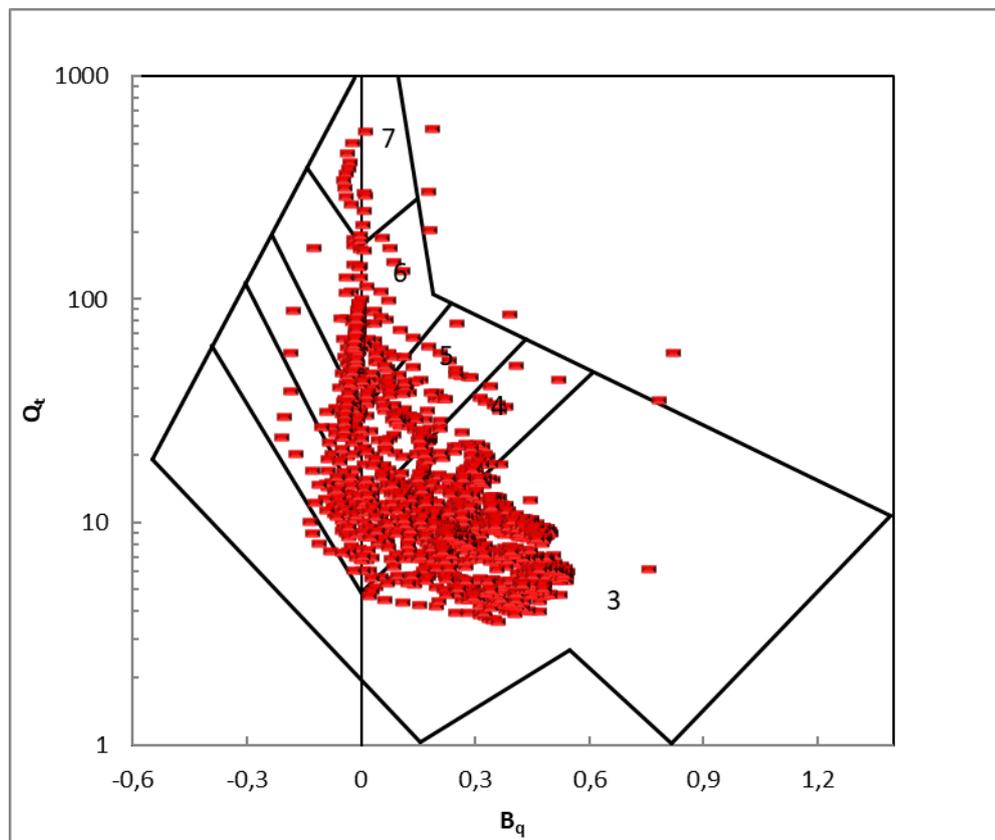
4.2 OBRA 2

4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A seguir serão apresentadas as formas de classificação de solos aplicadas aos rejeitos de mineração de bauxita, a fim de verificar a sua tendência de comportamento do material.

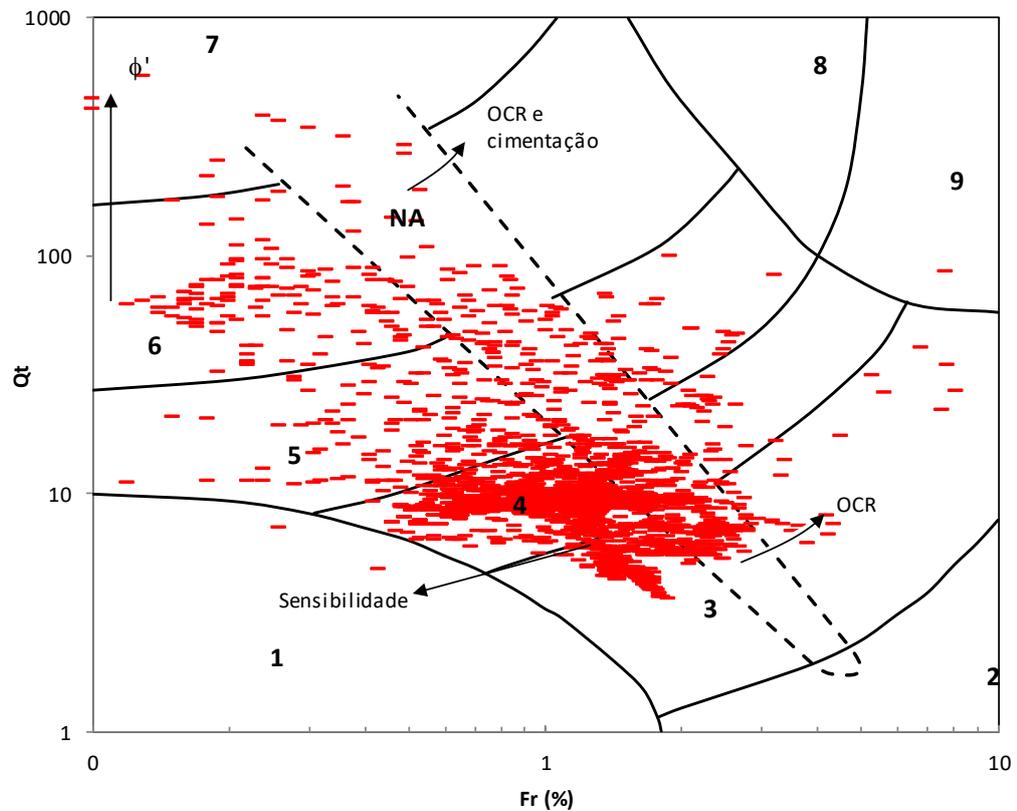
As Figuras 27 e 28 ilustram a distribuição da combinação dos resultados dos ensaios CPTu realizados na obra 2, quando classificados de acordo com a proposta de Robertson (1990). Observa-se que existe uma dispersão relevante dos resultados, mas há uma tendência de concentração de pontos juntos às regiões cujos comportamentos são caracterizados desde argila até silte argilo-arenoso, com uma predominância de material com comportamento de argila siltosa.

Figura 27 - Dispersão de resultados de ensaios em rejeito de mineração de bauxita na obra 2 utilizando as grandezas B_q e Q_t de acordo com Robertson (1990).



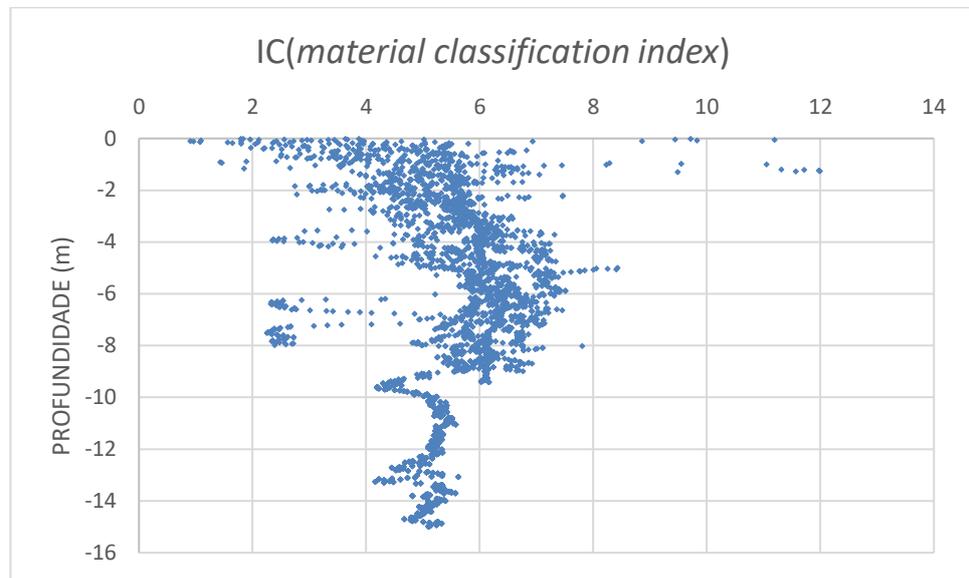
Fonte: Autora (2022)

Figura 28 - Dispersão de resultados de ensaios em rejeito de mineração de bauxita da obra 2 utilizando as grandezas Fr e Qt de acordo com Robertson (1990).



Fonte: Autora (2022)

De acordo com a classificação de Jefferies e Davies (1993), com base no valor de IC, é possível caracterizar o perfil ao longo da profundidade por meio da Figura 29. Nesta metodologia de classificação, o material da obra 2 foi classificado como um material que tem comportamento característico entre misturas de areias e argila orgânica de 0 a 2 metros de profundidade por estar incluído na faixa de valor de IC entre aproximadamente 2 e 6, conforme apresentado no item 2.4.2 deste trabalho. Já a porção que resta, 2 a 15 metros de profundidade, o comportamento se caracteriza como argila orgânica por apresentar IC maior que 3,22. De modo geral, observa-se que o IC indica que o material tem comportamento de um material sensível e de baixa resistência.

Figura 29 – IC (*material classification index*) para Obra 2.

Fonte: Autora (2022)

4.2.2 INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE PALHETA

Após a obtenção dos valores de S_u de todos os ensaios de palheta, os dados foram tabulados (Apêndice D). Então, construiu-se um gráfico para mostrar o comportamento da resistência não drenada indeformada de acordo com a profundidade, assim como foi feito na Obra 1.

É possível verificar uma tendência de que a resistência não drenada indeformada aumente com a profundidade, chegando a alcançar o valor máximo de 30,65kPa e, valor mínimo de 5,65kPa, em profundidades de 7m e 1m, respectivamente, como é possível observar na Figura 30 a seguir.

Figura 30 – Compilado dos ensaios de palheta efetuados na obra 2.



