

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO DE CO-  
DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO**

**GABRIEL GOMES SILVA**

**ORIENTADOR: RAFAEL CERQUEIRA SILVA  
COORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.TD-194/2024**

**BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2024**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO DE CO-  
DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO**

**GABRIEL GOMES SILVA**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO  
GRAU DE DOUTOR.**

**APROVADA POR:**

---

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**MAURICIO EHRLICH, PhD (COPPE/UFRJ)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

---

**JOSÉ OTÁVIO SERRÃO ELEUTÉRIO, DSc (UFMS)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2024**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, GABRIEL GOMES

**Análise do comportamento mecânico e hidráulico de co-disposição de resíduos de mineração** (Distrito Federal) 2024.

xviii, - 100., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2024) Tese de Doutorado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Palavras-chaves:

- |                  |                           |
|------------------|---------------------------|
| 1. Co-disposição | 2. Estéril                |
| 3. Rejeitos      | 4. Comportamento mecânico |
| I. ENC/FT/UnB    | II. Doutor                |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, G. G. (2024). **Análise do comportamento mecânico e hidráulico de co-disposição de resíduos de mineração**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-194/24. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 175 p.

## CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DO AUTOR: GABRIEL GOMES SILVA

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: **Análise do comportamento mecânico e hidráulico de co-disposição de resíduos de mineração**.

GRAU/ANO: Doutor/24.

Ensaio de Laboratório.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Gabriel Gomes Silva

Universidade Federal de Catalão, Departamento de Engenharia de Minas da Faculdade de Engenharia. Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 1120, Bloco O, Setor Universitário. CEP 75704-020. Catalão/Goiás – Brasil.

E-mail: gabriel\_gomes@ufcat.edu.br

## AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço imensamente à minha família pelo apoio incondicional, amor e dedicação ao longo da minha vida.

À Flávia de Castro, obrigado por estar sempre ao meu lado. Seu apoio foi a base para manter meu ânimo e determinação ao longo deste caminho.

Aos meus queridos amigos, pelas palavras de encorajamento e momentos de descontração. Vocês foram fontes de motivação durante os desafios enfrentados ao longo deste trabalho.

Aos amigos da Universidade de Queensland e amigos que fiz na Austrália, obrigado pela acolhida calorosa, troca de conhecimentos e momentos de diversão. Obrigado por serem uma parte tão especial da minha jornada. Espero manter essa amizade por toda minha vida.

Aos respeitados professores e amigos da Universidade Federal de Catalão, agradeço a dedicação em compartilhar seu conhecimento e experiência.

Ao professor José Otávio S. Eleutério, pelo apoio e contribuição em diversos momentos deste trabalho.

Aos professores da Universidade de Brasília, em especial ao professor Luís Fernando Martins Ribeiro e ao orientador Rafael Cerqueira Silva, minha profunda gratidão pelo ensino, motivação, inspiração, apoio inestimável e amizade sincera ao longo de todos esses anos.

Aos professores da Universidade de Queensland, em especial ao professor David Williams. Obrigado por toda a ajuda, receptividade, ensinamentos e orientação nesta etapa da minha vida.

Aos laboratórios, técnicos e parceiros pela colaboração e suporte: Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Catalão; Laboratórios de Geotecnia e Difractometria da Universidade de Brasília; Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura e Laboratório Multiusuário em Energias Renováveis da Universidade Federal de Uberlândia, e; Centro de Engenharia Geotécnica da Universidade de Queensland.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de estudos no doutorado Sanduíche.

A todos vocês, meu mais sincero obrigado por fazerem parte desta jornada e por tornarem este trabalho uma realidade.

## RESUMO

### ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO DE CO-DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO

A complexidade do comportamento de barragens de rejeitos de mineração, construídas pela técnica de disposição hidráulica, e as recorrentes rupturas dessas estruturas, destacam a importância de se garantir uma segurança aprimorada por meio de técnicas avançadas de disposição. Embora o método de co-disposição tenha sido explorado para diferentes substâncias minerais, como minério de ferro no Brasil, existe uma lacuna considerável na literatura quanto à sua aplicação em lamas, rejeitos e estéreis provenientes de operações de mineração de fosfato e outros minerais. O presente estudo concentrou-se na análise de amostras provenientes de três fontes distintas de mineração: uma mina de fosfato no Brasil, uma mina de carvão mineral e outra mina de fosfato, ambas localizadas na Austrália. Dentre os objetivos, buscou-se identificar a proporção ótima para as misturas entre estéril e rejeito, estéril e lama, e entre diferentes tipos de lamas, de modo a avaliar o comportamento mecânico e hidráulico em comparação com materiais individuais. Foram realizados ensaios abrangentes de caracterização física, química, microestrutural e mineralógica nas amostras da mineração no Brasil, enquanto que as demais amostras foram submetidas análises mais simplificadas. O comportamento mecânico foi avaliado por meio de análises dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto e triaxiais, enquanto que o comportamento hidráulico por ensaios de permeabilidade, sucção e ensaios em um consolidômetro de grande dimensão. Observou-se que a co-disposição de resíduos de mineração pode resultar em materiais com comportamento mecânico dominado pelos estéreis ou pelos materiais mais grosseiros, dependendo da proporção da mistura, sugerindo que a co-disposição pode ser uma estratégia eficaz para gestão de resíduos de mineração. Além disso, o comportamento hidráulico revelou uma alta capacidade de drenagem dos materiais, bem como uma dissipação dos excessos de poropressões ao longo do tempo. Adicionalmente, para reproduzir o comportamento tensão-deformação da co-disposição, calibrou-se o modelo constitutivo Norsand, tendo como referência os resultados dos ensaios triaxiais. Este estudo contribuiu com informações para otimizar as práticas de co-disposição de resíduos de mineração, abordando aspectos essenciais do comportamento mecânico e hidráulico em misturas de diferentes materiais, além de análises numéricas de calibração de modelos constitutivos.

## ABSTRACT

### ANALYSIS OF MECHANICAL AND HYDRAULIC BEHAVIOR IN CO-DISPOSAL OF MINING WASTE

The complexity of the behavior of mining tailings dams, constructed using the hydraulic deposition technique, and the recurring ruptures of these structures underscore the importance of ensuring enhanced safety through advanced disposal techniques. Although the co-disposal method has been explored for various mineral substances, such as iron ore in Brazil, there is a significant gap in the literature regarding its application to slimes, tailings, and waste rock originating from phosphate mining and other minerals. This study focused on the analysis of samples from three distinct mining sources: a phosphate mine in Brazil, a coal mine, and another phosphate mine, both located in Australia. The objectives included identifying the optimal proportion for mixtures of waste rock and tailings, waste rock and mud/slimes, and among different types of mud, in order to assess the mechanical and hydraulic behavior compared to individual materials. Comprehensive physical, chemical, microstructural, and mineralogical characterization tests were performed on the samples from the Brazilian mining, while the other samples underwent simplified analyses. Mechanical behavior was evaluated through direct shear and triaxial tests, while hydraulic behavior was assessed through permeability, suction, and tests in a large-scale consolidometer. The results indicated that the co-disposal of mining waste can result in materials with mechanical behavior dominated by waste rock or coarser materials, depending on the mixture proportion, suggesting that co-disposal can be an effective strategy for mining waste management. Additionally, hydraulic analyses revealed high drainage capacity of the materials, as well as dissipation of excess pore pressures over time. Furthermore, to replicate the stress-strain behavior of co-disposal, the Norsand constitutive model was calibrated using the results of triaxial tests as a reference. This study provided insights to optimize the practices of mining waste co-disposal, addressing crucial aspects of mechanical and hydraulic behavior in mixtures of different materials, as well as numerical analyses for constitutive model calibration.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS DA PESQUISA	4
1.2. JUSTIFICATIVA	5
1.3. ESTRUTURA DA TESE	6
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>7</b>
2.1. MINERAÇÃO E GERAÇÃO DE RESÍDUOS	7
2.2. TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL NA MINERAÇÃO	10
2.3. TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS NA MINERAÇÃO	11
2.4. CO-DISPOSIÇÃO E DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA DE REJEITOS E ESTÉREIS	16
2.5. MISTURA ENTRE REJEITOS E ESTÉREIS	20
2.6. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DA MISTURA DE ESTÉREIS E REJEITOS	26
2.7. MODELAGEM CONSTITUTIVA	33
2.8. MODELAGEM NUMÉRICA DE PILHAS DE CO-DISPOSIÇÃO	40
2.9. PESQUISAS SOBRE CO-DISPOSIÇÃO E MODELAGEM NUMÉRICA ENCONTRADOS NA LITERATURA	42
2.10. MINERAÇÃO DE FOSFATO E BENEFICIAMENTO DE ROCHA FOSFÁTICA	45
2.11. PILHAS DE DISPOSIÇÃO DE <i>SPOIL</i> DE CARVÃO MINERAL	49
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>55</b>
3.1. MISTURA DE REJEITOS E ESTÉREIS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO E PROCESSAMENTO DE FOSFATO DO BRASIL55	
3.1.1. <i>DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS</i>	55
3.1.2. <i>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA</i>	56
3.1.3. <i>CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL</i>	59
3.1.4. <i>RAZÃO ÓTIMA DA MISTURA</i>	61
3.1.5. <i>ANÁLISES MECÂNICAS</i>	62
3.1.6. <i>ANÁLISES HIDRÁULICAS</i>	68
3.1.7. <i>CALIBRAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS E MODELAGEM NUMÉRICA DE PILHAS DE CO-DISPOSIÇÃO DE REJEITOS E ESTÉREIS DE MINERAÇÃO</i>	70
3.2. MISTURA DE RESÍDUOS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DA AUSTRÁLIA	74
3.2.1. <i>DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DE UMA MINERADORA DE CARVÃO MINERAL NA AUSTRÁLIA</i>	74
3.2.2. <i>DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DE UMA MINERADORA DE FOSFATO AUSTRALIANA</i>	75
3.2.3. <i>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DA AUSTRÁLIA</i>	76
3.2.4. <i>RAZÃO ÓTIMA DA MISTURA DOS MATERIAIS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DA AUSTRÁLIA</i>	77
3.2.5. <i>ANÁLISES MECÂNICAS DOS MATERIAIS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DA AUSTRÁLIA</i>	78
3.2.6. <i>ANÁLISES HIDRÁULICAS DOS MATERIAIS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DA AUSTRÁLIA</i>	79
<b>4. RESULTADOS OBTIDOS</b>	<b>81</b>
4.1. CO-DISPOSIÇÃO DE REJEITOS E ESTÉREIS DA MINERAÇÃO E PROCESSAMENTO DE FOSFATO NO BRASIL	81
4.1.1. <i>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS (REJEITO E ESTÉRIL)</i>	81
4.1.2. <i>CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL (REJEITO E ESTÉRIL)</i>	84
4.1.3. <i>RAZÃO DA MISTURA (REJEITO E ESTÉRIL)</i>	93
4.1.4. <i>ENSAIO DE COMPACTAÇÃO – PROCTOR NORMAL</i>	99
4.1.5. <i>CISLHAMENTO DIRETO</i>	100
4.1.6. <i>ENSAIOS TRIAXIAIS</i>	109
4.1.7. <i>ENVOLTÓRIAS E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA</i>	114
4.1.8. <i>LINHA DE ESTADO CRÍTICO (LEC)</i>	117
4.1.9. <i>VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA</i>	119
4.1.10. <i>PARÂMETROS DO MODELO NORSAND NO ESTADO CRÍTICO (LEC).</i>	120

