

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

ISADORA DE AMORIM

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE
REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CAMPO

Joinville

2024

ISADORA DE AMORIM

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE
REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CAMPO

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil de Infraestrutura, do
Centro Tecnológico de Joinville, da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Helena Paula Nierwinski

Joinville

2024

ISADORA DE AMORIM

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE
REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO ATRÁVES DE ENSAIOS DE CAMPO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 05 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Dra. Helena Paula Nierwinski
Orientadora/Presidente

Dr. Julian Asdrubal Buritica Garcia
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Jonatas Sosnoski
Membro
Universidade do Estado de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha família, especialmente meus pais e meu avô que não pode estar presente para ver essa grande realização pessoal.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e a Maria, minha mãezinha do céu e protetora. Sem eles, eu e tudo até aqui não seriam possíveis. A minha família, Jab, Vânia, Híris, Júnior e Lívia, que sempre me apoiaram incondicionalmente ao longo desta trajetória, meu mais profundo agradecimento. Em especial, aos meus pais, que mesmo à distância, estiveram presentes nos momentos mais desafiadores e também nas maiores alegrias. Obrigada por todo o amor, amizade e compreensão. Tudo o que faço é e sempre será por vocês.

Ao Mateus, meu melhor amigo e companheiro, que esteve ao meu lado, suportando minhas crises de ansiedade, choros e momentos de felicidade, obrigada por nunca deixar de me apoiar e incentivar, mesmo nas horas mais difíceis.

Às minhas irmãs de alma, Débora e Thayse, que dividiram comigo um lar e estiveram presentes em diferentes períodos desta jornada. Cada uma, com seu jeito especial, deixou marcas de acolhimento e carinho no meu coração.

Aos meus amigos e colegas, que contribuíram em diversos momentos e diversas formas, e que compartilham também suas trajetórias, minha eterna gratidão.

Aos professores do curso de Engenharia Civil, pela dedicação e comprometimento com a universidade e com os alunos, meu muito obrigada. Principalmente, à minha orientadora, professora Helena, cuja paciência, disponibilidade e apoio foram fundamentais desde o momento em que a procurei. Professora, obrigada pelo carinho e acolhida.

Por fim, expresso minha gratidão a todos os funcionários da UFSC que, de alguma forma, participaram desta jornada e contribuíram para que este momento se tornasse possível.

“O período de maior ganho de conhecimento e experiência é o período de maior dificuldade na vida de cada um.”
(DALAI LAMA).

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise detalhada dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de rejeitos de mineração de ferro, com base em ensaios de campo do tipo *Cone Penetration Test (CPTu)*. O estudo abrangeu rejeitos de mineração de ferro, provenientes de barragens localizadas no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, Brasil, uma das principais regiões de mineração no país, visando compreender o comportamento geotécnico dos rejeitos, um fator crítico para a segurança de barragens. Dados como resistência de ponta, atrito lateral e poropressão foram coletados, permitindo a estimativa de parâmetros de resistência através de três diferentes metodologias propostas pela literatura, baseadas em resultados do ensaio CPTu. Esses resultados foram comparados com parâmetros obtidos em ensaios laboratoriais disponíveis na literatura, além de resultados de ensaios de cisalhamento direto realizados em amostras com três diferentes índices de vazios, 0,78, 0,85 e 0,90. Os valores de ângulo de atrito encontrado com as literaturas variaram entre 28° e 37°, dependendo da metodologia aplicada e das condições de ensaio, alinhando-se aos intervalos relatados na literatura. A coesão resultou em 0 kPa, consistente com estudos prévios. A metodologia de Kulhawy e Mayne (1990) destacou-se como a mais confiável para a interpretação dos dados de CPTu em rejeitos de mineração, reforçando sua aplicabilidade prática. A comparação entre os resultados deste trabalho e os encontrados na literatura mostrou uma boa concordância, indicando que as práticas adotadas podem ser utilizadas com segurança e eficiência em estudos semelhantes. O estudo contribui para o desenvolvimento de práticas mais seguras e eficientes no manejo de rejeitos de mineração, promovendo a integridade estrutural de barragens e minimizando os riscos associados a essas operações.

Palavras-chave: Rejeitos de mineração. Barragens. Parâmetros de resistência ao cisalhamento. Ensaio de campo.

ABSTRACT

This study presents a detailed analysis of the shear strength parameters of iron mining tailings, based on Cone Penetration Test (CPTu) field tests. The research focused on iron mining tailings from dams located in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil—one of the country's most significant mining regions—aiming to understand the geotechnical behavior of these materials, a critical factor for dam safety. Data such as tip resistance, sleeve friction, and pore pressure were collected, enabling the estimation of shear strength parameters using three different methodologies proposed in the literature based on CPTu results. These estimates were compared with parameters obtained from laboratory tests and direct shear tests conducted on samples with void ratios of 0.78, 0.85, and 0.90. The friction angle values ranged from 28° to 37°, depending on the methodology and testing conditions, aligning with ranges reported in the literature. Cohesion values resulted in 0 kPa, consistent with previous studies. Kulhawy and Mayne's (1990) methodology proved to be the most reliable for interpreting CPTu data in mining tailings, reinforcing its practical applicability. The comparison between the results of this study and those found in the literature demonstrated good agreement, indicating that the adopted practices can be safely and efficiently applied in similar studies. This research contributes to the development of safer and more effective practices in the management of mining tailings, enhancing the structural integrity of dams and reducing the risks associated with these operations.

Keywords: Mining tailings. Dams. Shear strength parameters. Field tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Beneficiamento do minério.....	35
Figura 2 - Descarte do rejeito de ferro.....	37
Figura 3 - Método de disposição à montante	39
Figura 4 - Método de disposição à jusante.....	42
Figura 5 - Método de disposição de linha de centro.....	43
Figura 6 - Ensaio de campo.....	55
Figura 7 - Esquema de execução do ensaio de cone e detalhes construtivos.	58
Figura 8 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, Brasil.....	60
Figura 9 - Resultados registrados nos ensaios CPTu na estrutura 1.	62
Figura 10 - Resultados registrados nos ensaios SCPTu na estrutura 2.....	63
Figura 11 - Resultados registrados nos ensaios SCPTu na estrutura 3.....	64
Figura 13 - Equipamento utilizado no ensaio - Cisalhamento Direto.....	69
Figura 14 - Célula do ensaio de cisalhamento direto moldada com rejeito.	70
Figura 15 – Correlação entre ângulo de atrito x profundidade para a estrutura 1 – CPTu 1 de acordo com as metodologias estudadas.	78
Figura 16 - Correlação entre ângulo de atrito x profundidade para a estrutura 2 – CPTu 6 de acordo com as metodologias estudadas.	80
Figura 17 - Correlação entre ângulo de atrito x profundidade para a estrutura 3 – CPTu 3A de acordo com as metodologias estudadas.....	81
Figura 18 - Resultado ensaio de cisalhamento direto para o estado fofo ($e=0,90$). ..	83
Figura 19 - Resultado ensaio de cisalhamento direto para o estado medianamente compacto ($e=0,85$).	84
Figura 20 - Resultado ensaio de cisalhamento direto para o estado compacto ($e=0,78$).	85
Figura 21 - Variação do ângulo de atrito a partir das metodologias adotadas para a estrutura 1.	90
Figura 22 - Variação do ângulo de atrito a partir das metodologias adotadas para a estrutura 2.	91
Figura 23 - Variação do ângulo de atrito a partir das metodologias adotadas para a estrutura 3.	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de rejeitos e suas propriedades geotécnicas.....	46
Quadro 2 - Variação dos valores de ângulo de atrito do rejeito de ferro.	48
Quadro 3 - Índices de coesão e ângulo de atrito para rejeitos de mineração de ferro.	49
Quadro 4 - Resumo da campanha de investigação geotécnica para o ensaio CPTu realizada por Costa,2023.	61
Quadro 5 - Resultados de ângulo de atrito e coesão para estrutura 1.	73
Quadro 6 - Resultados de ângulo de atrito e coesão para a estrutura 2.	73
Quadro 7 - Resultados de ângulo de atrito e coesão para a estrutura 3.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de ângulo de atrito e coesão obtidos através de ensaios CD e CU em minério de ferro e CU em minério de cobre, na China.	47
Tabela 2 - Propriedades físicas do rejeito de minério de ferro.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANM – Agência Nacional de Mineração

BR - Brasil

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

CPT – Ensaio de cone

CPTU – Ensaio de piezocone

CU – Ensaio Triaxial Consolidado Não Drenado

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

IP – Índice de Plasticidade

PIB – Produto Interno Bruno

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

SCPTu – Ensaio de Piezocone Sísmico

SPT – Sondagem à percussão

UU – Ensaio Triaxial Não Consolidado Não Drenado

LISTA DE SÍMBOLOS

φ – Ângulo de atrito interno

c – Coesão

q_c – Resistência de ponta

q_t – Resistência de ponta corrigida

f_s – Atrito lateral

u – Poropressão

σ' – Tensão efetiva

σ – Tensão total

γ – Peso específico do solo

e – Índice de vazios

C_v – Coeficiente de adensamento

SiO_2 – Dióxido de silício

Fe – Elemento ferro

Δu – Variação de poropressão (kPa)

Q_{tn} – Parâmetro de resistência normalizado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	29
1.1. OBJETIVOS	31
1.1.1. Objetivo Geral.....	31
1.1.2. Objetivos Específicos	31
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	32
2.1. MINÉRIO DE FERRO.....	32
2.2. REJEITO DE MINERAÇÃO.....	34
2.3. MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DO REJEITO.....	37
2.3.1. Método de alteamento a montante.....	39
2.3.2. Método de alteamento à jusante	40
2.3.3. Método de linha de centro	42
2.4. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	44
2.4.1. Conceitos gerais.....	44
2.4.2. Parâmetro de resistência ao cisalhamento de rejeitos de mineração	45
2.4.3. Parâmetros de resistência estimados através de ensaios de campo.....	49
2.4.4. Parâmetros de resistência estimados através de ensaios de laboratório.....	53
2.5. PRINCIPAIS ENSAIOS DE CAMPO PARA OBTENÇÃO DE PARAMETROS DE RESISTÊNCIA	54
3. METODOLOGIA	59
3.1. REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO E ESTRUTURAS AVALIADAS	59
3.2. INTERPRETAÇÃO	64
3.3. ESTUDO COMPARATIVO DOS PARÂMETROS DE RESISTENCIA OBTIDOS EM ENSAIO DE LABORATÓRIO.....	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
4.1. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA ATRAVÉS DO ENSAIO CPTU	72
4.1.1. Parâmetros para as estruturas 1, 2 e 3.....	72
4.2. PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA COMPARATIVO COM DADOS DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	82

4.3. PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA COMPARATIVO COM DADOS DA LITERATURA.....	87
5. CONCLUSÃO	94
REFERÊNCIAS.....	96
ANEXO A – RESULTADOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE ÂNGULO DE ATRITO X PROFUNDIDADE PARA A ESTRUTURA 1.....	100
ANEXO B – RESULTADOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE ÂNGULO DE ATRITO X PROFUNDIDADE PARA A ESTRUTURA 2.....	101
ANEXO C – RESULTADOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE ÂNGULO DE ATRITO X PROFUNDIDADE PARA A ESTRUTURA 3.....	105
ANEXO D – RESULTADOS DOS GRÁFICOS TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA AS TRÊS AMOSTRAS.	111

1. INTRODUÇÃO

A mineração é um dos pilares essenciais para a economia global, e particularmente para a economia brasileira, em função da vasta riqueza mineral presente no território nacional. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2019), a produção mineral no Brasil atingiu um valor expressivo de US\$34 bilhões em 2018, superando os resultados de 2017, com a indústria mineral representando 1,4% do Produto Interno Bruto (PIB) do país. Essa relevância econômica é sustentada pela exploração de recursos minerais que são vitais para diversos setores industriais e tecnológicos.

Entretanto, a mineração, apesar de sua importância econômica, traz consigo uma série de desafios ambientais, especialmente devido à geração de grandes volumes de rejeitos. Estes rejeitos, definidos como subprodutos de baixo valor econômico, são frequentemente caracterizados por seu potencial de reatividade química e capacidade de contaminar o meio ambiente (Silva, 2007). Na exploração do minério de ferro, por exemplo, os rejeitos são gerados após o beneficiamento, um processo que inclui etapas como moagem, tratamento químico, lavagem e britagem, resultando em uma mistura de finos particulados, frequentemente disposta sob a forma de lama em barragens (Milonas, 2006).

A disposição inadequada desses rejeitos em barragens é uma questão crítica, pois esses depósitos podem se tornar instáveis, levando a riscos de ruptura que causam sérios danos ambientais e socioeconômicos. O Brasil, em particular, tem enfrentado vários desastres envolvendo rompimentos de barragens de rejeitos, o que evidenciou a necessidade de uma análise mais rigorosa das condições de armazenamento e das características dos materiais depositados. Conforme destacado por Biazon (2018), falhas no controle de armazenamento, supervisão inadequada e a falta de manutenção das estruturas estão entre as principais causas desses desastres.

O rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015, em Minas Gerais, demonstrou a urgência com que as metodologias relacionadas à investigação e análise desses materiais precisam ser aplicadas com mais rigor. Trouxe à tona grandes vulnerabilidades na gestão de rejeitos de mineração, o que provou que as práticas de engenharia precisam ser aprimoradas para a segurança dessas

estruturas. De acordo com a Agência Brasil (2015), o rompimento da barragem do Fundão causou a liberação de cerca de 34 milhões de metros cúbicos de lama no ambiente, causando um impacto significativo no ecossistema local. Esta lama, composta principalmente de detritos do processamento de minério de ferro, provocou um desastre ambiental sem igual, resultando em mortes e deixando centenas de famílias sem abrigo.

A ruptura da barragem de Fundão não só devastou comunidades e ecossistemas, como também alertou para a necessidade imediata de revisar as normas e práticas de engenharia ligadas à construção e manutenção de barragens de rejeitos. Este evento promoveu uma série de discussões acerca da relevância da caracterização geotécnica dos rejeitos e da análise de sua estabilidade ao longo do tempo, elementos fundamentais para evitar futuros desastres.

Nesse contexto, compreender o comportamento geotécnico dos rejeitos de mineração se torna um fator crucial para garantir a segurança das barragens e reduzir o risco de catástrofes. Avaliar os parâmetros de resistência ao cisalhamento desses materiais, por meio de ensaios de campo e laboratório, é fundamental para o desenvolvimento de práticas de engenharia mais seguras e eficientes. A análise dos fatores que influenciam a estabilidade das barragens de rejeitos, como a coesão e o ângulo de atrito interno dos rejeitos, é essencial para a elaboração de projetos que minimizem o risco de falhas catastróficas e promovam um manejo ambientalmente responsável dos resíduos de mineração.

A coleta de amostras indeformadas e qualidade em rejeitos de mineração constitui-se em um desafio para a engenharia geotécnica, principalmente considerando as técnicas rotineiramente adotadas no Brasil. Explorar alternativas como a estimativa de parâmetros de resistência por meio de ensaios de campo, como o CPTu, é essencial para o desenvolvimento de projetos envolvendo esses materiais. Neste aspecto, este trabalho visa avaliar o comportamento do rejeito de mineração de ferro a partir de resultados de ensaios CPTu e a partir de resultados de ensaios de cisalhamento direto realizado em laboratório, para a estimativa de parâmetros de resistência ao cisalhamento do rejeito de ferro, comparativamente a valores destes parâmetros fornecidos pela literatura a partir de ensaios de laboratório.

1.1. OBJETIVOS

Para o estudo relacionado aos parâmetros de resistência do rejeito de mineração de ferro, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar estimativas de parâmetros de resistência ao cisalhamento de rejeitos de mineração de ferro, obtidas a partir de resultados de ensaios de campo (CPTu).

1.1.2. Objetivos Específicos

- Selecionar, por meio de levantamento bibliográfico, distintas metodologias que permitam a estimativa de parâmetros de resistência ao cisalhamento a partir de resultados de ensaios CPTu;
- Estimar parâmetros de resistência a partir de resultados de ensaios CPTu, executados em diferentes estruturas de contenção de rejeito de mineração de ferro;
- Realizar um estudo comparativo entre os valores estimados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento a partir de ensaios de campo em relação aos valores presentes na literatura, obtidos através de ensaios de laboratório.
- Avaliação dos parâmetros de resistência obtidos através de estimativas a partir de ensaios de campo para comparação com valores provenientes da literatura e amostras de campo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados conceitos fundamentais que sustentam a análise de questões relacionadas aos rejeitos de mineração de ferro. Inicialmente, são explorados aspectos cruciais sobre o processo de extração do minério de ferro, incluindo métodos de disposição dos rejeitos e técnicas de alteamento de barragens, que são de particular relevância para a segurança e estabilidade dessas estruturas. Adicionalmente, são abordados os principais ensaios de campo empregados no Brasil para caracterizar as propriedades geotécnicas desses materiais, com um foco especial na determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e nos ensaios CPTu, que são foco principal deste trabalho.

2.1. MINÉRIO DE FERRO

O minério é um elemento mineral de valor econômico, que fornece matérias-primas e recursos para o avanço e desenvolvimento das sociedades. No Brasil, o minério de ferro é notável por seu alto conteúdo de ferro e ausência de impurezas, garantindo sua excelente qualidade em nível global (Branco, 2008).

O elemento ferro (Fe) é o quarto mais abundante na crosta terrestre, estando presente em todas as categorias minerais. Sua abundância, aliada à sua tendência à oxidação em diversos ambientes (Takehara, 2004), resulta em uma ampla variedade de minerais que contêm ferro. Mais de 400 minerais exibem níveis detectáveis deste elemento, que variam de concentração.

O principal motivador que impulsiona a exploração do minério de ferro é sua importância na produção e consumo de aço. De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2019), cerca de 99% do minério de ferro produzido é utilizado na fabricação de aço e ferro fundido. O minério de ferro é definido como um material natural com diversas propriedades físicas, graus e composições, sendo minerável e processável conforme as condições de mercado (Takehara, 2004). Para Mapa (2006), o minério de ferro é um agregado de minerais que pode ser explorado em função do seu conteúdo de ferro.

No Brasil, as atividades metalúrgicas ligadas ao ferro remontam ao período colonial, quando a matéria-prima ainda era proveniente de importação. Contudo, foi

no século XIX que ocorreu um acontecimento relevante. Preocupado com a falta de conhecimento geológico e mineral no país, Dom Pedro II designou Claude Henry Gorceix, nomeado por Auguste Daubrée, para liderar a consolidação do estudo dos minerais no Brasil (Oliveira, 2017).

Em 1876, foi fundada a Escola de Minas e Ouro Preto, resultado direto da vinda de Gorceix ao Brasil. Essa instituição teve papel crucial no desenvolvimento da mineração de ferro, formando profissionais capacitados para compreender os minérios, sua extração e utilização. Além disso, contribuiu para a instalação das primeiras usinas siderúrgicas no país (Azevedo, 2007).

No momento, o Brasil está em quarto lugar no ranking global de reservas de minério de ferro, possuindo aproximadamente 29 bilhões de toneladas. As reservas mundiais, estimadas em 160 bilhões de toneladas, abrangem aproximadamente 8 % do total mundial (IBRAM, 2011). A abundância de reservas no Brasil, aliada à sua excelente qualidade, posiciona o país em destaque no cenário global. A procura crescente por aço de alta qualidade estimula a intensificação da sua exploração, sendo crucial para várias áreas da economia.

As maiores jazidas de minérios de ferro maiores estão situadas na Austrália, Brasil, China, Canadá, Índia, Rússia, Ucrânia, Estados Unidos e África do Sul. Em conjunto, esses países controlam a produção mundial desse minério (UNCTAD, 2008). Cerca de 85% da produção mundial de minério de ferro é obtida de minas a céu aberto e o restante em minas subterrâneas, sendo que, no Brasil, a prática predominante de exploração é a céu aberto (Lamoso, 2001).

As reservas globais de minério de ferro são estimadas em cerca de 170 bilhões de toneladas. O Brasil, com reservas que possuem um teor médio de 46,2% de ferro, é responsável por aproximadamente 19,8% dessas reservas mundiais. Entre os estados brasileiros que concentram as maiores reservas, destaca-se Minas Gerais, com 74,4% das reservas nacionais e um teor médio de 41,1% de ferro. Em seguida, o Pará detém 19,5% das reservas, com um teor significativamente mais alto, de 65,6%, enquanto o Mato Grosso do Sul abriga 2,2% das reservas, com um teor médio de 63,7% de ferro (ANM, 2018).

Segundo Carvalho *et al.* (2018), o minério de ferro é o principal mineral na pauta da exportação do Brasil, devido à grande quantidade de minas e barragens associadas a essa atividade. Em 2016, o Brasil contava com 163 barragens associadas a extração desse minério. Além disso, o minério de ferro foi o principal

produto exportado pelo Brasil entre os anos de 2005 e 2014, consolidando sua importância no cenário econômico e industrial brasileiro.

2.2. REJEITO DE MINERAÇÃO

O processamento de minerais consiste em uma série de operações destinadas a converter o minério bruto em produtos de venda. Ao longo dessas fases, surgem resíduos denominados "rejeitos de mineração" (Portes, 2013). Conforme a Lei no 12.305/2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os rejeitos são resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as opções de tratamento e recuperação economicamente viáveis, só resta a eliminação final de maneira ecologicamente correta. Espósio (2000) amplia essa definição ao caracterizar os rejeitos como subprodutos do processamento de minerais, com a finalidade de extrair os componentes de valor econômico, ou seja, o produto final.

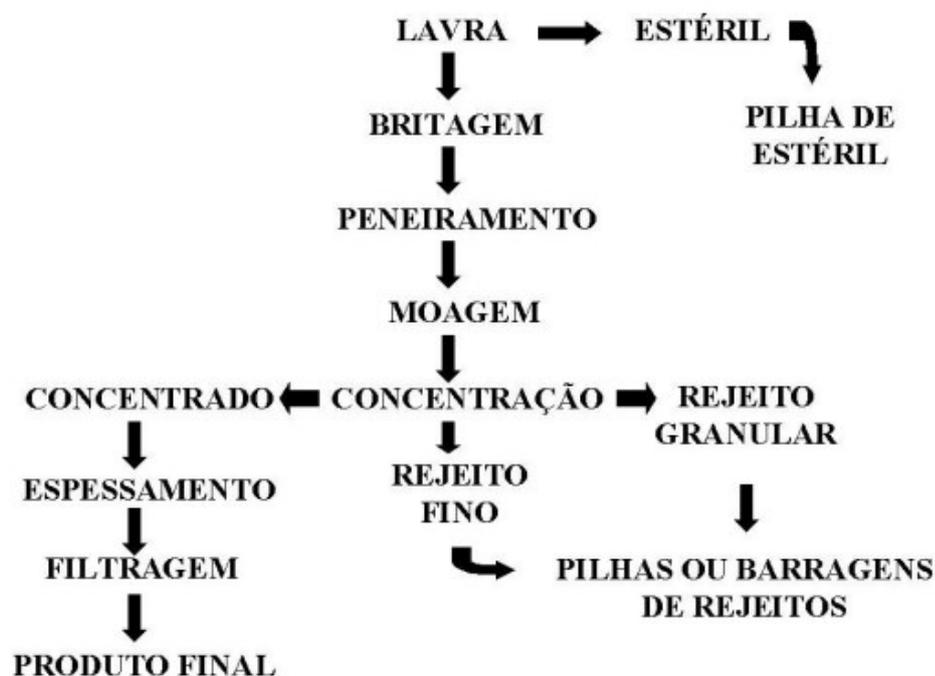
Os métodos de processamento produzem rejeitos com características granulométricas diferentes do material original. Não só a mineralogia da rocha afeta essas características, mas também o método de extração empregado e os tratamentos químicos utilizados durante o beneficiamento (Britto, 2015). Durante o processo de beneficiamento, utiliza-se uma grande quantidade de água para limpar e eliminar as impurezas do minério. O resultado desse procedimento é apresentado na forma de lama. A partir desta lama, separam-se os produtos de valor comercial dos economicamente inúteis (rejeitos), isso é realizado por meio de processos físicos e químicos (Milonas, 2006).

Segundo Luz, Sampaio e França (2010), os métodos mais comuns de beneficiamento do minério de ferro podem ser resumidos em uma série de processos interligados e cruciais para assegurar a eficácia na extração dos minerais. Estes procedimentos englobam:

1. Cominuição: Consiste na fragmentação e moagem do minério para diminuir o tamanho das partículas, simplificando as fases seguintes de processamento.
2. Classificação e Separação por Tamanho: Esta fase é executada através de peneiramento e cicloneamento, além da classificação em espirais, com a finalidade de classificar as partículas de acordo com sua granulometria.

3. **Concentração:** Inclui métodos de separação que se fundamentam nas características físicas ou químicas do material, tais como a concentração gravítica, magnética, eletrostática e os processos de flotação. Cada procedimento é selecionado com base na natureza dos minerais que serão concentrados.
4. **Distribuição de Resíduos:** Diz respeito à gestão apropriada dos detritos produzidos durante o processo de beneficiamento, assegurando o descarte seguro e sustentável desses materiais.

Figura 1 - Beneficiamento do minério.



Fonte: Adaptada de Oliveira et al., 2021

Conforme a técnica de beneficiamento empregada, as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos rejeitos podem sofrer alterações consideráveis (Portes, 2013). A seleção de métodos de beneficiamento, tais como flotação, separação magnética ou gravítica, é baseada na avaliação custo-benefício, levando em conta o impacto no meio ambiente e as demandas de pureza dos materiais no mercado.

Embora o processamento de minérios seja marcado por uma aplicação técnica meticulosa, não se pode desconsiderar as consequências econômicas associadas a ele. Nas operações diárias, a distinção completa e perfeita entre os minerais

desejados e não desejados é, na realidade, inalcançável. Em geral, nota-se uma correlação inversa entre a concentração obtida e a taxa de recuperação: à medida que a pureza dos concentrados aumenta, as perdas de minério útil também se elevam (Cetem, 2010).

Os rejeitos da mineração têm uma granulometria variada, que é afetada pela mineralogia da rocha, pelo tipo de frente de extração e pelo processo de beneficiamento do mineral. Conforme Pinto (2006), solos de mesma origem geológica geralmente compartilham algumas características, contudo, frequentemente exibem uma variação considerável na distribuição granulométrica. Os rejeitos podem apresentar características bastante variadas, variando tanto de acordo com a mineralogia do minério quanto com os processos físicos e químicos, empregados em sua extração e processamento.

É crucial levar em conta que os rejeitos produzidos em operações de mineração são materiais antrópicos que não se enquadram nas categorizações tradicionais de solos que se formaram naturalmente. Isso implica que esses materiais exibam comportamentos diferentes dos esperados para solos, tais como resistência, permeabilidade e compressibilidade, e frequentemente não aderem às normas que orientam os solos naturais (Carvalho, 2018; Fracaro, 2022).

Conforme Wolff (2009), os minerais comumente encontrados nos rejeitos da mineração de ferro incluem caulinita, gibbsita, goethita, hematita, magnetita e quartzo. De acordo com Espósito (2000), a classificação dos rejeitos pode ser feita com base na sua granulometria: os rejeitos finos, conhecidos como lama, são compostos por partículas menores que 0,0754 mm, enquanto os rejeitos granulares apresentam grãos maiores que essa medida. O comportamento geotécnico dos rejeitos é diretamente afetado pela granulometria. Os rejeitos finos, costumam ser mais propensos à liquefação e representam desafios para a drenagem e a estabilidade das barragens. Por outro lado, os resíduos granulares têm maior capacidade de permeabilidade e podem oferecer maior estabilidade estrutural se forem devidamente compactados. Ademais, aspectos físico-químicos, como o pH e a existência de minerais reativos, influenciam a relação dos rejeitos com o meio ambiente e os processos de consolidação.