Fonte: Autora (2022)

4.2.3 INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO CPTU E COMPARATIVO COM VALORES DE S_u OBTIDOS PELO ENSAIO DE PALHETA

Assim como foi feito na Obra 1, para estimar o perfil da resistência não drenada de cada ensaio foi estimado um Nkt_1 médio, de acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), ao utilizar a subtração da tensão vertical da resistência de ponta corrigida em relação a resistência não drenada obtida no ensaio de palheta. Também foi feita a estimativa do Nkt_2 , de acordo com Robertson (2012), o qual não utiliza nenhum dado de ensaio de palheta, somente uma correlação empírica com o atrito lateral (F_s) obtido do ensaio CPTu.

As tabelas com a estimativa do Nkt_1 e Nkt_2 para cada ensaio estão expostas no Apêndice B e C, sendo que o valor médio de Nkt_1 adotado foi de 17 e o valor médio de Nkt_2 adotado foi 11.

Os valores de S_u estimados a partir dos resultados dos ensaios CPTu foram obtidos utilizando-se os valores de Nkt_1 e Nkt_2 e também os limites superior e inferior para o Nkt , indicados pela literatura, que são 20 e 10 respectivamente.

Para os valores de S_u , obtidos para cada perfil de CPTu avaliado, foram determinados os respectivos erros, tendo sempre como referência o valor de S_u obtido no ensaio de palheta. Estes erros foram calculados de acordo com a Equação 11 pra cada profundidade e, logo após,

foram calculados os erros médios para cada uma das estimativas realizadas, com base no valor de Nkt .

A Tabela 18 apresenta um resumo dos valores correspondente à análise referente ao ensaio CPTu 1. Os resultados mostram que o valor de Su estimado a partir do ensaio CPTu, utilizando-se os valores de Nkt correspondente ao limite inferior, apresenta um erro médio de cerca de 24%, em relação ao valor de Su fornecido pela palheta. Já os valores de Su definidos com base no Nkt_2 , apresentaram um erro médio de aproximadamente 20%. Para o Nkt_1 o erro médio foi em torno de 27% e para o Nkt correspondente ao limite superior indicado pela literatura, um erro médio de cerca de 38%. Então, o Nkt que melhor representou o perfil de resistência não drenada ao comparar com o ensaio de palheta foi aquele obtido com o Nkt_2 , estimado através do método de Robertson (2012), que resultou no valor de 11.

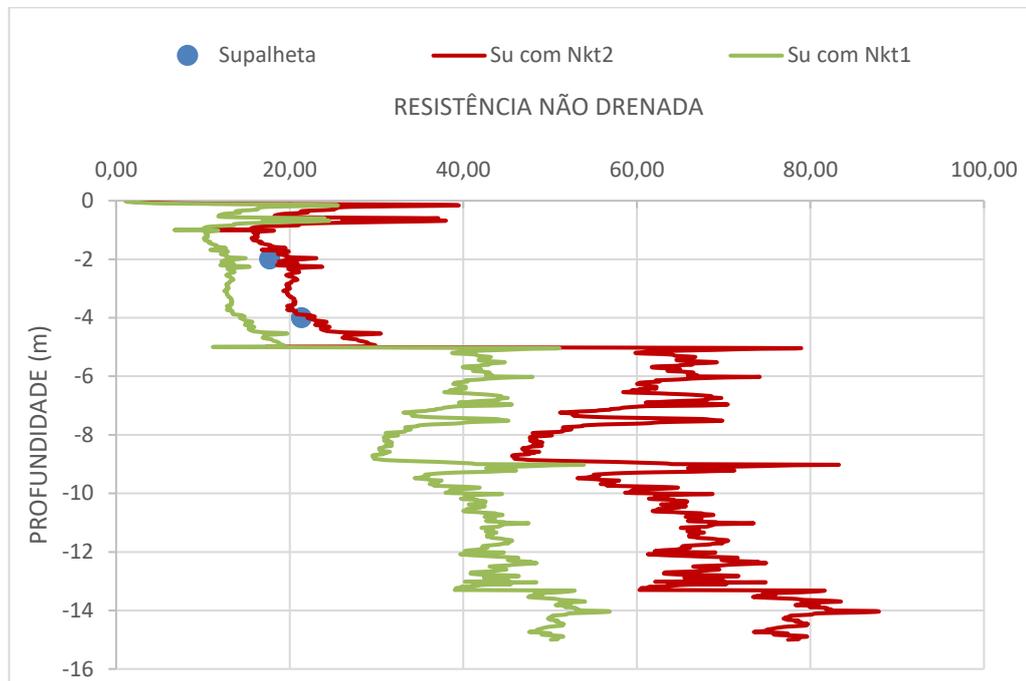
Tabela 18 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 1.

Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt_2=11$	% diferença	Su com $Nkt_1=17$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença	
-2	17,69	23,67	33,82	21,52	36,38	13,92	21,28	11,83	33,09	
-4	21,37	24,28	13,63	22,08	3,30	14,28	33,16	12,14	43,18	
Erro médio			23,73				19,84	27,22	38,14	

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 31 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt_2 = 11$ e $Nkt_1 = 17$, para o CPTu 1. Observa-se que não há uma diferença muito relevante de ajuste das curvas estimadas com os valores de Su da palheta, fato que também pode ser observado na pequena diferença entre os erros médios definidos na Tabela 15.

Figura 31 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2 = 11$ e $Nkt_1 = 17$, para o CPTu 1.



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 19 mostra os resultados obtidos para o CPTu 3. Observa-se que em relação ao Nkt correspondente ao limite inferior definido pela literatura, ocorre um erro médio de cerca de 33%. Em relação ao Nkt_2 um erro médio de aproximadamente 27%, para o Nkt_1 em torno de 30% e para o Nkt correspondente ao limite superior indicado pela literatura, um erro médio de cerca de 38%. Então, verifica-se que o Nkt que melhor calibrou o perfil de resistência não drenada gerado no ensaio CPTu foi o Nkt_1 , obtido através do método proposto por Schnaid e Odebrecht (2012) e, neste caso, tem por valor 17.

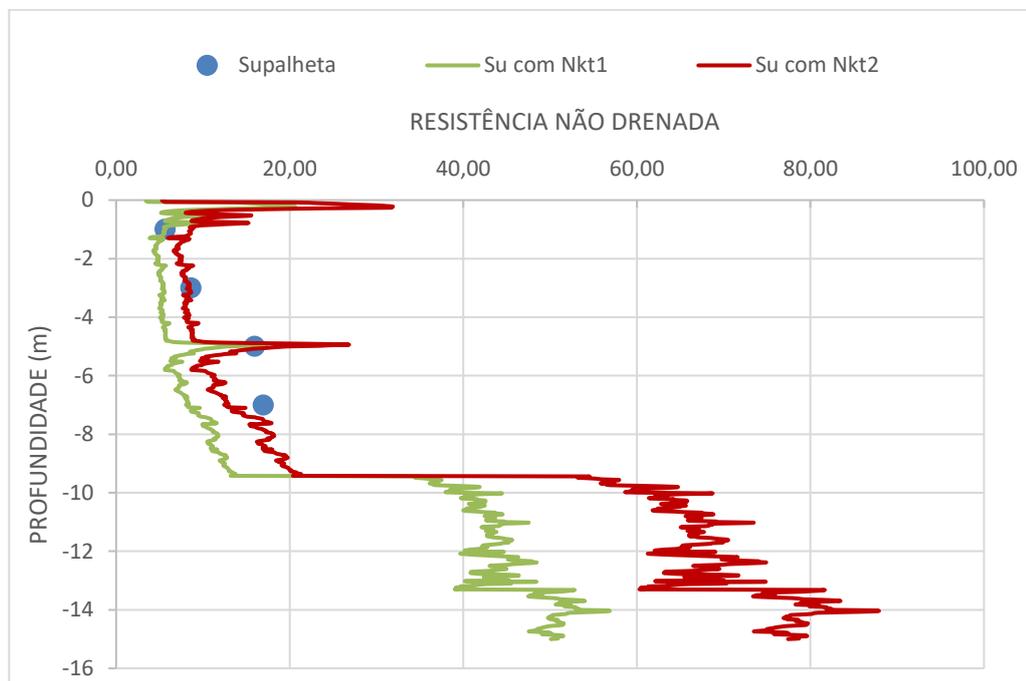
Tabela 19 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 3.

Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt_2=11$	% diferença	Su com $Nkt_1=17$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença
-1	5,65	9,54	68,96	8,68	53,60	5,61	0,61	4,77	15,52
-3	8,60	9,12	6,14	8,30	3,51	5,37	6,14	4,56	46,93
-5	15,97	21,80	36,55	19,82	24,13	12,82	19,68	10,90	31,73
-7	16,95	13,70	19,15	12,46	26,50	8,06	52,44	6,85	59,58
Erro médio			32,70		26,94		19,72		38,44

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 32 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt_2 = 11$ e $Nkt_1 = 17$, para o CPTu 3. Observa-se que não há uma diferença muito relevante de ajuste das curvas estimadas com os valores de S_u da palheta, fato que também pode ser observado na pequena diferença entre os erros médios definidos na Tabela 16.

Figura 32 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_2 = 11$ e $Nkt_1 = 17$, para o CPTu 3.



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 20 mostra os resultados obtidos para o CPTu 4. Observa-se que em relação ao Nkt correspondente ao limite inferior definido pela literatura, ocorre um erro médio de cerca de 26%. Em relação ao Nkt_2 um erro médio de aproximadamente 16%, para o Nkt_1 em torno de 25% e para o Nkt correspondente ao limite superior indicado pela literatura, um erro médio de cerca de 37%. Então, verifica-se que o Nkt que melhor calibrou o perfil de resistência não drenada gerado no ensaio CPTu foi o Nkt_2 , obtido através do método proposto por Robertson (2012) e, neste caso, tem por valor 11.