4.1.11. ENSAIO DE PERMEABILIDADE	124
4.1.12. ENSAIOS OEDOMÉTRICOS	125
4.1.13. ENSAIOS DE PAPEL FILTRO	127
4.1.14. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS DE MISTURAS REJEITOS E ESTÉREIS DE MINERAÇÃO	129
4.1.15. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CONSTRUÇÃO DE UMA PILHA DE CO-DISPOSIÇÃO DE ESTÉREIS E REJEITOS	134
4.2. CO-DISPOSIÇÃO DE ESTÉREIS E LAMAS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DE CARVÃO MINERAL DA AUSTRÁLIA.	140
4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE CARVÃO MINERAL	140
4.2.2. RAZÃO DA MISTURA PARA SPOIL e MUD DE CARVÃO MINERAL	142
4.2.3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SPOIL, MUD E MISTURAS	143
4.3. CO-DISPOSIÇÃO DE ESTÉREIS E LAMAS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DE FOSFATO DA AUSTRÁLIA.	157
4.3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (SHALE E SLIME)	157
4.3.2. RAZÃO DA MISTURA (SHALE E SLIME)	159
4.3.3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SHALE E SLIME E MISTURAS	160
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>164</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>169</b>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 – Classificação dos rejeitos quanto à granulometria.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 2.2 – Classificação dos tipos de disposição de rejeitos e estêreis de mineração dependendo do grau da mistura (adaptado de Wickland, 2006) .....</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 2.3 - Minerais de ganga típicos para os diferentes tipos de depósito de fosfato de origem ígnea.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 2.4 - Reagentes utilizados na flotação do fosfato no Brasil e no mundo. ....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 4.1– Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 4.2 - Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 4.3 – Resumo dos resultados da análise química realizada em 4 amostras. ....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 4.4– Resumo das propriedades das misturas. ....</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 4.5 - Resumo das condições iniciais dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto. ....</i>	<i>104</i>
<i>Tabela 4.6 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para os materiais não misturados e misturas (<math>R \approx 2,5</math>, <math>R \approx 3,0</math> com <math>w=15\%</math>).....</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 4.7 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para bilinearidade.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabela 4.8 - Resumo dos resultados dos ensaios triaxiais para os materiais isolados e mistura (<math>R_{ot} \approx 2,5</math> com <math>w=15\%</math>).....</i>	<i>114</i>
<i>Tabela 4.9 – Parâmetros de resistência dos ensaios triaxiais para os materiais não misturados e mistura. ....</i>	<i>116</i>
<i>Tabela 4.10 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto e ensaio triaxial.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabela 4.11 - Parâmetro de permeabilidade para os materiais isolados e mistura. ....</i>	<i>124</i>
<i>Tabela 4.12 - Parâmetro de adensamento oedométrico. ....</i>	<i>126</i>
<i>Tabela 4.13 - Parâmetro de ajuste das curvas de retenção de água pelo modelo de Van Genuchten.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabela 4.14 – Parâmetros do modelo constitutivo Norsand para misturas de rejeito e estéril. ....</i>	<i>134</i>
<i>Tabela 4.15 – Descrição das especificidades de cada cenário simulado.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabela 4.16 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização para as amostras de spoil e mud. ....</i>	<i>140</i>
<i>Tabela 4.17 – Resumo das considerações de ensaio de cisalhamento direto.....</i>	<i>144</i>
<i>Tabela 4.18– Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto dos materiais de carvão.....</i>	<i>149</i>
<i>Tabela 4.19 - Parâmetros de resistência dos materiais de carvão avaliando tensão cisalhante máxima.....</i>	<i>150</i>
<i>Tabela 4.20– Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto das lamas de carvão. ....</i>	<i>152</i>
<i>Tabela 4.21 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabela 4.22 – Distribuição granulométrica para as amostras de lama (slimes). ....</i>	<i>159</i>
<i>Tabela 4.23 – Limites de consistência para as amostras de lama (slimes). ....</i>	<i>159</i>
<i>Tabela 4.24– Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto dos resíduos de fosfato.....</i>	<i>162</i>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 - Etapa de extração mineral (adaptado de Lottermoser, 2010).</i>	8
<i>Figura 2.2 – Exemplo dos principais processos presentes no beneficiamento mineral (adaptado de Lottermoser, 2010).</i>	8
<i>Figura 2.3 – Consistência dos rejeitos, aspecto físico e tipos de depósito (adaptado de MEND, 2017).</i>	13
<i>Figura 2.4 - Comparação entre as diferentes formas de disposição de rejeito (adaptado de Davies, 2011).</i>	14
<i>Figura 2.5 - Processo de mistura e disposição de estéril e rejeitos na co-disposição (adaptado de FLSMIDTH, 2019).</i>	20
<i>Figura 2.6 – Modelo da estrutura de partículas de estéreis e rejeitos co-misturados para diferentes proporções de mistura, R (adaptado de Wickland et al., 2006b).</i>	22
<i>Figura 2.7 – Relação entre o ângulo de atrito efetivo (<math>\phi'</math>) e a razão de misturas R de rejeitos e estéreis de mineração, onde T são rejeitos puros e WR estéril puro (adaptado de Jehring, 2014).</i>	23
<i>Figura 2.8 – Comportamento típico de areias em ensaios triaxiais não-drenados monotônicos nos planos: a) <math>\epsilon_a</math>; b) <math>p'</math>; c) <math>p_w</math>; <math>\epsilon_a</math> (Kramer, 1996).</i>	27
<i>Figura 2.9 – Comportamento de areias fofas e compactas sob cisalhamento (Kramer, 1996).</i>	28
<i>Figura 2.10 - a) Linha de Estado Crítico; b) Linha de estado Permanente (Kramer, 1996).</i>	29
<i>Figura 2.11 - Representação tridimensional da Linha de Estado Permanente no espaço <math>e</math>; <math>\sigma'</math>; <math>\tau</math> e nos planos <math>\tau</math>; <math>\sigma'</math> e <math>e</math>; <math>\sigma'</math> (Kramer, 1996).</i>	30
<i>Figura 2.12 - Representação da Linha de Estado Crítico no espaço <math>p'</math>; <math>q</math>; <math>e</math> e nos planos bidimensionais (adaptado de Carneiro, 2021).</i>	30
<i>Figura 2.13 - Definição do parâmetro de estado <math>\psi</math> (Guillén, 2008)</i>	32
<i>Figura 2.14 - Dilatância absoluta e taxa de dilatação (adaptado de Jefferies &amp; Been, 2016).</i>	35
<i>Figura 2.15 - Ilustração da dilatância e componentes de ângulo de atrito (adaptado de Jefferies &amp; Been, 2016).</i>	36
<i>Figura 2.16 - Relação tensão-dilatância em areia compacta drenada (adaptado de Shuttle &amp; Jefferies, 2010).</i>	37
<i>Figura 2.17 - Dados experimentais para relação entre pico de resistência e pico de dilatância para areia Erksak em compressão e extensão triaxial (adaptado de Jefferies &amp; Been, 2016).</i>	37
<i>Figura 2.18 - Derivação do parâmetro <math>\chi</math> para areias selecionadas de diferentes localizações (adaptado de Jefferies &amp; Been, 2016).</i>	38
<i>Figura 2.19 - Fundamentos da escavação do carvão mineral e disposição do spoil com uso de draglines (adaptado de Humphrey, 1984).</i>	50
<i>Figura 2.20 - Operação típica de dragline na cava, mostrando as características do perfil de inclinação da pilha de estéril ou pilha de spoil (Simmons &amp; Yarkosky, 2017).</i>	51
<i>Figura 2.21 – Ilustração do método operacional sidecast para draglines (adaptado de Simmons &amp; Yarkosky, 2017)</i>	52
<i>Figura 2.22 - Seção esquemática da estrutura formada no estéril depositado por dragline mostrando a superfície freática potencial e a zonagem típica do material (adaptado de Simmons, &amp; Mcmanus, 2004).</i>	53
<i>Figura 2.23 - Instabilidade do talude da pilha de spoil devido a deposição sobre material de base de baixa resistência mecânica (Simmons &amp; Yarkosky, 2017).</i>	54
<i>Figura 3.1 - Amostras de: a) rejeito, e; b) estéril.</i>	55
<i>Figura 3.2 - Ensaios de massa específica utilizando: a) balões volumétricos; b) analisador automático (pentapicnômetro).</i>	57
<i>Figura 3.3 - Ensaios de limites de consistência: a) limite de liquidez; b) limite de plasticidade.</i>	57
<i>Figura 3.4 – Ensaio de peneiramento. a) conjunto de peneiras sobre agitador eletromecânico; b) frações granulométricas de estéril, e; c) frações granulométricas de rejeito.</i>	58
<i>Figura 3.5 – Caracterização microestrutural com uso de microscópio eletrônico de varredura.</i>	59
<i>Figura 3.6 - Impregnação das amostras com ouro.</i>	60
<i>Figura 3.7 - Análises químicas por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X.</i>	60
<i>Figura 3.8 – a) preparação das amostras de rejeitos e estéril; b) fusão das amostras em pastilhas.</i>	61
<i>Figura 3.9 - Exemplo de misturas com <math>R_{ot} = 2</math> e <math>R_{ot} = 2,5</math>.</i>	62