Existem duas maneiras principais de descartar os rejeitos. A Figura 2 apresenta o primeiro cenário, no qual os rejeitos são transportados em estado bruto, através de caminhões ou correias transportadoras até o local de descarte. No segundo, os

rejeitos são liberados como polpa, uma combinação de sólidos e água, sendo transportados por meio de tubulações, empregando sistemas de bombeamento ou aproveitando a força da gravidade.

Figura 2 - Descarte do rejeito de ferro



Fonte: LAMINATOS, 2016.

A decisão sobre a disposição dos rejeitos está intrinsecamente relacionada às suas características geotécnicas. Conforme Figueiredo (2007), a maneira como os rejeitos são dispostos depende do tipo de minério e do processo empregado no seu beneficiamento. Uma das formas mais utilizadas de disposição dos rejeitos é através de barragens de alteamento, tanto por questões econômicas, quanto pela simplicidade do processo (IBRAM, 2016). Esta metodologia será discutida no item a seguir.

2.3. MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DO REJEITO

Atualmente, o método mais comum de armazenar rejeitos é por meio de barragens de contenção, que podem ser construídas com solos, estéreis ou até mesmo com o próprio rejeito. A sua popularidade é justificada pela sua facilidade de implementação e custo reduzido. No entanto, existem diversas alternativas viáveis

para o descarte de rejeitos, segundo o IBRAM (2016), essas opções incluem o uso de minas subterrâneas e túneis abandonados, onde os rejeitos são dispostos em espaços previamente esgotados; o armazenamento em pilhas, método simples para materiais com baixa umidade; o empilhamento a seco, que consiste na desidratação dos rejeitos para formar pilhas compactas e estáveis; a filtração, que remove grande parte da água dos rejeitos, facilitando sua compactação; e a disposição em pasta, que envolve o armazenamento de rejeitos espessados com baixo teor de água. Além disso, há a possibilidade da construção de novas barragens de contenção. Cada solução apresenta vantagens e limitações técnicas, econômicas e ambientais, mas sua implementação é essencial para garantir a segurança e a sustentabilidade na gestão de rejeitos.

Apesar de a disposição de rejeitos através de barragens de contenção ser uma alternativa economicamente benéfica, a técnica de construção e as características dos rejeitos podem resultar em riscos ambientais ligados a esses reservatórios (Nierwinski, 2019). A seleção do método de disposição precisa ser meticulosamente analisada, considerando aspectos como o tipo de processo de mineração, as condições geológicas e topográficas do local, as características mecânicas dos materiais em questão e o risco de contaminação ambiental dos rejeitos (Hernandez, 2002).

As barragens de contenção de rejeitos são estruturas planejadas para crescer com o tempo, possibilitando a redução dos custos durante a extração de minerais através de sucessivos aumentos de altura. Primeiramente, é construído um dique inicial e, durante a vida útil da barragem, ela sofre elevações progressivas. Essas subidas podem ser realizadas usando material compactado de áreas de empréstimo ou com o próprio rejeito, empregando um dos três métodos construtivos disponíveis: método à montante, método à jusante ou método de linha de centro.

De acordo com IBRAM (2016), as técnicas de alteamento à montante e de linha central são economicamente benéficas, uma vez que possibilitam uma diminuição nos gastos iniciais de implementação e distribuem os custos de construção e operação ao longo do tempo. No entanto, a principal fonte de instabilidade nesses métodos é a água presente nos poros dos rejeitos e no reservatório. Nos itens a seguir serão discutidos aspectos relacionados à cada uma das metodologias de alteamento de barragens de rejeito de mineração.

2.3.1. Método de alteamento a montante

O processo de alteamento à montante começa com a construção de um dique inicial, normalmente composto por camadas compactadas de argila ou enrocamento. É o método mais frequente e de custo inicial mais baixo, especialmente em áreas com baixo risco de atividade sísmica. A barragem é elevada a partir da crista deste dique, com o despejo dos rejeitos para a parte interna da mesma. Esta técnica é frequentemente empregada por sua eficácia na execução e facilidade de operação, sendo viável até mesmo em terrenos acidentados, apenas restringida pela área disponível para deposição (Lozano, 2006).

Após a construção do dique inicial e alcançar sua cota de crista, começa o processo de elevação. Nesta etapa, um novo dique é erguido sobre a superfície do estágio anterior, normalmente usando os próprios resíduos como material de construção, tornando-se assim a fundação para futuras elevações. Este procedimento de elevação é realizado repetidamente até atingir a altura final estipulada no projeto (Nierwinski, 2019). A Figura 3, mostra um esquema representando uma barragem construída pelo método de alteamento à montante.

Figura 3 - Método de disposição à montante



Fonte: IBRAM, 2016.

De acordo com Martin e McRoberts (2002), na maioria das situações, a parte mais fina dos rejeitos, separada de maneira hidráulica, é empregada na criação das denominadas praias de rejeito, situadas próximas à barragem. Contudo, a parte mais fina tende a se acumular nas lagoas de resíduos. A segregação natural acontece devido às características dos rejeitos, onde o material mais denso costuma se

acumular perto dos locais de descarga, enquanto as partículas mais finas tendem a se mover para regiões mais internas da instalação. Contudo, esse comportamento de segregação é menos comum em rejeitos de maior espessura, que garantem uma formação de praias de rejeito mais uniforme (Souza, 2018).

Conforme CETEM (2010), a disposição dos rejeitos deve ser feita no perímetro do lago, a montante do dique inicial e dos alteamentos subsequentes, prevenindo o acúmulo de água perto da crista através de um planejamento adequado de disposição e supervisão da tubulação de despejo. É fundamental a existência de uma parte arenosa nos rejeitos para facilitar a drenagem, e a concentração de sólidos deve possibilitar a correta separação do material. O reservatório precisa manter o nível de água afastado da crista, com sistemas de drenagem eficientes. É necessário ajustar a altura das barragens e a velocidade de alteamento de acordo com as propriedades dos rejeitos, já que a segurança está atrelada à resistência dos rejeitos e à dissipação das pressões neutras ao longo do tempo.

O método de alteamento à montante para a disposição de rejeitos, apesar de amplamente utilizado no passado devido à sua simplicidade e baixo custo, apresenta riscos significativos. Estudos realizados por Davies e Martin (2000) e Martin e McRoberts (2002) demonstram que este método está associado ao maior número de falhas em barragens de rejeitos no mundo, principalmente devido à sua menor estabilidade estrutural quando comparado a outros métodos.

No Brasil, a Resolução nº 13 de 2020 da Agência Nacional de Mineração (ANM) proibiu a construção de barragens pelo método de alteamento à montante. Essa regulamentação foi uma resposta direta aos desastres catastróficos ocorridos em Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, que causaram enormes prejuízos sociais, ambientais e econômicos. A adoção dessa proibição reflete um avanço significativo nas práticas de segurança e gerenciamento de barragens no país. A nova normativa prioriza métodos construtivos mais seguros, como os alteamentos à jusante e linha de centro, que oferecem maior resistência a rupturas e são mais eficazes na mitigação de riscos associados à disposição de rejeitos.

2.3.2. Método de alteamento à jusante

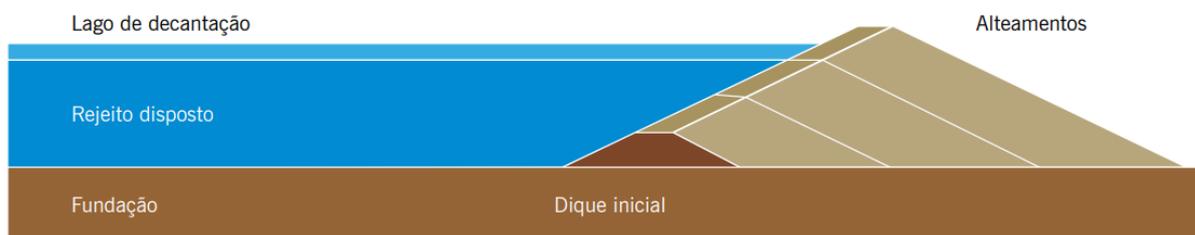
O processo de alteamento à jusante foi criado como uma opção para reduzir os riscos ligados ao método de alteamento à montante. Este procedimento cumpre

requisitos de projeto similares aos utilizados em barragens tradicionais de armazenamento de água, proporcionando maior estabilidade estrutural à medida que o dique se expande na direção contrária ao reservatório. No método de jusante, a etapa inicial consiste em um dique de partida, que é geralmente construído com solo ou enrocamento compactado, um ou mais alteamentos subsequentes feitos a jusante do dique de partida. O dique de partida deve ser projetado com sistemas de drenagem interna, sendo talvez mais importantes os filtros verticais e os tapetes drenantes para permitir a remoção eficiente da água.

Além disso, é fundamental que o talude à montante seja impermeabilizado, o que pode ser feito por meio da compactação de argila ou pela utilização de mantas plásticas específicas para garantir a impermeabilidade. Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida (Duarte, 2008). A Figura 4, ilustra o funcionamento do processo de alteamento à jusante. Os diques de alteamento podem ser erguidos com material emprestado ou com o próprio rejeito, contanto que exista uma quantidade adequada e uma separação granulométrica apropriada.

Conforme Klohn (1981), a técnica de alteamento a jusante requer um controle estrito na liberação e compactação dos materiais. Ao contrário de outras técnicas, nenhuma fase do alteamento ocorre sobre rejeitos já depositados. Os sistemas de drenagem interna podem ser implementados durante a edificação e ampliados ao longo dos sucessivos alteamentos, regulando a linha de saturação interna da barragem e garantindo maior estabilidade à estrutura. Os passos do método a jusante levam ao deslocamento gradual da linha central do topo da barragem em direção à margem inferior (Vick, 1983).

Figura 4 - Método de disposição à jusante



Fonte: IBRAM, 2016.

Com a devida organização, é possível projetar e construir uma barragem capaz de resistir a forças sísmicas, desde que as especificações do projeto incluam essa necessidade de resistência. Segundo Souza (2018), o método de alteamento à jusante apresenta como principal benefício a capacidade de projetar barragens com alturas variáveis, já que cada fase de alteamento é estruturalmente independente dos rejeitos. Dentre os benefícios, destacam-se: a facilidade de operação; a adequação para ambientes com vibrações e alta sismicidade, já que a compactação dos rejeitos do "*underflow*" diminui a propensão à liquefação; a possibilidade de compactar toda a estrutura da barragem; maior segurança devido ao controle em cada fase de elevação; e a redução do risco de "*piping*" e rupturas horizontais (Lozano, 2006).

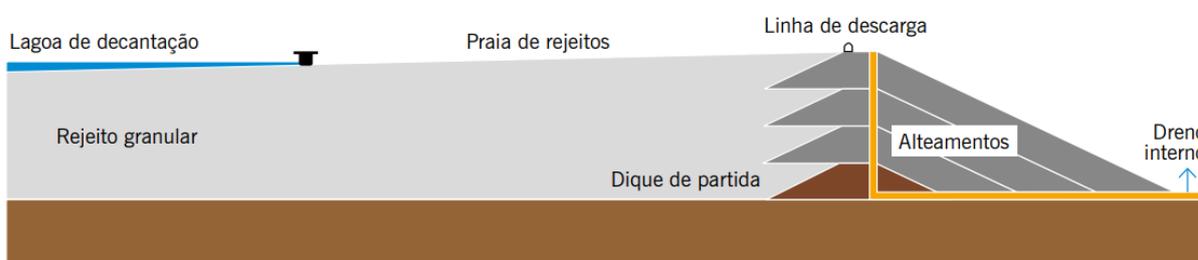
Este processo de alteamento requer grandes volumes de material para a edificação dos diques e requer amplos espaços para a fundação das estruturas. A principal desvantagem é o elevado custo do alteamento, dado que a quantidade de material requerida cresce exponencialmente a cada nova fase, aumentando, assim, a demanda por espaço ao redor da barragem (Vick, 1990). Apesar do método possibilitar a criação de estruturas de diversas alturas, a altura final da estrutura é restringida pela área disponível ao seu redor.

2.3.3. Método de linha de centro

O procedimento de alteamento por linha de centro une atributos dos métodos de montante e jusante. Ele proporciona uma estabilidade superior à do método de montante, ao mesmo tempo que demanda menos materiais para a construção em

relação ao método de jusante (Souza, 2018). O processo de alteamento por linha de centro pode ser mostrado a partir da Figura 5, onde a edificação inicia-se com um dique inicial, também chamado de dique de partida, onde os detritos são despejados periféricamente a jusante, formando uma região conhecida como praia. Os subsequentes alteamentos são realizados despejando os rejeitos na praia já formada e ao longo do talude de jusante do dique inicial (Cetem, 2010).

Figura 5 - Método de disposição de linha de centro



Fonte: IBRAM, 2016.

De acordo com Engels (2004) as barragens erguidas através do método de linha de centro não são apropriadas para grandes volumes de armazenamento de água, uma vez que os diques de alteamento são parcialmente construídos sobre rejeitos já depositados e ainda não consolidados. A resistência adequada a eventos sísmicos é demonstrada pelas barragens construídas pelo método da linha de centro, desde que os diques sejam compactados de forma eficaz e que o sistema de drenagem seja planejado e instalado adequadamente (Nierwinski, 2019).

Já Troncoso (1997) destaca inconvenientes deste método, como o perigo de perda de confinamento na parte superior do talude, particularmente em situações de inclinações elevadas a montante. Além disso, os desafios técnicos na realização e o grande volume de material requerido para os alteamentos podem aumentar os gastos ligados a essa opção. De acordo com IBRAM (2016), a geotecnia das barragens construídas pelo método de linha de centro se assemelha à das barragens construídas pelo método de jusante, particularmente no que se refere à estabilidade estrutural e ao gerenciamento da drenagem.

2.4. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

2.4.1. Conceitos gerais

A capacidade dos solos de suportar cargas e manter sua estabilidade está intrinsecamente relacionada à sua resistência ao cisalhamento. Quando essa resistência é excedida, toda massa de solo entra em colapso (Caputo, 1988). Segundo Lambe (1969), o movimento das partículas tem um papel fundamental nas deformações que acontecem dentro de um corpo de solo. Portanto, o atrito nos pontos de contato entre as partículas tem um impacto significativo na resistência do solo à deformação, apesar de ser apenas um dos mecanismos que contribuem para a resistência ao cisalhamento do solo. O principal fator que contribui para a resistência dos solos ao cisalhamento é o atrito entre as partículas, que é simbolizado pelo conhecido ângulo de atrito (φ), além da contribuição do atrito, possuem uma parte de resistência proveniente da coesão (c). (Terzaghi e Peck, 1948).

A coesão do solo diz respeito às forças que unem as partículas do solo, podendo ser classificada em coesão real e coesão aparente. A coesão efetiva surge de elementos cimentantes, tais como óxidos e minerais silicatados, que favorecem a união entre as partículas (Mullins et al., 1990). Em contrapartida, a coesão aparente é devida à tensão superficial da água que se encontra nos poros de solos com saturação parcial. Esta tensão origina meniscos que exercem uma força de sucção, aproximando as partículas e elevando a resistência ao cisalhamento em solos parcialmente saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Já o ângulo de atrito interno (φ) é um indicador crucial que demonstra as características de fricção entre as partículas do solo. Este ângulo representa a máxima força de cisalhamento que pode ser aplicada em relação à força normal, aplicada em um plano de ruptura, antes que ocorra o deslizamento ou cisalhamento das partículas. No âmbito geotécnico, refere-se à habilidade do solo em suportar tensões cisalhantes sem apresentar falhas.

A magnitude do ângulo de atrito interno é afetada por várias propriedades inerentes do solo, como o nível de compactação, bem como o tamanho, formato e ângulo dos grãos de areia (Pinto, 2000). Solos mais compactos, com partículas angulares e de maior resistência, tendem a apresentar valores superiores de φ . Já

solos com maior teor de argila plástica podem ter um ângulo de atrito reduzido devido ao efeito coesivo entre suas partículas.

Segundo Caputo (1988), a equação de Coulomb para a resistência ao cisalhamento de solos estabelece os limites da envoltória de resistência ao cisalhamento do material, conforme ilustrado na Equação 1. A equação engloba dois elementos essenciais: o intervalo de coesão " c " e o ângulo de atrito interno " φ ". Conforme indicado por Braida *et al.* (2007), esses parâmetros são inerentes ao solo e são afetados por suas características, tais como textura, densidade, estrutura, mineralogia, concentração de matéria orgânica e quantidade de água.

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\varphi \quad (1)$$

Rocha *et al.* (2002), ressalta que a equação de Coulomb define os limites da linha de resistência ao cisalhamento, estabelecendo assim as tensões máximas que o solo pode suportar sem se romper. Qualquer esforço que exceda essa linha resultará na ruptura do solo, prejudicando sua estabilidade.

2.4.2. Parâmetro de resistência ao cisalhamento de rejeitos de mineração

Em relação aos rejeitos de mineração, mesmo quando depositados com uma alta porcentagem de vazios, costumam exibir elevadas resistências ao cisalhamento. Isso acontece, principalmente, por causa da alta angularidade das suas partículas (Nierwinski, 2019).

A resistência ao cisalhamento, é um parâmetro geotécnico importante, que pode ser usado para avaliar o nível de compactação de um solo (Ayers & Perumpral, 1982; Schjonning, 1991). Em geral, solos mais compactados tendem a ter maior resistência ao cisalhamento, pois a menor distância entre suas partículas leva a uma diminuição do índice de vazios (Azevedo, 1999). Esta compactação intensifica o contato entre as partículas, exigindo um esforço maior para a quebra de suas estruturas.

Embora o comportamento dos rejeitos de mineração seja frequentemente comparado ao dos solos, existem diferenças significativas, como uma resistência ao cisalhamento reduzida em condições específicas (Fracaro, 2022). Esta propriedade

faz com que os rejeitos se tornem líquidos quando expostos a influências externas, como vibrações geradas pela movimentação de máquinas, explosões no setor de mineração ou até mesmo eventos sísmicos (Carvalho, 2018).

De acordo com essas informações, diversos ensaios experimentais foram relatados na literatura visando caracterizar o comportamento mecânico desses materiais. Mendes (2007) conduziu um estudo completo acerca das características geotécnicas dos principais tipos de rejeitos produzidos no Brasil. Esta pesquisa compila informações cruciais, tais como o coeficiente de adensamento, o índice de vazios e a densidade dos grãos, fundamentais para a concepção de estruturas seguras e a compreensão do comportamento mecânico dos rejeitos. Essas variáveis estão dispostas no Quadro 1.

Quadro 1 - Tipos de rejeitos e suas propriedades geotécnicas.

Tipo de rejeito	Material	Densidade dos grãos (g/cm ³)	Cv (cm ² /s)	Índice de vazios (e)
Ferro	areia siltosa e silte argiloso	3,5 a 5,25	10 ⁻² a 10 ⁻³	0,61 a 1,35
Cobre	silte argiloso e areias (>45%)	2,6 a 2,8	3.10 ⁻¹ a 10 ⁻³	0,6 a 0,8 (areias) e 0,9 a 1,4
Bauxita	silte argiloso e areias (30%)	2,6 a 2,7	10 ⁻³ a 5,10 ⁻²	8 (lamas)
Gesso (sulfato de cálcio hidratado)	silte	2,36 a 2,39	2.10 ⁻⁴	0,7 a 1,5

Fonte: Adaptado de BRITTO, 2015.

Devido à sua origem antrópica e variabilidade inerente, os rejeitos de mineração são extensivamente analisados por especialistas, gerando análises variadas devido às suas características heterogêneas. Estes materiais, muitas vezes subprodutos do processamento mineral, exibem propriedades que mudam consideravelmente de acordo com o tipo de minério e o método de tratamento ao qual foram submetidos.

Segundo Schnaid, Lehane e Fahey (2004), Dienstmann et al. (2018) e De Jong e Randolph (2012), afirmam que os rejeitos de mineração são materiais siltosos e apresentam uma permeabilidade intermediária ($10^{-5} \text{ m/s} < k < 10^{-8} \text{ m/s}$). Esta permeabilidade intermediária exerce uma influência direta sobre o comportamento

durante ensaios de campo, especialmente nos testes de penetração com cone (CPT). Em condições padrão de penetração, com uma velocidade de avanço de 20 mm/s, pode ocorrer drenagem parcial do solo, o que pode comprometer a precisão dos dados coletados, levando a uma interpretação equivocada dos parâmetros geotécnicos.

Pesquisas realizadas por diferentes autores demonstram a ampla variação de propriedades geotécnicas dos rejeitos, o que se deve à sua composição mineralógica e ao tipo de processo de beneficiamento ao qual foram submetidos. Por exemplo, Qiu e Segó (2001) conduziram uma série de ensaios triaxiais não drenados com consolidação (CU) em quatro tipos de rejeitos, incluindo rejeitos de chumbo, ouro, carvão puro e rejeitos consolidados. Os resultados indicaram uma coesão variando entre 0 kPa e 10 kPa e ângulos de atrito interno entre 30° e 34°. Esses valores são indicativos de um comportamento predominantemente friccional, com baixa contribuição coesiva, o que é típico de materiais granulares.

Por outro lado, Hu *et al.* (2017) apresentaram um estudo mais detalhado sobre rejeitos de diferentes minerais, avaliando suas propriedades por meio de ensaios triaxiais CU (consolidados e não drenados) e CD (consolidados e drenados). Para os rejeitos de ferro da mina de Yuhezhai (designados como Tipo A) e rejeitos de cobre da mina de Bahuerachi (designados como Tipo B), os ensaios revelaram diferenças significativas em suas características de resistência. Os rejeitos de ferro (A) foram testados tanto em condições CU quanto CD, enquanto os rejeitos de cobre (B) foram avaliados apenas em condições CU. O estudo identificou que os rejeitos granulares (G) apresentaram maior ângulo de atrito em comparação com os rejeitos finos (F), refletindo a influência da granulometria na resistência ao cisalhamento. O resultado dos ensaios se encontra na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Valores de ângulo de atrito e coesão obtidos através de ensaios CD e CU em minério de ferro e CU em minério de cobre, na China.

Tipos	Tipo	CU				CD	
		ϕ_{cu} (°)	C_{cu} (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ_{cd} (°)	C_{cd} (kPa)
A	G	25,0	194,0	41,0	8,8	40,0	30,1
	F	16,0	13,8	32,0	7,4	35,0	28,5
B	G	38,0	71,0	40,0	32,0	-	-
	F	31,0	0,0	38,0	0,0	-	-

Fonte: Adaptado de Hu *et al.*, 2017.

Adicionalmente, vários estudiosos têm analisado os parâmetros de resistência dos rejeitos de minério de ferro no Brasil. Morgenstern *et al.* (2016) conduziram um estudo minucioso das propriedades geotécnicas dos rejeitos da Barragem do Fundão, enquanto Becker, Cavalcanti e Marques realizaram pesquisas específicas sobre a resistência ao cisalhamento dos materiais existentes na Barragem de Germano. Albuquerque Filho (2004) também conduziu uma análise detalhada dos parâmetros de resistência em quatro barragens diferentes situadas no Quadrilátero Ferrífero, uma das principais áreas de mineração do país. Os resultados obtidos pelos autores citados, está composto no Quadro 2.

Quadro 2 - Variação dos valores de ângulo de atrito do rejeito de ferro.

Autor	Local	Variação ϕ' (°)
Morgenstern <i>et al.</i>	Barragem de Fundão	28 - 36
Becker, Cavalcanti e Marques	Barragem de Germano	28 - 37
Albuquerque Filho	Barragem de Córrego do Doutor	30 - 34
	Barragem de Campo Grande	32 - 45
	Barragem de Gongo Soco	26 - 32
	Barragem do Pontal	32 - 36

Fonte: Autora, 2024.

Em particular, os rejeitos da mineração de ferro exibem uma vasta variação nas características mecânicas devido ao tamanho das partículas, à sua plasticidade e à forma como foram depositados. Vários estudos foram conduzidos para caracterizar essas propriedades, empregando variados tipos de testes triaxiais para compreender o comportamento desses materiais em ambientes controlados de laboratório. O Quadro 3 sintetiza os índices de coesão e o ângulo de atrito identificados na literatura para rejeitos de mineração de ferro, com base em testes triaxiais CU (consolidado não drenado), CD (consolidado drenado) e UU (não consolidado não drenado). Os achados evidenciam o impacto da granulometria e da plasticidade nos indicadores de resistência ao cisalhamento.

Quadro 3 - Índices de coesão e ângulo de atrito para rejeitos de mineração de ferro.

Fonte	Tipo de Ensaio	Tipo de Rejeito	Coesão (c)	Ângulo de Atrito (ϕ')
Gonçalves et al. (2019)	Triaxial CU	Finos	2 - 10 kPa	25° - 30°
Oliveira e Ramos (2016)	Triaxial CD	Granulares	0 - 5 kPa	32° - 36°
Hu et al. (2017)	Triaxial CU/CD	Granulares e Finos	0 - 12 kPa	30° - 34°
Biazon (2018)	Triaxial CU	Alta Plasticidade	5 - 15 kPa	20° - 28°
Rezende et al. (2015)	Triaxial UU	Lama de Rejeito	10 - 18 kPa	15° - 22°

Fonte: Autora, 2024.

Com as informações fornecidas pode-se notar que os rejeitos com maior concentração de finos, conforme observado por Gonçalves et al. (2019), tendem a ter uma coesão aparente um pouco mais forte em relação aos predominantemente granulares analisados por Oliveira e Ramos (2016). Estes apresentam uma resistência ao cisalhamento mais elevada devido ao alto ângulo de atrito (ϕ), que pode atingir até 36°.

Por outro lado, Hu et al. (2017) identificaram que os rejeitos granulares e finos apresentam uma variabilidade no comportamento mecânico, com coesão de até 12 kPa e ângulos de atrito variando de 30° a 34°. Isso sugere que a mistura de granulometria dos rejeitos tem um impacto significativo nos parâmetros de resistência. No caso de materiais de alta plasticidade, como os estudados por Biazon (2018), a coesão pode atingir até 15 kPa, contudo com um ângulo de atrito reduzido, indicando um comportamento mais dependente da coesão. Rezende et al. (2015) notaram que a lama de rejeito possui elevada coesão, particularmente em condições sem drenagem, apresentando valores que oscilam entre 10 e 18 kPa.

2.4.3. Parâmetros de resistência estimados através de ensaios de campo

É crucial entender profundamente as propriedades e o comportamento geotécnico dos materiais resultantes das atividades de mineração. É fundamental ter um entendimento aprofundado dessas características para evitar desastres em

estruturas de contenção de rejeito. Conforme mencionado anteriormente, as propriedades granulométricas dos rejeitos minerais são diretamente afetadas pelo tipo de minério bruto extraído e pelo método industrial de beneficiamento empregado. Assim, esses materiais têm a capacidade de ter uma vasta gama de composições, variando desde solos arenosos e não plásticos até materiais de granulometria ultrafina (Ribeiro e Albuquerque Filho, 2004).

Diversas correlações semi-empíricas foram desenvolvidas para estimar parâmetros geotécnicos a partir do Cone Penetration Test (CPT) em uma ampla variedade de solos. A confiabilidade e a aplicabilidade dessas correlações podem variar consideravelmente. Além disso, os diferentes sensores utilizados no CPT, como a medição de pressão de poros (CPTu) e o teste sísmico (SCPT), permitem a estimativa dos parâmetros do solo com níveis de precisão distintos.