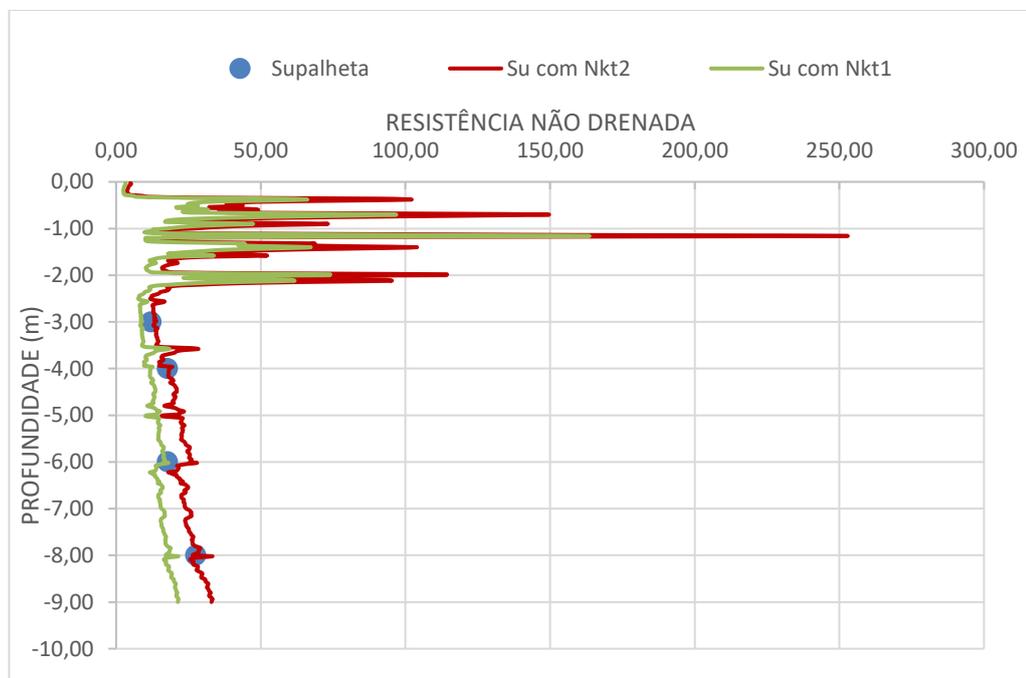
Tabela 20– Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 4.

Prof.	Supalheta	S_u com $N_{kt}=10$	% diferença	S_u com $N_{kt2}=11$	% diferença	S_u com $N_{kt1}=17$	% diferença	S_u com $N_{kt}=20$	% diferença	
-3	12,04	14,86	23,46	13,51	12,23	8,74	23,46	7,43	38,27	
-4	17,68	20,29	14,75	18,45	4,32	11,94	32,50	10,15	42,62	
-6	17,69	28,15	59,15	25,59	44,68	16,56	6,38	14,07	20,42	
-8	27,51	29,18	6,08	26,53	3,56	17,16	37,60	14,59	46,96	
Erro médio			25,86	16,20			24,98			37,07

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 33 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $N_{kt2} = 11$ e $N_{kt1} = 17$, para o CPTu 4. Observa-se que não há uma diferença muito relevante de ajuste das curvas estimadas com os valores de S_u da palheta, fato que também pode ser observado na pequena diferença entre os erros médios definidos na Tabela 17.

Figura 33 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $N_{kt2} = 11$ e $N_{kt1} = 17$, para o CPTu 4.



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 21 mostra os resultados obtidos para o CPTu 5. Observa-se que em relação ao Nkt correspondente ao limite inferior definido pela literatura, ocorre um erro médio de cerca de 58%. Em relação ao Nkt_2 um erro médio de aproximadamente 40%, para o Nkt_1 um erro médio de 10% e para o Nkt correspondente ao limite superior em torno de 23%. Verifica-se que para esta obra, o valor de Nkt_2 apresentou um erro bastante considerável, já o Nkt_1 apresentou uma melhor estimativa.

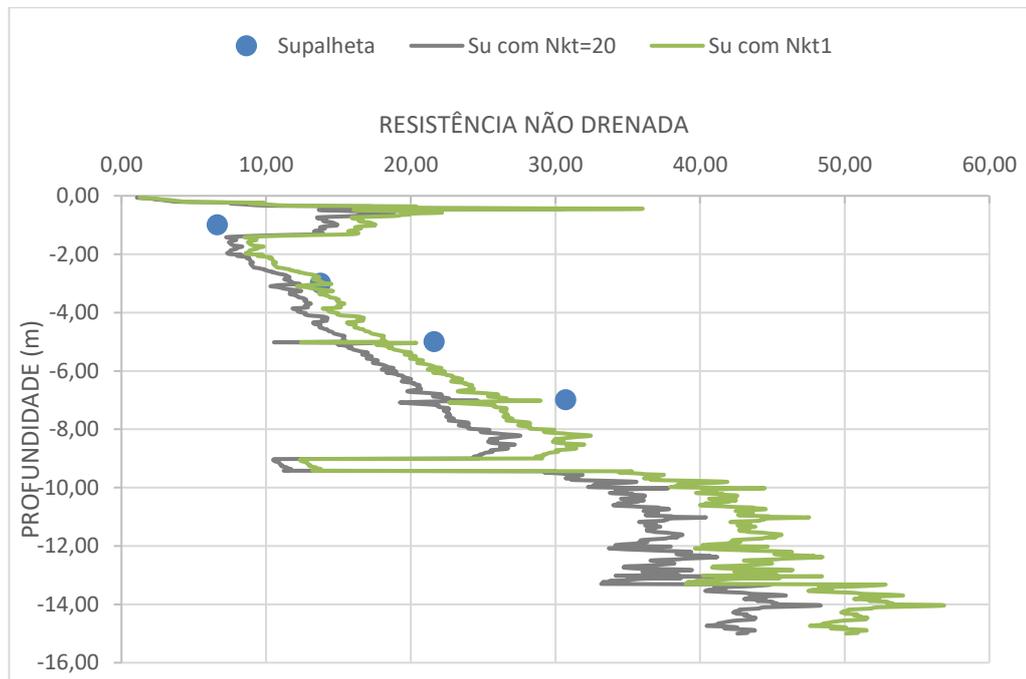
Tabela 21 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 5.

Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt_2=11$	% diferença	Su com $Nkt_1=17$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença	
-1	6,63	29,54	345,39	26,85	304,90	17,38	161,99	14,77	122,69	
-3	13,75	23,71	72,41	21,56	56,74	13,95	1,42	11,86	13,79	
-5	21,61	31,11	43,96	28,29	30,87	18,30	15,32	15,56	28,02	
-7	30,70	45,36	47,75	41,24	34,32	26,68	13,09	22,68	26,12	
Erro médio			54,7				40,64	9,94	22,64	

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 34 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt = 20$ e $Nkt_1 = 17$, para o CPTu 5. Observa-se que não há uma diferença muito relevante de ajuste das curvas estimadas com os valores de Su da palheta, fato que também pode ser observado na pequena diferença entre os erros médios definidos na Tabela 18. É possível salientar que neste caso, um valor adequado de Nkt seria maior que 20, o que não é usual para solos brasileiros e por isso não foi utilizado.

Figura 34 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt = 20$ e $Nkt_1 = 17$, para o CPTu 5.



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 22 mostra os resultados obtidos para o CPTu 6. Observa-se que em relação ao Nkt correspondente ao limite inferior definido pela literatura, ocorre um erro médio de cerca de 127%. Em relação ao Nkt_2 um erro médio de aproximadamente 107%, para o Nkt_1 e para o Nkt correspondente ao limite superior em torno de 48%. Então, verifica-se que o Nkt que melhor calibrou o perfil de resistência não drenada gerado no ensaio CPTu foi o Nkt limite superior, por valor 20.

Tabela 22 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 6.

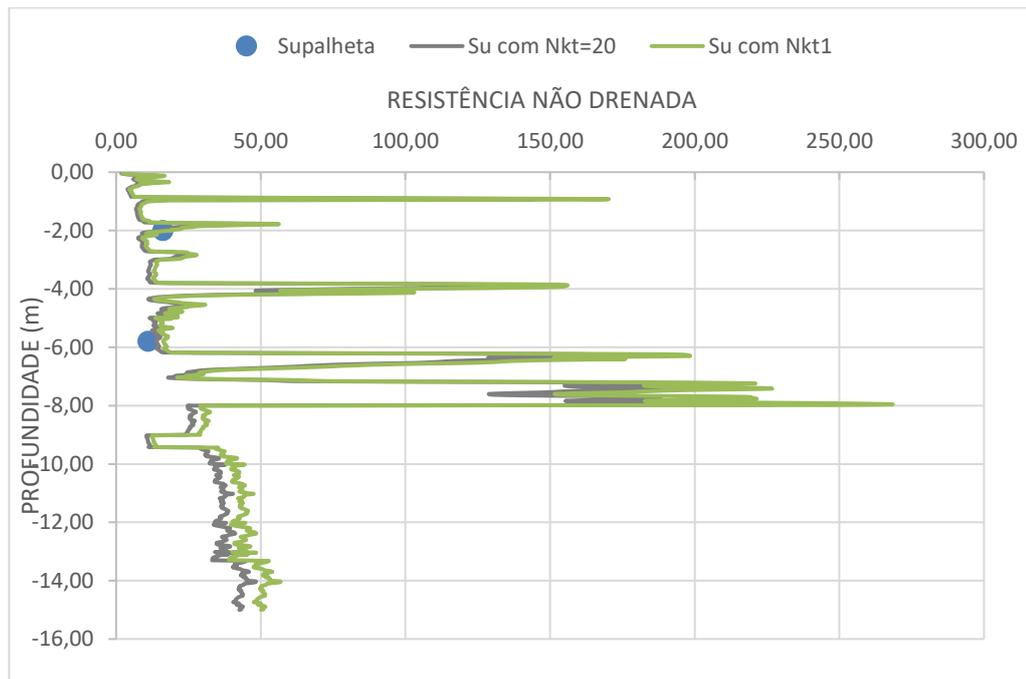
Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt_2=11$	% diferença	Su com $Nkt_1=17$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença
-2	16,21	32,76	102,12	29,79	83,75	19,27	18,90	16,38	1,06
-5,8	11,05	27,69	150,51	25,17	127,74	16,29	47,36	13,84	25,25
Erro médio			126,32		105,74		33,13		13,16

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 35 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt = 20$ e $Nkt_1 = 17$, para o CPTu 6. Observa-se que não há

uma diferença muito relevante de ajuste das curvas estimadas com os valores de S_u da palheta, fato que também pode ser observado na pequena diferença entre os erros médios definidos na Tabela 19. É possível salientar que neste caso, um valor adequado de N_{kt} seria maior que 20, o que não é usual para solos brasileiros e por isso não foi utilizado.