Figura 3.10 – Equipamento de cisalhamento direto para grandes deslocamentos.	64
Figura 3.11 – Equipamento Triaxial.	64
Figura 3.12 – Critérios de ruptura para diferentes formatos de curvas de tensão cisalhante versus deformação horizontal (Pereira, 2013).	66
Figura 3.13 – Equipamento de adensamento unidimensional.	67
Figura 3.14 – Moldagem e preparação dos corpos de prova para o ensaio de papel filtro: a) tubos PVC; b) compactação; c) corpo de prova compactado; d) inserção de papel filtro duplo no topo e base; e) selagem com plástico filme; f) recobrimento com papel alumínio e identificação.	69
Figura 3.15 – Modelo geométrico e condições iniciais da etapa de consolidação para modelagem numérica do ensaio triaxial.	71
Figura 3.16 - Modelo geométrico e condições iniciais da etapa de cisalhamento para modelagem numérica do ensaio triaxial.	71
Figura 3.17 - Detalhes da geometria da pilha hipotética de co-disposição e condições de contorno.	73
Figura 3.18 – Amostras de resíduos de carvão: a) Spoil; b) Mud01; c) Mud02.	74
Figura 3.19 – Amostras de resíduos de fosfato: a) Slimes; b) Shale.	75
Figura 3.20 - Gas Pycnometer	77
Figure 3.21 – Consolidômetro de rejeitos de grandes dimensões.	79
Figura 4.1 – Análise granulométrica.	83
Figura 4.2 – Microscopia eletrônica de varredura no rejeito: a) aumento de 50x; b) aumento de 300x; c) aumento de 500x; d) aumento de 700x.	86
Figura 4.3 – Microscopia eletrônica de varredura no estéril: a) aumento de 50x; b) aumento de 300x; c) aumento de 6500x.	87
Figura 4.4 – Composição química por EDS obtida no mapeamento da imagem do MEV aumentada 50x para o rejeito.	87
Figura 4.5 – Seleção dos locais de mapeamento dos elementos químicos do rejeito com EDS: a) e b) imagem aumentada de 500x no MEV; c) e d) imagem aumentada 700x.	88
Figura 4.6 - Composição química por EDS obtida para os 5 pontos mapeados da imagem do MEV aumentada 500x para o rejeito.	89
Figura 4.7 - Composição química por EDS obtida no mapeamento da imagem do MEV aumentada 50x para o estéril.	89
Figura 4.8 – Seleção dos locais de mapeamento dos elementos químicos do estéril com EDS (imagem aumentada de 300x no MEV).	90
Figura 4.9 – Composição química por EDS obtida no mapeamento da imagem do MEV aumentada 300x para o estéril.	90
Figura 4.10 – Resultados das análises FRX nas amostras de rejeito.	91
Figura 4.11 – Resultados das análises FRX nas amostras de estéril.	91
Figura 4.12 – Resultados das análises DRX nas amostras de rejeito.	92
Figura 4.13 – Resultados das análises DRX nas amostras de estéril.	93
Figura 4.14 – Proporção em massa vs razão da mistura (R).	94
Figura 4.15 – Proporção em volume vs razão da mistura (R).	95
Figura 4.16 – Propriedade geotécnica vs razão da mistura (R).	96
Figura 4.17 – Razão da mistura ótima ( $R_{ot}$ ) vs teor de sólidos na polpa de rejeitos.	97
Figura 4.18 – Distribuição granulométrica teórica para as misturas de rejeitos e estéril.	99
Figura 4.19 – Curva de compactação do rejeito, estéril e mistura com $R_{ot} = 3,0$ .	100
Figura 4.20 – Corpos de prova cisalhados: a) Estéril; b) Rejeito; c) Mistura com $R_{ot} \approx 2,0$ ; d) Mistura com $R_{ot} \approx 2,5$ ; e) Mistura com $R_{ot} \approx 3,0$ e umidade de 15%; f) Mistura com $R \approx 3,0$ e umidade de 16,5%.	101
Figura 4.21 – Relações entre deformação horizontal e tensões cisalhantes no cisalhamento direto dos materiais isolados e misturas ( $R_{ot} \approx 2,0$ , $R_{ot} \approx 2,5$ , $R_{ot} \approx 3,0$ com $w=16,5\%$ , $R \approx 3,0$ com $w=15\%$ ).	102
Figura 4.22 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto dos materiais não misturados e das misturas realizadas com estéril com $e_{max} = 1,45$ ( $R \approx 2,5$ , $R \approx 3,0$ com $w = 15\%$ ).	105
Figura 4.23 – Ensaio de cisalhamento direto na condição inundada (50, 100 e 200 kPa) para: a) os rejeitos; b) os estéreis.	107

Figura 4.24 – Envoltórias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para os materiais não misturados e misturas ( $R \approx 2,5$ , $R \approx 3,0$ com $w=15\%$ ).	107
Figura 4.25 - Corpos de prova e moldagem para ensaios triaxiais: a) Estéril; b) Mistura com $R \approx 2,5$ ; c) Rejeito; d) Moldagem por compactação estática usando Prensa CBR/Marshall.	110
Figura 4.26 – Relações de tensão desviatória e o excesso de poropressão em relação à deformação axial dos materiais isolados e misturas para ensaio CU ( $R \approx 2,5$ com $w=15\%$ ).	111
Figura 4.27 - Relações de tensão desviatória e variação volumétrica em relação à deformação axial dos materiais isolados e misturas para ensaio CD ( $R \approx 2,5$ com $w=15\%$ ).	112
Figura 4.28 – Corpos de prova cisalhados: a) estéril CD; b) rejeito CD; c) estéril CU; d) rejeito CU.	113
Figura 4.29 - Trajetórias de tensão dos ensaios do tipo CD e CU - envoltórias tipo $q;p'$ .	115
Figura 4.30 – Envoltórias de resistência dos ensaios triaxiais para os materiais isolados e mistura ( $R_{ot} \approx 2,5$ com $w=15\%$ ).	116
Figura 4.31 - Trajetórias de tensão no estado crítico para os ensaios do tipo CD e CU - envoltórias tipo $q;p'$ .	118
Figura 4.32 – Projeção da Linha de Estados Críticos no plano $e;p'$ .	121
Figura 4.33 - Dilatação máxima ( $D_{min}$ ) em função do Parâmetro de Estado ( $\psi$ ).	122
Figura 4.34 – Razão de Tensões ( $\eta_{max}$ ) em função da Dilatância Máxima ( $D_{min}$ ).	122
Figura 4.35 – Parâmetro de Endurecimento ( $H$ ) em função do Parâmetro de Estado ( $\psi$ ).	123
Figura 4.36 – Módulo de Cisalhamento Elástico ( $G_{max}$ ) e função da Tensão Efetiva ( $p'$ ).	124
Figura 4.37 – Curva de adensamento unidimensional para os materiais isolados e mistura ( $R \approx 2,5$ com $w=15\%$ ).	126
Figura 4.38 - Curva característica de retenção de água no rejeito.	127
Figura 4.39 – Curva característica de retenção de água no estéril e mistura com $R=2,5$ e umidade de 15%.	128
Figura 4.40 – Curva característica de retenção de água para todos os materiais.	129
Figura 4.41 – Calibração dos resultados dos ensaios triaxiais CD ao modelo Norsand.	130
Figura 4.42 – Calibração dos resultados de Trajetória de Tensões experimentais CD ao modelo Norsand.	131
Figura 4.43 – Calibração dos resultados dos ensaios triaxiais CU ao modelo Norsand.	132
Figura 4.44 - Calibração dos resultados de Trajetória de Tensões experimentais CU ao modelo Norsand.	133
Figura 4.45 – Cenário 01, considerando uma taxa de alteamento de 155 cm/dia.	135
Figura 4.46 – Modelo de pilha de co-disposição para: a) Cenário 02 (taxa de alteamento de 10 cm/dia); b) Cenário 03 (taxa de alteamento de 5 cm/dia), e; c) Cenário 04 (taxa de alteamento de 2,5 cm/dia).	136
Figura 4.47 – Resultados das poropressões obtidas para os cenários simulados: a) Cenário 01, 02, 03, 04; b) Cenário 01.	137
Figura 4.48 – Análise de estabilidade por Equilíbrio Limite (Morgenstern-Price).	138
Figura 4.49 - Análise de estabilidade pelo método Cuckoo Search.	139
Figure 4.50 – Distribuição granulométrica para os materiais não misturados e curvas teóricas das misturas com diferentes razões em massa seca (à seco e após inundado por 24h).	141
Figure 4.51 – Distribuição granulométrica para o mud01, mud02 e spoil considerando peneiramento após inundado em água por 24h.	142
Figura 4.52 – Razão da mistura ótima ( $R_{ot}$ ) vs teor de sólidos nas lamas de carvão.	143
Figura 4.53 – Amostras cisalhadas de resíduos de carvão: a) Mud01; b) Spoil; c) Mistura 4:1.	144
Figura 4.54 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto dos materiais isolados e das misturas realizadas de resíduos de carvão.	145
Figura 4.55 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizadas na lama (mud01) de carvão com diferentes dimensões da caixa de cisalhamento.	147
Figura 4.56 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizadas nas misturas 4:1 na umidade natural dos materiais de carvão e com 80% de teor de umidade (razão ótima).	148
Figura 4.57 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para os materiais isolados e misturas dos materiais de carvão.	149
Figura 4.58 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizadas para os materiais isolados e misturas entre lamas de carvão.	151
Figura 4.59 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para os materiais isolados e misturas das lamas de carvão.	152

<i>Figura 4.60 – Resultados do ensaio de adensamento para misturas de 4:1 na razão ótima no consolidômetro de lama em larga escala - tensões, poropressão e consolidação.</i>	153
<i>Figura 4.61 – Ampliação das curvas de excesso de poropressão da mistura de 4:1 na razão ótima.</i>	154
<i>Figure 4.62 – Condutividade hidráulica para a mistura com <math>R_{ot} = 4</math>.</i>	154
<i>Figura 4.63 – Resultados do ensaio de adensamento para misturas de 2:1 na razão ótima no consolidômetro de lama em larga escala - tensões, poropressão e consolidação.</i>	155
<i>Figura 4.64 – Ampliação das curvas de excesso de poropressão para misturas 2:1 na razão ótima.</i>	156
<i>Figure 4.65 – Condutividade hidráulica para a mistura com <math>R = 2</math>.</i>	156
<i>Figura 4.66 – Razão da mistura ótima (<math>R_{ot}</math>) vs teor de sólidos nas lamas de fosfato.</i>	160
<i>Figura 4.67 – Amostras cisalhadas de resíduos de fosfato: a) Slime; b) Shale; c) Mistura 1,1:1.</i>	160
<i>Figura 4.68 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizadas para os materiais isolados e misturas para os resíduos de fosfato.</i>	161
<i>Figura 4.69 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para os materiais isolados e misturas dos resíduos de fosfato.</i>	162

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM1	Amostra 1
AM2	Amostra 2
ANM	Agência Nacional de Mineração
ART	Altered Rock Tailings
AS	Australia Standards
ASTM	American Society for Testing and Materials
CD	Ensaio Triaxial Consolidado e Drenado
CDF	Com Uso de Defloculante
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
CS	Cuckoo Search
CSL	Critical State Line (Linha de Estado Crítico)
CT	Coarse Tailings
CU	Ensaio Triaxial Consolidado e Não-drenado
EDS	Espectroscopia de Dispersão de Energia
FRX	Espectrômetro de Fluorescência de Raios X
FT	Fine Tailings
HRT	Hard Rock Tailings
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IP	Índice de Plasticidade
LAMEV	Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura
LEC	Linha de Estado Critico
LEP	Linha de Estado Permanente
MEF	Método dos Elementos Finitos

MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MFT	Mature Fine Tailings
MID	Modelagem Direta Iterativa ( <i>Iterative Forward Modelling</i> )
PDE	Pilha de Disposição de Estéril
SC	Areias Argilosas
SDF	Sem Uso de Defloculante
SL	Índice de Contração
SM	Areias Siltosas
SP1	Amostra 1
SP2	Amostra 2
SSL	Steady State Line (Linha de Estado Estacionário)
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UFCAT	Universidade Federal de Catalão
UFT	Ultra Fine Tailings
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UQ	Universidade de Queensland
WL	Limite de Liquidez
WP	Limite de Plasticidade
XRD	Difratometria de Raios X
$\theta_r$	teor de umidade volumétrica residual
$\theta_s$	teor de umidade volumétrica saturado
$\chi_{tc}$	parâmetro da relação estado-dilatância obtido por ensaios triaxiais de compressão
B	parâmetro de Skempton
b	parâmetros de ajuste empíricos

$c$	coesão do solo
$C_a$	constante $a$ de ajuste de curva da LEC
$C_b$	constante $b$ de ajuste de curva da LEC
$C_c$	constante $c$ de ajuste de curva da LEC
$C_c$	índice de compressão
$C_v$	coeficiente de adensamento
$D$	dilatância
$D_{10}$	diâmetro dos grãos passantes na malha de 10%
$D_{50}$	diâmetro dos grãos passantes na malha de 50%
$D_{\min}$	dilatância máxima
$e$	índice de vazios
$E$	módulo de Young ou módulo de elasticidade do solo
$e_0$	índice de vazios do solo <i>in situ</i> antes do cisalhamento
$e_c$	índice de vazios crítico
$e_{constante}$	índice de vazios estacionário
$e_{es}$	índice de vazios do estéril
$e_{es}$	índice de vazios da fração mais grosseira
$e_{es}^*$	índice de vazios equivalente à fração grossa
$e_g$	índice de vazios global da mistura
$e_{\max}$	índice de vazios máximo
$e_j$	índice de vazio da fração fina
$e_{ss}$	índice de vazios na LEC
$G_{\max}$	módulo de cisalhamento
$G_{ref}$	módulo de cisalhamento na tensão de referência
$G_s$	densidade relativa dos grãos
$G_{s,es}$	densidade relativa dos grãos do estéril ou material grosso

$G_{s,rj}$	densidade relativa dos grãos do rejeito ou material fino
$H$	parâmetro de endurecimento
$H_0$	parâmetro de endurecimento inicial
$Ha$	altura atual da amostra
$H\psi$	parâmetro de endurecimento em função do parâmetro de estado 0
$k_{20}$	coeficiente de permeabilidade padronizado para temperatura de 20°C
$M$	massa da mistura
$m$	parâmetros de ajuste empíricos
$M$	razão de atrito crítico
$M_{es}$	massa seca de estéreis
$M_{rj}$	massa seca de rejeitos
$M_{tc}$	razão de atrito no estado crítico obtido por ensaio triaxial de compressão
$M_w$	massa de água
$n_p$	expoente plástico ou expoente power-law da elasticidade
$N_{tc}$	propriedade da associação volumétrica
OCR	razão de pré adensamento (Over Consolidation Ratio)
$p'$	tensão média efetiva
$p'_c$	tensão média efetiva no estado crítico
$p_0$	tensão efetiva média inicial
$p'_{ref}$	tensão média efetiva de referência ( $p'_{ref} = 100\text{kPa}$ )
$q$	tensão desviatória
$R$	razão de mistura
$R_{ot}$	razão ótima de mistura
$t_f$	índices das frações finas
$u_e$	excesso de poropressão de água
$u_h$	excesso de poropressão de água na base da amostra

$V$	volume total da mistura
$V_{ar}$	volume de ar
$V_{es}$	volume do estéril
$V_{est}$	volume de estéril
$V_{polpa}$	volume da polpa
$V_{rej}$	volume de rejeito
$V_w$	volume de água
$w$	teor de umidade
$w_{rj}$	teor de umidade dos rejeitos
$\Gamma$	índice de vazios crítico em $p' = 1$ kPa
$\gamma_w$	peso específico da água
$\delta$	deformação
$\Delta h$	variação de altura da amostra durante uma variação selecionada no tempo
$\Delta t$	variação de tempo.
$\epsilon_a$	deformação axial
$\eta$	razão de tensões ou invariante de tensão
$\eta_{max}$	razão de tensões máxima
$\lambda$	inclinação da linha de estado crítico
$\rho_{es}$	massa específica do estéril
$\rho_{polpa}$	massa específica da polpa/lama
$\rho_s$	massa específico do material
$\sigma'$	tensão efetiva
$\sigma'_1$	tensão principal maior efetiva
$\sigma'_3$	tensão principal menor efetiva
$\tau$	resistência ao cisalhamento
$\tau$	tensão de cisalhamento

$\phi$	ângulo de atrito do solo
$\phi'$	ângulo de atrito efetivo
$\phi'_c$	ângulo de atrito no estado crítico
$k$	condutividade hidráulica ou permeabilidade
$\Delta e$	variação no índice de vazios
$\varepsilon'_q$	deformação cisalhante
$\varepsilon'_v$	deformação volumétrica
$\theta(\psi)$	teor de umidade volumétrica
$\nu$	coeficiente de Poisson
$\psi$	parâmetro de estado atual
$\psi_0$	parâmetro de estado inicial

## 1. INTRODUÇÃO

A importância da atividade mineradora no Brasil e no mundo é indiscutível. Dados econômicos do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) mostram que o setor mineral do país faturou R\$ 339,1 bilhões em 2021 e R\$ 250 bilhões em 2022, excluindo petróleo e gás. Cerca de R\$ 10,3 bilhões foram arrecadados com a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) em 2021 e R\$ 7,08 bilhões em 2022. As exportações brasileiras de minerais aumentaram 58,6% em relação a 2020, atingindo US\$ 58 bilhões em 2021 (IBRAM, 2023).

Apesar da significativa contribuição do setor mineral para a economia, observa-se nos últimos anos no Brasil uma série de alterações nos processos de mineração, em decorrência de acidentes catastróficos envolvendo barragens de rejeito. Destaca-se, historicamente, o rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em Mariana/MG, no ano de 2015, bem como o colapso da barragem da mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho/MG, no ano de 2019. Após o aumento dos casos de rompimentos, o mundo tem acompanhado um crescente aumento do nível de preocupação da sociedade quanto à gestão de riscos associados às barragens de rejeitos nas operações de mineração (IBRAM, 2019).

Em resposta à essas preocupações relacionadas à segurança das estruturas de disposição de resíduos na mineração, as autoridades reguladoras promulgaram normativas com o objetivo de mitigar o risco de novos rompimentos. Um exemplo é a Resolução nº 4/2019 da Agência Nacional de Mineração (ANM), posteriormente substituída pela Resolução nº 13/2019. Estas resoluções não apenas proibiram a construção de novas barragens pelo método à montante, mas também estabeleceram diretrizes claras para o descomissionamento e descaracterização das estruturas já existentes, impondo prazos para a elaboração e conclusão dos projetos de descaracterização (ANM, 2023).

Assim como as barragens de rejeitos, as Pilhas de Disposição de Estéril (PDE), estruturas formadas pela disposição dos estéréis de mina, também apresentam um elevado potencial de impactos ambientais. Embora rupturas de pilhas ocorra com menor frequência do que aquelas das barragens, quando ocorrem, seus efeitos podem não ser tão generalizados. No entanto, a construção de Pilhas de Disposição de Estéril demanda extensas áreas e pode acarretar diversos problemas, incluindo a geração de drenagem ácida e, conseqüentemente, a contaminação do subsolo.

Dentre as diferentes técnicas disponíveis para a disposição de rejeitos utilizadas nos projetos de mineração, a adoção dos métodos convencionais de disposição dos rejeitos na forma de polpa, uma mistura de rejeito sólido e água, ainda prevalece (Pullum, 2018). Em função das características dos rejeitos, que geralmente consistem em materiais granulares e/ou finos não plásticos, como areias e siltes, quando dispostos na forma de polpa com baixo teor de sólidos, tendem a manter-se em estado de ampla saturação mesmo após o encerramento das operações de mineração, resultando em uma mistura altamente fluida com um potencial considerável de instabilidade (Toledo *et al.*, 2016).

Com vistas à redução do potencial de instabilidade das estruturas de disposição de rejeitos construídas por métodos convencionais, têm-se estudado e adotado métodos alternativos baseados no aumento da concentração de sólidos (MEND, 2017; Carneiro & Fourie, 2018). Esses métodos incluem: disposição por empilhamento drenado, espessamento de rejeitos, rejeitos em pasta, rejeitos filtrados, co-disposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis.

A transição do uso de métodos construtivos convencionais de barragens para métodos alternativos, não apenas se concentra na adequação das estruturas às exigências de descaracterização das normativas, mas também em garantir uma maior segurança estrutural, representando uma mudança importante na abordagem atual em relação ao gerenciamento de resíduos. Essa mudança promove práticas mais sustentáveis alinhadas com os princípios da responsabilidade ambiental, destacando a importância de explorar e implementar métodos inovadores para minimizar o impacto ambiental. As regulamentações, exemplificadas pela Resolução nº 13/2019 da ANM, não apenas proíbem a construção de novas barragens à montante, mas também incentivam ativamente a adoção de abordagens alternativas de disposição.

A co-disposição, também conhecida como mistura homogênea, consiste na disposição conjunta dos resíduos de mineração, como rejeitos, estéreis, escória, entre outros, sendo uma abordagem altamente eficaz na redução da área de disposição. Além de otimizar o espaço utilizado, a co-disposição contribui para a diminuição do potencial de geração de ácidos, promovendo assim uma gestão mais sustentável dos resíduos. Estudos como os de Li *et al.* (2011) e Wickland *et al.* (2010) demonstram a eficácia da co-disposição com relação à melhoria das propriedades mecânicas e hidráulicas das misturas em comparação com os rejeitos. Essa abordagem não apenas representa uma solução prática para a disposição de rejeitos de mineração, mas também

se alinha positivamente com as diretrizes ambientais, proporcionando uma gestão mais eficiente e segura dos rejeitos.

Um aspecto fundamental da co-disposição é a definição de uma proporção ideal entre estéril e rejeitos. Com base nessa proporção, espera-se melhorar o comportamento hidráulico e mecânico da mistura. Pesquisas indicam a existência dessa proporção ótima para a mistura, com uma quantidade relativamente maior de estéril em comparação aos rejeitos, devido à sua influência no comportamento mecânico da mistura (Wickland *et al.*, 2006; Jehring & Bareither, 2016; Hamade, 2017).

Neste estudo, foram conduzidos estudos em três tipos distintos de materiais, explorando o uso da técnica de co-disposição de rejeitos e estéreis. O primeiro estudo concentrou-se em misturas de rejeitos e estéreis provenientes de uma mineração de fosfato no Brasil, sendo os estéreis caracterizados como rochas bastante alteradas, com uma faixa granulométrica bem distinta, podendo ser comparada à de um solo. O objetivo foi analisar o comportamento mecânico e hidráulico dessas misturas em diferentes escalas (laboratorial e de campo - modelagem numérica). Assim, além das análises dos resultados dos ensaios, o comportamento tensão-deformação da co-disposição foi reproduzido por meio da calibração do modelo constitutivo Norsand, fundamentada nos resultados dos ensaios triaxiais. Por fim, realizou-se a avaliação das poropressões construtivas de uma pilha de co-disposição por meio de simulação numérica.