A avaliação da resistência ao cisalhamento de solos granulares usando dados CPT é basicamente uma avaliação direta do ângulo de atrito interno de pico (φ) e uma avaliação indireta da densidade dos depósitos arenosos. Normalmente, tal análise é realizada relacionando os dados do teste à densidade relativa ou diretamente à resistência de ponta (q_c) medida no teste. Essas relações são muito importantes para interpretar o que o teste está medindo em termos de densidade e, portanto, resistência ao cisalhamento, de solos granulares e têm sido amplamente utilizadas para fins de projeto e análise geotécnica.

A correlação proposta por Robertson e Campanella (1983), mostrada na equação 2, estima o ângulo de atrito de pico (φ') para areias ricas em quartzo em um estado não cimentado e não envelhecido com compressibilidade moderada quando executada em testes de câmara de calibração. Ainda pode não ser aplicável no caso de areias de alta compressibilidade, como areias carbonáticas ou alto teor de mica, porque estas são muito moles para que este método forneça qualquer coisa além de ângulos de atrito mais baixos.

$$\tan\varphi' = \frac{1}{2.68} \left[\log \frac{q_c}{\sigma'_{vo}} + 0,29 \right] \quad (2)$$

Kulhawy e Mayne (1990) sugeriram uma relação alternativa para areias de quartzo perfeitamente limpas, arredondadas e não cimentadas. Eles analisaram essa correlação com base em dados de campo de alta qualidade, com o objetivo de

aprimorar a exatidão na previsão dos parâmetros de resistência dessas areias. A estratégia deles visa oferecer uma opção mais sólida em relação a métodos que se baseiam em correlações mais amplas, particularmente em situações onde as propriedades das areias são claramente estabelecidas e controladas.

$$\varphi' = 17,6 + 11 \log(Q_{tn}) \quad (3)$$

Para o cálculo do parâmetro Q_{tn} foi utilizada a equação 3.1, que relaciona as variáveis relevantes ao contexto do estudo.

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_v}{p_a} \right) * \left(\frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^n \quad (3.1)$$

Onde o parâmetro p_a representa a pressão atmosférica, enquanto n é um coeficiente associado ao modelo matemático do solo. De acordo com Nierwinski (2019), o valor $n=0,5$ é recomendado, seguindo a proposta de Zhang, Robertson e Brachman (2002). Esse valor é amplamente utilizado para a análise de solos granulares devido à sua adequação em descrever as propriedades de resistência desses materiais.

Já Meyerhof (1976) propôs a seguinte correlação para a determinação do coeficiente de correlação do ângulo interno de atrito. Onde a resistência de ponta deve ser expressa em MPa.

$$\varphi' = 29^\circ + 2,5 \sqrt{q_c} \quad (4)$$

Conforme Meyerhof (1976), em solos arenosos com grande quantidade de pedregulhos, o ângulo de atrito interno indicado na expressão deve ser aumentado em 5 graus. Para depósitos de silte-arenito, sugere-se uma diminuição de 5 graus.

Por outro lado, a determinação da coesão pode ser realizada por meio de diversas metodologias que abrangem desde ensaios laboratoriais detalhados até correlações empíricas baseadas nas características físicas dos materiais. Dentre os ensaios laboratoriais, destacam-se os ensaios triaxiais do tipo CU (consolidado não drenado), CD (consolidado drenado) e UU (não consolidado não drenado), amplamente utilizados para avaliar a resistência ao cisalhamento de rejeitos (HU *et al.*, 2017). Esses ensaios permitem a obtenção direta de parâmetros como coesão (c)

e ângulo de atrito (ϕ), que são essenciais para o dimensionamento e análise de estabilidade de estruturas geotécnicas.

Além dos ensaios triaxiais, também é comum a utilização de correlações empíricas baseadas em índices de plasticidade (IP) para estimar a coesão, especialmente em rejeitos que apresentam uma significativa fração de partículas finas (ROBERTSON; CABAL, 2015). Métodos gráficos, como os ábacos propostos por Taylor (1948) e Terzaghi (1967), são amplamente aplicados para estimar a coesão a partir de propriedades físicas dos materiais, como densidade seca e teor de umidade. Esses ábacos são ferramentas valiosas em análises preliminares, proporcionando uma estimativa rápida dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Outra abordagem eficiente é o uso de ensaios de penetração de campo, como o Cone Penetration Test (CPT) e o Cone Penetration Test com medição de poropressão (CPTu). Esses ensaios são particularmente úteis para rejeitos parcialmente saturados, permitindo correlações entre a resistência à penetração e os parâmetros de coesão (Lunne; Robertson; Powell, 1997). O ensaio CPTu, mede três parâmetros principais durante sua execução, a resistência de ponta (q_c), a resistência lateral (f_s) e a poropressão (u). Com base nesses parâmetros, é possível aplicar correlações empíricas para estimar a coesão. De acordo com Robertson e Cabal (2015), uma das fórmulas amplamente utilizadas está descrita a seguir.

$$c = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v) \quad (5)$$

onde,

$$q_t = q_c + u_2 (1 - a_r) \quad (5.1)$$

Com u_2 representando a poropressão medida logo atrás da ponta do cone, a_r sendo a relação de área do cone (normalmente 0,8), e σ_v a tensão vertical total. O fator α varia entre 0,2 e 0,5, dependendo da plasticidade e do teor de finos do rejeito (Robertson; Cabal, 2015).

2.4.4. Parâmetros de resistência estimados através de ensaios de laboratório

A caracterização do solo é essencial para o desenvolvimento de projetos de engenharia, pois as informações obtidas orientam na escolha de estratégias de projeto, soluções técnicas adequadas e estimativas de custo. Conforme Schnaid e Odebrecht (2012), diversos ensaios são realizados diariamente com o objetivo de compreender as propriedades do solo e avaliar sua adequação frente às demandas de obras de engenharia. Entre os parâmetros mais relevantes está a resistência ao cisalhamento, que pode ser determinada por métodos laboratoriais consagrados, como o ensaio de cisalhamento direto, compressão triaxial e compressão simples.

O ensaio de cisalhamento direto é amplamente utilizado para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos, devido à sua simplicidade, baixo custo e rapidez de execução, especialmente quando os resultados são analisados em termos de tensões totais ou resistência a curto prazo (Das, 2015).

Conforme descrito por Heidemann (2020), o ensaio consiste em forçar uma porção do solo a deslizar sobre outra, aplicando uma carga normal ao plano de cisalhamento. O corpo de prova, geralmente em estado natural ou compactado, é colocado em uma caixa bipartida metálica e rígida. Durante o ensaio, a metade inferior da caixa desliza em relação à parte superior, que permanece fixa, enquanto a força de cisalhamento é medida por uma célula de carga. Esse método permite a obtenção direta do envelope de resistência, representado pelos parâmetros de ângulo de atrito interno (φ) e coesão (c).

Apesar das vantagens, o ensaio apresenta limitações que devem ser consideradas. Uma delas é a impossibilidade de reproduzir condições tridimensionais de tensões no plano de cisalhamento, o que pode subestimar a resistência mobilizada. Além disso, segundo Holtz, Kovacs e Sheahan (2011), o equipamento pode causar perturbações adicionais no solo, especialmente em materiais menos coesivos, devido ao confinamento inadequado das bordas. Assim, os valores obtidos para materiais granulares devem ser interpretados com cautela, já que a ausência de um estado uniforme de tensão pode levar a resultados conservadores.

Para solos drenados, como areias ou siltes com baixa plasticidade, ele fornece estimativas confiáveis dos parâmetros de resistência. No entanto, quando aplicado a solos finos e saturados, o controle da taxa de cisalhamento e das condições de drenagem é crucial para evitar resultados inconsistentes (Craig, 2004).

De acordo com Das (2007), o ensaio de compressão triaxial é amplamente reconhecido como uma das abordagens mais confiáveis para determinar tanto a resistência ao cisalhamento quanto as propriedades de deformabilidade do solo. Este método permite simular condições variadas de adensamento (isotrópico ou anisotrópico), drenagem (drenada ou não drenada) e carregamento (axial ou lateral), o que proporciona resultados mais representativos do comportamento do solo em campo.

O ensaio triaxial permite que a ruptura ocorra ao longo do plano de menor resistência, replicando com maior fidelidade as condições naturais, o ensaio triaxial pode ser conduzido sob diferentes condições, sendo os principais tipos, CD (ensaio consolidado e drenado), que simula a drenagem durante o carregamento, CU (ensaio consolidado e não drenado), em que a drenagem é impedida durante o carregamento e UU (ensaio não consolidado e não drenado), que avalia amostras em estado não-adensado.

Segundo Caputo (1989), o equipamento utilizado nos ensaios triaxiais consiste em uma câmara cilíndrica transparente, preenchida com um líquido (geralmente água) que exerce uma pressão uniforme (σ_3) sobre o corpo de prova. O solo é encapsulado por uma membrana de borracha fina, protegendo-o do contato direto com o líquido, enquanto um pistão aplica uma carga axial controlada através de uma placa rígida. Esse aparato possibilita a simulação de diferentes estados de tensão no solo, contribuindo para uma análise abrangente de seu comportamento mecânico, dessa forma, os ensaios triaxiais destacam-se pela capacidade de representar condições reais de campo.

2.5. PRINCIPAIS ENSAIOS DE CAMPO PARA OBTENÇÃO DE PARAMETROS DE RESISTÊNCIA

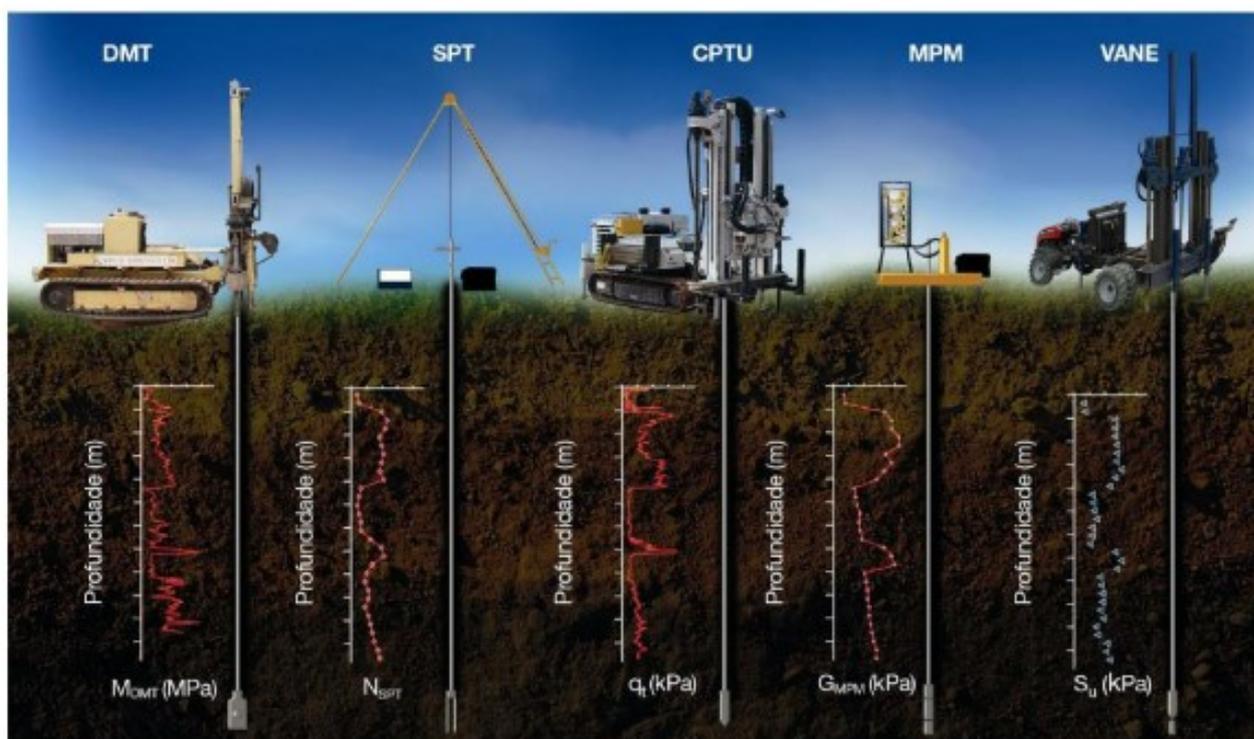
A importância de caracterizar o subsolo e determinar suas características geológicas, geotécnicas e geomorfológicas é amplamente reconhecida. Neste cenário, é crucial estabelecer a extensão apropriada para o programa de pesquisa, considerando a utilidade de cada método utilizado e os parâmetros de projeto que podem ser obtidos a partir dessas avaliações (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Os ensaios de campo são essenciais na análise de rejeitos de mineração, uma vez que fornecem informações que espelham as condições reais dos materiais no

local. Em relação aos rejeitos de mineração, esses testes são fundamentais para estabelecer parâmetros de resistência ao cisalhamento, fundamentais para a avaliação da estabilidade de pilhas de rejeitos e barragens de contenção. Os testes de campo levam em conta as condições geotécnicas naturais, tais como compactação, saturação e tensões presentes no depósito, o que auxilia na compreensão do comportamento mecânico do material (COSTA, 2023).

No Brasil, vários ensaios de campo são frequentemente realizados, sendo alguns particularmente significativos. Schnaid e Odebrecht (2012) ressaltam os ensaios de penetração mais comuns, como o *Standard Penetration Test* (SPT), bem como técnicas especiais, como o *Cone Penetration Test* (CPTu), o *Vane Test* (ensaio de palheta), além dos testes de dilatômetro e pressiométrico, apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Ensaios de campo



Fonte: Schnaid e Odebrecht, 2012.

A técnica de sondagem à percussão, também chamada de *Standard Penetration Test* (SPT), é frequentemente empregada em estudos geotécnicos por sua facilidade de aplicação e custo reduzido, sendo um dos ensaios mais utilizados globalmente para a avaliação inicial de solos (Schnaid & Odebrecht, 2012). Este

ensaio envolve a avaliação da resistência dinâmica do solo através de golpes dados em um amostrador padronizado, gerando um índice de resistência conhecido como N_{spt} . Este índice é empregado em várias correlações geotécnicas que possibilitam a previsão de parâmetros cruciais para projetos de engenharia. Além disso, possibilita a classificação tátil-visual do solo e a determinação do nível do lençol freático na região em estudo.

Uma alternativa ao método convencional é a sondagem SPT mecanizada, em que o processo é conduzido com a ajuda de um equipamento instalado em um automóvel ou em uma esteira. Esta técnica mecanizada proporciona maior produtividade e pode atingir profundidades mais elevadas, sendo particularmente benéfica em áreas de acesso complicado ou em projetos que requerem sondagens mais aprofundadas. A mecanização, além de melhorar a eficiência do processo, oferece resultados mais uniformes, diminuindo a variabilidade ligada à execução manual (Schnaid & Odebrecht, 2012).

O ensaio de palheta, também chamado de *Vane Shear Test*, é frequentemente empregado para avaliar a resistência não drenada ao cisalhamento em solos argilosos saturados, particularmente em depósitos de argilas macias (Sousa Pinto, 2023). O procedimento envolve a colocação de uma palheta cruciforme no solo, seguida pela aplicação de um torque constante até que haja o rompimento por cisalhamento. A rotação padrão da palheta é de cerca de 6° por minuto, assegurando a avaliação da resistência em situações não drenadas, de acordo com o estabelecido pela NBR 10905/1989.

Este ensaio é apreciado pela sua facilidade de operação e custo reduzido, constituindo uma opção eficaz para avaliações in loco da resistência não drenada (Sousa Pinto, 2006). Em relação aos testes em laboratório, o *Vane Shear Test* proporciona um resultado mais rápido, tornando-se assim uma técnica crucial para investigações geotécnicas iniciais. Contudo, é essencial garantir que a rotação seja rápida o suficiente para prevenir a dissipação das pressões neutras, o que poderia prejudicar a condição de não drenagem e, conseqüentemente, a exatidão dos resultados.

O ensaio de palheta, além de fornecer a resistência não drenada (S_u), também pode oferecer percepções sobre o histórico de tensões do solo e sua sensibilidade, contribuindo para a compreensão das condições geotécnicas locais e para a avaliação da estabilidade de taludes e fundações em argilas de baixa resistência (Schnaid &

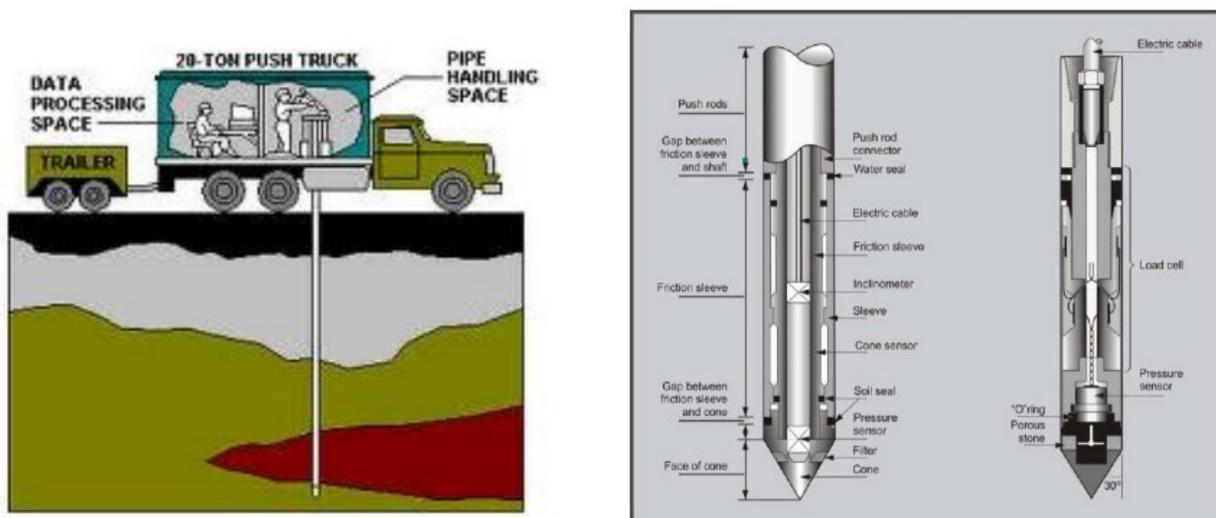
Odebrecht, 2012). Portanto, sua utilização é crucial em projetos que envolvem solos delgados e saturados, auxiliando em uma avaliação mais sólida das propriedades mecânicas do subsolo.

Os ensaios de cone e piezocone (CPT e CPTu) têm se estabelecido, a nível global, como ferramentas indispensáveis para estudos geotécnicos aprofundados. Esses testes são frequentemente empregados para a análise estratigráfica de perfis de solo, particularmente em depósitos de argilas macias, e também fornecem parâmetros cruciais para a previsão da capacidade de carga de fundações (Heidemann, 2022).

O processo de ensaio envolve a cravação contínua de uma ponteira cônica, com um ângulo de 60° , a uma velocidade constante de 2 centímetros por segundo. Há três variantes fundamentais: o cone mecânico, que transmite os esforços por meio de hastes; o cone elétrico, que possui células de carga para medições mais acuradas; e o piezocone (CPTu), que além de medir a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s), possibilita o acompanhamento constante da poropressão (u) durante o processo de cravação. O piezocone se torna particularmente valioso ao oferecer um perfil estratigráfico minucioso e confiável, reduzindo a influência do operador na obtenção dos dados (Schnaid & Odebrecht, 2012; Knappett & Craig, 2012).

Além disso, o teste CPTu pode ser reforçado com testes adicionais, tais como o teste de dissipação de poropressão e o teste sísmico de cone. O teste sísmico (SCPTu) consiste em produzir uma onda de cisalhamento sobre a superfície, que é registrada por sensores sísmicos, como geofones ou acelerômetros, posicionados na ponta da sonda em profundidade. Essa abordagem é frequentemente empregada para calcular o módulo de cisalhamento do solo, utilizando a velocidade da onda de cisalhamento. Isso proporciona informações valiosas para estudos de resposta dinâmica e comportamento sísmico de fundações e estruturas (Schnaid & Odebrecht, 2012).

Figura 7 - Esquema de execução do ensaio de cone e detalhes construtivos.



Fonte: Heidemann, 2022.

No setor de mineração, a aplicação do teste de piezocone para a caracterização de rejeitos tem crescido consideravelmente. Com base em medições como a resistência de ponta (q_c), o atrito lateral (f_s) e a poropressão (u), podemos estabelecer parâmetros cruciais como a razão de atrito e a poropressão, fundamentais para a categorização de solos (Mellia, 2017). Ademais, a correlação entre rigidez e resistência obtida pelo CPTu proporciona um entendimento detalhado das características mecânicas dos materiais, auxiliando em uma avaliação mais precisa da estabilidade de depósitos de rejeitos (Schnaid, Lehane & Fahey, 2004).

Robertson e Cabal (2015) demonstram, de forma prática, como os parâmetros obtidos pelo ensaio CPTu podem variar em função do tipo de solo investigado, oferecendo uma avaliação do grau de confiabilidade desses dados para diferentes materiais. Isso torna o piezocone uma ferramenta indispensável não apenas para a caracterização geotécnica de solos naturais, mas também para a análise detalhada de rejeitos de mineração, contribuindo para a segurança e otimização de projetos de engenharia.

3. METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar as características do material avaliado, os ensaios estudados e metodologia adotada para avaliação dos parâmetros de resistência do rejeito de mineração de ferro.

3.1. REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO E ESTRUTURAS AVALIADAS

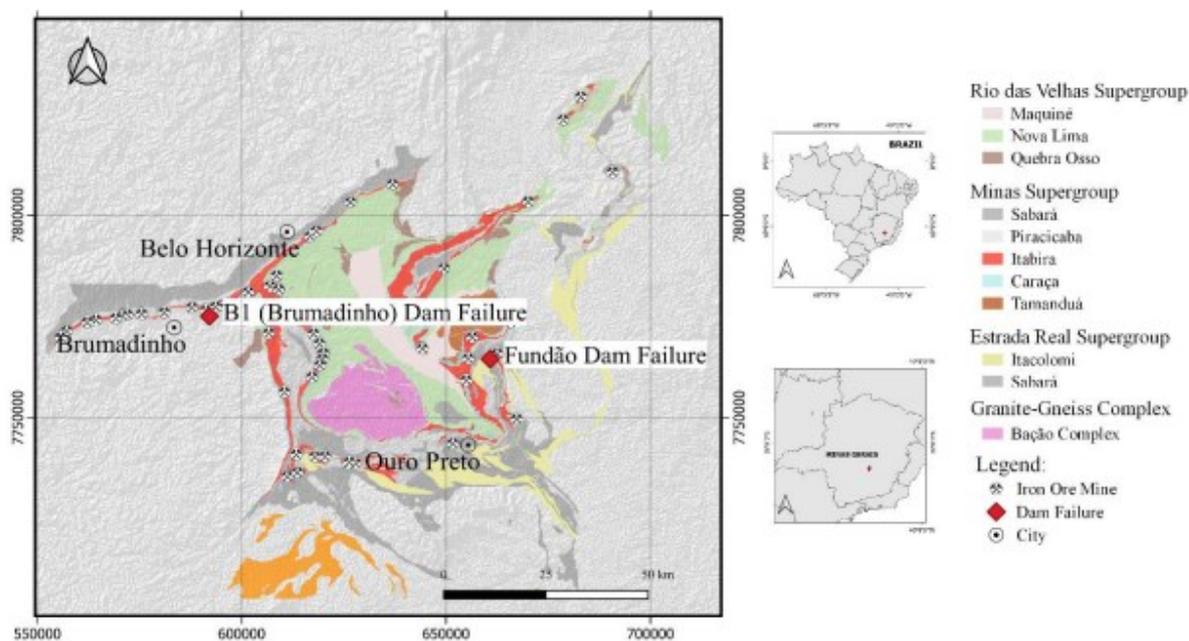
O material avaliado nesta pesquisa é um rejeito de mineração de ferro oriundo de depósitos localizados na região Nordeste do Brasil. Sua composição química é predominantemente constituída por dióxido de silício (SiO_2), além de pequenas quantidades de óxidos de ferro, hidróxidos e caulinita. Uma amostra de rejeito de ferro foi obtida e caracterizada como parte das atividades do grupo de pesquisa do Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) do Centro Tecnológico de Joinville, servindo como base para análises relacionadas às propriedades mecânicas e comportamentais do material em estudos aplicados. Este material foi utilizado para a realização dos ensaios de cisalhamento direto, realizados diretamente para esta pesquisa, cujos resultados foram confrontados com as estimativas obtidas através dos ensaios de campo (CPTu). Detalhes referentes ao ensaio de cisalhamento direto serão discutidos na sequência do trabalho.

Referente aos resultados dos ensaios de campo, o banco de dados da pesquisa foi obtido a partir do estudo de Costa (2023), que de acordo com o autor, tratam-se de ensaios realizados em rejeitos localizados em três estruturas diferentes inseridas no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, uma das regiões mais importantes do Brasil em termos de mineração. Ainda de acordo com o Costa (2023), as barragens analisadas em seu estudo estão localizadas nos grupos de Itabira e Nova Lima, ambos inseridos no contexto do Quadrilátero Ferrífero. Essas áreas são conhecidas pela intensa atividade de mineração e pela presença de importantes estruturas de armazenamento de rejeitos. A Figura 8 apresenta uma visão geral da região do Quadrilátero Ferrífero, destacando sua relevância geológica e mineralógica, além de evidenciar a localização estratégica das barragens estudadas.

Essa área é caracterizada por depósitos de minério de ferro de alta qualidade e abriga diversas barragens e depósitos de rejeitos, o que a torna um cenário

estratégico para a análise do comportamento geotécnico dos materiais provenientes do beneficiamento mineral. A escolha dessas estruturas permite uma avaliação abrangente dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos rejeitos, considerando as particularidades geológicas e operacionais da região.

Figura 8 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Cavalcanti *et al.*, 2023.

3.2. ENSAIOS DE CAMPO

No contexto de ensaios de campo, foram detalhados os procedimentos e as boas práticas de engenharia adotados para a realização dos ensaios em campo. A descrição abrange desde a preparação e execução dos testes até o processamento e validação dos resultados, assegurando que os métodos aplicados estejam em conformidade com os padrões técnicos e científicos, seguindo a norma, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos. Esses ensaios foram fundamentais para a obtenção dos dados utilizados nas análises que serão apresentadas neste trabalho. O Quadro 4, apresenta um resumo do programa de investigação realizado por Costa (2023), para o ensaio de Piezocone (CPTu), as profundidades do ensaio variaram entre 20 a 50 metros.

Quadro 4 - Resumo da campanha de investigação geotécnica para o ensaio CPTu realizada por Costa, 2023.