Figura 35 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $N_{kt} = 20$ e $N_{kt1} = 17$, para o CPTu 6.



Fonte: Autora (2022)

Importante salientar que para esta obra, o erro médio para todos os ensaios, ao utilizar os fatores de cone N_{kt1} , se situou entre 10 e 48% e para o N_{kt2} se situou entre 16 e 106%. Nesta obra se observa uma maior heterogeneidade no material, o que influencia os resultados dos ensaios CPTu, cujas medidas são realizadas de 2 em 2 cm. Além disso, a disponibilidade de dados de ensaios de palheta também foi reduzida, o que não permitiu uma análise detalhada em todas as profundidades.

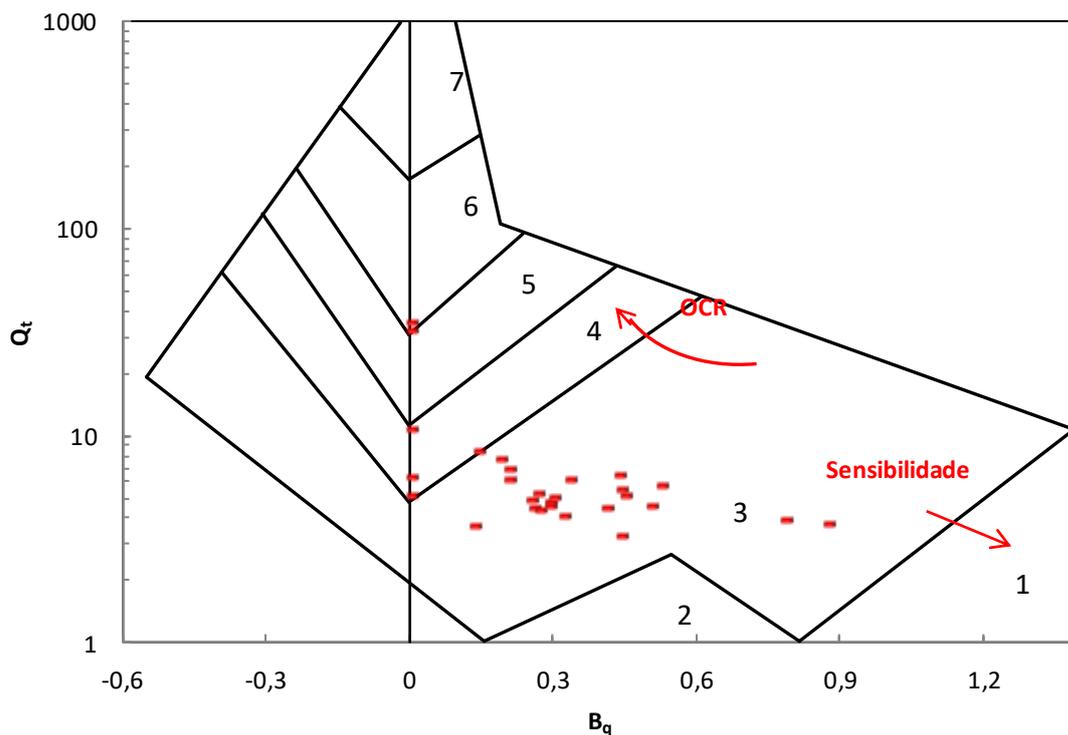
4.3 OBRA 3

4.3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A seguir serão apresentadas as formas de classificação de solos aplicadas aos rejeitos de mineração de bauxita, a fim de verificar a sua tendência de comportamento do material.

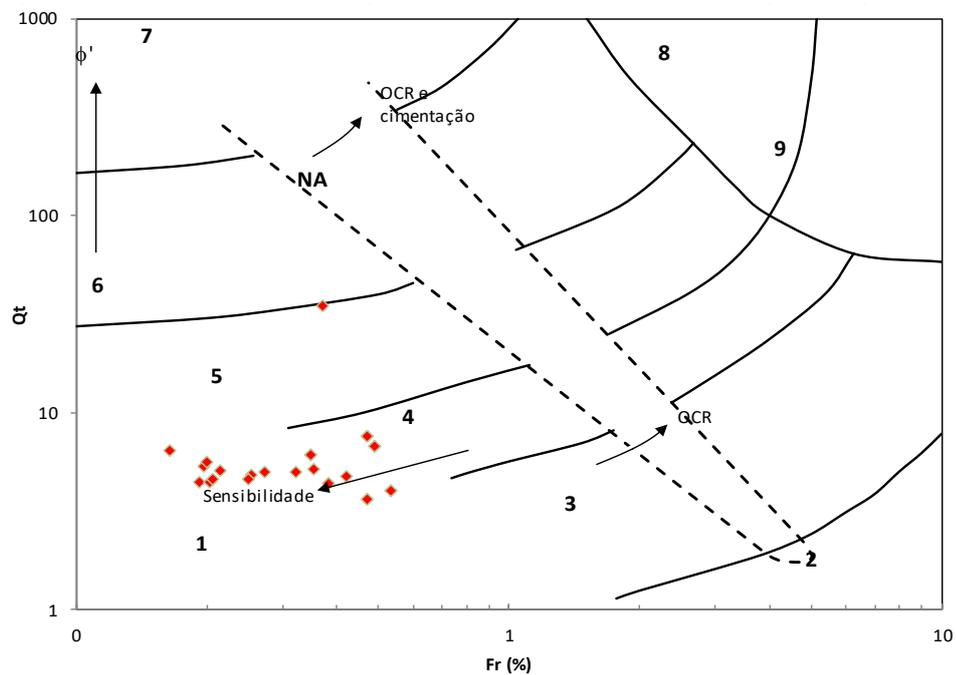
As Figuras 36 e 37 ilustram a distribuição da combinação dos resultados dos ensaios CPTu realizados na obra 3, quando classificados de acordo com a proposta de Robertson (1990). Observa-se que existe uma dispersão relevante dos resultados, mas há uma tendência de concentração de pontos juntos às regiões cujos comportamentos são caracterizados de argila até argila-siltosa com alguns poucos pontos mostrando ocorrência de misturas de areias.

Figura 36 - Dispersão de resultados de ensaios em rejeito de mineração de bauxita na obra 3 utilizando as grandezas B_q e Q_t de acordo com Robertson (1990).



Fonte: Autora (2022)

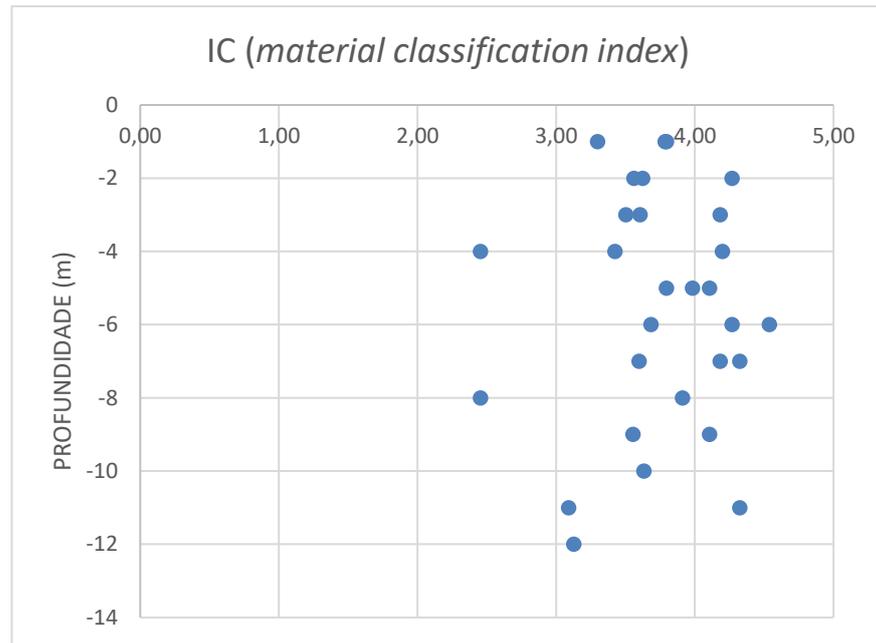
Figura 37 - Dispersão de resultados de ensaios em rejeito de mineração de bauxita da obra 3 utilizando as grandezas Fr e Qt de acordo com Robertson (1990).