O segundo material investigado consistiu de dois tipos diferentes de amostras provenientes de uma mineradora de carvão mineral na Austrália, um estéril não alterado e um estéril alterado, visando avaliar o comportamento mecânico da co-disposição e as poropressões das misturas por meio de ensaios de consolidação em um consolidômetro de grande dimensão.

O terceiro material estudado envolveu estéril e lama, provindos de uma mineradora de fosfato na Austrália, com foco na avaliação da melhoria de comportamento mecânico da mistura co-disposta.

O primeiro estudo se destacou por sua abordagem mais abrangente, envolvendo uma série de ensaios e análises que não foram realizados nos estudos subsequentes. Além disso, devido às particularidades da granulometria mais fina do estéril, foi possível realizar ensaios laboratoriais mais representativos. Isso se deve ao fato de que o estéril comumente utilizado para co-disposição não permite tais procedimentos devido às suas grandes dimensões individuais e as limitações dos equipamentos laboratoriais. Outro aspecto relevante foi a razão de mistura obtida, que se aproximou muito da proporção de estéril e rejeitos gerados pelas empresas de

fosfato. Isso permitiu avaliar o comportamento das misturas em proporções que podem ser aplicadas em larga escala pelas empresas de mineração.

Os estudos seguintes, por sua vez, foram de fundamental importância para aprofundar o entendimento do comportamento mecânico de misturas sob diferentes razões de mistura, considerando materiais provenientes de diversas minas, cada uma com suas características geotécnicas específicas. Por meio de ensaios conduzidos em um consolidômetro de grande dimensão, equipamento construído especificamente para avaliar rejeitos de mineração, foi possível aprimorar o conhecimento sobre as propriedades hidráulicas das misturas, permitindo a análise da dissipação das poropressões ao longo do tempo e o entendimento do processo de consolidação dos materiais.

Assim, a pesquisa contribuiu para o desenvolvimento de abordagens eficazes para estudar e analisar o comportamento mecânico e hidráulico das misturas, bem como para avaliar as poropressões envolvidas. Isso foi alcançado por meio de uma combinação de ensaios laboratoriais e modelagens numéricas, o que proporcionou uma base sólida para a aplicação dessas técnicas em uma ampla gama de materiais e contextos.

## **1.1. OBJETIVOS DA PESQUISA**

Visando contribuir para a melhoria das práticas de execução das pilhas de co-disposição, garantindo a segurança e sustentabilidade nas estruturas, o objetivo geral da tese foi avaliar o comportamento mecânico e hidráulico de misturas de resíduos de mineração, considerando resultados de ensaios de amostras de depósitos distintos e de modelagens numéricas. Para isso, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar análises físicas detalhadas, incluindo granulometria, massa específica dos grãos, umidade, limites de plasticidade e liquidez, compactação, entre outros, para caracterização abrangente dos materiais de estéril, rejeitos e lamas;
- Conduzir análises químicas, mineralógicas e microestruturais das amostras individuais e das misturas;
- Determinar a Razão Ótima de Mistura ( $R_{ot}$ ) entre as diferentes amostras consideradas, de modo a avaliar a possibilidade de otimização do desempenho das misturas frente aos materiais dispostos isoladamente;
- Realizar ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais (CU e CD) para quantificar as propriedades mecânicas dos materiais não misturados e das misturas, avaliando sua

resistência ao cisalhamento em diferentes condições de compactação, umidade e confinamento;

- Definir os parâmetros de estados críticos para as misturas de rejeito e estéril provindos de uma mineração de fosfato no Brasil, considerando o modelo constitutivo Norsand;
- Avaliar a aderência do modelo constitutivo Norsand aos resultados obtidos nos ensaios triaxiais para misturas de rejeito e estéril;
- Realizar ensaios de consolidômetro de grande dimensão para investigar as propriedades hidráulicas e de consolidação dos materiais, permitindo compreender o comportamento das pilhas de co-disposição sob diferentes condições de carregamento e tempo;
- Avaliar as poropressões construtivas de uma pilha de co-disposição por meio de simulação numérica;

## **1.2. JUSTIFICATIVA**

No contexto global de mineração, observa-se uma demanda crescente por alternativas sustentáveis na gestão dos resíduos provenientes das operações da indústria de mineração. Essa busca por alternativas de disposição é impulsionada não apenas pelas atuais dificuldades no licenciamento e autorização nos processos de disposição de rejeitos em barragens e pelas necessidades de adequação às regulamentações, que proíbem métodos de disposição considerados de alto risco em alguns países, como a disposição à montante, mas também pela urgência em mitigar os impactos ambientais, sociais e humanos associados a possíveis rupturas dessas estruturas de disposição. Desse modo, métodos como pilhas de rejeitos filtrados ou de co-disposição de resíduos emergem como soluções promissoras, alinhadas aos princípios da sustentabilidade e voltadas para a minimização de riscos e danos ao meio ambiente e às comunidades afetadas. Entretanto, devido ao elevado volume de resíduos gerados no processo de mineração, as pilhas são projetadas para alturas que superam centenas de metros, sendo, portanto, muito importante a compreensão dos comportamentos mecânico e hidráulico dos materiais utilizados, antes da construção das pilhas. A implementação de soluções inadequadas e/ou processos executivos de disposição mal planejados pode, ao contrário do esperado, acarretar riscos. Nesta pesquisa buscou-se investigar os fatores que influenciam o desempenho de misturas para co-disposição, considerando resíduos de mineração de depósitos minerais distintos. Utilizando uma abordagem que combina uma ampla campanha de ensaios realizados em laboratório e análises numéricas, propõe-se testar e validar o comportamento mecânico e hidráulico destes materiais. Em resumo, buscou-se fornecer uma base sólida de conhecimento científico e técnico para orientar o desenvolvimento e a implementação de práticas de co-

disposição de rejeitos e estéreis na mineração, visando aprimorar a gestão de resíduos e promover o desenvolvimento sustentável do setor.

### **1.3. ESTRUTURA DA TESE**

A estrutura do trabalho está organizada em cinco capítulos principais: introdução, revisão de literatura, materiais e métodos, resultados e conclusões.

No capítulo de introdução, são apresentados o contexto e a motivação para a pesquisa, além dos objetivos do estudo.

O segundo capítulo aborda a revisão de literatura, onde são discutidos os principais conceitos e teorias que embasam a compreensão do tema aqui tratado.

O capítulo de materiais e métodos descreve a metodologia experimental adotada, incluindo os ensaios realizados, procedimentos e técnicas de análise utilizadas para avaliar o comportamento mecânico e hidráulico dos materiais.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados, bem como apresentação das análises numéricas.

O capítulo final sintetiza as principais conclusões do trabalho e discute as implicações para a prática da co-disposição de estéreis e rejeitos na mineração. Além disso, são destacadas as contribuições do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. MINERAÇÃO E GERAÇÃO DE RESÍDUOS

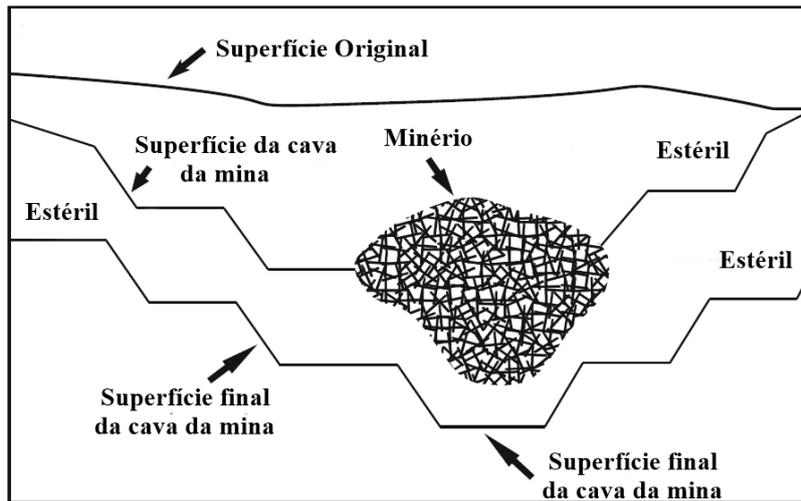
Segundo Lottermoser (2010), as operações na indústria de mineração podem ser categorizadas em três partes principais: extração mineral, processamento mineral e extração metalúrgica. A extração mineral representa a fase inicial na exploração comercial de um recurso mineral ou energético, envolvendo a remoção do solo mineralizado, de modo a recuperar uma ou mais partes que compõe o material extraído. Por sua vez, o processamento ou beneficiamento mineral tem por objetivo separar e concentrar fisicamente o(s) mineral(is) do minério, enquanto que a extração metalúrgica visa romper as ligações cristalográficas no mineral, a fim de recuperar o elemento ou composto de interesse.

Em todas as operações da indústria de mineração, paralelamente a produção do bem mineral de interesse, tem-se a geração de resíduos. Dentre esses destaca-se a existência dos resíduos sólidos provenientes do decapeamento na mina (estéril) e dos efluentes de processo gerados na planta de processamento ou beneficiamento (rejeitos) (IBRAM, 2016).

Conforme definido pela norma brasileira NBR13029 (ABNT, 2017a), o estéril de mina constitui “*todo e qualquer material não aproveitável economicamente, cuja remoção se torna necessária para a lavra do minério*”. Tal material, apesar de não possuir valor econômico agregado, precisa ser removido, transportado e estocado, sendo que a disposição é usualmente realizada sob a forma de pilhas, denominadas Pilhas de Disposição de Estéril (PDE), devendo estas serem feitas de forma planejada, projetada e controlada, considerando toda a vida útil operacional da estrutura (ABNT, 2017a).

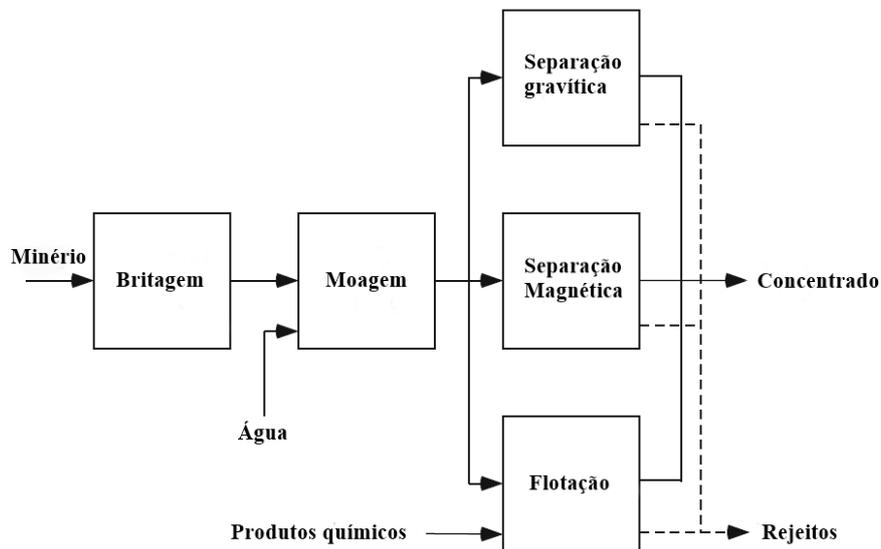
O principal parâmetro utilizado para classificação dos materiais presentes na mina como econômicos ou subeconômicos é o chamado teor de corte, no qual baseia-se na concentração do elemento de minério em cada unidade de rocha minerada e no custo de mineração dessa unidade. Como resultado desta classificação, pode-se separar os resíduos da mineração, estéreis, do minério economicamente viável (Lottermoser, 2010).