Estrutura	Ponto de Investigação	Metros de CPTu
Estrutura 1	CPTu - 01	9,71
	CPTu - 02	6,55
Estrutura 2	CPTu - 01	16,03
	CPTu - 06	25,65
	CPTu - 07	31,6
	CPTu - 08	29,61
	CPTu - 09	29,5
	CPTu - 13	13,2
	CPTu - 17	2925
Estrutura 3	CPTu - 01	19,68
	CPTu - 02	32
	CPTu - 03	17,45
	CPTu - 03A	39,64
	CPTu - 04	30,65
	CPTu - 05	26,98
	CPTu - 06	41,01
	CPTu - 07	34,22
	CPTu - 08	15,1
	CPTu - 08A	44,01
	CPTu - 09	41,2

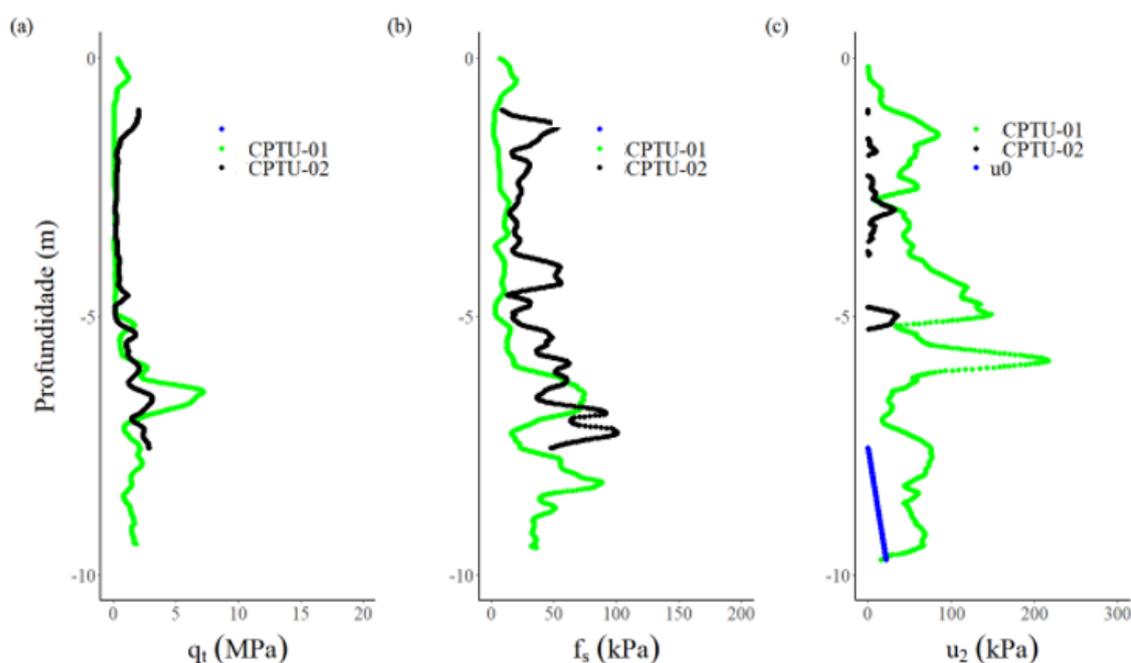
Fonte: Adaptado de Costa, 2023.

Os ensaios CPTu realizados por Costa (2023), foram conduzidos nos anos de 2021 e 2022, seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM D5778-20: *Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*. Esta norma internacional regula a execução do ensaio de penetração com cone piezométrico e fricção eletrônica, garantindo padrões de qualidade e confiabilidade dos resultados. No Brasil, a norma NBR 12069, que anteriormente tratava do ensaio de penetração de cone *in situ* (CPT) com equipamentos mecânicos, foi cancelada, deixando lacunas no tratamento normativo para métodos similares no país.

Os resultados obtidos nos ensaios de CPTu são apresentados em perfis contínuos ao longo da profundidade investigada. Esses perfis permitem a elaboração de gráficos detalhados, que facilitam a análise das variações de resistência e das

condições geotécnicas do solo. No caso das três estruturas estudadas, os dados brutos coletados (qt , fs e u_2) foram plotados em função da profundidade, conforme demonstrado nas figuras apresentadas a seguir. A Figura 9, mostra os resultados encontrados para a estrutura 1, onde foi realizado dois ensaios CPTu, onde os dois ensaios totalizaram 16,26 metros lineares de campanha investigada.

Figura 9 - Resultados registrados nos ensaios CPTu na estrutura 1.



Fonte: Costa, 2023.

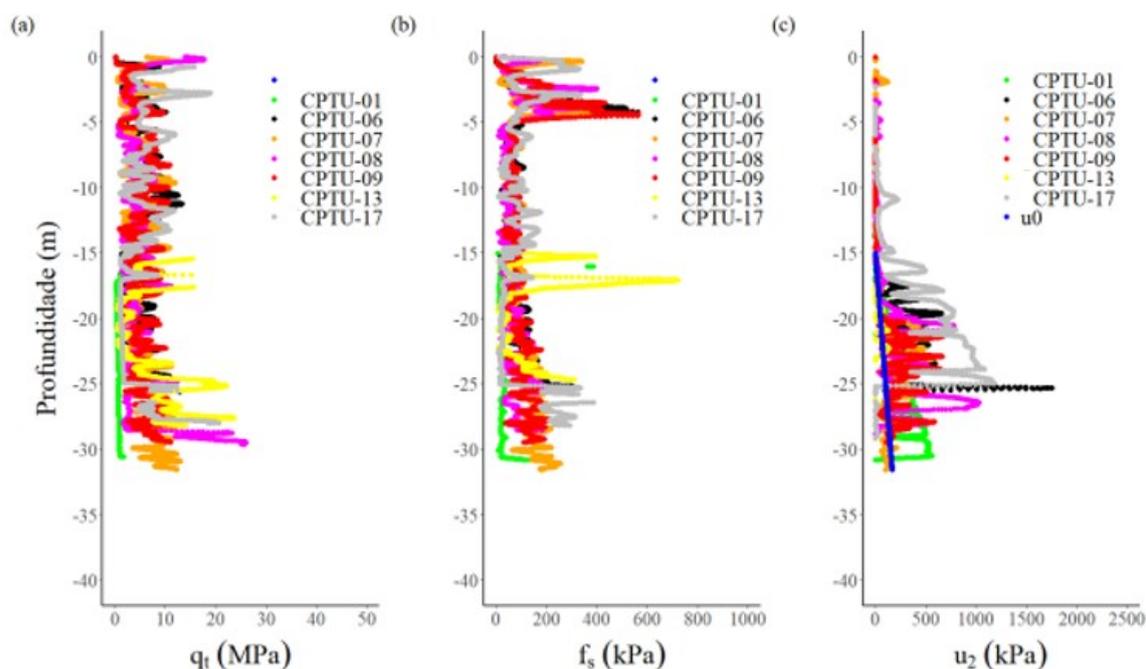
Conforme observado pelo autor, os valores de resistência de ponta (q_c) registrados encontram-se abaixo de 5 MPa, indicando características de um material com comportamento plástico, típico de solos argilosos. Quanto aos valores de poropressão (u), observa-se uma discrepância significativa entre os dois furos investigados, sugerindo possíveis variações nas condições de saturação ou na permeabilidade do material ao longo da área estudada. Já os valores de atrito lateral (f_s) são baixos (menores que 100 KPa) em ambos os pontos de análise.

A estrutura 2 investigada, obteve parâmetros de resistência de ponta que estão próximos dos 5 Mpa, já o atrito lateral teve resultados abaixo de 200 KPa em todos os pontos, o que são registros muito baixo para tal parâmetro, contudo os registros da poropressão são marcados pela cota do nível de água, ainda que rapidamente

dissipados e retornados para próximos da linha hidrostática. A Figura 10 mostra os valores médios obtidos no ensaio realizado.

Na análise realizada na estrutura 2, os valores de resistência de ponta (q_c) obtidos aproximam-se de 5 MPa. O atrito lateral (f_s) apresentou resultados consistentemente inferiores a 200 kPa em todos os pontos, o que reflete níveis relativamente baixos para este parâmetro. Os registros de poropressão (u) mostraram-se significativamente elevados na cota correspondente, entretanto, observa-se uma rápida dissipação desses valores, retornando a condições próximas da linha hidrostática. A Figura 10 a seguir ilustra os valores médios obtidos durante a execução do ensaio, oferecendo uma representação clara das condições geotécnicas observadas na estrutura investigada.

Figura 10 - Resultados registrados nos ensaios SCPTu na estrutura 2.

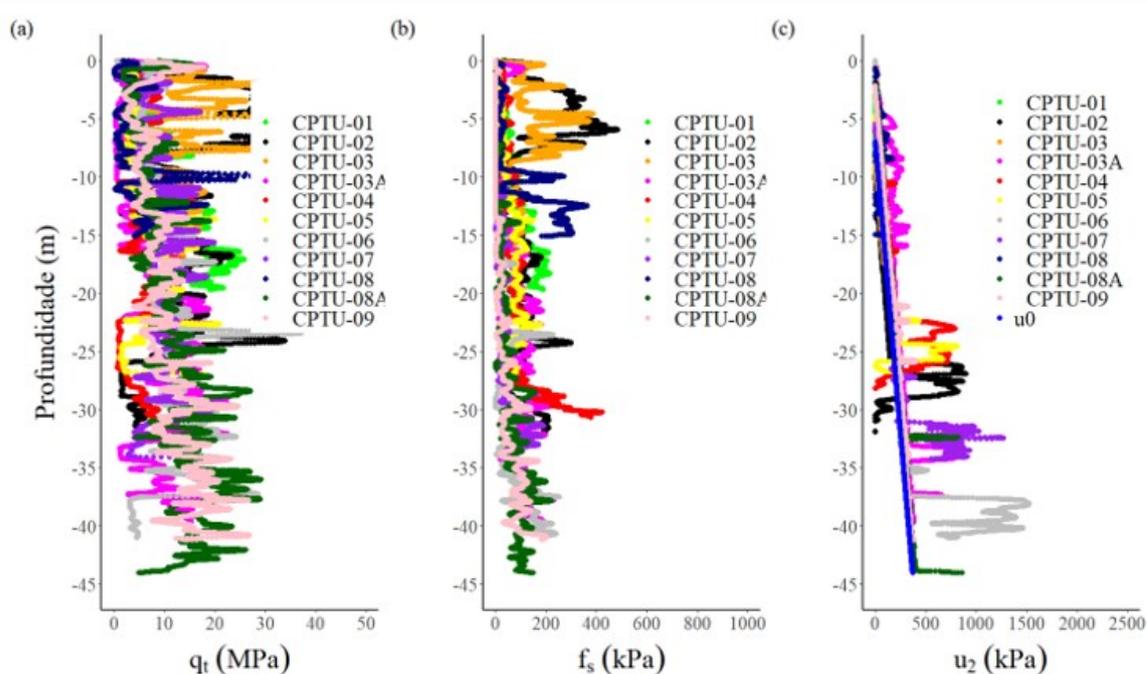


Fonte: Costa, 2023.

Para concluir a campanha de ensaios CPTu, foi realizada uma investigação detalhada na estrutura 3, que representou o maior esforço de caracterização geotécnica entre todas as estruturas analisadas. Este programa envolveu a execução de ensaios que, no total, abrangeram 340,13 metros de profundidade investigada. A

Figura 11 a seguir ilustra os resultados obtidos para a resistência de ponta (q_c) que apresentou uma média próxima a 10 MPa, indicando predominantemente um comportamento típico de materiais granulares. Os registros de atrito lateral (f_s) mantiveram-se baixos, com valores inferiores a 200 kPa na maioria dos pontos, comportamento similar ao observado nas estruturas 1 e 2. Em relação à poropressão (u) foram observados excessos localizados, que ocorreram em apenas alguns pontos de investigação. Esses resultados destacam a variabilidade local do comportamento hidráulico.

Figura 11 - Resultados registrados nos ensaios SCPTu na estrutura 3.



Fonte: Costa, 2023.

3.2. INTERPRETAÇÃO

Com o objetivo de estimar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do rejeito de mineração de ferro, como o ângulo de atrito (φ) e a coesão (c), foi conduzido um estudo que avalia a os dados obtidos por meio dos ensaios CPTu, realizados por Costa (2023), comparando-os com os valores usualmente reportados na literatura técnica para este tipo de rejeito de mineração. A análise busca validar os resultados

experimentais em comparação com estudos anteriores, reforçando a confiabilidade das metodologias empregadas e a consistência das propriedades geotécnicas inferidas para o material investigado.

Para a determinação do ângulo de atrito (ϕ), foram utilizadas três metodologias distintas com o objetivo de verificar a aplicabilidade de cada equacionamento para o cenário avaliado. As fórmulas utilizadas para este estudo estão detalhadas na fundamentação teórica previamente apresentada neste trabalho. A primeira metodologia empregou a equação proposta por Meyerhof (1976), apresentada na Equação (4), que estabelece o ângulo de atrito (ϕ), a partir de uma correlação com a resistência de ponta (q_c) obtida nos ensaios CPTu. Essa abordagem possibilitou uma análise direta dos dados de campo, relacionando-os aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, com base em correlações amplamente aceitas na literatura geotécnica.

A segunda metodologia empregada baseou-se na equação proposta por Robertson e Campanella (1983), que calcula o ângulo de atrito utilizando a resistência de ponta corrigida e a tensão efetiva estimada. Essa formulação é frequentemente utilizada para correlacionar resultados de campo a parâmetros geotécnicos. Por fim, a terceira metodologia seguiu o modelo de Kulhawy e Mayne (1990), que utiliza o valor do parâmetro Q_{tn} para determinar o ângulo de atrito. A obtenção de Q_{tn} requer o ajuste da resistência de ponta, o conhecimento das tensões totais e efetivas, da pressão atmosférica e de um coeficiente associado ao modelo matemático do solo. Essa abordagem é reconhecida por sua capacidade de incorporar diferentes variáveis relacionadas às condições do material estudado.

A aplicação dos métodos mencionados anteriormente exigiu a utilização de parâmetros complementares ao método adotado. Para a metodologia de Robertson e Campanella (1983), foi essencial calcular as tensões efetivas do solo. Nesse contexto, foi considerado um valor de peso específico (γ_n) igual a 20,06 kN/m³ em toda a profundidade, conforme determinado por Silva *et al.* (2023), que obteve esse parâmetro através de ensaios laboratoriais realizados com o rejeito de mineração de ferro. A partir desse dado, foi possível calcular as tensões totais em função da profundidade investigada nos ensaios, o que permitiu a subsequente determinação das tensões efetivas.

É relevante salientar que, para cada estrutura onde os ensaios CPTu foram realizados, foram identificados diferentes níveis de água, os quais influenciaram diretamente as condições de poropressão observadas. Na estrutura 1, o nível d'água

foi identificado a uma profundidade de 7,5 metros. Na estrutura 2, os registros de poropressão começaram a ser avaliados a partir de 15 metros, enquanto na estrutura 3, o nível d'água foi encontrado a 6 metros de profundidade. Essas variações exigiram ajustes específicos nos cálculos das tensões efetivas, de modo a considerar as particularidades hidrogeológicas de cada local. Essas adaptações foram fundamentais para garantir que os resultados fossem representativos das condições reais de cada estrutura investigada.

O modelo de Kulhawy e Mayne (1990), que utiliza o parâmetro Q_{tn} , requer a incorporação de outros dados complementares, com alguns valores extraídos diretamente da literatura técnica. Para o cálculo, foi utilizado o valor da resistência de ponta corrigida (q_t), já apresentado nos estudos realizados por Costa (2023). Os valores das tensões totais e efetivas empregados foram os mesmos adotados no método de Robertson e Campanella (1983). Para a pressão atmosférica (p_a) utilizou-se um valor padrão de 100 kPa, enquanto o parâmetro n , um coeficiente associado ao modelo matemático do solo, foi definido como 0,5. Esse valor foi escolhido com base na recomendação de Zhang, Robertson e Brachman (2002), que sugerem sua aplicação para análises de solos granulares.

A análise para determinação dos valores de coesão (c) foi conduzida com base na metodologia descrita no referencial teórico deste trabalho. Esse método avalia a coesão utilizando o valor da resistência de ponta corrigida (q_t), as tensões totais registradas no solo e um fator empírico que depende do teor de finos presentes no rejeito, variando entre 0,2 e 0,5. Para os cálculos realizados neste estudo, foi adotado o valor de 0,5 para o referido fator, uma escolha que se alinha às recomendações da literatura técnica para materiais similares a rejeitos de mineração.

3.3. ESTUDO COMPARATIVO DOS PARÂMETROS DE RESISTENCIA OBTIDOS EM ENSAIO DE LABORATÓRIO.

Para o estudo dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do rejeito de mineração de ferro, foram realizados ensaios laboratoriais do tipo cisalhamento direto. Esses ensaios tiveram como principal objetivo fornecer uma base comparativa com os resultados obtidos por meio dos ensaios de campo. É relevante destacar que os

ensaios laboratoriais foram utilizados exclusivamente como suporte complementar, possibilitando a validação parcial dos métodos e parâmetros propostos no estudo.

O material analisado nos ensaios de laboratório é proveniente do grupo de pesquisa do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC – Joinville (LMS), mas não corresponde diretamente ao rejeito estudado por Costa (2023). Essa decisão teve como objetivo avaliar metodologias de análise comparativa, mesmo em amostras com características similares, porém não idênticas. O material utilizado para a realização dos ensaios de cisalhamento direto neste estudo já foi previamente analisado por Silva *et al.* (2024), que conduziu uma série de ensaios de classificação geotécnica aplicados a rejeitos de minério de ferro. Essa análise foi baseada nas normas ABNT NBR 16840/2020, que trata da caracterização de resíduos sólidos, e ABNT NBR 16843/2020, que estabelece diretrizes para ensaios em rejeitos de mineração. A autora, por meio desses testes, verificou características importantes que fundamentam o presente estudo.

Adicionalmente, os testes granulométricos realizados indicaram que os rejeitos possuem partículas predominantemente equiparadas à areia fina, com tamanho de grãos majoritariamente na faixa de 0,075 mm a 0,42 mm, caracterizando-os como materiais predominantemente arenosos, com baixa fração de finos (argila e silte). Esse comportamento granulométrico é especialmente relevante para a avaliação da resistência ao cisalhamento, uma vez que materiais arenosos tendem a apresentar ângulos de atrito relativamente elevados e coesão próxima de zero, conforme descrito por Craig (2004).

Na Tabela 2, são apresentados os resultados da granulometria e densidade de grãos obtidos por Silva *et al.* (2024), que serviram como base comparativa para este estudo. Esses resultados reforçam a adequação do material utilizado nos ensaios de cisalhamento direto, ainda que não seja exatamente o mesmo rejeito estudado em campo. Assim, o uso desses dados auxilia na correlação entre parâmetros laboratoriais e de campo, contribuindo para a validação das metodologias aplicadas na caracterização e análise de rejeitos de mineração de ferro.

Tabela 2 - Propriedades físicas do rejeito de minério de ferro.

Propriedade	Valor	Unidade
Limite de Liquidez (LL)	-	%
Limite de Plasticidade (LP)	-	%
Índice de Plasticidade (IP)	Não-Plástico (NP)	%
Densidade dos Grãos	3,64	G
Areia Fina (0.06 mm < Diâmetro < 0.2 mm)	69,00	%
Silte (0.002 mm < Diâmetro < 0.06 mm)	17,69	%
Argila (Diâmetro < 0.002 mm)	0	%
Diâmetro médio das partículas, D50 (mm)	0,069	mm
Peso específico seco máximo por compactação Proctor Normal	2,04	kN/m ³
Umidade ótima por compactação Proctor Normal	12,6	%
Classificação SUCS	ML	-
Classificação HRB	A4	-
e(mín)*	0,76	-
e(máx)*	1,05	-
γ_n (mín.)*	1,78	g/cm ³
γ_n (máx.)*	2,06	g/cm ³

Fonte: Julia da Silva, 2024.

Para este estudo, os ensaios de cisalhamento direto foram realizados utilizando o equipamento Owntec, MS 101 – Cisalhamento Direto do Solo, conforme ilustrado na Figura 13 subsequente. O equipamento foi escolhido devido à sua praticidade e rapidez em fornecer resultados de parâmetros de resistência do material.

Os ensaios laboratoriais foram conduzidos utilizando o material analisado sob três condições distintas de índice de vazios: estado fofo, medianamente compacto e compacto. Para o estado medianamente compacto e compacto, adotou-se um índice de vazios igual a 0,85 e 0,78, respectivamente. Já para o estado fofo, o índice de vazios foi de 0,90. Essa variação foi estabelecida para representar diferentes condições de deposição e compactação do material em campo, refletindo situações típicas de rejeitos arenosos de mineração de ferro.

Figura 12 - Equipamento utilizado no ensaio - Cisalhamento Direto

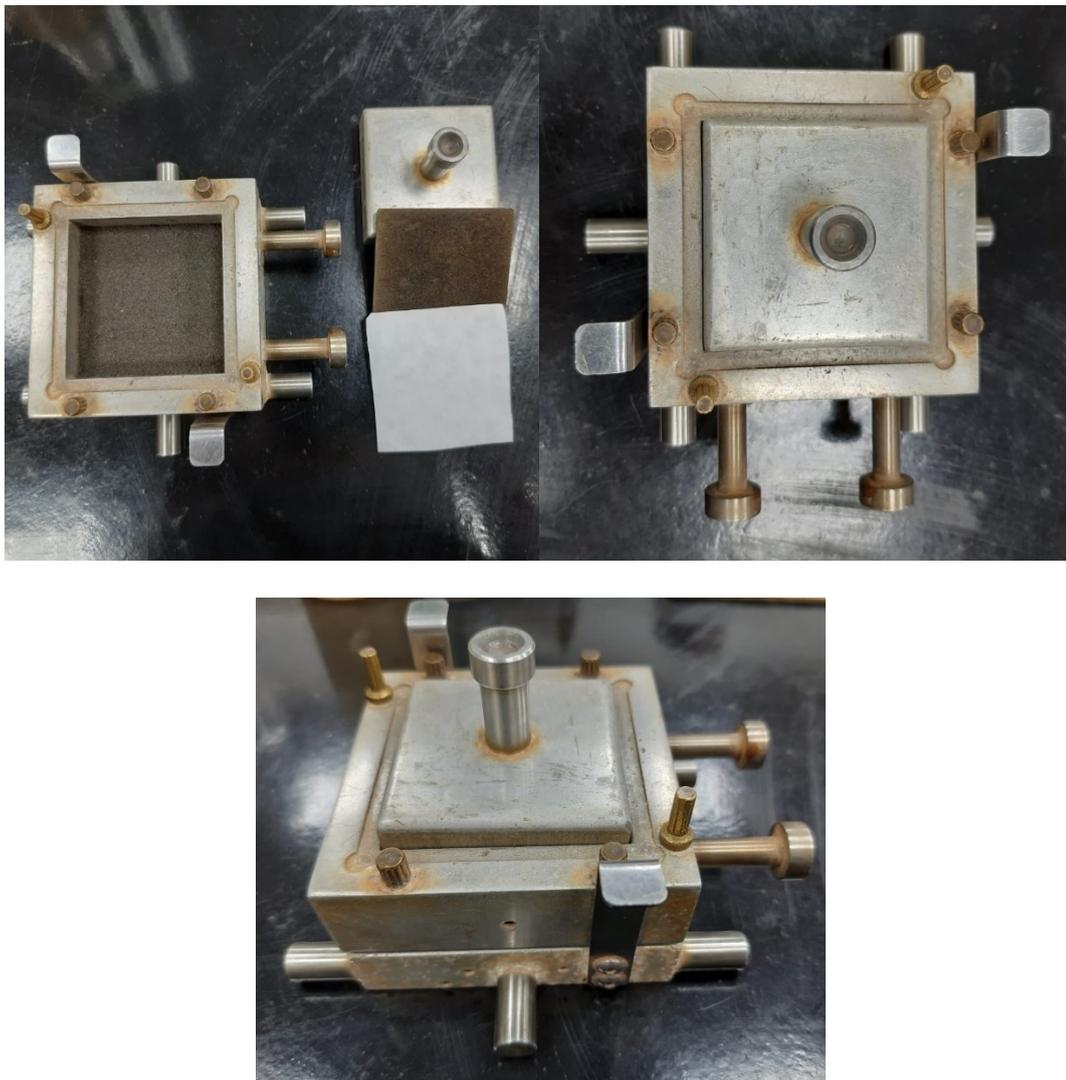


Fonte: Autora 2024.

Os corpos de prova foram moldados diretamente na célula do equipamento de cisalhamento, conforme ilustrado na Figura 14, a célula é quadrada com dimensões de 6,0x6,0 cm. O preparo seguiu procedimentos para garantir a uniformidade e representatividade das condições testadas. Durante o processo, buscou-se minimizar distúrbios no material e assegurar a homogeneidade necessária para a obtenção de resultados compatíveis com os da literatura.

Foram adotadas três diferentes condições de tensões normais aplicadas: 50, 100 e 200 kPa, representando cenários que simulam cargas atuantes em diferentes profundidades. Essa abordagem é essencial para compreender o comportamento mecânico do material sob diferentes condições de carregamento.

Figura 13 - Célula do ensaio de cisalhamento direto moldada com rejeito.



Fonte: Autora 2024.

O teor de umidade inicial do material foi fixado em 10%, valor considerado adequado para garantir a boa compactação do corpo de prova. A quantidade exata de rejeito a ser utilizada foi calculada a partir de índices físicos do material, com base nos parâmetros de densidade seca e índice de vazios. O objetivo foi obter corpos de prova que refletissem as densidades desejadas para cada estado de compactação.

Além disso, foram atribuídas condições saturadas a todos os corpos de prova antes da realização dos ensaios. A metodologia aplicada garantiu a avaliação precisa da interação entre os grãos sob diferentes estados de tensão e condições de saturação, oferecendo uma visão abrangente do comportamento mecânico do material, tanto em situações de baixa como de alta pressão de confinamento. Os

resultados obtidos são apresentados e discutidos nas seções subsequentes, comparando-os com dados disponíveis na literatura e com os parâmetros obtidos em ensaios de campo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para os parâmetros de resistência ao cisalhamento do rejeito de mineração de ferro, especificamente o ângulo de atrito (φ) e a coesão (c). Esses parâmetros foram calculados para cada um dos ensaios CPTu realizados nas três estruturas estudadas. O objetivo principal é correlacionar os valores obtidos em campo com aqueles encontrados na literatura, permitindo avaliar a aplicabilidade das estimativas baseadas em resultados de ensaios de campo como uma alternativa mais ágil e prática, em comparação aos ensaios laboratoriais tradicionais, para a determinação dos parâmetros de resistência do material. Essa abordagem visa demonstrar a eficiência das metodologias em fornecer resultados confiáveis para o rejeito em estudo.

4.1. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA ATRAVÉS DO ENSAIO CPTU

A partir dos dados relativos a rejeito de mineração de ferro, foram determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento, como o ângulo de atrito (φ) e a coesão (c), que são essenciais para as aplicações práticas abordadas neste trabalho. O estudo foi estruturado com a separação em três diferentes estruturas, permitindo a aplicação dos métodos de análise de forma específica para cada uma. Os resultados obtidos serão apresentados para cada estrutura, conforme os procedimentos descritos por Costa (2023), buscando destacar as características particulares de cada caso avaliado.

4.1.1. Parâmetros para as estruturas 1, 2 e 3

Na Estrutura 1, foram realizados dois ensaios CPTu, cujos dados foram analisados com base nas metodologias previamente descritas. Os cálculos realizados permitiram a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, especificamente o ângulo de atrito (φ) e a coesão (c). A aplicação das equações foi feita separadamente para cada uma das campanhas realizadas, garantindo maior

precisão na análise dos resultados. O Quadro 5, apresenta uma síntese dos valores obtidos para o ângulo de atrito, os valores apresentados são os valores mínimos e máximos encontrados com base nas três metodologias utilizadas, e o valor de coesão determinado por meio de uma única abordagem.

Quadro 5 - Resultados de ângulo de atrito e coesão para estrutura 1.

Estrutura	Ponto de Investigação	Meyerhof (1976)	Robertson e Campanella (1983)	Kulhawy e Mayne (1990)	Robertson e Cabal (2015)
		φ'	φ'	φ'	c
Estrutura 1	CPTu - 01	30° - 41°	18° - 57°	12° - 50°	0
	CPTu - 02	30° - 33°	25° - 61°	17° - 47°	0

Fonte: Autora, 2024.