Fonte: Autora (2022)

De acordo com a classificação de Jefferies e Davies (1993), com base no valor de IC, é possível caracterizar o perfil ao longo da profundidade por meio da Figura 38. Nesta metodologia de classificação, o material da obra 3 foi classificado como um material que tem comportamento característico entre misturas de siltes e argila orgânica, conforme apresentado no item 2.4.2 deste trabalho. De modo geral, observa-se que o IC indica que o material tem comportamento de um material sensível e de baixa resistência.

Figura 38 – IC (*material classification index*) para Obra 3.



Fonte: Autora (2022)

4.3.2 INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE PALHETA

Após a obtenção dos valores de S_u de todos os ensaios de palheta, os dados foram tabulados (Apêndice E). Então, construiu-se um gráfico para mostrar o comportamento da resistência não drenada indeformada de acordo com a profundidade, assim como foi feito na Obra 2.

É possível verificar uma tendência de que a resistência não drenada indeformada aumente com a profundidade, chegando a alcançar o valor máximo de 59,31 kPa e, valor mínimo de 1,27 kPa, em profundidades de 12 m e 1 m, respectivamente, como é possível observar na Figura 34 a seguir.

Figura 39 – Compilado dos ensaios de palheta efetuados na obra 3.



Fonte: Autora (2022)

4.3.3 INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO CPTU E COMPARATIVO COM VALORES DE S_u OBTIDOS PELO ENSAIO DE PALHETA

Assim como foi feito na Obra 2, para estimar o perfil da resistência não drenada de cada ensaio foi estimado um Nkt_1 médio, de acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), ao utilizar a subtração da tensão vertical da resistência de ponta corrigida em relação a resistência não drenada obtida no ensaio de palheta. Também foi feita a estimativa do Nkt_2 , de acordo com Robertson (2012), o qual não utiliza nenhum dado de ensaio de palheta, somente uma correlação empírica com o atrito lateral (F_s) obtido do ensaio CPTu.

As tabelas com a estimativa do Nkt_1 e Nkt_2 para cada ensaio estão expostas nos Apêndices B e C, porém como o valor de Nkt_1 foi superior a 20 será plotado com o auxílio do Nkt limite superior, 20. O valor para Nkt_2 também não se encaixou no intervalo aceitável, sendo menor que 10, portanto será utilizado o 10 como Nkt limite inferior.

Os valores de S_u estimados a partir dos resultados dos ensaios CPTu foram obtidos utilizando-se os valores de Nkt_1 limite inferior e superior, 20 e 10 respectivamente.

Para os valores de S_u , obtidos para cada perfil de CPTu avaliado, foram determinados os respectivos erros, tendo sempre como referência o valor de S_u obtido no ensaio de palheta. Estes erros foram calculados de acordo com a Equação 11 (apresentada anteriormente), para cada profundidade e, logo após, foram calculados os erros médios para cada uma das estimativas realizadas, com base no valor de Nkt .

A Tabela 23 apresenta um resumo dos valores correspondentes à análise referente ao ensaio CPTu 1. Neste perfil de ensaio CPTu também há indícios da presença de uma camada ressecada nos primeiros três metros de rejeito, pois a resistência de ponta do cone é mais alta nestas profundidades e cai na sequência. Desta forma, acredita-se que esta situação tenha contribuído para as estimativas de N_{kt} com valores fora dos limites apresentados pela literatura. Para a avaliação dos erros médios, serão desconsideradas as camadas superficiais, até os 3 m de profundidade, a fim de evitar possíveis interferências do ressecamento superficial. Sendo assim, os resultados mostram que o valor de S_u estimado a partir do ensaio CPTu, utilizando-se os valores de N_{kt} correspondente ao limite inferior, apresentam um erro médio de cerca de 9%, em relação ao valor de S_u fornecido pela palheta. Para o N_{kt} correspondente ao limite superior indicado pela literatura, ocorre um erro médio de cerca de 48%. Então, o N_{kt} que melhor se aproxima dos valores de S_u definidos pelo ensaio de palheta, abaixo da camada superficial, é o N_{kt} de limite inferior definido pela literatura, igual a 10.

Tabela 23 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 1.

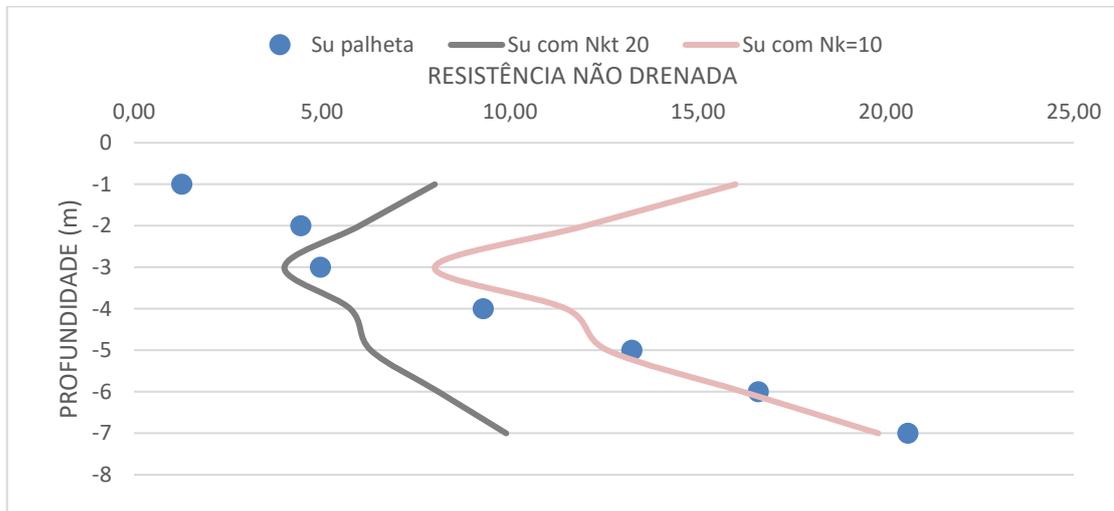
Prof.	$S_{u\text{palheta}}$	S_u com $N_{kt}=10$	% diferença	S_u com $N_{kt}=20$	% diferença
-1	1,27	16,00	1159,84	8,00	529,92
-2	4,44	12,00	170,27	6,00	35,14
-3	4,96	8,00	61,29	4,00	19,35
-4	9,29	11,50	23,79	5,75	38,11
-5	13,25	12,60	4,91	6,30	52,45
-6	16,61	16,20	2,47	8,10	51,23
-7	20,59	19,80	3,84	9,90	51,92
Erro médio			8,75		48,43

*Os erros obtidos nos 3 primeiros metros foram desconsiderados por se tratar de uma camada ressecada, comum nos rejeitos de mineração de bauxita.

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 35 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu (de metro em metro), utilizando o fator de cone $N_{kt} = 20$ e $N_{kt} = 10$, para o CPTu 1. Observa-se os valores de S_u da palheta para a camada superficial não se aproximam de nenhuma das curvas de forma adequada, indicando mais uma vez a possibilidade de ocorrência do ressecamento destas camadas. Já para as camadas inferiores, aparentemente o N_{kt} igual a 10 indicaria uma boa tendência dos valores de S_u , como também indica o erro médio calculado.

Figura 40 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt = 20$ e $Nkt = 10$, para o CPTu 1.



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 24 apresenta um resumo dos valores correspondente à análise referente ao ensaio CPTu 2. Neste ensaio também se observou um pico de resistência de ponta do cone nas camadas superficiais de rejeito, o que possivelmente indica uma camada ressecada, típica neste tipo de reservatório. Estes valores elevados de resistência possivelmente também tenham afetado o cálculo do Nkt calculado. Para efeitos de análise dos erros médios, a camada superficial, até os 2m de profundidade será desconsiderada nos cálculos. Sendo assim, os resultados mostram que o valor de S_u estimado a partir do ensaio CPTu, utilizando-se os valores de Nkt correspondentes ao limite inferior, apresentam um erro médio bastante elevado, de cerca de 74%, em relação ao valor de S_u fornecido pela palheta. Para o Nkt correspondente ao limite superior indicado pela literatura, ocorre um erro médio bem menor de cerca de 14%. Então, para este perfil, o Nkt que melhor representou o perfil de resistência não drenada ao comparar com o ensaio de palheta foi aquele obtido com o Nkt correspondente ao limite superior indicado pela literatura, com o valor de 20.

Tabela 24 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 2.