Os estéreis de mineração podem incluir tanto o material de decapeamento, solo superficial contendo ou não matéria orgânica, quanto os resíduos de rochas escavadas e extraídas de operações de superfície e/ou subterrâneas, onde a rocha residual é essencialmente a rocha removida para acessar e extrair minério (Fig. 2.1).



**Figura 2.1 - Etapa de extração mineral (adaptado de Lottermoser, 2010).**

Após a extração mineral, os materiais passam por um processo de beneficiamento para obter o bem mineral desejado. O processamento mineral envolve inúmeras etapas (Figura 2.2), como: cominuição; separação gravimétrica, separação magnética ou eletrostática; flotação, podendo ou não ser seguido pela extração metalúrgica, como é o caso do ouro, cobre, níquel, urânio ou fosfato. Um exemplo é a extração metalúrgica do ouro utilizando cianetos por meio da etapa de lixiviação.



**Figura 2.2 – Exemplo dos principais processos presentes no beneficiamento mineral (adaptado de Lottermoser, 2010).**

Esses métodos de tratamento e concentração mineral resultam na produção de resíduos de processamento, que são os rejeitos, lamas e águas residuais do beneficiamento mineral. Pela definição da norma brasileira NBR13028 (ABNT, 2017b), rejeito é “*todo e qualquer material descartado durante o processo de beneficiamento de minérios*”.

As características físicas e químicas dos resíduos de processamento podem variar de acordo com inúmeros parâmetros, como: a mineralogia e geoquímica do recurso tratado; tipo de tecnologia de processamento; tamanho de partícula do material cominuído, e; tipo de produto químico do processo (Lottermoser, 2010).

Na maioria dos casos estes resíduos são transportados e descartados na forma de lama ou polpa com alto teor de água, podendo ser compostos de material com granulometria variando desde finos, fração coloidal, até partículas bastante grosseiras, cascalho, ou serem descartados como um material seco muito grosso (Wills & Finch, 2016).

Os rejeitos geralmente são depositados em barragens ou tanques específicos para esse fim, os quais podem ser construídos utilizando o próprio rejeito da atividade mineradora, bem como outros materiais disponíveis no local ou em áreas próximas, como solos provenientes de áreas de empréstimo.

Apesar da elevada eficiência alcançada na etapa de beneficiamento mineral, uma grande quantidade de rejeitos, composta por metais, minerais, produtos químicos, materiais orgânicos e água de processo irrecuperáveis e não rentáveis, é gerada, principalmente em operações de mineração a céu aberto. Isso se deve aos custos relativamente mais baixos associados a essas operações, nas quais o minério frequentemente apresenta baixa qualidade (baixo teor), resultando na produção de grandes quantidades de rejeitos finos (Wills & Finch, 2016).

Atualmente, os avanços tecnológicos já permitem a exploração de minérios de baixíssimo teor, gerando volumes cada vez mais altos de resíduos, tanto estéreis quanto rejeitos. Percebe-se com isso que há uma tendência em construir estruturas cada vez maiores, as quais devem atender os inúmeros requisitos de segurança e das regulamentações ambientais (IBRAM, 2016). Devido as características físicas e químicas dos rejeitos e sua capacidade de mobilizar constituintes metálicos, tem-se também uma crescente preocupação ambiental, social e econômica associada a como este material é disposto, principalmente após eventos recorrentes de ruptura de barragens em todo o mundo.

## **2.2. TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL NA MINERAÇÃO**

A disposição de material estéril de mineração representa um desafio complexo devido à sua natureza geologicamente heterogênea, abrangendo desde rochas sedimentares, metamórficas e ígneas até solos e sedimentos soltos (Lottermoser, 2010). Em virtude dessa origem, a granulometria do estéril pode variar desde frações de argila até fragmentos de rochas, refletindo a variabilidade desses materiais.

A variabilidade geológica e geotécnica dos estéreis na mineração é notável, visto que cada jazida mineral é singular e única, deste modo, estéreis de jazidas de um mesmo bem mineral podem apresentar comportamentos geotécnicos completamente diferentes. Este comportamento geotécnico é influenciado não apenas pela formação geológica específica e localização, mas também por fatores como mineralogia, geoquímica, tipo de equipamento de mineração utilizado e métodos de desmonte. É crucial reconhecer que não existe um padrão uniforme para o comportamento dos estéreis, e cada empreendimento de mineração apresenta desafios únicos relacionados à gestão desses resíduos.

Na indústria de mineração, as pilhas de disposição podem ser categorizadas de acordo com sua finalidade, sendo classificadas como pilhas de armazenamento permanente ou temporário, e também de acordo com os materiais usados em sua construção, tais como rochas/enrocamentos, solos e misturas de materiais (aterros mistos) (Hawley & Cunning, 2017).

As pilhas de estocagem ou de homogeneização geralmente possuem um caráter temporário e são utilizadas para diversos fins. Elas servem para o armazenamento de minério destinado ao uso progressivo na usina de beneficiamento, permitindo que haja a mistura de minérios provindos de diferentes frentes de lavra de modo a se obter um teor médio adequado para a operação e concentração mineral nas usinas de processamento. Além disso, essas pilhas podem armazenar solos superficiais que serão utilizados posteriormente nas etapas de desativação e fechamento da mina. Os solos superficiais são empregados para revegetação e cobertura de certas áreas devido à sua composição rica em matéria orgânica.

Outro uso das pilhas de estocagem é o armazenamento de material com teor de minério próximo ao teor de corte de exploração. Isso significa que essas pilhas armazenam materiais que, em um determinado momento, podem ser considerados inviáveis devido ao valor comercial do minério no mercado de commodities, mas que podem se tornar viáveis caso haja um aumento repentino no valor comercial desses minerais ao longo do tempo.

As Pilhas de Disposição de Estéreis (PDE) geralmente possuem caráter permanente, sendo estruturas que devem ser planejadas, projetadas e controladas seguindo-se todas as premissas apresentadas nas normas vigentes (ABNT, 2017a).

Em relação aos materiais de construção, o termo enrocamento inclui todas as rochas mineradas e naturais compostas de partículas angulares coerentes e com poucos finos, enquanto os termos terra ou solo incluem a maioria dos materiais de estéril, solos residuais, materiais saprolíticos fracos e rochas muito fracas que se desagregam quando escavadas. Neste contexto, o termo *overburden* ou *topsoil* é geralmente utilizado para descrever solos superficiais e materiais similares, em contraste com a definição mais ampla aplicada a todos os materiais (solo e rocha) que cobrem um depósito mineral. Os aterros mistos consistem em uma combinação de materiais de enrocamento e solo (Hawley & Cuning, 2017; Daniel, 1993).

Em geral, os estéreis são caracterizados como de alta resistência ao cisalhamento e alta condutividade hidráulica (Castillo, 2019). As PDE são tipicamente estruturas topográficas ascendentes construídas acima da superfície original do terreno e acima do lençol freático regional, criando um perfil de disposição que pode favorecer o escoamento e a drenagem, mantendo-as em condições insaturadas (Hawley & Cuning, 2017).

### **2.3. TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS NA MINERAÇÃO**

Assim como apresentado na Seção 2.1, os rejeitos compreendem rochas cominuídas e partículas de solo não aproveitadas no processo de beneficiamento mineral, podendo conter precipitados e/ou metais ou minerais residuais do processo.

Entre os resíduos gerados nas operações de mineração, os rejeitos são frequentemente responsáveis pelos maiores volumes a serem dispostos. Devido às suas características físicas e químicas, o descarte de rejeitos representa um dos principais elementos de gerenciamento de riscos e custos para uma mina, sendo de fundamental importância para o sucesso de qualquer empreendimento minerador. Falhas e rupturas nas estruturas de armazenamento de rejeitos resultaram em inúmeras perdas de vidas, danos ambientais significativos, fechamento de operações de mineração, quedas dramáticas no valor das ações e, em alguns países, em responsabilização pessoal da gestão das minas (Darling, 2011).

O Brasil, em particular, tem sido destaque na mídia devido a eventos marcantes envolvendo barragens de rejeito, que deixaram uma marca permanente em nossa história e na consciência mundial. O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana-MG, no ano de 2015, repercutiu globalmente. Esse desastre não apenas resultou em inúmeras perdas de vidas humanas, mas

também desencadeou impactos sociais e ambientais de magnitude inimaginável na época. O mais recente rompimento da barragem da mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, em 2019, reforçou a urgência de lidar efetivamente com os desafios associados à gestão de barragens de rejeito.

Esses eventos trágicos têm impulsionado discussões e ações tanto a nível nacional quanto internacional, levando a uma revisão crítica das práticas de segurança em barragens de rejeitos. A indústria de mineração reconhece tais consequências advindas de falhas nas estruturas de disposição de rejeitos a décadas e vem, desde então, concentrando esforços no gerenciamento de rejeitos e na melhoria dos projetos, operação, monitoramento e fechamento de barragens de rejeitos.

A Resolução ANM n° 13/2019 representou um marco importante na regulamentação de barragens de rejeitos, proibindo a construção de novas estruturas pelo método à montante e estabelecendo prazos para a descaracterização das existentes. A legislação subsequentemente consolidada pela Resolução ANM n° 95/2022 fortaleceu os requisitos para o acompanhamento e monitoramento das barragens descaracterizadas, evidenciando o compromisso com a segurança dessas estruturas (ANM, 2023).