A investigação realizada para a Estrutura 2 foi mais abrangente em comparação à Estrutura 1, considerando o número de pontos de investigação nos ensaios CPTu. Essa abordagem ampliada permitiu uma análise mais detalhada das condições geotécnicas do material, possibilitando a obtenção de dados mais representativos e consistentes para o cálculo dos parâmetros de resistência. Os resultados obtidos por meio das metodologias adotadas, descritas anteriormente, estão apresentados no Quadro 6 a seguir.

Quadro 6 - Resultados de ângulo de atrito e coesão para a estrutura 2.

Estrutura	Ponto de Investigação	Meyerhof (1976)	Robertson e Campanella (1983)	Kulhawy e Mayne (1990)	Robertson e Cabal (2015)
		φ'	φ'	φ'	c
Estrutura 2	CPTu - 01	30° - 47°	24° - 60°	22° - 45°	0
	CPTu - 06	30° - 39°	28° - 54°	26° - 47°	0
	CPTu - 07	31° - 38°	27° - 63°	26° - 52°	0
	CPTu - 08	31° - 42°	26° - 65°	25° - 56°	0
	CPTu - 09	30° - 37°	26° - 53°	24° - 41°	0
	CPTu - 13	31° - 47°	28° - 66°	24° - 60°	0
	CPTu - 17	32° - 50°	25° - 64°	24° - 55°	0

Fonte: Autora, 2024.

Os resultados obtidos para a Estrutura 3 estão sintetizados no Quadro 7. Essa estrutura destacou-se por ter a mais extensa campanha de investigação geotécnica conduzida no estudo, tanto em termos de número de pontos de ensaio quanto de profundidade total investigada. No total, foram realizados 11 ensaios CPTu, correspondendo a um acumulado de 340,13 metros de perfuração e coleta de dados.

A campanha conduzida na Estrutura 3 não apenas complementa os resultados das estruturas anteriores, mas também serve como base para comparar tendências e validar as metodologias empregadas. A maior quantidade de dados obtidos contribui significativamente para as análises e reforça a aplicabilidade dos parâmetros determinados para futuros estudos e projetos relacionados ao gerenciamento de rejeitos de mineração.

Quadro 7 - Resultados de ângulo de atrito e coesão para a estrutura 3.

Estrutura	Ponto de Investigação	Meyerhof (1976)	Robertson e Campanella (1983)	Kulhawy e Mayne (1990)	Robertson e Cabal (2015)
		φ'	φ'	φ'	c
Estrutura 3	CPTu - 01	31° - 42°	34° - 59°	27° - 43°	0
	CPTu - 02	31° - 48°	28° - 62°	26° - 49°	0
	CPTu - 03	32° - 46°	31° - 60°	27° - 47°	0
	CPTu - 03 - A	30° - 41°	22° - 62°	19° - 50°	0
	CPTu - 04	31° - 39°	24° - 61°	21° - 46°	0
	CPTu - 05	31° - 44°	24° - 58°	25° - 42°	0
	CPTu - 06	31° - 44°	32° - 55°	30° - 45°	0
	CPTu - 07	29° - 42°	31° - 59°	26° - 46°	0
	CPTu - 08	29° - 43°	18° - 59°	13° - 46°	0
	CPTu - 08 - A	29° - 42°	34° - 62°	32° - 56°	0
	CPTu - 09	29° - 42°	37° - 62°	33° - 52°	0

Fonte: Autora, 2024.

Os valores obtidos para o ângulo de atrito (φ) demonstram uma variação significativa entre as diferentes metodologias utilizadas para os cálculos. Essa discrepância pode ser explicada pelas particularidades de cada abordagem, visto que cada método adota fatores e premissas específicas para a determinação do parâmetro. Por exemplo, metodologias como as de Meyerhof (1976) e Robertson e Campanella (1983) utilizam correlações empíricas baseadas em condições de campo e características do material, enquanto outras, como a de Kulhawy e Mayne (1990), incorporam coeficientes relacionados à granulometria e tensões efetivas.

Essa variabilidade ressalta a importância de compreender as limitações e os contextos de aplicação de cada método, reforçando a necessidade de uma análise criteriosa na escolha da metodologia mais apropriada para a investigação de acordo com o material a ser estudado.

Para o método de Meyerhof, os valores para φ variam de 29° a 50° ao longo dos pontos investigados. Esses valores sugerem um comportamento típico de materiais arenosos ou silto-arenosos, com boa resistência ao cisalhamento. A menor variação nos valores indica que esse método é mais estável e menos sensível às mudanças de condições locais.

Já a metodologia de Robertson e Campanella apresenta uma faixa de φ mais ampla, variando de 18° a 66°. Essa maior variabilidade reflete a dependência do método em relação a fatores como densidade relativa, granulometria e saturação. Os valores mais baixos (<25°) indicam possível saturação ou presença de materiais mais finos, enquanto os mais altos (>50°) sugerem rejeitos mais compactados ou com maior predominância de frações grossas.

Já pelo estudo de Kulhawy e Mayne, apresentam-se que os valores de φ variam entre 12° e 60°. Esse método apresenta uma dispersão similar à de Robertson e Campanella, evidenciando a influência de condições locais, como compactação e saturação. Valores mais baixos refletem condições de menor resistência, enquanto valores mais altos estão associados a materiais mais densos ou com menor teor de finos.

De modo geral, os valores de φ se alinham com o comportamento esperado de rejeitos arenosos e silto-arenosos, que apresentam φ tipicamente entre 28° e 36° na literatura. Os valores mais altos (>40°) podem ser explicados por condições específicas, como compactação ou baixa saturação. Já os valores mais baixos (<20°)

são atribuídos a maior presença de finos ou condições saturadas, características comuns em rejeitos com maior variabilidade granulométrica.

Já a coesão para todos os pontos investigados, o valor da coesão (c) foi igual a 0, esse comportamento é consistente com rejeitos predominantemente arenosos, que, em condições drenadas, não apresentam coesão aparente. Isso ocorre porque a resistência ao cisalhamento é determinada principalmente pelo atrito entre partículas, característica típica de materiais granulares. Na literatura, rejeitos coesivos, como argilosos ou com alto teor de finos, geralmente exibem valores de coesão diferentes de zero. A ausência de coesão nos resultados reforça a interpretação de que o material analisado possui um comportamento granular dominante.

Os valores do ângulo de atrito apresentados nas tabelas analisadas encontram-se, em sua maioria, alinhados com os intervalos comumente reportados na literatura técnica para materiais com características semelhantes. Entretanto, nota-se a existência de uma faixa de variação que abrange valores tanto inferiores quanto superiores aos indicados na literatura. Essa variação pode ser atribuída às condições específicas impostas pelo material durante os ensaios, incluindo fatores como granulometria, índice de vazios e teor de umidade.

A análise desses resultados reforça a importância de considerar as condições particulares do material ao interpretar os valores obtidos. Essa abordagem é essencial para garantir que os parâmetros geotécnicos estimados sejam representativos das reais condições do rejeito, evitando discrepâncias que poderiam comprometer as conclusões e aplicações práticas do estudo.

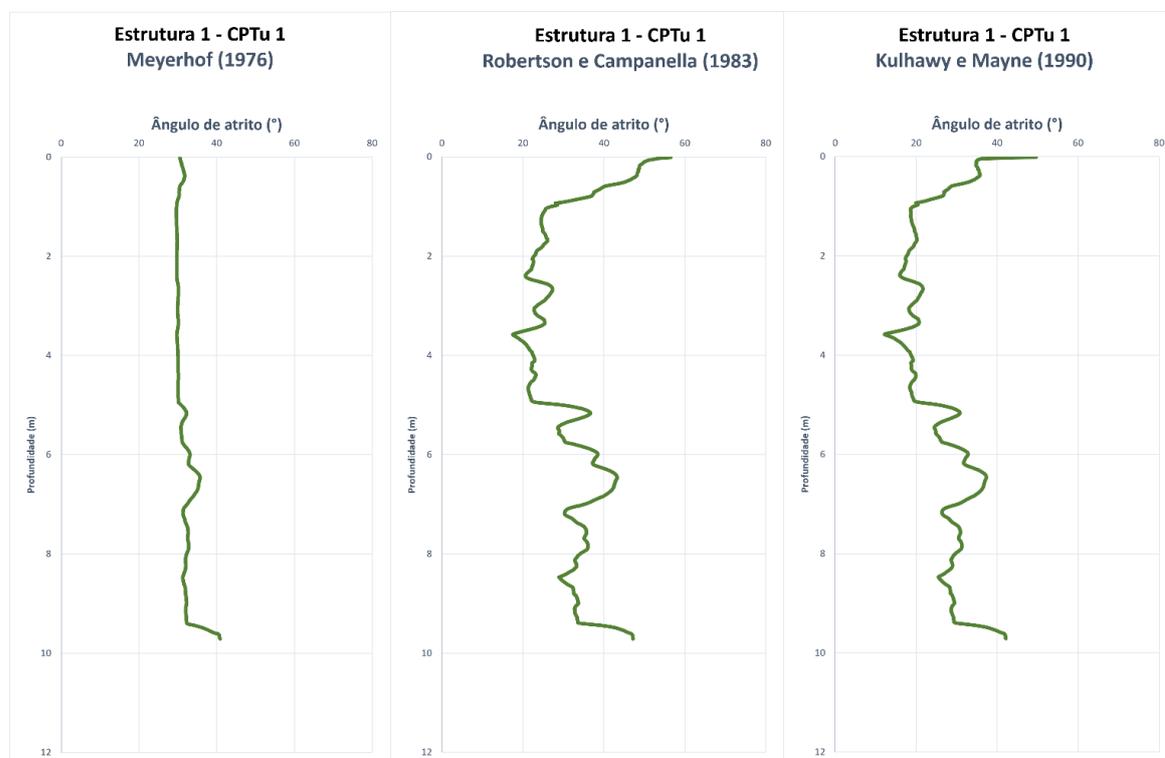
Assim, a avaliação crítica e detalhada dos dados torna-se indispensável para assegurar a confiabilidade dos parâmetros de resistência empregados no projeto ou na análise de estabilidade. Ademais, essa variação ressalta a necessidade de comparação sistemática com a literatura, não apenas para validar os resultados, mas também para identificar possíveis fatores que possam influenciar significativamente o comportamento mecânico do rejeito em estudo.

Com base nos valores obtidos para o ângulo de atrito interno (ϕ), foram desenvolvidos gráficos de dispersão que correlacionam este parâmetro com a profundidade das camadas investigadas. Para cada estrutura estudada, foi gerado um gráfico específico, permitindo a análise detalhada do comportamento do material em relação às diferentes metodologias aplicadas.

Esses gráficos estão dispostos no anexo A, contudo a Figura 15, apresenta o resultado obtido para a estrutura 1, CPTu 1, que oferece uma representação visual clara da variação do ângulo de atrito ao longo do perfil de profundidade, onde pode-se notar que para a o método de Meyerhof (1976) é o que evidencia a menor variabilidade dos valores para o ângulo de atrito. A construção desses gráficos possibilitou identificar padrões de comportamento mecânico associados às diferentes camadas do rejeito de mineração de ferro. Essa correlação é fundamental para avaliar como o parâmetro de resistência ao cisalhamento se distribui ao longo da profundidade, permitindo conclusões mais detalhadas sobre as propriedades geotécnicas do material investigado.

Além de que, a análise gráfica serve como uma ferramenta importante para comparar os resultados obtidos com os dados encontrados na literatura. Isso auxilia na validação das metodologias empregadas e contribui para a definição de critérios mais robustos para o uso do rejeito em estudos e projetos de engenharia. A correlação identificada reforça a importância do conhecimento do comportamento do ângulo de atrito em função da profundidade, sendo este um aspecto crítico na caracterização geotécnica de rejeitos arenosos.

Figura 14 – Correlação entre ângulo de atrito x profundidade para a estrutura 1 – CPTu 1 de acordo com as metodologias estudadas.



Fonte: Autora, 2024.

A Figura 15, portanto, não apenas sintetiza os resultados obtidos, mas também serve como uma ferramenta valiosa para interpretar o comportamento do material com relação à profundidade. Pode-se notar então que cada metodologia apresenta um comportamento diferente de acordo com a profundidade crescente do ensaio, com isso pode-se notar que geralmente, com o aumento da profundidade, ocorre um aumento da compactação e do estado de tensões efetivas, o que tende a aumentar o ângulo de atrito interno. Essa tendência é mais evidente nos gráficos de Robertson e Campanella (1983) e Kulhawy e Mayne (1990) enquanto a abordagem de Meyerhof (1976) parece menos sensível a essa variação.

Pode-se notar que os maiores valores para o ângulo de atrito foram encontrados na variação de 4 a 6 metros, os rejeitos de mineração de ferro apresentam granulometria variável, que influencia diretamente o atrito entre partículas. Por serem solos artificialmente depositados, a distribuição das partículas, a compactação e a saturação podem causar variações significativas nos valores de ϕ'

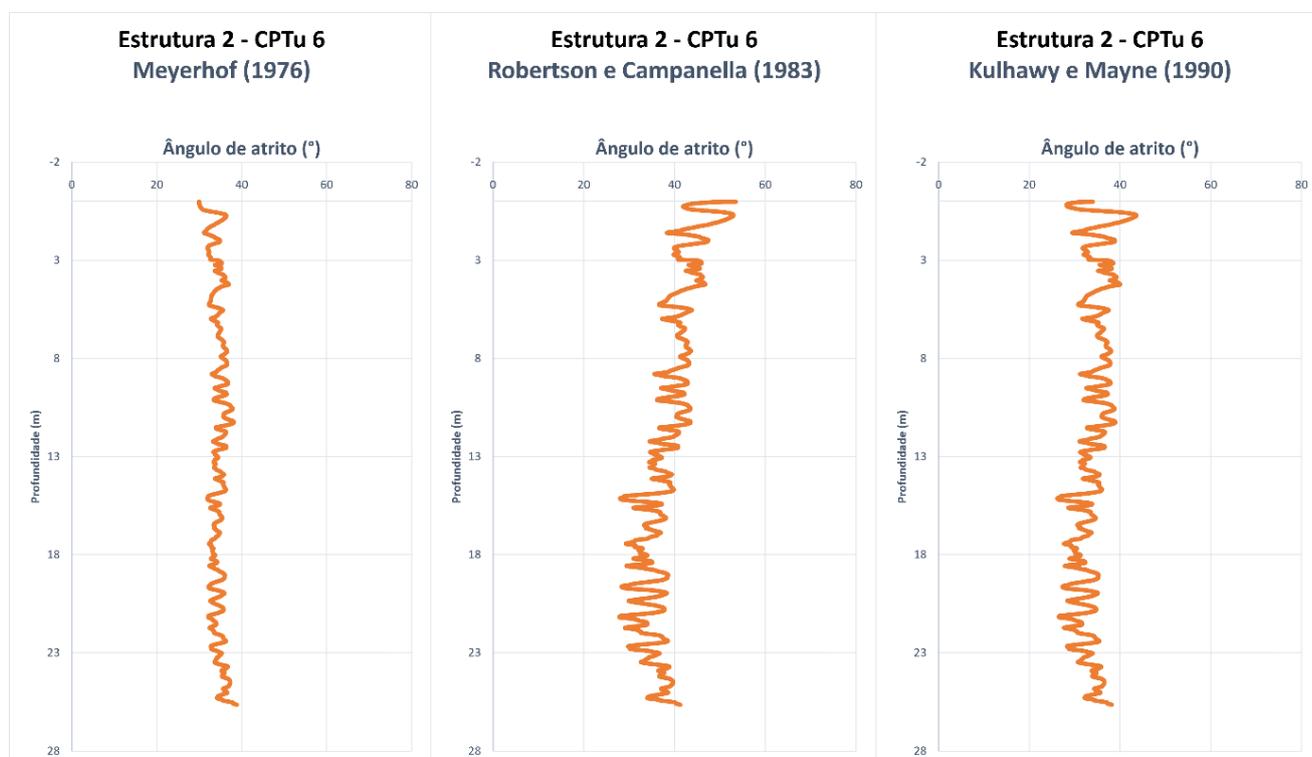
em profundidade, como observado nos métodos mais sensíveis Robertson e Campanella (1983), Kulhawy e Mayne (1990).

A Figura 16 apresenta os resultados obtidos para o ensaio CPTu 6 da estrutura 2, onde se observa que, ao contrário do que foi observado na Figura 15, os ângulos de atrito para essa estrutura mantiveram-se mais constantes com o aumento da profundidade. Os resultados indicam que os maiores valores para o ângulo de atrito são observados nas camadas superiores, a baixas profundidades. Contudo, conforme a profundidade aumenta, há uma tendência de redução no ângulo de atrito. Esse comportamento pode ser explicado pela maior compactação do material à medida que se desce no perfil do solo.

O aumento da pressão devido à profundidade maior pode causar uma compressão adicional das partículas do solo, resultando em uma estrutura mais densa e, conseqüentemente, uma redução na mobilidade das partículas, o que leva à diminuição do ângulo de atrito. Esse fenômeno está alinhado com os conceitos de compactação e de resistência ao cisalhamento, como discutido em diversas referências na literatura geotécnica, como aquelas de Das (2007) e de Robertson e Campanella (1983).

Em comparação com a Figura 15, que apresenta uma maior variação, o comportamento da estrutura 2 revela uma distribuição mais uniforme dos ângulos de atrito ao longo do perfil de profundidade. Além disso, pode-se notar as diferenças entre os resultados das metodologias utilizadas. A metodologia de Robertson e Campanella (1983) e a de Kulhawy e Mayne (1990) apresentam resultados mais alinhados com os intervalos típicos encontrados na literatura, o que reforça a boa abordagem para análise do comportamento de rejeitos. Essas metodologias, cada uma com seu modelo específico de análise, demonstram a importância de escolher o método adequado de acordo com as características do material em questão.

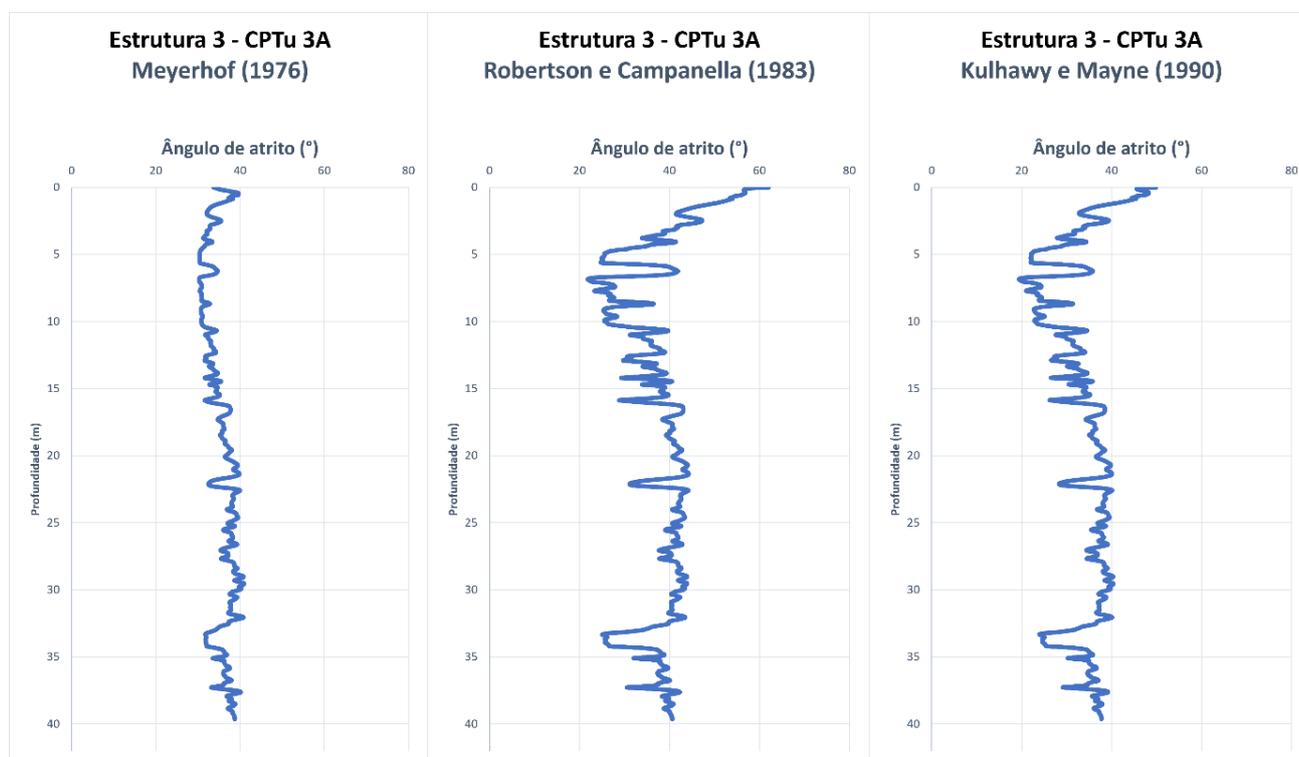
Figura 15 - Correlação entre ângulo de atrito x profundidade para a estrutura 2 – CPTu 6 de acordo com as metodologias estudadas.



Fonte: Autora, 2024.

Já na Figura 17, são apresentados os resultados obtidos para a estrutura 3 no ensaio CPTu 3A. A análise desses dados revela que, assim como observado na Figura 16, os maiores ângulos de atrito estão localizados nas camadas superficiais, em menores profundidades. No entanto, com a continuidade do ensaio, a resistência estabiliza em níveis medianos, apresentando algumas flutuações, com valores baixos em determinados pontos. Essas variações podem ser atribuídas à presença de camadas ressecadas na superfície do depósito ou às características heterogêneas dos rejeitos. Ao final do ensaio, em profundidades maiores, o ângulo de atrito diminui significativamente. Essa queda pode ser atribuída à presença de camadas de material mais fino ou maior saturação do material neste ponto. Esse comportamento é consistente com os estudos realizados por Kulhawy e Mayne (1990), que observaram que a umidade do solo e a presença de água no fundo de barragens influenciam diretamente a resistência ao cisalhamento.

Figura 16 - Correlação entre ângulo de atrito x profundidade para a estrutura 3 – CPTu 3A de acordo com as metodologias estudadas.



Fonte: Autora, 2024.

Os demais resultados, referentes a cada estrutura e ensaio, encontram-se apresentados nos anexos deste trabalho. De maneira geral, as análises realizadas indicam que os resultados obtidos para cada estrutura possuem comportamento semelhante ao discutido no tópico principal. Observou-se que, independentemente da estrutura analisada, os parâmetros geotécnicos, como o ângulo de atrito, tendem a seguir um padrão consistente, caracterizado pela manutenção de valores similares ao longo das camadas de profundidade.

Essa similaridade entre as estruturas reforça a hipótese de que o comportamento dos rejeitos de mineração de ferro apresenta homogeneidade em termos de resposta mecânica, dentro das condições de compactação e saturação avaliadas neste estudo. No entanto, é importante destacar que pequenas variações podem ocorrer devido a diferenças pontuais nas condições locais de cada estrutura, como alterações na granulometria ou na presença de água, o que pode influenciar a resistência ao cisalhamento do material. Essas nuances também foram observadas em estudos similares reportados na literatura, como os realizados por Meyerhof (1976)

e Kulhawy e Mayne (1990), que destacam a influência do ambiente local no desempenho geotécnico de rejeitos.

A partir disto, pode analisar que as metodologias de Robertson e Campanella (1983) e Kulhawy e Mayne (1990) seriam os métodos mais indicados devido à maior adaptação aos solos heterogêneos, como rejeitos. A maior variabilidade observada nos valores pode refletir a heterogeneidade típica dos depósitos de rejeitos. Essa análise é fundamental para validar os parâmetros obtidos e avaliar a consistência com dados reportados na literatura, além de fornecer subsídios para aplicações práticas em projetos de engenharia envolvendo rejeitos de mineração.

4.2. PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA COMPARATIVO COM DADOS DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Com o objetivo de comparar os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos rejeitos de mineração de ferro, foram realizados ensaios de cisalhamento direto, conforme descrito anteriormente. Esses ensaios permitiram verificar se os valores obtidos por meio das metodologias propostas na literatura apresentavam concordância com os resultados provenientes de ensaios laboratoriais.

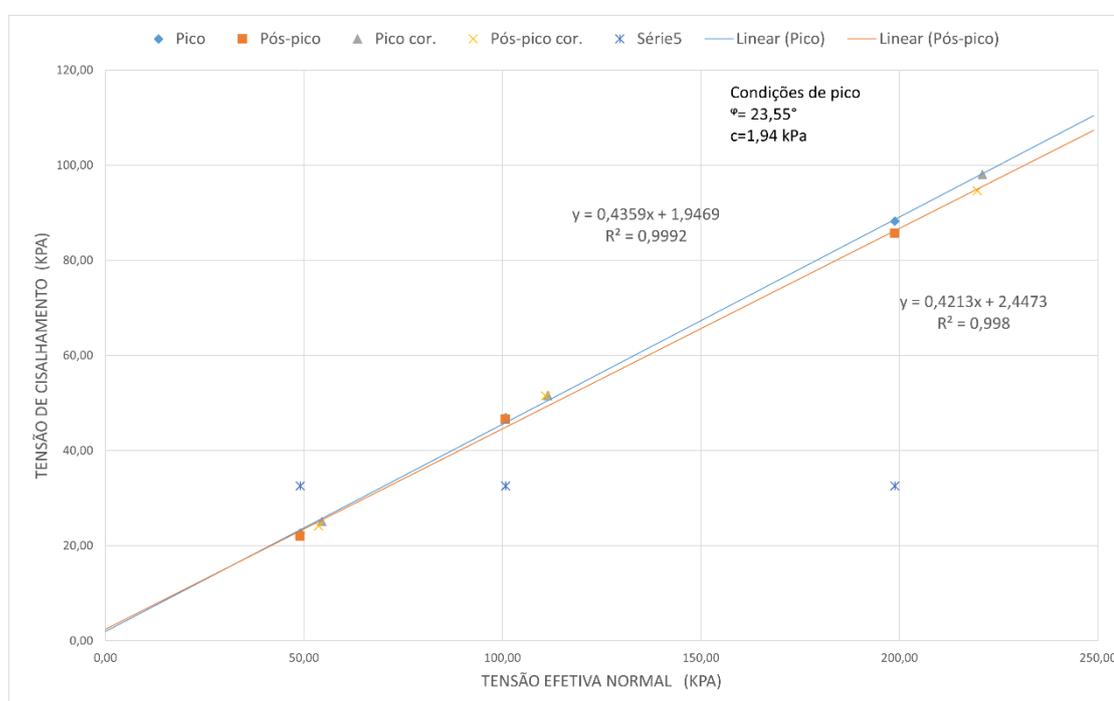
O estudo utilizou três amostras distintas, apresentando diferentes condições de densidade relativa e condições de carregamento: estado fofo, estado medianamente compacto e estado compacto. Esses estados foram escolhidos com base na relevância prática de se compreender como os parâmetros geotécnicos variam em diferentes condições de compactação, especialmente em contextos de barragens de rejeitos, onde o comportamento mecânico do material influencia diretamente a estabilidade da estrutura.

Os resultados obtidos para cada estado de compactação foram analisados por meio da envoltória de resistência do material, considerando diferentes condições de compactação e de índice de vazios. Para o estado fofo, com índice de vazios igual a 0,90, o ângulo de atrito obtido para o estado de pico foi de $23,55^\circ$, conforme mostrado na Figura 18. Nesse estado, observou-se que o valor do intercepto coesivo foi 1,94, o que é consistente com o comportamento típico de materiais em estado fofo, onde a resistência ao cisalhamento é predominantemente controlada pelo ângulo de atrito. Esses resultados estão em linha com o comportamento esperado de materiais com

maior grau de porosidade, que, em condições de baixa densidade, apresentam resistência reduzida à deformação.