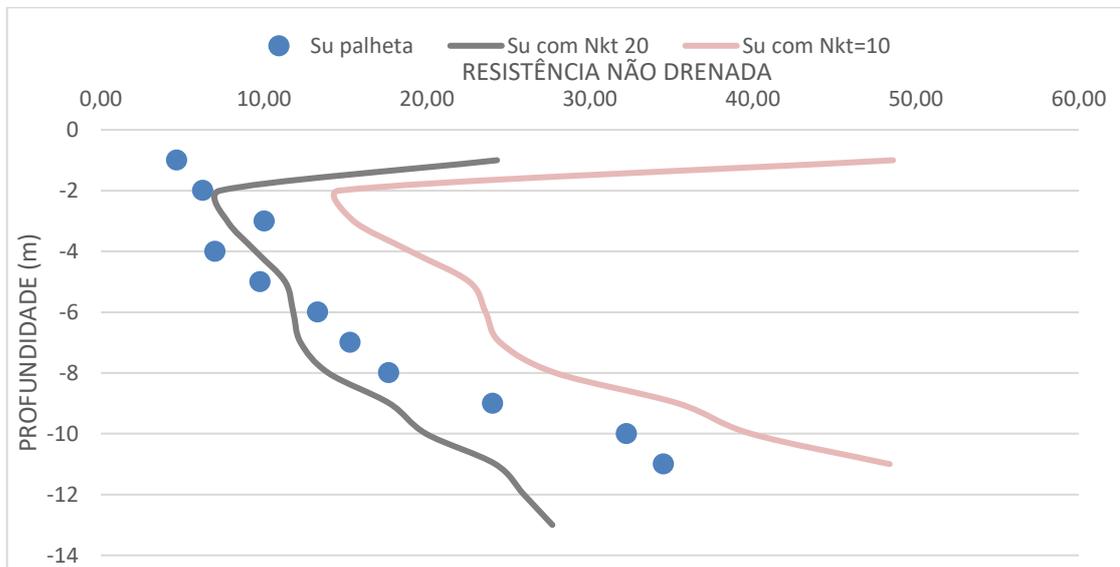
Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença
-1	4,66	48,6	942,92	24,3	421,46
-2	6,24	14,6	133,97	7,30	16,99
-3	10,03	15,5	54,54	7,75	22,73
-4	7,00	19	171,43	9,50	35,71
-5	9,77	22,6	131,32	11,3	15,66
-6	13,3	23,6	77,44	11,8	11,28
-7	15,3	24,5	60,13	12,25	19,93
-8	17,66	27,9	57,98	13,95	21,01
-9	24,03	35,4	47,32	17,70	26,34
-10	32,25	39,9	23,72	19,95	38,14
-11	34,51	48,4	40,25	24,20	29,88
Erro médio			73,79	24,52	

*Os erros obtidos nos 2 primeiros metros foram desconsiderados por se tratar de uma camada ressecada, comum nos rejeitos de mineração de bauxita.

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 41 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt = 20$ e $Nkt = 10$, para o CPTu 2. Observa-se os valores de Su da palheta são bem caracterizados pela estimativa do CPTu com $Nkt=20$ a partir dos 2m de profundidade, até a profundidade de cerca de 8m. Após esta profundidade, os valores de Su da palheta parecem se aproximar mais da curva correspondente à estimativa realizada com base nos resultados do ensaio CPTu, mas com o $Nkt=10$. Este comportamento poderia indicar a eventual existência de camadas diferentes de material no reservatório, o que não é possível verificar apenas com os dados que foram disponibilizados para este estudo.

Figura 41 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt = 20$ e $Nkt_1 = 10$, para o CPTu 2.



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 25 mostra os resultados obtidos para o CPTu 5. Neste perfil, não se observa a elevação da resistência de ponta do cone na superfície do reservatório, mas este pico de resistência ocorre na profundidade de 4m. Este fato pode indicar uma camada ressecada de rejeito que tenha recebido uma outra camada de rejeito posteriormente, situação que pode ocorrer com frequência em barragens de rejeito, em função do processo de alteamento. Sendo assim, seguindo-se a mesma premissa adotada nas análises dos ensaios anteriores para esta obra, o valor correspondente ao pico de resistência verificado aos 4m de profundidade, será desconsiderado na avaliação dos erros médios. Além disso, para este ensaio em específico, o valor do Nkt_1 não extrapolou os limites ditados pela literatura, assumindo um valor de 14, o qual será utilizado nas análises.

Em análise aos dados da Tabela 22 e desconsiderando-se o valor de S_u na camada de 4m (pico de resistência do cone), observa-se que em relação ao Nkt correspondente ao limite inferior definido pela literatura, ocorre um erro médio de cerca de 15%. Em relação ao Nkt_2 , não se fez a plotagem, pois ele apresentou um resultado menor que o limite inferior definido pela literatura. Já para o Nkt_1 calculado, ocorreu um erro médio de aproximadamente 28% e, para o Nkt correspondente ao limite superior, definido pela literatura, encontrou-se um erro médio em torno de 50%. Então, verifica-se que o Nkt que melhor calibrou o perfil de resistência não drenada gerado no ensaio CPTu foi o Nkt limite inferior, com o valor 10.

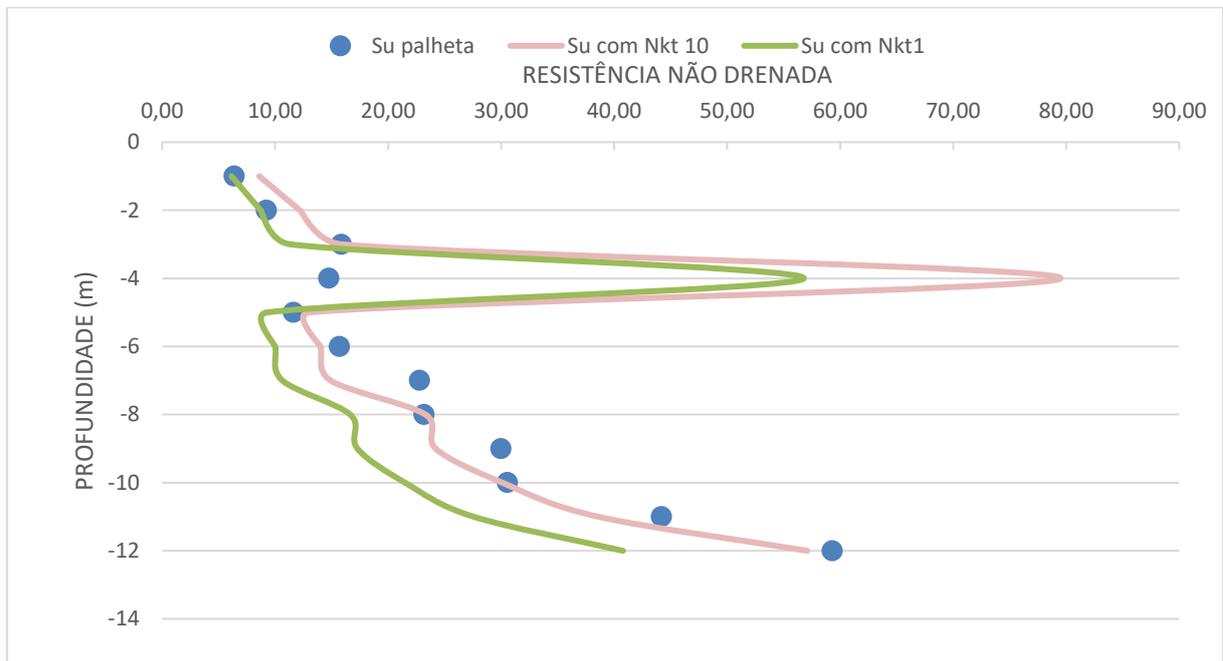
Tabela 25 – Comparativo entre as resistências não drenadas estimadas pelo CPTu e obtida pelo ensaio de palheta no ensaio CPTu 5.

Prof.	Su_{palheta}	Su com $Nkt=10$	% diferença	Su com $Nkt_I=14$	% diferença	Su com $Nkt=20$	% diferença
-1	6,40	8,60	34,38	6,14	4,02	4,30	32,81
-2	9,23	12,20	32,18	8,71	5,59	6,10	33,91
-3	15,87	15,90	0,19	11,36	28,44	7,95	49,90
-4	14,77	79,50	438,25	56,79	284,47	39,75	169,13
-5	11,63	13,00	11,78	9,29	20,16	6,50	44,11
-6	15,71	14,00	10,88	10,00	36,35	7,00	55,44
-7	22,78	14,90	34,59	10,64	53,28	7,45	67,29
-8	23,18	23,30	0,52	16,64	28,20	11,65	49,74
-9	30,00	24,20	19,33	17,29	42,38	12,10	59,67
-10	30,55	30,10	1,47	21,50	29,62	15,05	50,73
-11	44,19	38,60	12,65	27,57	37,61	19,30	56,32
-12	59,31	57,10	3,73	40,79	31,23	28,55	51,86
Erro médio			14,70			28,81	50,16

Fonte: Autora (2022)

A fim de visualização plotou-se na Figura 42 a seguir a comparação entre a resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e a resistência não drenada estimada pelo ensaio de CPTu, utilizando o fator de cone $Nkt_I=14$ e $Nkt=10$ (menor erros médios), para o CPTu 5. Observa-se que, com exceção da camada de alta resistência localizada aos 4m de profundidade, os valores de Su da palheta foram bem caracterizados pelo Nkt igual a 10 ao longo da profundidade. Observa-se que mesmo o Nkt_I sendo definido como um valor intermediário, mais próximo dos valores indicados pela literatura, para este ensaio em específico, não forneceria os resultados mais próximos àqueles obtidos pelo ensaio da palheta.

Figura 42 – Comparação entre resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta e pelo CPTu utilizando $Nkt_1= 14$ e $Nkt= 10$, para o CPTu 5.



Fonte: Autora (2022)

Destaca-se que esta obra em específico foi a que apresentou os valores de Nkt mais díspares daqueles valores rotineiramente indicados pela literatura, para a interpretação de ensaios CPTu. Não se pode deixar de comentar que esta obra também teve o menor número de dados, já que não se obteve acesso às planilhas editáveis dos dados dos ensaios. Entretanto, verifica-se que a presença de camadas ressecadas, típicas de depósitos de rejeitos, e heterogeneidade do material podem afetar muito na interpretação dos valores de Su a partir do ensaio de cone. Mais uma vez, verifica-se a necessidade de avaliação criteriosa dos valores de Su para projeto, obtidos a partir do ensaio CPTu, neste tipo de material em específico.