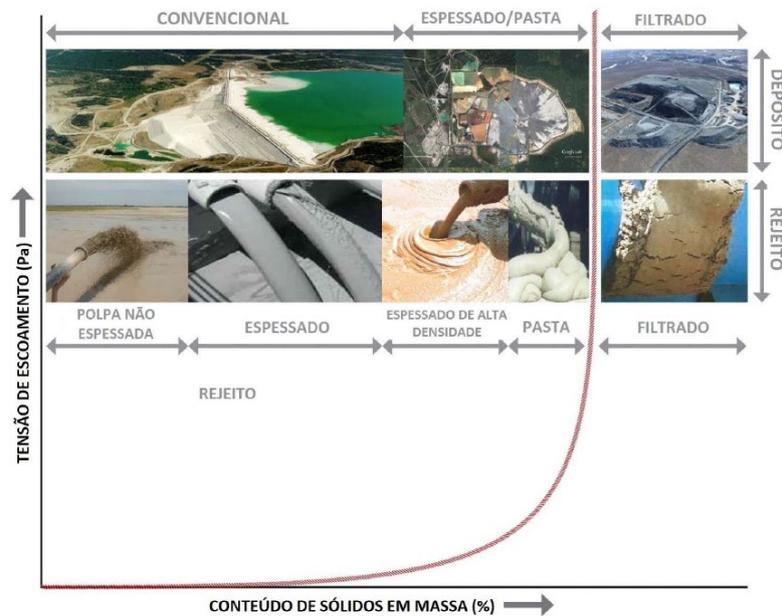
As regulamentações, representadas pela Resolução n° 13/2019 da ANM e pela Resolução ANM n° 95/2022 tendem a incentivar ativamente a adoção de abordagens alternativas de disposição, especialmente diante da proibição de métodos de disposição à montante e a necessidade de descaracterização de barragens existentes. Essas medidas visam promover práticas mais sustentáveis em consonância com os princípios da responsabilidade ambiental, enfatizando a importância de explorar e implementar métodos inovadores para reduzir o impacto ambiental.

Atualmente, existem diversos métodos de disposição de rejeitos, os quais vem sendo estudados, aplicados e aprimorados continuamente com objetivo de garantir um armazenamento seguro ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas de disposição. No entanto, o principal desafio reside na consistência na aplicação desses métodos.

Diante dos desafios apresentados, é importante destacar que as propriedades dos rejeitos variam substancialmente em função do minério de origem, dos processos empregados na extração e concentração mineral, bem como do nível de oxidação do material de interesse e das rochas encaixantes, influenciadas pelo processo de intemperização (Lottermoser, 2010). Nesse contexto, considerando a diversidade de características dos rejeitos de mineração, que difere de mina para mina devido às particularidades locais, as instalações de disposição de rejeitos podem

assumir uma variedade de configurações, com diferentes princípios operacionais, métodos de transporte e deposição de rejeito, além de diferentes abordagens no gerenciamento de sólidos e na concepção das instalações. Para lidar com essa diversidade, são necessários sistemas de gerenciamento de soluções e planos de fechamento específicos para cada contexto operacional (Darling, 2011).

Além dos métodos convencionais de disposição de rejeitos na forma de polpa, largamente utilizados na mineração, recentemente passou-se a considerar o uso de métodos de descarte e disposição classificados em termos de aumento da concentração de sólidos. Neste caso, os rejeitos são submetidos a técnicas de desaguamento até atingirem os estados denominados de: espessado, pasta e filtrado. Cada uma destas categorias baseia-se no teor de sólidos e na tensão de escoamento do produto apresentado ao final do desaguamento, sendo que, para cada tipo, diferentes métodos de disposição são adotados (Fig. 2.3) (MEND, 2017).

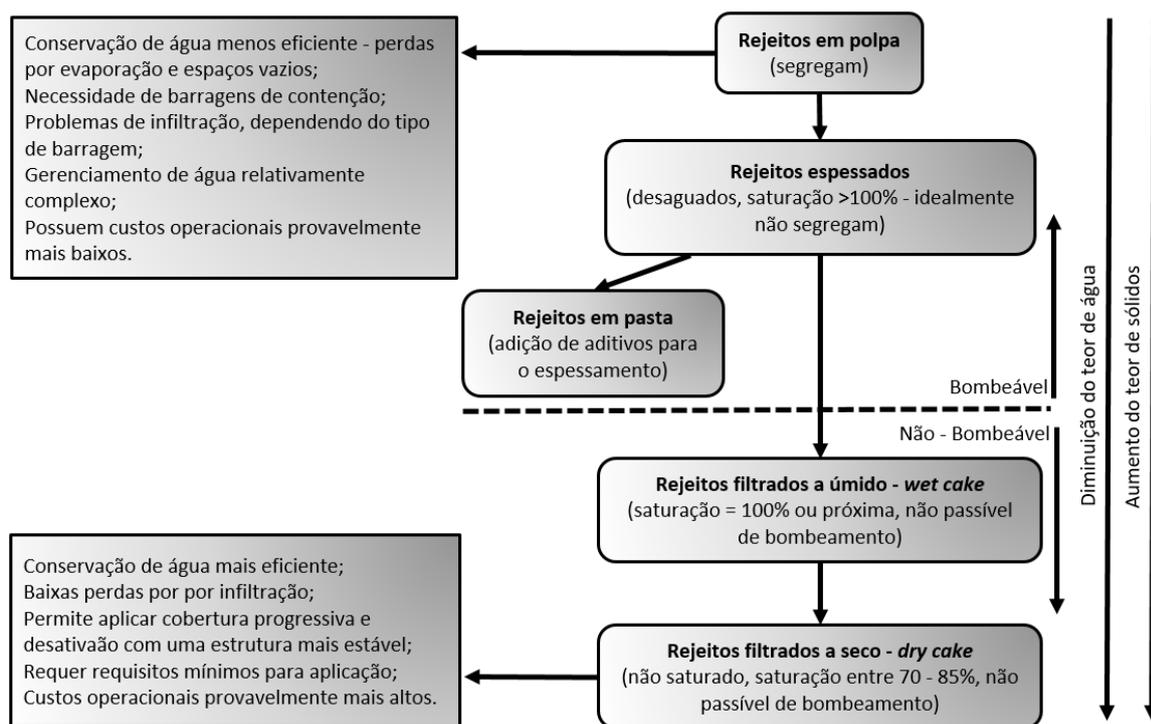


**Figura 2.3 – Consistência dos rejeitos, aspecto físico e tipos de depósito (adaptado de MEND, 2017).**

Conforme a classificação representada na Figura 2.3, as instalações convencionais de rejeitos são aquelas nas quais podem ser dispostos rejeitos na forma de polpa, independentemente de serem ou não espessados, considerando um baixo teor de sólidos. Por outro lado, as instalações de rejeitos espessados com alta densidade ou em pasta são definidas como aquelas onde os rejeitos são produzidos por um espessador de alta densidade ou uma usina que permita a produção de pastas. Instalações de rejeitos filtrados são destinadas a armazenar rejeitos desaguados, os quais se comportem como um solo, geralmente produzidos com um teor de

umidade ótimo para facilitar a compactação. Os rejeitos desaguados normalmente são dispostos na forma de pilhas, caracterizadas por zonas estruturais compactadas e alto fator de estabilidade quando comparados aos outros métodos de disposição na forma de polpa (Davies, 2011; MEND, 2017).

Davies (2011) apresentou uma caracterização dos rejeitos com base na quantidade de sólidos após o processo de desaguamento e grau de segregação, conforme ilustrado na Figura 2.4. Essa classificação inclui diferentes formas de rejeitos, como polpa ou lama, rejeito espessado, rejeito em pasta, rejeito filtrado a úmido (*wet cake tailings*) e rejeito filtrado a seco (*dry cake tailings*). Cada uma dessas categorias apresenta um comportamento geotécnico distinto, destacando-se a pasta por não possuir tendência de fluir facilmente, ausência de segregação hidráulica e não liberação de água durante sua disposição. Normalmente, o rejeito em forma de pasta é espessado com a adição de algum aditivo químico, aprimorando suas propriedades geotécnicas.



**Figura 2.4 - Comparação entre as diferentes formas de disposição de rejeito (adaptado de Davies, 2011).**

Embora os métodos alternativos de disposição de rejeitos envolvam custos mais elevados, sua implementação em escala comercial proporciona benefícios tangíveis quando comparados à disposição convencional de rejeitos em forma de polpa. Esses benefícios incluem a recuperação máxima de água de processo, resultando em um aumento na recirculação interna, a redução do

volume de outorga para água nova, a diminuição da área necessária para disposição, o melhor atendimento às demandas dos órgãos ambientais e o aumento dos coeficientes de segurança das estruturas de disposição de resíduos (Carneiro & Fourie, 2018; European Commission, 2009).

Segundo Davies (2011), a técnica de filtragem de rejeitos tem se tornado mais comum em muitas minas ao redor do mundo. Além disso, a co-disposição também surge como uma estratégia inovadora na gestão de rejeitos e vem sendo amplamente pesquisada. Apesar do aumento no uso das técnicas, existe uma notável falta de informações sobre essas elas, podendo resultar em decisões inadequadas na gestão dos rejeitos. Essa carência de informações destaca a necessidade de mais pesquisas e divulgação sobre essas tecnologias (Alves, 2020).

Empreendimentos como a Mina Cuiabá e a Mina Córrego do Sítio, ambas da AngloGold Ashanti, e a Herculano Mineração, em Itabirito-MG, exemplificam o crescente uso da filtragem de rejeitos na prática (Alves, 2020). No que diz respeito à co-disposição, projetos como o NICO, no Canadá, e o Penãsquito, pioneiro nessa prática, demonstram o potencial dessa técnica. No projeto NICO, propõe-se uma co-disposição com camadas alternadas de estéril e rejeito, sem uma mistura homogênea dos materiais, enquanto no Penãsquito, a co-disposição foi aplicada com sucesso, utilizando correias transportadoras para misturar o rejeito e o estéril durante o transporte (Souza, 2020).

Ao selecionar as tecnologias apropriadas de desaguamento, é necessário um entendimento das propriedades físicas e geoquímicas dos rejeitos. As propriedades geoquímicas incluem constituintes elementares e minerais, potencial de geração de ácido, potencial de neutralização e potencial de lixiviação de metais. Além disso, é importante considerar os reagentes adicionados durante o processamento, como floculantes, depressores, entre outros, os quais podem influenciar a estabilidade física e geoquímica dos rejeitos, bem como a composição da água presente nos poros (água contida nos espaços vazios dos rejeitos) (MEND, 2017).

As propriedades físicas incluem distribuição de tamanho de partícula, tipo e conteúdo da argila, peso específico, reologia, plasticidade, propriedades de consolidação e condutividade hidráulica. Essas propriedades desempenham um papel fundamental na viabilidade técnica das tecnologias de desaguamento de rejeitos, variando conforme diversos fatores, incluindo as características do minério processado e a operação de processamento. Os rejeitos podem ser classificados em cinco categorias distintas, conforme apresentado na Tabela 2.1 (MEND, 2017; McLeod & Bjelkevik, 2017).