Os valores relativamente baixos de coesão indicam que a resistência do material é fortemente dependente da tensão normal aplicada. Em aplicações práticas, como em taludes ou barragens de rejeitos, isso reforça a necessidade de manter um bom estado de compactação e drenagem eficiente para evitar o desenvolvimento de pressões de poro excessivas, que poderiam reduzir significativamente a resistência ao cisalhamento.

Figura 17 - Resultado ensaio de cisalhamento direto para o estado fofo ($e=0,90$).

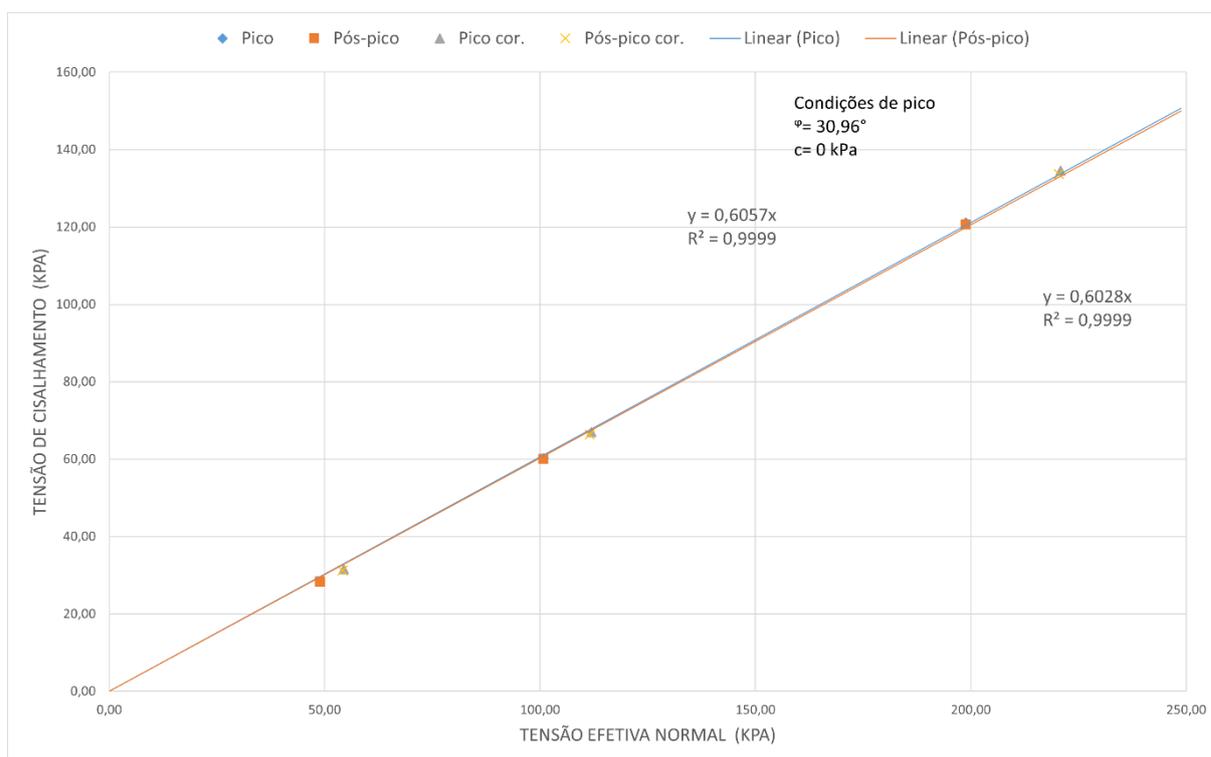


Fonte: Autora, 2024.

O gráfico exibe duas tendências principais: uma correspondente ao estado de pico e outra para o estado pós-pico, a diferença entre tais condições é quase imperceptível nos resultados apresentados. Essa característica indica que o material mantém boa resistência residual após atingir o estado de ruptura, minimizando riscos de colapso progressivo. Na literatura, essa estabilidade pós-pico é frequentemente associada à presença de partículas angulares e à baixa compressibilidade dos rejeitos, fatores que contribuem para o intertravamento efetivo.

Para o estudo do ensaio de cisalhamento realizado em estado medianamente compacto, no qual o índice de vazios foi igual a 0,85, os resultados obtidos são apresentados na Figura 19. Este estado de compactação intermediária, representa uma condição entre o estado fofo e compacto.

Figura 18 - Resultado ensaio de cisalhamento direto para o estado medianamente compacto ($e=0,85$).



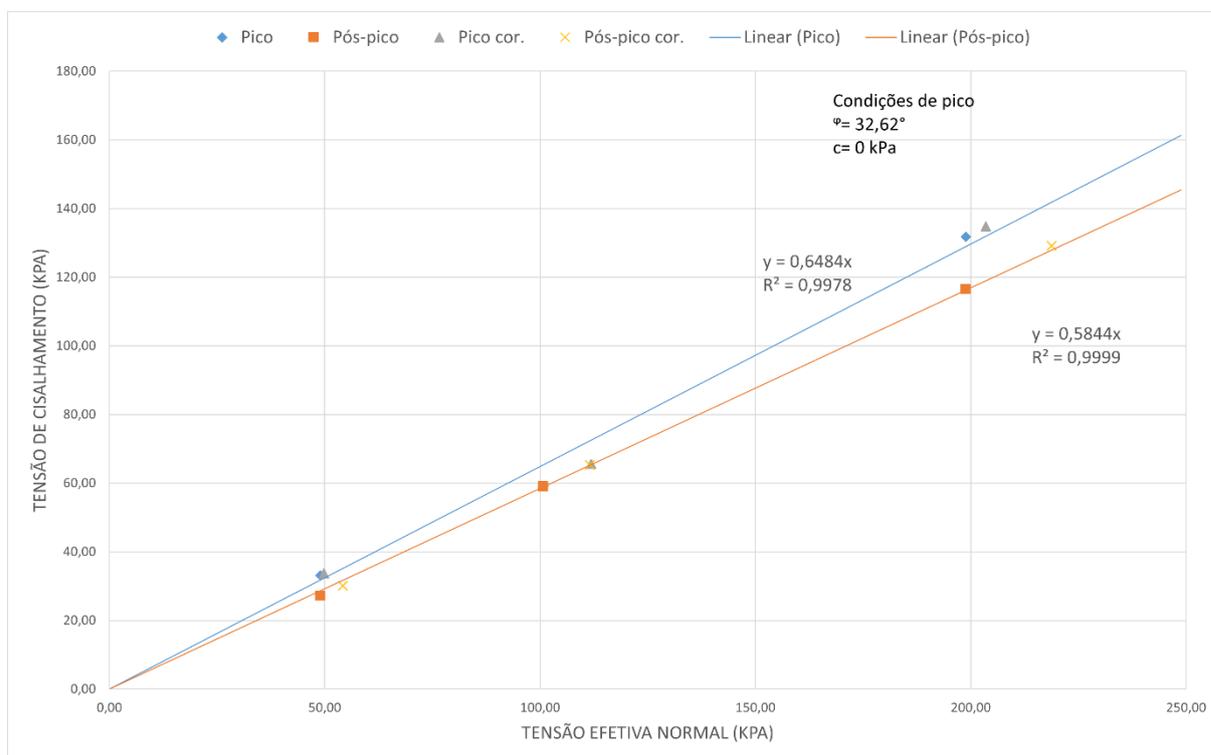
Fonte: Autora, 2024.

A pequena diferença entre os coeficientes angulares das retas nos estados de pico e pós-pico indica que a degradação de resistência após a ruptura foi mínima. Tal comportamento é atípico para rejeitos que geralmente apresentam uma redução mais acentuada na resistência pós-pico devido à reorientação de partículas e perda de intertravamento. Este resultado sugere que o material em estudo possui características de baixa compressibilidade e que o intertravamento entre partículas é menos dependente da deformação, possivelmente devido a um maior teor de partículas angulares. Na literatura, rejeitos de mineração de ferro podem apresentar

grande variabilidade em suas propriedades mecânicas, dependendo do método de disposição e das condições geológicas da jazida. Para rejeitos mais densos, como é o caso deste estudo, os ângulos de atrito se mantêm mais próximos nos dois estados, o que favorece um comportamento mais estável em termos de redistribuição de esforços após a ruptura.

Para o último ensaio analisado, referente ao estado compacto do material, no qual o índice de vazios foi igual a 0,78, os resultados obtidos estão apresentados na Figura 20. Neste estado, o material apresenta uma compactação maior, o que resulta em um aumento significativo na resistência ao cisalhamento. Esse comportamento é esperado, já que a maior compactação implica na redução dos vazios entre as partículas, aumentando a coesão interna do material e, conseqüentemente, o seu comportamento de resistência.

Figura 19 - Resultado ensaio de cisalhamento direto para o estado compacto ($e=0,78$).



Fonte: Autora, 2024.

O gráfico mostra a relação entre a tensão efetiva normal e a tensão de cisalhamento, distinguindo os estados de pico e pós-pico. Os coeficientes angulares das retas indicam os ângulos de atrito interno (ϕ) associados a esses estados. O

estado de pico apresenta uma inclinação maior, refletindo maior resistência devido ao intertravamento inicial das partículas do rejeito. Já o estado pós-pico evidencia uma redução de resistência, típica de materiais particulados, associada à reorientação e desagregação das partículas após a mobilização máxima.

Rejeitos de mineração de ferro frequentemente possuem uma composição granular fina, com frações variáveis de argila, silte e areia. Este comportamento influencia diretamente os parâmetros geotécnicos observados. A redução do ângulo no estado pós-pico reflete o comportamento típico de materiais que perdem parte da resistência devido ao rearranjo das partículas e possível ruptura de pontes interpartículas.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto realizados em rejeitos de mineração de ferro demonstram um comportamento característico de materiais particulados com propriedades variáveis em função da granulometria, estado de compactação e condições de drenagem. A análise conjunta dos estados de pico e pós-pico evidencia parâmetros geotécnicos fundamentais que permitem avaliar a estabilidade de estruturas envolvendo esses rejeitos.

De modo geral, os coeficientes angulares das retas obtidos nos ensaios indicam ângulos de atrito interno (φ) variando na faixa de 30° a 35°, o que é compatível com a estimativa avaliada do CPTu para algumas camadas, o que reflete alterações de densidade no interior do depósito e também que está alinhado com valores reportados na literatura para rejeitos predominantemente arenosos ou silto-arenosos, com baixa a moderada plasticidade. Em rejeitos com maior teor de frações arenosas e partículas angulares, a resistência ao cisalhamento é frequentemente mais elevada, o que foi refletido nos valores observados. Essa característica é atribuída ao maior intertravamento das partículas e à menor suscetibilidade à deformação volumétrica durante o cisalhamento.

No caso de rejeitos ensaiados em estado mais fofo, observa-se na literatura uma maior diferença entre os estados de pico e pós-pico, devido à reorganização das partículas e à perda de intertravamento. Já em materiais mais densos, como sugerido pelos ensaios realizados, a diferença entre os estados de pico e pós-pico é menos pronunciada, indicando que o material mantém boa resistência residual após a mobilização máxima.

4.3. PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA COMPARATIVO COM DADOS DA LITERATURA

Com os resultados apresentados anteriormente, foi possível realizar uma comparação detalhada com os valores reportados na literatura especializada, já discutida nas seções anteriores deste trabalho. Esse comparativo evidenciou que os parâmetros determinados neste estudo, especialmente o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão (c), encontram-se, em sua maioria, dentro de intervalos típicos para rejeitos de mineração de ferro, destacados na literatura. Contudo é importante ressaltar que se obteve resultados fora do proposto na literatura, devido as condições do material estudado.

Na literatura, rejeitos de mineração geralmente apresentam valores de entre 28° e 36° para materiais arenosos com baixa fração de finos. Contudo, valores superiores a 40° podem ser atribuídos a condições específicas do depósito investigado, como compactação elevada, estado de tensão inicial ou características particulares da mineralogia local, pois tais condições podem modificar a interação entre as partículas. Por outro lado, valores significativamente inferiores a 20° são geralmente associados a zonas saturadas ou regiões com alta concentração de finos, onde a presença de água reduz a tensão efetiva e, conseqüentemente, diminui a resistência.

Já para a coesão, segundo o método Robertson e Cabal (2015), a coesão estimada para ambos os pontos é igual a 0. Esse resultado é coerente com a literatura para rejeitos predominantemente arenosos, que, em condições drenadas, não apresentam coesão aparente, já que o comportamento do material é dominado pelo atrito entre partículas. Os rejeitos de mineração, dependendo de sua composição (granulometria, presença de finos e saturação), apresentam predominantemente comportamento granular, com resistência ao cisalhamento controlada pelo ângulo de atrito e baixa coesão.

A Tabela 4 apresenta os índices de resistência ao cisalhamento obtidos por meio de ensaios laboratoriais conduzidos com amostras de rejeitos de mineração de ferro apresentados na literatura por diversos autores. Os resultados indicam variações significativas nos valores de resistência, que estão diretamente relacionadas às características granulométricas das partículas presentes no material. Rejeitos com granulometria predominantemente arenosa tendem a apresentar maiores valores de

ângulo de atrito (ϕ), refletindo a predominância de interações friccionais entre partículas.

Por outro lado, materiais com maior teor de finos, como siltes e argilas, frequentemente exibem valores de resistência ao cisalhamento mais baixos, em razão da menor contribuição das forças friccionais e maior influência de forças coesivas. Essa relação é amplamente documentada na literatura, sendo consistente com os estudos de Zhang et al. (2002) e outros trabalhos que abordam a influência da granulometria no comportamento mecânico de rejeitos.

Para avaliar a consistência dos resultados obtidos para o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão a partir dos ensaios CPTu, foi realizada uma análise comparativa entre os valores encontrados e dados disponíveis na literatura. Esta comparação utilizou como referência os resultados apresentados pela autora, confrontando-os com os valores previamente discutidos na Tabela 4, que sintetiza índices de resistência determinados por meio de ensaios laboratoriais.

Com base nos resultados obtidos na análise das metodologias aplicadas, foi elaborado um histograma para representar graficamente a distribuição dos valores de ângulo de atrito para cada estrutura e metodologia estudada. Essa abordagem possibilitou identificar as variações no ângulo de atrito ao longo das diferentes estruturas analisadas. Além disso, foi possível visualizar a frequência dos valores obtidos, facilitando a interpretação dos resultados em comparação com a literatura técnica.

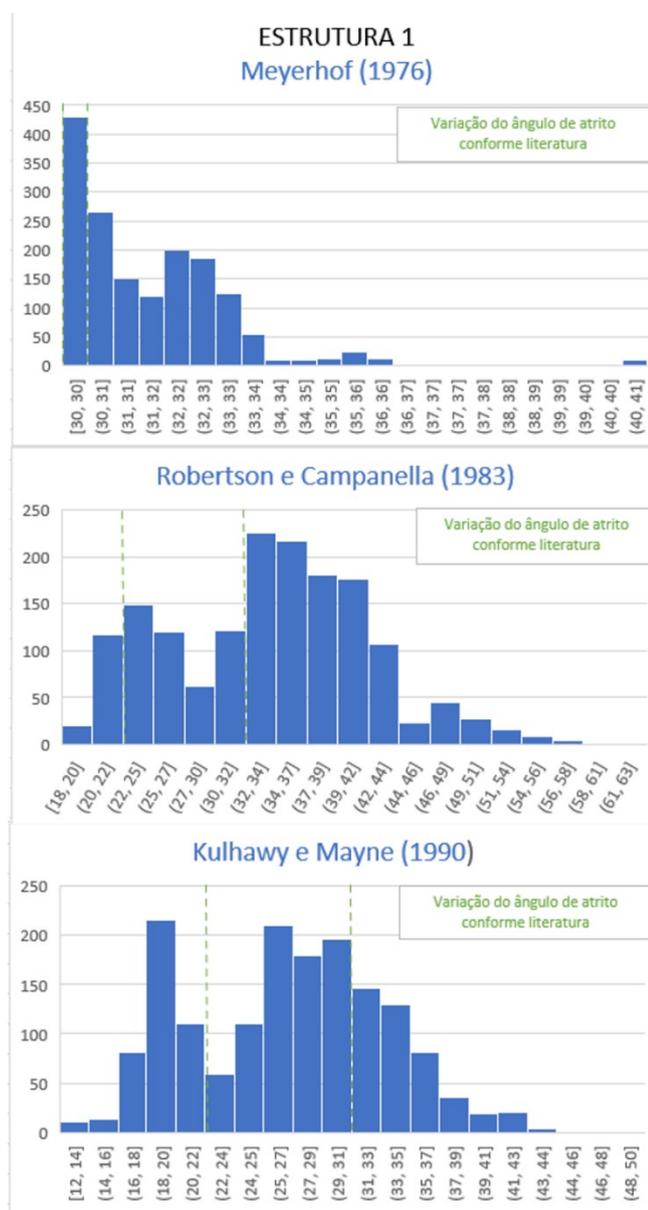
Para complementar a análise, foi traçada uma linha representando a variação média do ângulo de atrito mencionada em estudos de referência. A Figura 21 ilustra os resultados obtidos para a estrutura 1, destacando as tendências observadas no comportamento do material avaliado. Para entender se os valores encontrados pelas metodologias aplicadas, traçou-se uma linha que apresenta os valores médios para ângulo de atrito atribuídos na Tabela 4.

Com base nos resultados obtidos, foi possível avaliar qual metodologia apresentou maior aderência aos valores de ângulo de atrito descritos na literatura técnica. Para a estrutura 1, cujos resultados estão apresentados na Figura 21, observa-se que a metodologia de Kulhawy e Mayne (1990) foi a que melhor representou os dados, uma vez que a maioria dos valores encontrados esteve dentro do intervalo médio sugerido pela literatura. Na estrutura 2, mostrada na Figura 22, os

resultados também indicaram a superioridade da metodologia de Kulhawy e Mayne (1990).

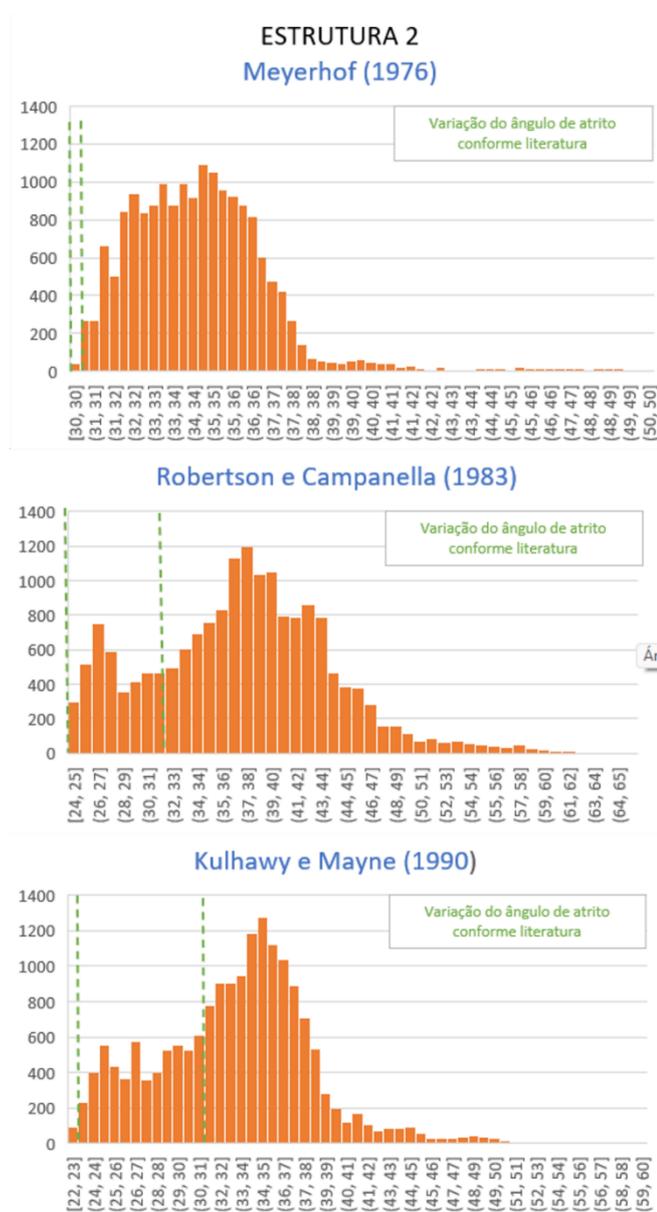
No entanto, nota-se que a maior parte dos valores encontrados se situou fora da média prevista na literatura. Essa discrepância pode ser atribuída a variações nas condições do terreno, que influenciam diretamente os parâmetros de resistência do material avaliado. Já para a estrutura 3, ilustrada na Figura 23, os resultados mostraram pouca correspondência com os valores médios da literatura, independentemente da metodologia aplicada. Essa divergência pode ser explicada pelo maior número de ensaios realizados nessa estrutura, além de condições particulares do terreno no momento da realização dos testes. Tais fatores podem ter contribuído para uma maior variabilidade nos resultados, refletindo as características naturais do material e do ambiente local.

Figura 20 - Variação do ângulo de atrito a partir das metodologias adotadas para a estrutura 1.



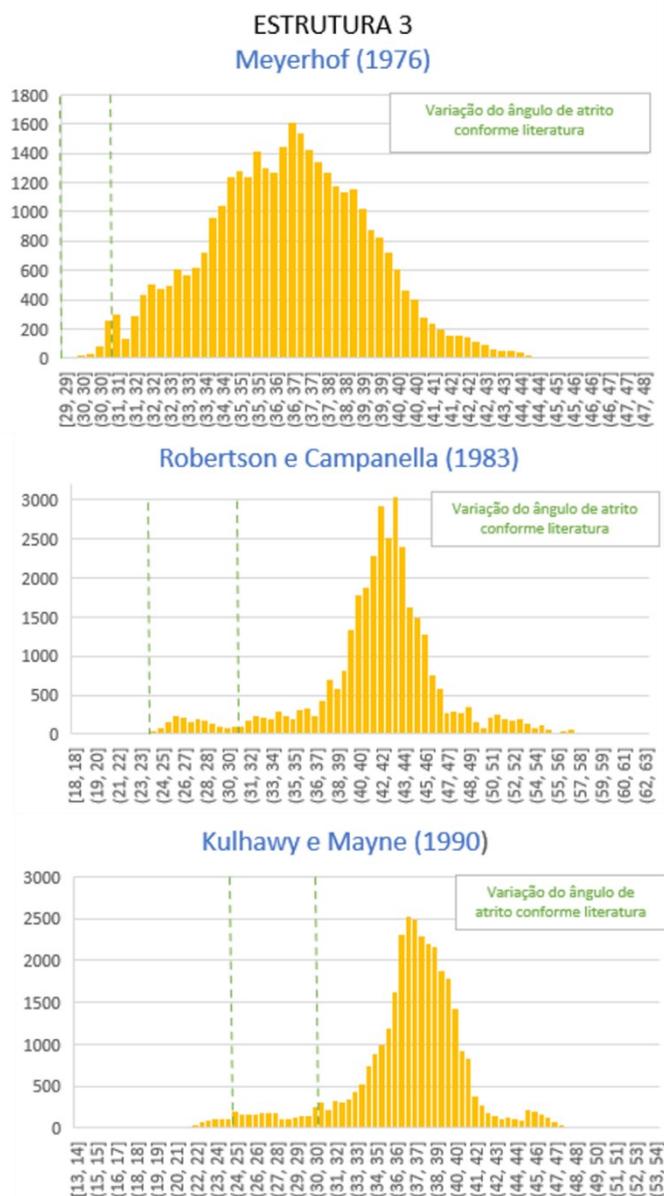
Fonte: Autora, 2024.

Figura 21 - Variação do ângulo de atrito a partir das metodologias adotadas para a estrutura 2.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 22 - Variação do ângulo de atrito a partir das metodologias adotadas para a estrutura 3.



Fonte: Autora, 2024.

A análise crítica dos dados obtidos permitiu uma avaliação detalhada da adequação de cada metodologia aplicada ao estudo dos rejeitos de mineração de ferro. Observou-se que a metodologia de Robertson e Campanella (1983) apresentou resultados inconsistentes em relação aos valores esperados na literatura. Essa discrepância é atribuída à limitação mencionada pelos próprios autores, que indicam que o método não seja aplicável a materiais de alta compressibilidade, como areias muito moles. Dada a natureza específica dos rejeitos de mineração de ferro,

caracterizados por comportamentos que diferem de solos naturais convencionais, concluiu-se que essa metodologia deve ser descartada para esse tipo de material.

Por outro lado, a metodologia de Kulhawy e Mayne (1990) demonstrou ser a mais adequada para o contexto do estudo. Os autores propõem correlações baseadas em dados de ensaios de campo de alta qualidade, o que resulta em valores mais precisos e condizentes com os parâmetros reportados na literatura técnica. A consistência dos resultados indica que essa abordagem é particularmente confiável para a avaliação de parâmetros de resistência ao cisalhamento em rejeitos de mineração.

A metodologia de Meyerhof (1976) também apresentou valores compatíveis com a literatura, evidenciando sua aplicabilidade. Contudo, a principal limitação desse método está no fato de considerar apenas um parâmetro do ensaio CPTu, o que pode introduzir incertezas e limitar a robustez das análises. Apesar disso, trata-se de uma alternativa válida, especialmente em situações onde o objetivo é obter uma estimativa preliminar dos parâmetros de resistência.

Dessa forma, conclui-se que, embora as três metodologias tenham seus méritos, o método de Kulhawy e Mayne (1990) se destaca como a opção mais precisa para a análise de rejeitos de mineração de ferro. Esse resultado reforça a importância de selecionar métodos apropriados às características específicas do material investigado e aos objetivos do estudo.

5. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento de rejeitos de mineração de ferro, especificamente o ângulo de atrito (φ) e a coesão (c), utilizando metodologias consagradas na literatura geotécnica. Para isso, foram analisados os dados obtidos por meio de ensaios de piezocone (CPTu), avaliando a aplicabilidade e consistência dessas metodologias na estimativa dos parâmetros de resistência.

Com essa abordagem visou-se verificar a adequação dos valores calculados em comparação com os apresentados na literatura e a partir de ensaios de cisalhamento direto, permitindo validar os métodos utilizados e explorar as vantagens dos ensaios de campo como uma alternativa mais ágil e eficiente aos ensaios laboratoriais tradicionais. Por serem menos dependentes de manipulações de amostras e de condições controladas de laboratório, os ensaios de campo oferecem uma solução prática para análises preliminares ou em grande escala.

Os resultados obtidos confirmaram que os ensaios CPTu são ferramentas eficazes na estimativa de parâmetros de resistência ao cisalhamento de rejeitos de mineração de ferro, como o ângulo de atrito e a coesão. A análise revelou que rejeitos granulares apresentam maiores ângulos de atrito, refletindo em maior resistência, enquanto os rejeitos mais finos exibem coesão ligeiramente superior, mas são mais suscetíveis à liquefação. Essa variabilidade está diretamente relacionada às características geotécnicas dos rejeitos, influenciadas pelo método de beneficiamento e deposição. A integração entre resultados de campo e dados da literatura demonstrou coerência, reforçando a confiabilidade das metodologias empregadas.

Além disso, o estudo destacou que o Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, com suas condições geológicas específicas, apresenta desafios únicos no manejo de rejeitos, exigindo um entendimento aprofundado das propriedades mecânicas e hidráulicas para evitar desastres associados a falhas de barragens. A utilização de ensaios CPTu, associados a métodos consagrados de interpretação, mostrou-se fundamental para a caracterização de rejeitos e para o planejamento de soluções geotécnicas mais robustas.