5 CONCLUSÃO

Vale destacar que a falta de padronização no comportamento dos rejeitos de mineração de bauxita torna necessário o constante aperfeiçoamento do estudo no que tange às suas características. Para tal, este estudo buscou analisar a variação da resistência não drenada em depósitos de rejeitos de mineração de bauxita através de ensaios de campo, ao obter a resistência não drenada (S_u) através dos ensaios de palheta e estimar um fator de cone (N_{kt}) adequado através de correlações empíricas para estimar a resistência não drenada (S_u) através do ensaio de CPTu.

Foram avaliados 3 depósitos brasileiros de rejeitos de mineração de bauxita, sendo que o comportamento de todos os materiais, analisado por meio de correlações com os resultados do ensaio de cone, indicaram se tratar de materiais bastante sensíveis e com baixa resistência, majoritariamente classificados com comportamento típico variante entre argilas orgânicas e misturas de siltes.

Em relação às análises realizadas para a avaliação dos valores de S_u , pode-se concluir que o grande desafio na obtenção de S_u a partir de resultados do ensaio CPTu está na correta definição dos valores do fator N_{kt} . No presente trabalho, correlações fornecidas pela literatura foram utilizadas para o cálculo de N_{kt} , bem como, os limites e valores tipicamente indicados para solos naturais foram analisados. Ao se realizar o comparativo entre os valores de S_u obtidos a partir do ensaio CPTu, com os valores de S_u obtidos no ensaio de palheta, verificou-se que os valores de N_{kt} que definiam o melhor ajuste, apresentaram grande variabilidade. Além disso, mesmo observando o melhor ajuste, os erros médios entre os valores de S_u estimados pelo CPTu e aqueles medidos no ensaio de palheta, apresentaram valores consideráveis, ainda maiores que os erros já indicados pela literatura para solos naturais.

Interessante observar, que nos depósitos em que se identificou maior heterogeneidade do material ao longo da profundidade, teve-se maior influência nos valores da resistência de ponta do cone e esta condição influenciou bastante a definição do N_{kt} por meio de correlações da literatura. Ainda no caso do depósito denominado neste trabalho de Obra 3, verificou-se uma possível existência de camadas ressecadas, ocorrência típica em depósitos de rejeitos. Este possível ressecamento de camadas provocou picos de resistência de ponta do cone, fato que também pode ter afetado consideravelmente a definição dos valores de N_{kt} , sendo que em muitos casos, resultou em valores fora do intervalo tipicamente indicado pela literatura, para a variação deste fator.

Pode-se destacar que a correta definição da resistência não drenada é de extrema importância para o desenvolvimento de um projeto seguro de uma barragem de rejeitos de mineração, já que este material se encontra em condição saturada e pode, em muitas situações, ser submetido a carregamentos rápidos, sem a ocorrência de drenagem. Neste sentido, o presente trabalho enfatizou a importância do correto entendimento e estudo do material para que esta avaliação seja realizada com acurácia. Pode-se verificar que para o rejeito de mineração de bauxita, em específico, a estimativa de S_u com base em resultados de ensaios CPTu, necessita de um olhar bastante criterioso e o maior levantamento possível de informações sobre o depósito, a fim de identificar todas as possíveis causas de erro nas estimativas. Para o caso dos depósitos avaliados neste trabalho, pode-se concluir que na grande maioria das situações as estimativas de S_u a partir do ensaio CPTu apresentou erros consideráveis.

Na estimativa dos valores de N_{kt} por meio de correlações, verificou-se que na grande maioria dos casos, o valor definido com base na resistência de atrito lateral medida no ensaio de cone, forneceu valores de S_u mais discrepantes em relação àquele medido pelo ensaio de palheta. Desta forma, pode-se concluir que esta correlação não seria a mais indicada para avaliações realizadas em depósitos de rejeitos de mineração de bauxita, com base em resultados do ensaio CPTu.

O estudo permitiu concluir ainda, que mesmo que o ensaio CPTu seja utilizado para estimativas de valores de S_u , ensaios de palheta ainda se tornam necessários para uma calibração mais adequada dos valores de N_{kt} para o depósito em questão. Esta necessidade de calibração se mostra muito importante em depósitos de rejeitos de mineração em função do comportamento atípico do material e variável em função do processo de beneficiamento e minério extraído.

Por fim, recomenda-se que o uso de resultados do ensaio CPTu para a estimativa de valores de S_u em rejeitos de mineração de bauxita, seja realizada com bastante parcimônia em casos de projeto, atentando-se a todas as especificidades do depósito e do material.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Levantar dados sobre a construção, etapas de alteamento, possível existência de camadas ressecadas dos depósitos estudados, para uma análise mais completa das influências sobre os valores de N_{kt} ;

- Estimar valores de N_{kt} desconsiderando possíveis camadas ressecadas, bem como, existência de drenos de fundo nos depósitos avaliados;

- Verificar possíveis influências do material/ depósito nos valores de S_u obtidos pelo ensaio de palheta;
- Avaliar um banco de dados maior para o mesmo material de estudo.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, P. C. **Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil** - In SIMP Simpósio de Barragem de Rejeitos e Resíduos Industriais e de Mineração, Anais., V1, p. 2 – 9, 1987. Acesso em: 06 de jul. 2021.

ALMEIDA, M. S. S., MARQUES, M. E. S., **Aterros Sobre Solos Moles: Projeto e Desempenho**, Oficina de Textos, São Paulo, 2010.

ALMEIDA, M. S. S.; MARQUES, M. E. S.; **Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

ALMEIDA, S.L.M., FIGUEIRA, H.V.O., LUZ, A.B., **Tratamento de minérios**, 2004.

ANP, **Agência Nacional de Mineração**.1967. Lei nº227. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del0227.html. Acesso em: 06 de jul. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (São Paulo). **Bauxita no Brasil: mineração responsável e competitividade**. São Paulo: Gráfica Mundo, 2017. 66 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10905: Ensaio de palheta**. 1 ed. Rio de Janeiro: Normatécnica, 1989. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12069: Ensaio de penetração de cone *in situ***. 1 ed. Rio de Janeiro: Normatécnica, 1991. 10 p.

BEDIN, Jucélia. **Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita**. 2006. 256 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BELLO, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira. **Estudo de Ruptura em Aterro sobre solos moles: aterro do galpão localizado na BR - 101 - PE**. 2004. 231 f. Dissertação (Mestrado) -

Curso de Mestrado em Ciências da Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

BJERRUM, L. **Embankments on soft ground**. In: Proc. ASCE Specialty Conference on earth and Earthsupported. Purdue University: 1972. 54 p.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini. **Barragens de rejeito de mineração**: considerações gerais e aspectos geotécnicos. 2019. 56 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

CHANDLER, R. **The In-Situ Measurement of the Undrained Shear Strength of Clays Using the Field Vane**. Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1988. p. 13-13–32.

CONSELHO NACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS - CNDH. Relatório sobre o rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco e seus efeitos sobre o Vale do Rio Doce. 2017.

COUTINHO, R. Q.; OLIVEIRA, A. T. J.; **Palheta**: experiência, tradição e inovação. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia/Seminário Brasileiro de Investigações de Campo, SEFE IV/BIC, 2000, São Paulo. Anais 3... São Paulo, ABMS/ABEF, 2000, p. 53-79.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7o ed. São Paulo, 2014.

EDRAKI, M; BAUMGARTL, T; MANLAPIG, E; BRADSHAW, D; FRANKS, D.M; MORAN, C. J. **Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches**. Journal of Cleaner Production, (2014), 84 (1), pp. 411-420.

FERLA, Fernanda. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos avaliando o potencial para compostagem e reciclagem no município de Garibaldi (RS). 2016. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

FERRANTE, Fernanda. **ESTUDO DE VIABILIDADE PARA RECUPERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM REJEITOS CONTIDOS EM BARRAGENS**. 2014. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

FERREIRA, Juliana de Moraes. **Análise da indústria do alumínio no Brasil**. 1999. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Economia, Departamento de Economia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

FORMIGHERI, Luis Eduardo. **Comportamento de um aterro sobre argila mole da baixada fluminense**. 2003. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geotecnia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

FUHR, Luís Felipe. **Projeto geotécnico de um aterro rodoviário sobre solos moles na região metropolitana de Porto Alegre**. 2017. 186 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. Economia Mineral 2021. Disponível em: <https://ibram.org.br/>. Acesso em 05/07/2021.

JEFFERIES, M. G.; DAVIES, M. P. **Use of the CPTU to estimate equivalent SPT N60**". Geotech. Testing J., v.16, n.4, p.458-468, 1993.

JONES, H; BOGER, D. V. **Sustainability and waste management in the resource industries**. Ind. Eng. Chem. Res., 51 (2012), pp. 10057–10065

KLAHOLD, P. A. Interpretação de ensaios de campo em solos com permeabilidade intermediária. Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 2013.

LEI 12.305: **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para assuntos jurídicos, 12 de agosto de 2010.

LOTTERMOSER, B. G. **Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts**. Terceira Edição. Springer, New York, 2010.

LOZANO, Fernando Arturo Erazo. **Seleção de locais para barragem de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LUZ, A.B. e LINS, F.F., **Introdução ao Tratamento de Minérios** – Tratamento de Minérios, 2004.

MAFRA, J. M. Q. **Barragem construída com rejeito ciclonado: uma possível solução para disposição de rejeitos no Brasil?** In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABMS. 2016.

MANCINI Lucia; SALA Serenella. **Social impact assessment in the mining sector: review and comparison of indicators frameworks**. Elsevier, Resources Policy, v. 57, p. 98-111, 2018.

MARTINS, Leandra Rajczuk. **Tecnologia promete dar um fim mais sustentável ao rejeito de mineração de bauxita**. 2017. Disponível em:
<https://aun.webhostusp.sti.usp.br/index.php/2017/05/04/tecnologia-promete-dar-um-fim-mais-sustentavel-ao-rejeito-do-beneficiamento-de-bauxita/>. Acesso em: 08 mar. 2022.