A partir disto pode se notar que duas metodologias descrevem bem o comportamento do rejeito de mineração de ferro, as metodologias de Robertson e Campanella (1983) e Kulhawy e Mayne (1990). No entanto, conclui-se que a

metodologia de Kulhawy e Mayne (1990) é a mais adequada para a interpretação do CPTu, pois se destaca pela maior precisão e consistência. Isso se deve ao fato de suas correlações serem fundamentadas diretamente em dados obtidos por ensaios de campo, resultando em valores mais representativos e amplamente documentados na literatura. Além disso, a pesquisa reforça que a integração de métodos de campo e de laboratório é essencial para aprimorar a segurança de barragens, reduzir riscos ambientais e promover uma gestão mais sustentável e responsável dos rejeitos.

REFERÊNCIAS

- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASTM D3441 (2016) **Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Testing of Soils**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- AYERS, P. D.; PERUMPRAL, J. V. **Moisture and density effect on cone index**. *Transactions of the ASAE*, v. 25, n. 5, p. 1169–1172, 1982.
- AZEVEDO, U.R. **Patrimônio geológico e geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**: potencial para a criação de um geoparque da UNESCO. 2007. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.
- BIAZON, T. **O Desastre Ambiental**. Cientistas analisam os impactos ambientais, entre os quais os resultantes da devastação de ecossistemas. *Jornal da Unicamp*. Set, 2018.
- CAPUTO, H. P. *Mecânica dos Solos e Suas Aplicações*. Rio de Janeiro: LTC, 6ª edição, vol. 1, 1996.
- BIAZON, L. C. **Comportamento geotécnico de rejeitos de mineração**. *Revista Brasileira de Geotecnia*, v. 48, n. 2, p. 215-228, 2018.
- BRANCO, P. M. **Dicionário de Mineralogia e Gemologia**. São Paulo, Oficina de textos. 2008.
- BRITO, Rosemary Cordeiro Tôrres. **Recuperação de área degradada por mineração a partir do uso de seu rejeito**. 2015. 72 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/23852>. Acesso em: 06 nov. 2024
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. V. 6.
- CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM)**. *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965 p.
- COSTA, Giovani Cecatto Lopes Ribeiro da. **Susceptibilidade à liquefação de rejeito de minério de ferro em barragens alteadas à montante considerando as condições de drenagem a partir de ensaios de piezocone sísmico**. 2023. 79 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 62, de 17 de dezembro de 2002. **Dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais.** 2002.

Das, MB (2010) **Princípio da Engenharia Geotécnica.** 7ª edição, Cengage Learning, Stamford.

DAVIES, M. P.; MARTIN, T. E. **Mining waste management and tailings dam design: Best practices for risk reduction.** Canadá: Geotechnical News, 2000.

FRACARO, T. P. **Análise do comportamento mecânico de rejeito de minério de ferro submetido a ativação alcalina pelo método "two parts".** 2022. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2022.

FIGUEREDO, M.M. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG.** 2007. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 100 p.

GONÇALVES, A. M.; SOUZA, J. R.; SANTOS, M. A. **Análise de estabilidade de taludes com rejeitos de ferro.** *Journal of Mining and Metallurgy*, v. 55, p. 120-132, 2019.

HEIDEMANN Marcelo. **Apostila de estabilidade de taludes.** Joinville, 2022.

HU, Y.; LI, H.; WANG, Y. **Estudo comparativo de rejeitos de ferro e cobre utilizando ensaios triaxiais.** *Geotechnical Engineering Journal*, v. 34, n. 4, p. 348-359, 2017.

IBRAM. **Informações e análises da economia mineral brasileira.** 6ª edição. 2011. Instituto Brasileiro de Mineração, disponível em <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001669.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e manejo de rejeitos da mineração.** Brasília: IBRAM, 2016. ISBN 978-85-61993-10-8.

KULHAWY, F. H.; MAYNE, P. W. **Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design.** Report EL-6800. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1990.

LAMINATUS. **Aplicação do rejeito.** Disponível em: <https://laminatus.com.br/aplicacao-do-rejeito/>. Acesso em: 07 nov. 2024.

LOZANO, Fernando Arturo Erazo. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica.** 2006. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas. **Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações.** 2.Ed. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990

p. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/522>. Acesso em: 15 mai. 2023.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Introdução ao tratamento de minérios**. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (orgs.). *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. v. 1, p. 3-18.

MACHADO, W.G.F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. 2007. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MAPA, P.S. **Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A.** (2006) Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

MARTIN, T. E.; MCROBERTS, E. J. **The design and operation of tailings dams: Stability and environmental considerations**. In: *Proceedings of Tailings and Mine Waste Conference 2002*. Colorado: A.A. Balkema, 2002.

MENDES, M. B. **Comportamento Geotécnico de uma Barragem de Rejeito Alteada para Montante**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MILONAS, J.G. **Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeito de minério de ferro em aterro hidráulico**. 2006. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

NIERWINSKI, H. P. **Caracterização e Comportamento Geomecânico de Rejeitos de Mineração**. 2019. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

OLIVEIRA, José; SILVA, Maria; SOUZA, Paulo. **Estudo sobre o beneficiamento de minério de ferro**. ResearchGate, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Fluxograma-exemplificando-o-beneficiamento-de-minerio-de-ferro_fig1_356997903. Acesso em: 19 set. 2024.

OLIVEIRA, P. A.; RAMOS, L. B. **Caracterização de rejeitos granulares: Análise em ensaios drenados**. *Geotecnia e Meio Ambiente*, v. 22, n. 3, p. 85-97, 2016.

PORTES, Andréa Mírian Costa. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2013. Orientadora: Terezinha de Jesus Espósito Barbosa.

QI, Q.; SEGO, D. **Análise geotécnica de rejeitos de mineração: Propriedades de resistência ao cisalhamento.** *Canadian Geotechnical Journal*, v. 38, n. 6, p. 1250-1262, 2001.

REZENDE, D. C.; LIMA, R. M.; FREITAS, F. F. **Comportamento mecânico de lama de rejeito de ferro: Resultados de ensaios UU.** *Soils and Rocks*, v. 42, p. 177-188, 2015.

RIBEIRO, Luís Fernando Martins; ALBUQUERQUE FILHO, Luiz Heleno. **Avaliação da densidade in situ de barragens de rejeitos com o penetrológico.** *REM: Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 57, n. 4, p. 277-283, out./dez. 2004. Disponível em: www.rem.com.br. Acesso em: 3 nov. 2024.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SCHJONNING, P. **Soil mechanical properties and soil compactibility.** *Soil and Tillage Research*, v. 19, n. 2-3, p. 105-128, 1991.

SILVA, P. S. J. **“Impactos ambientais causados por mineração.”** 2007. *Revista Espaço da Sophia*. Nº 08, mensal, Ano I.

SILVA, Julia da; ALVES, Barbara Jade; NIERWINSKI, Helena Paula; HEIDEMANN, Marcelo; BARBOSA, Amanda Silva. **Estudo de propriedades físicas e geomecânicas de um rejeito de mineração de ferro em estado fofo.** In: **XX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA**, 24-27 set. 2024, Balneário Camboriú. Anais [...]. Balneário Camboriú, 2024.

SOUZA PINTO, C. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** Terceira edição, Oficina de Textos, São Paulo, 2006.

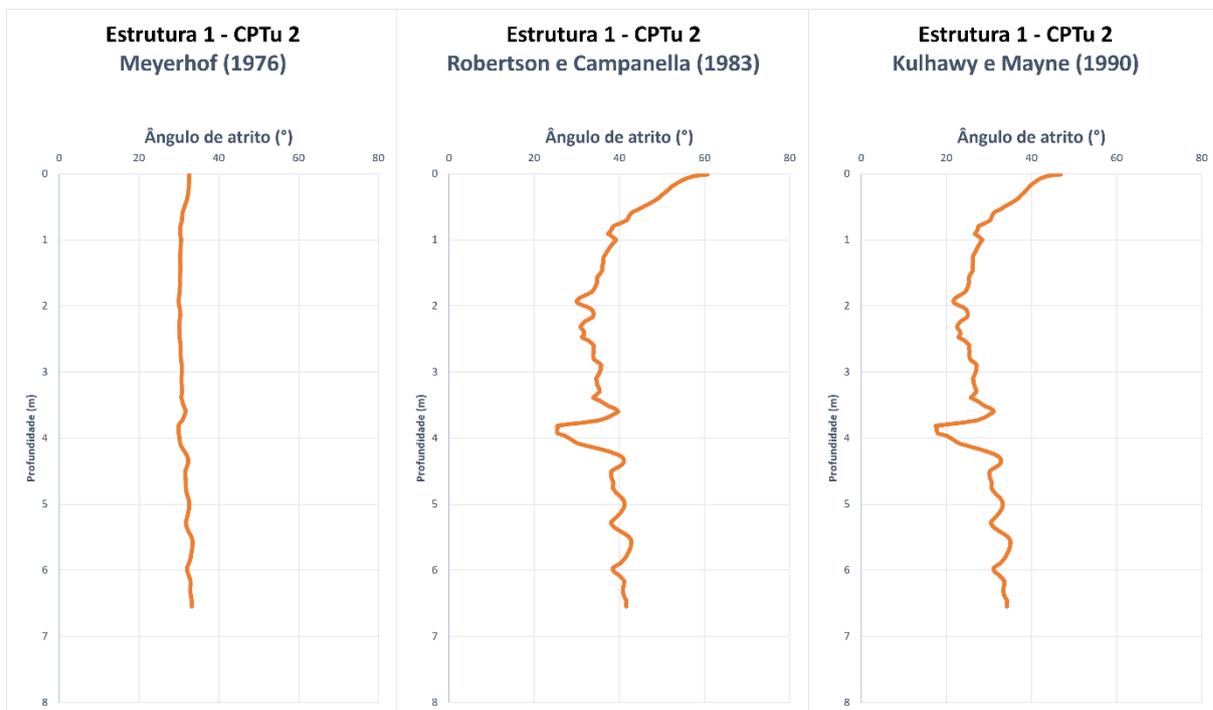
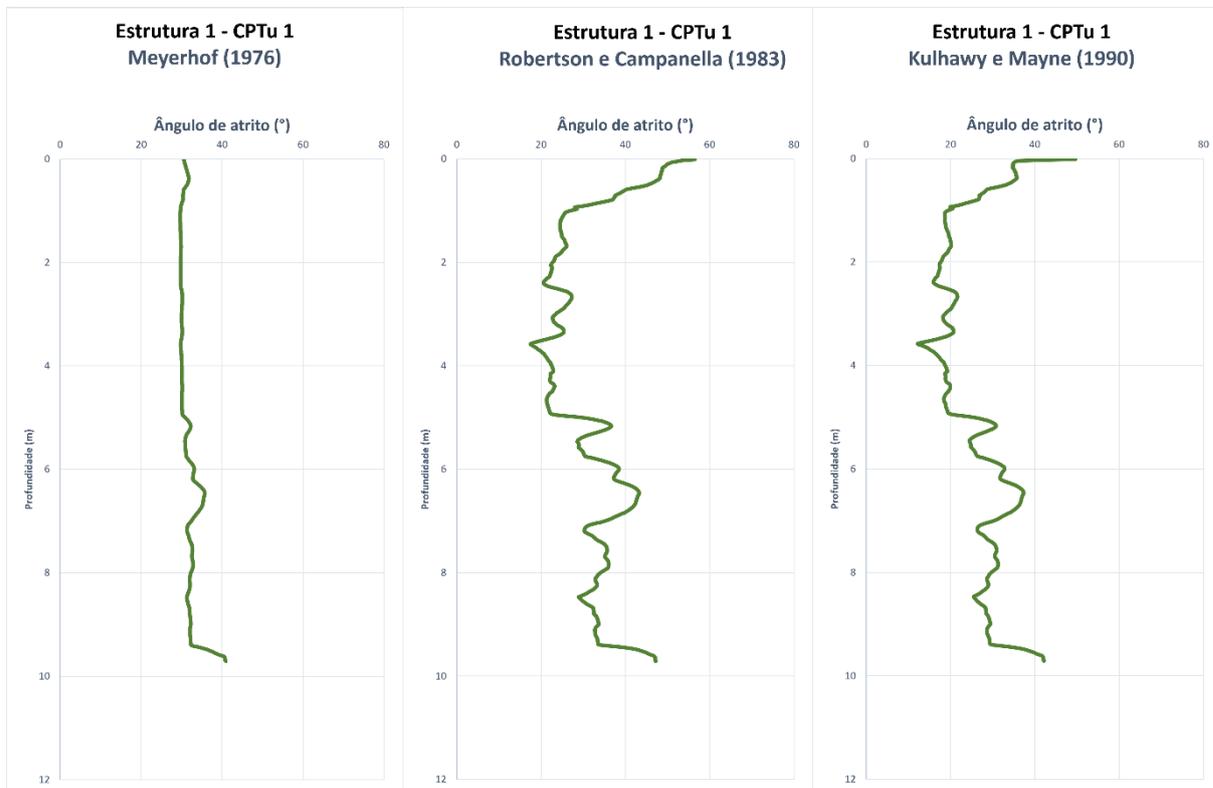
SOUZA, Carolina Vivian de. **Estudo das técnicas de disposição de rejeitos de mineração.** 2018. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2018.

TAKEHARA, L. **Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração Sinter Feed.** 2004 Tese de Doutorado. Instituto de Geociência, Programa de Pós-Graduação em Geociência, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

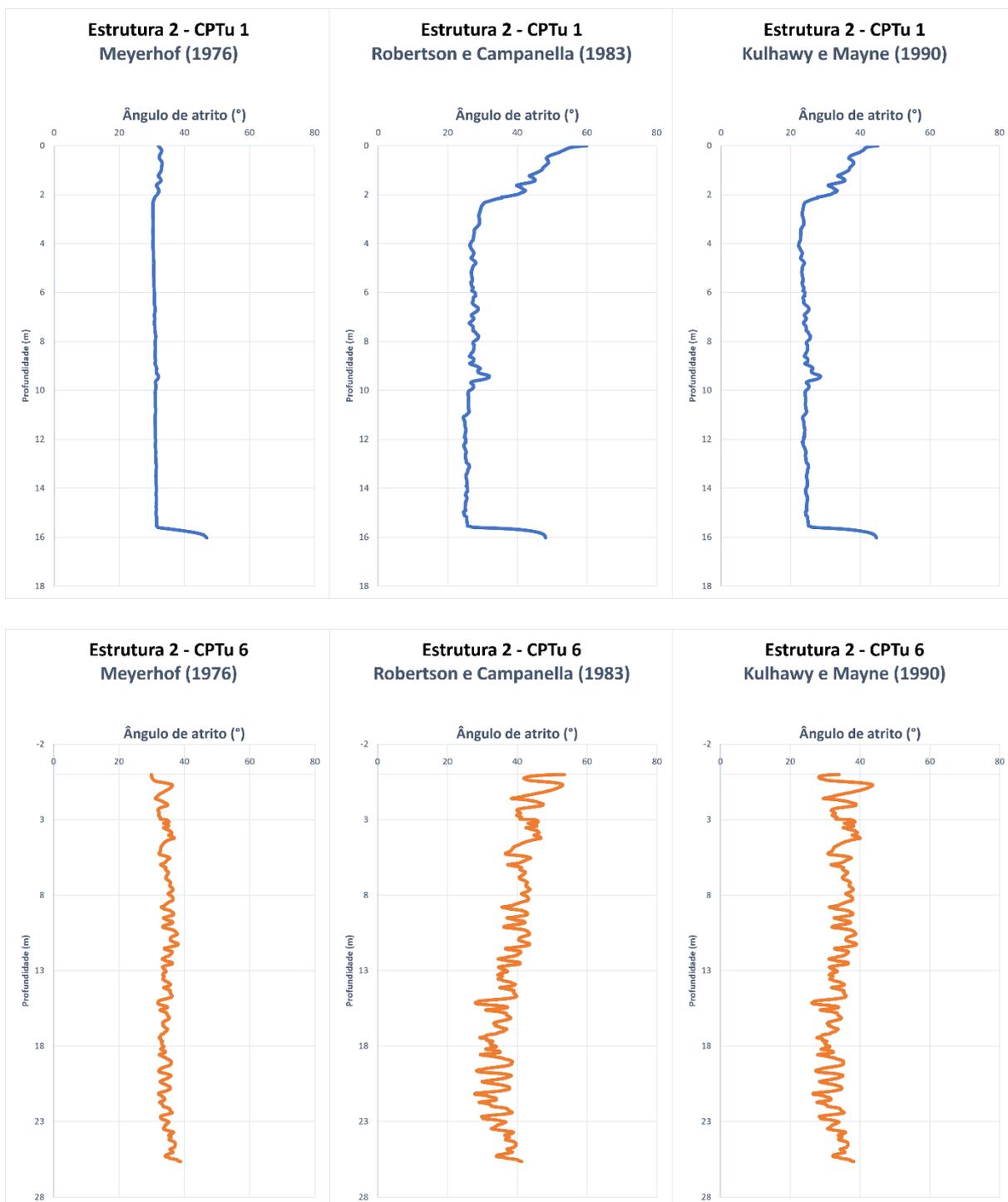
TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil Mechanics in Engineering Practice.** 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 1948.

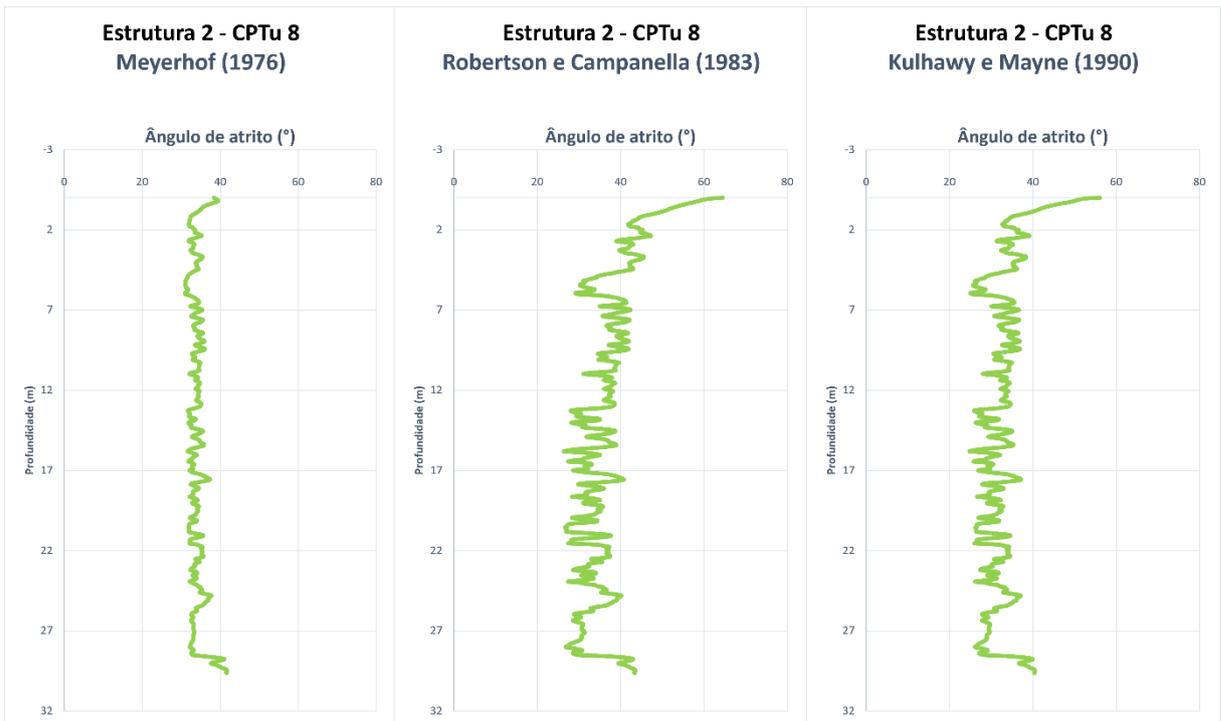
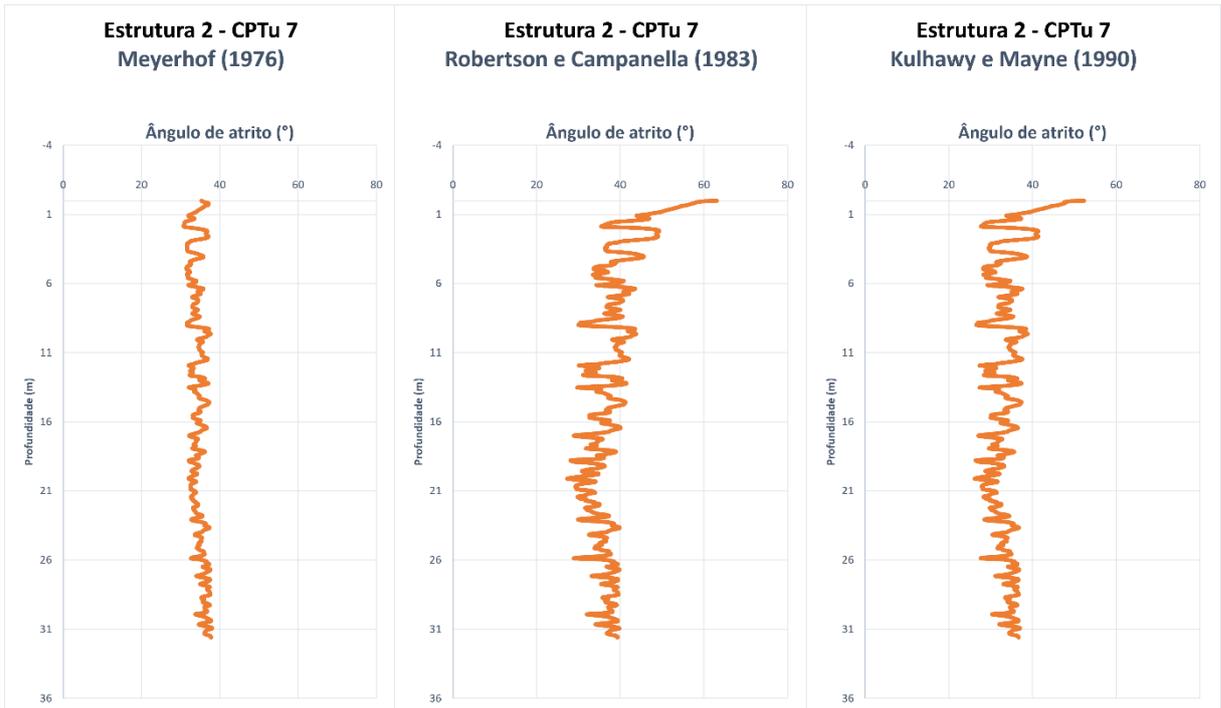
UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development. **The iron ore market: 2008-2010.** Genebra: United Nations Publication, 2009. 120p.

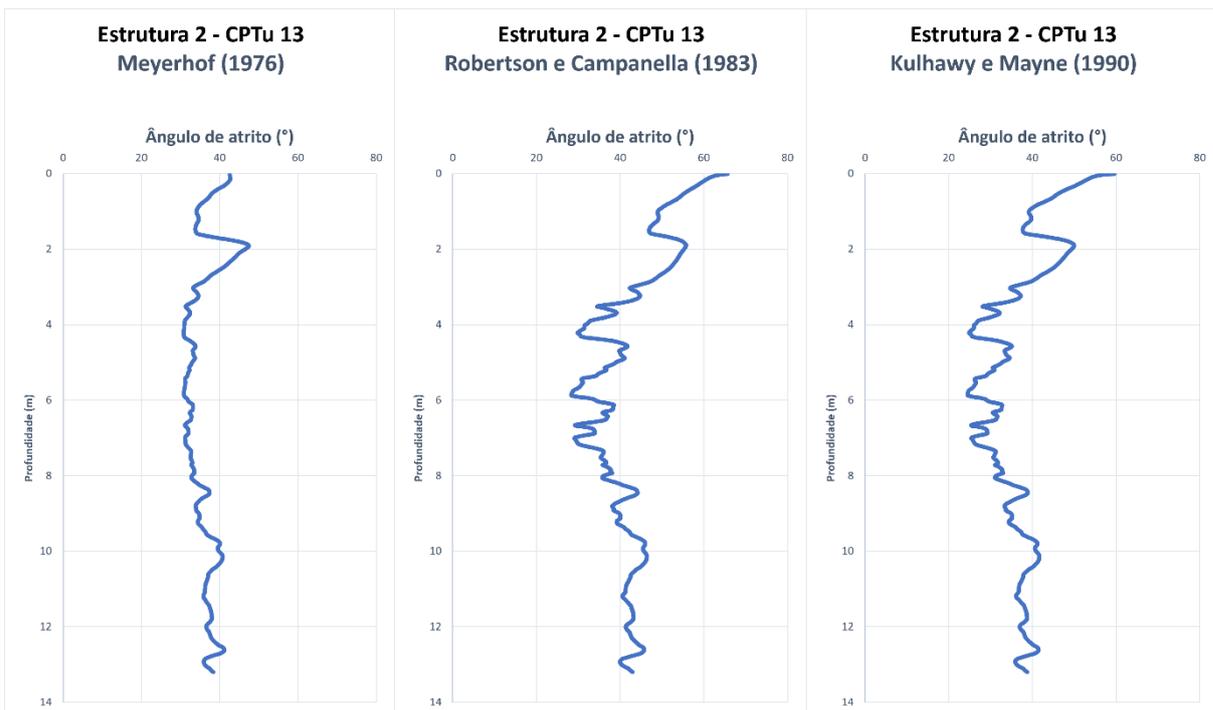
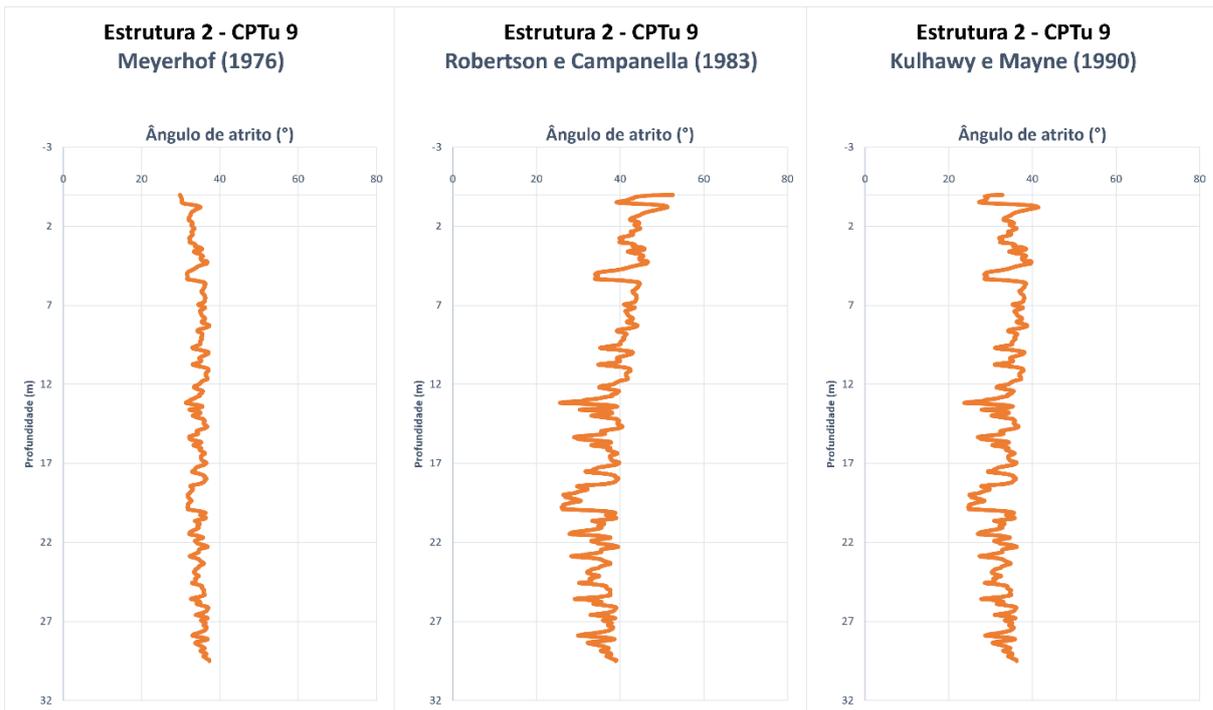
ANEXO A – Resultados das correlações entre ângulo de atrito x profundidade para a estrutura 1.

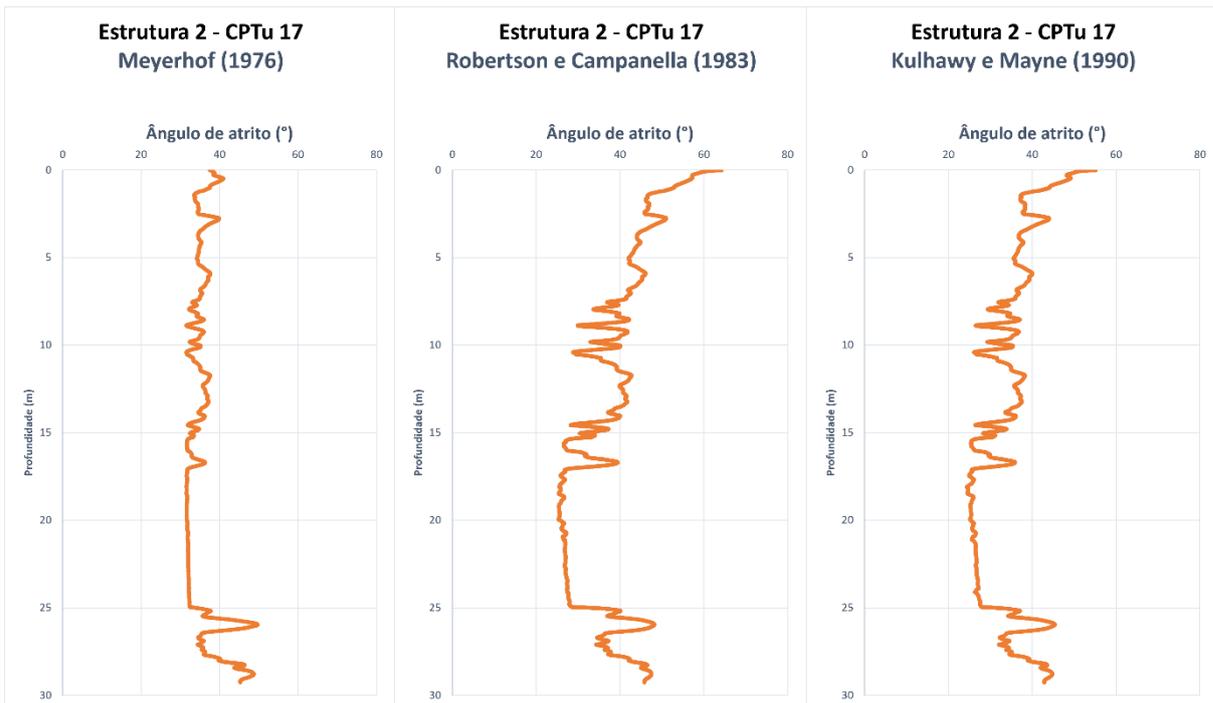


ANEXO B – Resultados das correlações entre ângulo de atrito x profundidade para a estrutura 2.

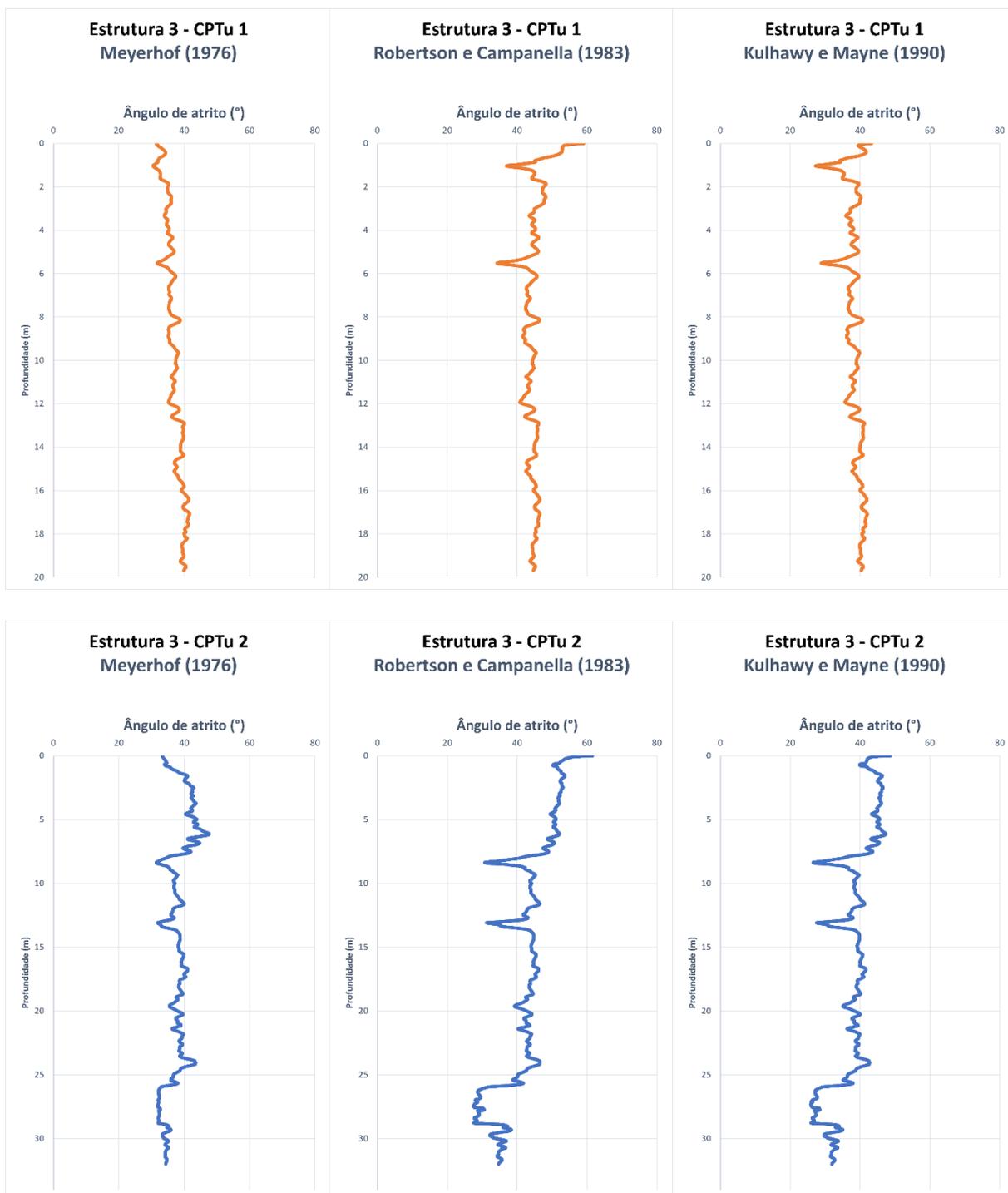


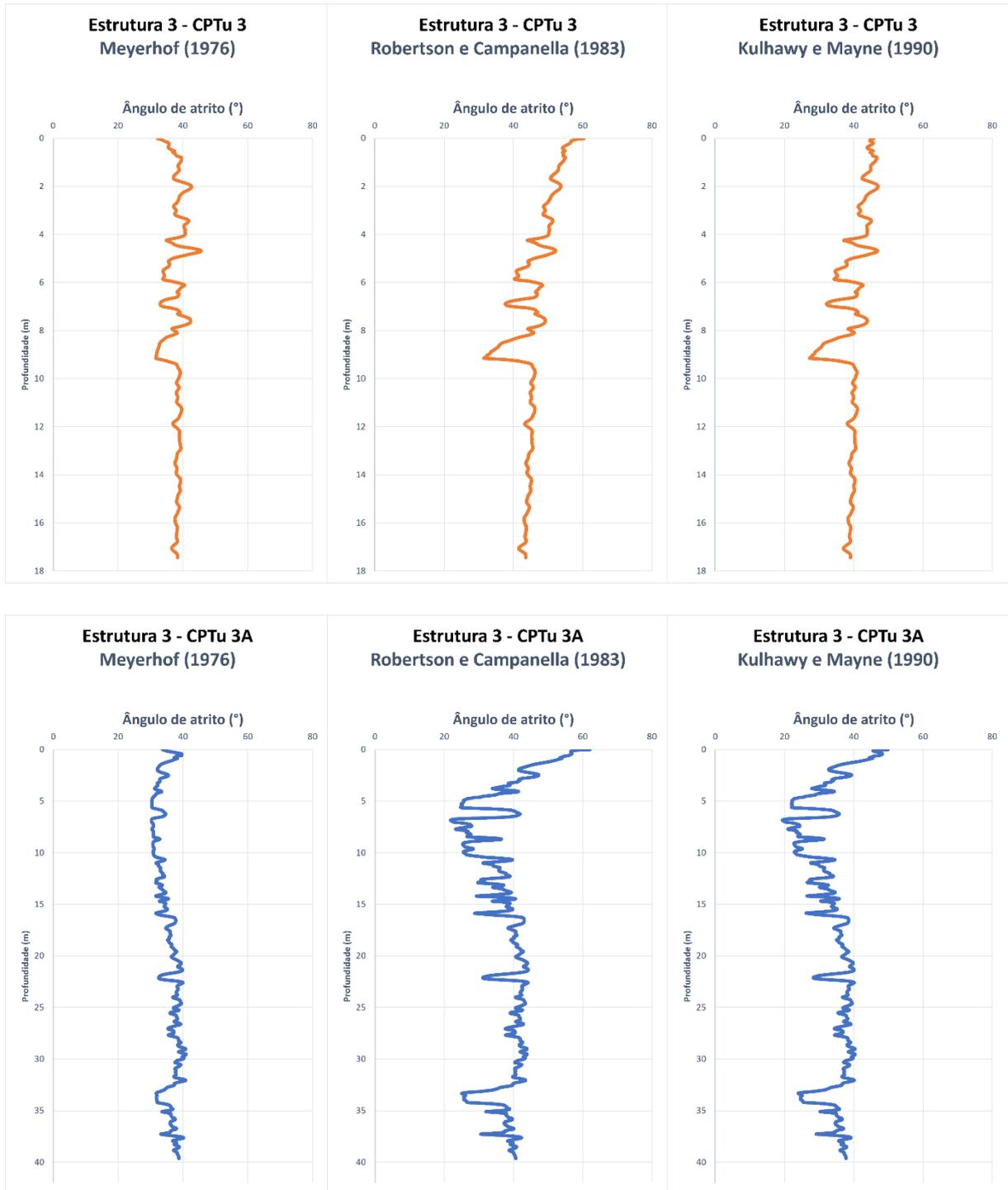


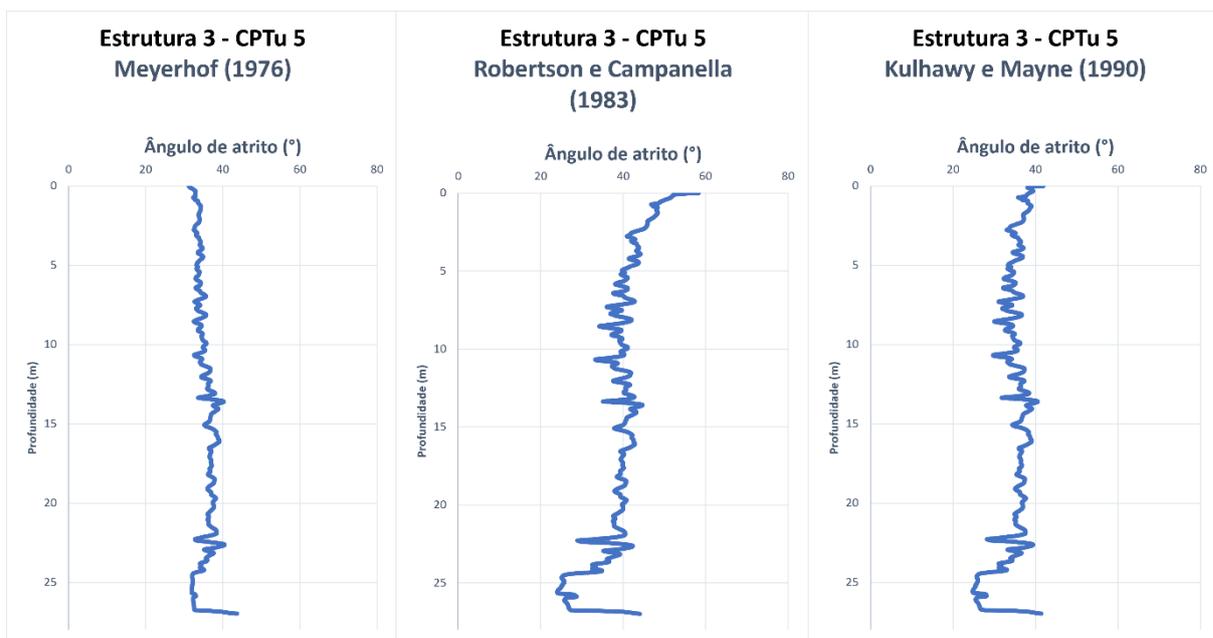
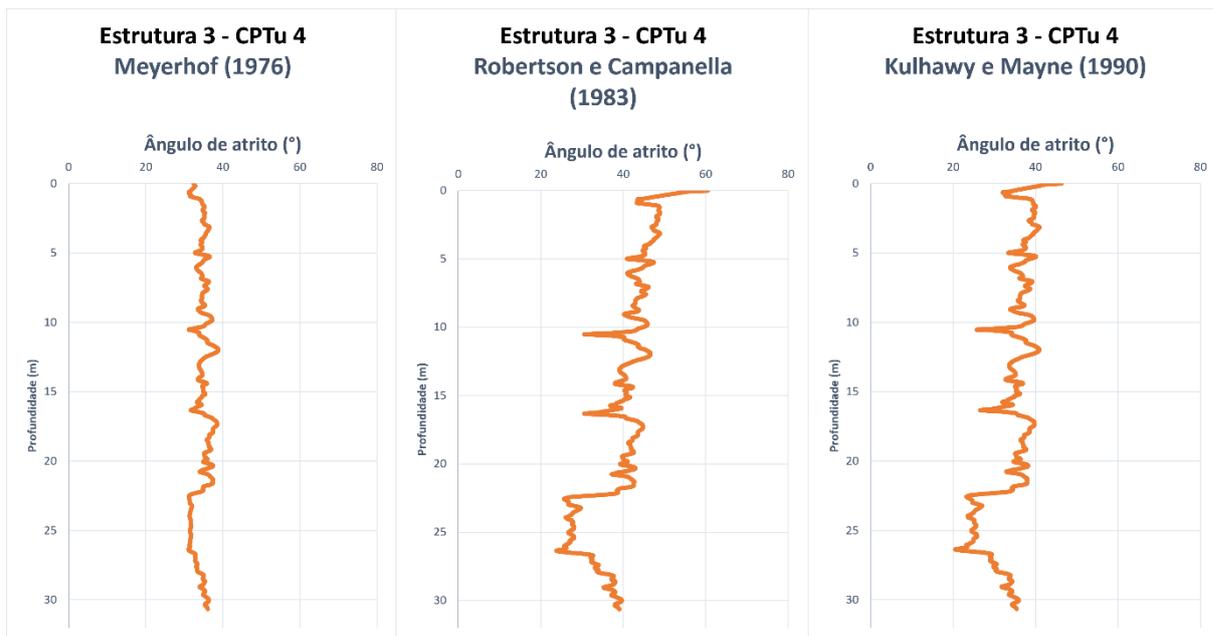


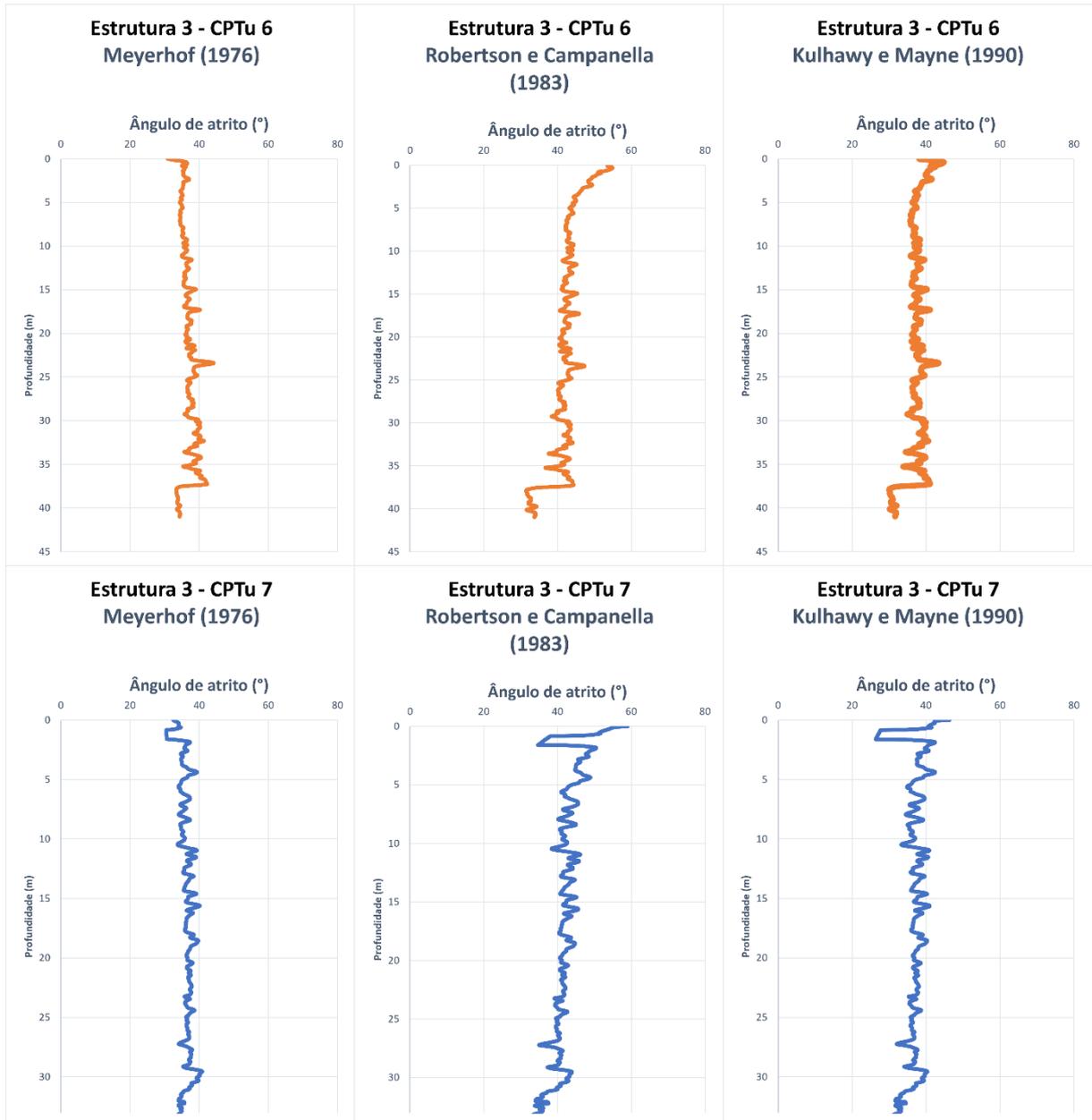


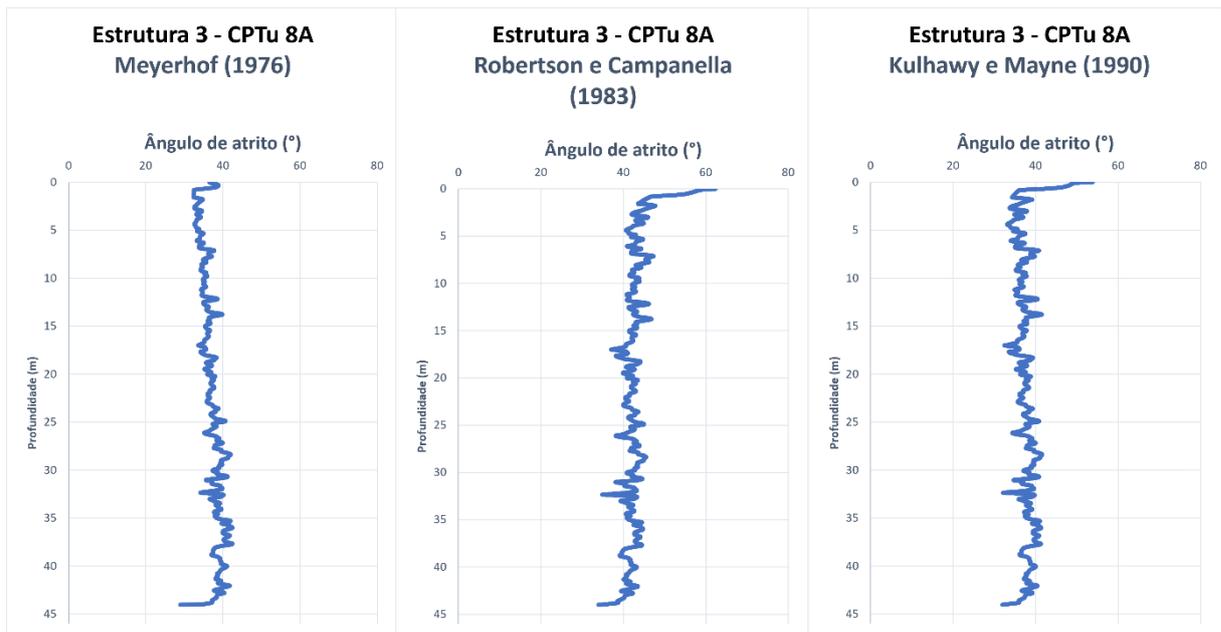
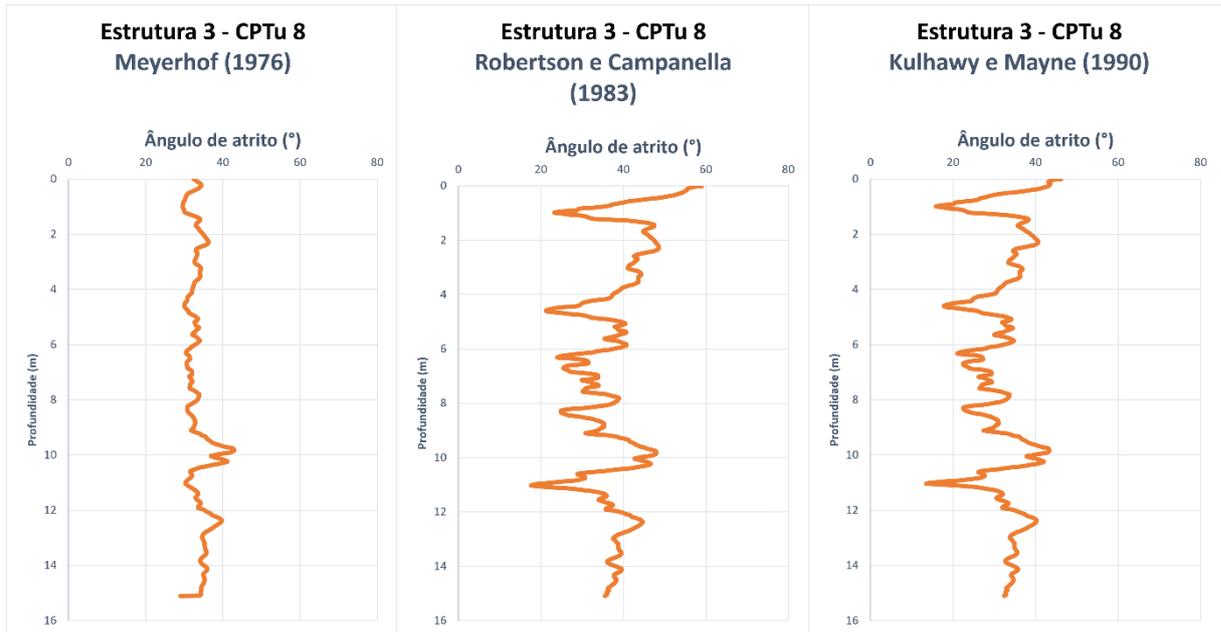
ANEXO C – Resultados das correlações entre ângulo de atrito x profundidade para a estrutura 3.

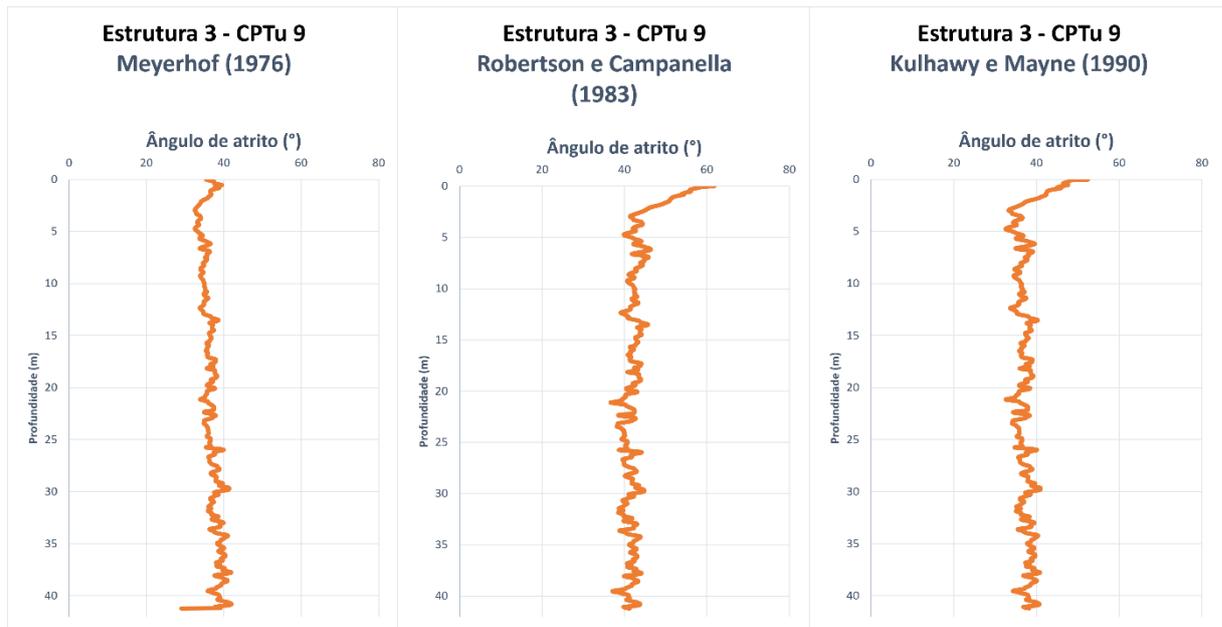












ANEXO D – Resultados dos gráficos Tensão x Deformação para as três amostras.