MASSOCCO, Narayana Saniele. **Determinação de parâmetros de compressibilidade e de resistência não-drenada de argila mole**. 2013. 114 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MAYNE, P. & MITCHELL, J. (1988). **Profiling overconsolidation ratio in clays by field vane**. Canadian Geotechnical Journal 25 150-157.

MIURA, Yuuki Silveira. **Revegetação do depósito de resíduo de bauxita: uma análise de técnicas promissoras para o caso da hydro alunorte.** 2016. 50 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável, Belém, 2016.

NIERWINSKI, Helena Paula. **Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de mineração.** 2019. 231 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

NUNES, Paulo Henrique Farias. **Mineração, meio ambiente e desenvolvimento sustentável: aspectos jurídicos e socioeconômico.** Disponível em: <http://egov.ufsc.br/portal/sites/default/files/anexos/26164-26166-1-PB.pdf>.

OLIVEIRA, Carmelita de. **Impactos ambientais derivados de atividades industriais: caso do cilo IV.** 2006. 167 f. TCC (Graduação) - Curso de Geografia, Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

OLIVEIRA, Fernanda Raphaela Gomes de. **Obtenção da resistência não drenada e coeficiente de adensamento horizontal através de ensaios de CPTU e de palheta.** 2015. 114 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Pampa, Alegrete, 2015.

OLIVEIRA, M. F. M. de. **Poliacrilamidas na flotação catiônica reversa de minério de ferro.** (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016;

OLIVEIRA, Rodrigo Peres de. **Estudo Comparativo da estimativa da resistência não-drenada liquefeita a partir de correlações propostas para ensaios de campo de CPTU.** 2020. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

ORTIGÃO, J. A. R.; COLLET, H. B. Errors caused by friction in field vane testing. ASTM Symp.on Laboratory and Field Vane Shear Strength Testing, STP 1014, Tampa, p. 104-116, 1987.

PEREIRA, Eleonardo Lucas. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minérios de ferro sob carregamento estático**. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

PEREIRA, Luiz Henrique Côrtes Santana. **Considerações sobre o processo de beneficiamento do minério de ferro: beneficiamento, pelotização e análise online de teores**. 2013. 44 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**- 3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367p.

ROBERTSON, P. K. **Interpretation of cone penetration tests – unified approach**. Canadian Geotechnical Journal, v. 46, p. 1337-1355, 2009.

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

ROBERTSON, P. K. The James K. Mitchell Lecture: **Interpretation of in situ tests-some insights**. Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, ISC 4, Brasil, p. 3-24, 2012.

RODRIGUES, André Buttros. **Riscos da disposição de rejeitos da mineração e técnicas alternativas de disposição**. 2017. 38 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo**. 2o ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SILVA, Marcelo Corrêa da. **Estudo da implementação de um sistema de disposição de rejeito desaguado de mineração de bauxita laterítica**. 2020. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doctor Scientiae, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

SKEMPTON, A. W; NORTHEY, R. D. **The sensivity of clays**. Géotechnique, v. 3, n. 1, p. 30-53, 1952.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B.; MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3rd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 549 p.

U.S. Geological Survey, **Mineral Commodity Summaries**. Lime. Relatório. Ano base 2019. Estados Unidos da América, 2020. 2 p. Recife, 2004.

VICK, S.G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams**. John Wiley & Sons, Inc., 369 p, 1983.

APÊNDICE A – RESUMO DO ENSAIO DE PALHETA DA OBRA 1

Obra 1 - Ensaio de palheta							
Par Palheta - CPTu	Prof.	Atrito com a haste do solo indeformado	Torque máximo obtido em solo indeformado	Atrito com a haste do solo amolgado	Torque máximo obtido em solo amolgado	Resistência não drenada de solo indeformado (suind)	Resistência não drenada de solo amolgado (suamolg)
17	2	1,022	34,503	0,511	2,556	33,481	2,045
	4	0,511	55,716	0	2,300	55,205	2,3
	6	0,511	60,828	0,511	4,089	60,317	3,578
	8	2,300	79,741	5,111	6,389	77,441	1,278
	10	1,278	64,406	5,111	6,389	63,128	1,278
	12	0,255	71,051	0,767	3,834	70,796	3,067
	14	3,578	112,455	0	0	108,877	0
	16	1,022	93,542	0,511	6,645	92,52	6,134
	18	1,022	112,199	0	0	111,177	0
19	3	1,789	19,679	0,284	2,839	17,89	2,555
	4	1,278	20,446	1,789	8,945	19,168	7,156
	5	2,811	32,459	1,789	3,067	29,648	1,278
	6	4,089	37,570	0,511	7,156	33,481	6,645
	7	5,878	42,171	0	6,389	36,293	6,389
21	2	1,533	90,253	0,767	7,667	88,72	6,9
	4	0	32,459	1,533	13,29	32,459	11,757
	6	3,322	87,408	4,600	10,223	84,086	5,623
	8	7,412	59,55	2,811	13,290	52,138	10,479
	10	3,067	81,019	3,578	11,245	77,952	7,667
	12	3,322	81,785	0,767	7,156	78,463	6,389
23	2	1,022	97,12	0	0	96,098	0
	3	0,511	37,059	0	2,556	36,548	2,556
	4	9,200	39,359	0	2,556	30,159	2,556
	6	3,834	56,228	1,789	8,690	52,394	6,901
	7	0,767	31,948	0,767	10,990	31,181	10,223
	8	NÃO FOI POSSÍVEL CRAVAR A PALHETA					
28	2	1,533	39,104	1,022	3,834	37,571	2,812
	4	2,045	19,935	2,556	6,134	17,89	3,578
	6	3,067	50,094	1,278	3,578	47,027	2,3
	8	1,278	49,838	0,511	5,367	48,56	4,856
	10	2,045	54,438	0,255	6,134	52,393	5,879
	12	2,045	54,438	0,255	6,134	52,393	5,879
	14	2,556	79,741	2,045	7,156	77,185	5,111
32	2	7,923	16,101	0,511	2,556	8,178	2,045
	3	1,022	16,868	0,255	3,578	15,846	3,323
	4	0,511	17,891	1,278	4,345	17,38	3,067
	5	0,255	11,756	1,789	7,923	11,501	6,134
	6	0,255	19,168	1,278	3,578	18,913	2,3

Fonte: Autora (2022).

APÊNDICE B – ESTIMATIVA DO NKT_1

Obra	CPTu	Nkt_1 médio ensaio	Nkt_1 médio obra	Nkt_1 adotado
1	17	13	16	16
	19	18		
	21	16		
	23	13		
	28	18		
	32	15		
2	1	12	17	17
	3	12		
	4	13		
	5	23		
	6	23		
3	1	38	26	20(Limite literatura)
	2	25		
	3	14		

Fonte: Autora (2022).

APÊNDICE C – ESTIMATIVA DO NKT_2

Obra	CPTu	Nkt_2 médio ensaio	Nkt_2 médio obra	Nkt_2 adotado
1	17	11	12	12
	19	11		
	21	10		
	23	12		
	28	11		
	32	14		
2	1	10	11	11
	3	11		
	4	12		
	5	11		
	6	10		
3	1	8	7	10(Limite literatura)
	2	6		
	3	6		

Fonte: Autora (2022).

APÊNDICE D – RESUMO DO ENSAIO DE PALHETA DA OBRA 2

OBRA 2 - ENSAIOS DE PALHETA

Cptu correspondente	Ensaio palheta	Prof.	Atrito com a haste do solo indeformado	Torque máximo obtido em solo indeformado	Resistência não drenada de solo indeformado (suind)
1	1	2	0,734	18,421	17,687
		4	0,982	22,351	21,369
-	2	2	0,737	9,333	8,596
		4	0,491	11,544	11,053
		6	0,737	19,158	18,421
		8	0,737	24,561	23,824
3	3	1	0,491	6,140	5,649
		3	0,491	9,088	8,597
		5	0,491	16,456	15,965
		7	0,982	17,93	16,948
4	4	3	1,719	13,754	12,035
		4	2,456	20,14	17,684
		6	2,210	19,895	17,685
		8	2,702	30,210	27,508
5	5	1	0,982	7,614	6,632
		3	1,228	14,982	13,754
		5	0,491	22,105	21,614
		7	1,719	32,421	30,702
6	6	2	2,702	18,912	16,21
		5,8	1,474	12,526	11,052

Fonte: Autora (2022).

APÊNDICE E – RESUMO DO ENSAIO DE PALHETA DA OBRA 3

Obra 3 - Ensaio de palheta				
CPTu correspondente	Ensaio de palheta	Prof.	Atrito com a haste do solo indeformado	Resistência não drenada de solo indeformado (Su_{ind})
1	1	1	0,62	1,27
		2	0,58	4,44
		3	0,50	4,96
		4	0,660	9,29
		5	0,78	13,25
		6	1,04	16,61
		7	1,25	20,59
2	2	1	0	4,66
		2	0	6,24
		3	0,36	10,03
		4	0,76	7,00
		5	0,71	9,77
		6	0,560	13,30
		7	0,82	15,30
		8	2,09	17,66
		9	1,22	24,03
		10	1,81	32,25
		11	2,23	34,51
5	3	1	0,43	6,4
		2	1,23	9,23
		3	0,85	15,87
		4	0,44	14,77
		5	0,910	11,63
		6	0,78	15,71
		7	1,17	22,78
		8	1,17	23,18
		9	1,69	30,00
		10	1,50	30,55
		11	2,16	44,19
		12	1,55	59,31

Fonte: Autora (2022).