**Tabela 2.1 – Classificação dos rejeitos quanto à granulometria.**

<b>Tipo de rejeito</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Exemplos<sup>1</sup></b>
Rejeitos granulares ( <i>Coarse tailings</i> )	CT	Areias siltosas, não plásticas. Rejeitos constituídos por partículas angulares sem coesão, com resistências ao corte média-alta e alta condutividade hidráulica.	sal, areias minerais, rejeitos grossos de carvão, material arenoso de minério de ferro
Rejeitos de rocha dura ( <i>Hard rock tailings</i> )	HRT	Silte arenoso, plasticidade nula a baixa. Rejeitos derivados de rochas ígneas e metassedimentares, com angularidade, boa resistência ao cisalhamento e condutividade hidráulica relacionada à granulometria.	cobre, sulfeto maciço, níquel, ouro
Rejeitos de rocha alterada ( <i>Altered rock tailings</i> )	ART	Silte arenoso, vestígio de partículas de argilas, baixa plasticidade. Compostos por rochas que sofreram alteração dos minerais de feldspato para minerais de argila ou com minerais de argila naturalmente presentes, exibindo características de sedimentação moderada e resistência ao cisalhamento dependentes da quantidade e do tipo de fração de argila.	cobre pórfiro com alteração hidrotermal, rocha oxidada
Rejeitos finos ( <i>Fine tailings</i> )	FT	Silte, com vestígio de partículas argilosas, plasticidade baixa a moderada	rejeitos finos de carvão, resíduos de bauxita (lama vermelha)
Rejeitos ultrafinos ( <i>Ultra fine tailings</i> )	UFT	Argila siltosa, alta plasticidade, densidade e condutividade hidráulica muito baixas.	areia betuminosa ( <i>mature fine tailings</i> – MFT) <sup>2</sup> , finos de fosfato, alguns finos de kimberlito e de carvão

Notas:

1. Os exemplos listados não são numerosos. Alguns tipos de minério produzirão múltiplas faixas de rejeitos que se encaixam em várias classes, por exemplo, os depósitos de cobre pórfiro podem ser rejeitos grosseiros e/ou rejeitos de rocha alterada.

2. Os rejeitos de areias betuminosas são um produto do uso de água quente para extrair betume da areia. A polpa de rejeito é então bombeada e armazenada em barragens de rejeitos. A fração de rejeitos finos (MFT - *mature fine tailings*) acumula-se mais perto do centro da lagoa. Após vários anos, o MFT, consistindo em 86% de água, poderá sedimentar até cerca de 30% a 35% de teor de sólidos.

## **2.4. CO-DISPOSIÇÃO E DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA DE REJEITOS E ESTÉREIS**

Conforme Peixoto (2012), a técnica de co-disposição envolve a mistura do rejeito com o estéril antes da sua disposição, enquanto na disposição compartilhada não há mistura dos dois materiais, neste caso, eles são simplesmente dispostos em um mesmo local.

De acordo com Figueiredo (2007), o conhecimento sobre o comportamento de estruturas de disposição de rejeitos e estéreis é melhor compreendido quando estes materiais são dispostos separadamente. Dado que possuem características intrínsecas distintas, como frações granulométricas, permeabilidade, grau de saturação e resistência, a disposição conjunta requer uma cuidadosa avaliação para evitar a redução dessas propriedades.

A co-disposição de resíduos na mineração permite a otimização na gestão dos materiais resultantes das atividades extrativas, incluindo rejeitos, estéreis e escória, ao aproveitar as propriedades individuais de cada um. Por exemplo, caso algum desses materiais apresente baixa permeabilidade, capacidade de suporte reduzida ou resistência limitada, combiná-los pode resultar em um material com características geotécnicas superiores às dos materiais isolados (Antonaki & Abdoun, 2016).

A consideração da permeabilidade relativamente baixa de certos rejeitos de mineração, juntamente com sua capacidade de retenção de umidade, sugere seu potencial como materiais vedantes. Quando dispostos em conjunto com estéreis, preferencialmente de granulometria grosseira, os rejeitos ocupam os vazios nos estéreis, diminuindo o fluxo de oxigênio entre as partículas e, conseqüentemente, mitigando problemas como a drenagem ácida de mina (Khalili, 2009). Além disso, as partículas de estéril atuam como matriz de suporte de carga dentro da mistura, o que pode melhorar o comportamento mecânico global da mesma.

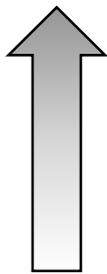
As vantagens potenciais da co-disposição de rejeitos e estéreis na mineração, incluem (Leduc & Smith, 2003; Leduc *et al.*, 2004; Wickland & Wilson, 2005; Wickland *et al.*, 2006b; INAP, 2009; Habte & Bocking, 2012):

- Gerenciamento simplificado do descarte, pois todos os materiais são dispostos em uma única estrutura;
- Redução da área necessária para disposição, resultando em menor impacto ambiental;
- Diminuição da necessidade de construção de novas estruturas ou redução do porte das barragens ou pilhas existentes;
- Eliminação ou redução da necessidade de revestimento;
- Aumento da vida útil das estruturas existentes, possibilitando mais alteamentos, maior inclinação da estrutura e aumento da densidade *in situ*;
- Redução de perdas por infiltração e evaporação;
- Menor erosão eólica e hídrica, além de redução dos requisitos de infraestrutura, como estradas, dutos e bombas;

- Melhor controle da geração de ácidos, devido a uma mistura mais eficiente que resulta em uma matriz mais rígida e com maior estabilidade física e química;
- Redução dos problemas de gerenciamento de água, com um ponto único de descarga para o meio ambiente;
- Ausência de água sobrenadante sobre os materiais co-dispostos;
- Facilidade no fechamento progressivo e redução dos problemas de fechamento, tornando o monitoramento mais fácil e simples;
- Acessibilidade aprimorada para tráfego e equipamentos.

Wickland (2006) delimitou diversos métodos de disposição para rejeitos e estéreis em operações de mineração, variando de acordo com o grau de mistura entre os materiais. As formas de disposição identificadas na Tabela 2.2 são organizadas em uma progressão ascendente, começando com a adição de rejeitos à pilha de estéreis e avançando para a adição de estéreis à barragem de rejeitos, mistura em camadas alternadas dos dois materiais, co-disposição bombeada e, por fim, a mistura homogênea denominada de *paste rock*.

**Tabela 2.2 – Classificação dos tipos de disposição de rejeitos e estéreis de mineração dependendo do grau da mistura (adaptado de Wickland, 2006)**

Tipos de co-disposição	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mistura homogênea entre o rejeito e o estéril, formando o material denominado <i>paste rock</i></li> <li>• Co-disposição bombeada - material grosseiro e fino são bombeados para a barragem para disposição (segregação ocorre no local de disposição).</li> <li>• Disposição em camadas alternadas de estéreis e rejeitos</li> <li>• Disposição do estéril na barragem de rejeitos</li> <li>• Disposição de rejeitos na pilha de estéril</li> <li>• Disposição de estéreis e rejeitos na mesma depressão topográfica</li> </ul>	 Grau da Mistura

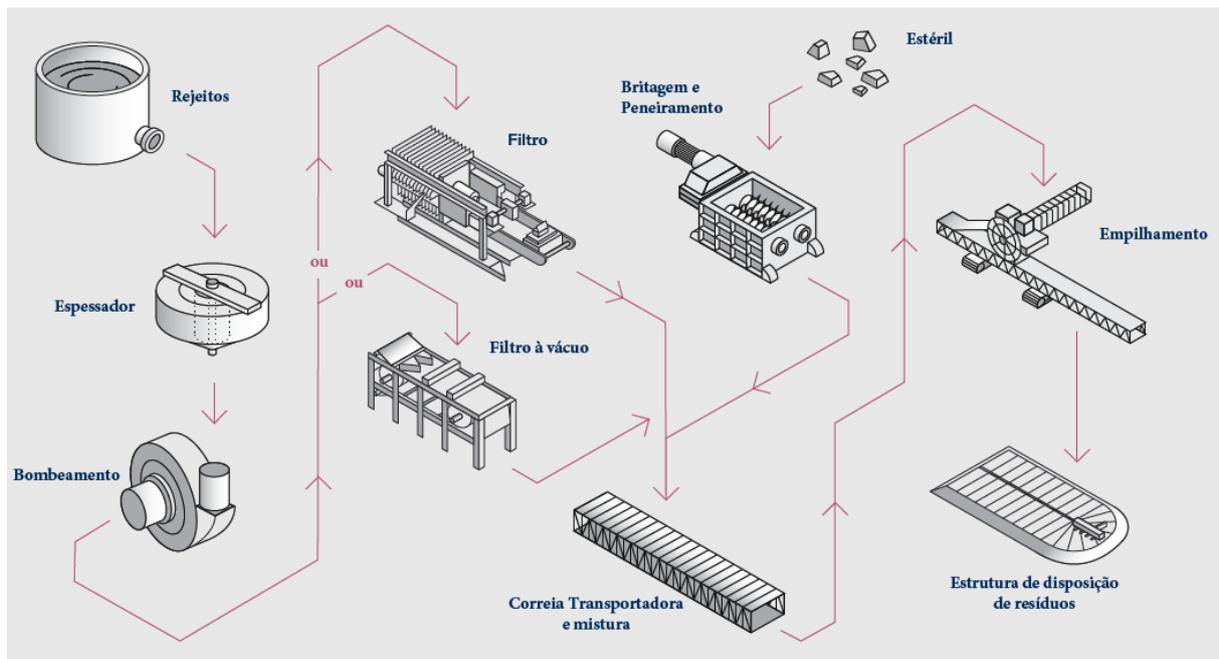
Dentre as estratégias para a disposição conjunta de resíduos em projetos de mineração, destacam-se as seguintes abordagens (Hawley & Cuning, 2017):

- a) Disposição de estéreis em barragens de rejeitos: esta técnica implica na disposição de estéreis, especialmente aqueles com alto teor de sulfetos reativos e potencial para gerar drenagem ácida, dentro do reservatório da barragem de rejeitos. Tal prática adota o princípio de contenção subaquática para mitigar os riscos ambientais associados à geração de ácidos.

- b) Disposição de rejeitos na pilha de estéril: nesse método, os rejeitos espessados são utilizados para preencher os vazios existentes no depósito de estéril, atuando como uma camada de vedação. Essa prática visa limitar o transporte de oxigênio e reduzir a potencial geração de ácido. De acordo com Cambridge (2017), esse modelo é especialmente adequado para projetos em regiões predominantemente áridas, onde os diques de contenção podem ser significativamente reduzidos em tamanho e a descarga pode ser realizada de forma sequencial por meio de enchimento hidráulico do rejeito no estéril, preenchendo os vazios do depósito.
- c) Disposição de camadas de rejeitos em bacias na pilha de estéril: nesta abordagem, camadas horizontais de rejeitos espessados, com 1 a 2 metros de espessura, são dispostas em bacias de armazenamento sequenciadas dentro da pilha de estéril. Essa prática busca uma disposição controlada e estratificada dos rejeitos.
- d) Disposição de rejeitos em pasta misturada homogeneamente com rejeitos e estéreis: os rejeitos são misturados homogeneamente com estéreis em proporções pré-definidas antes de serem depositados em um mesmo local. Essa técnica permite uma gestão integrada e eficiente dos resíduos.
- e) Mistura/blendagem de estéreis com potencial de geração de ácidos com estéreis inertes: o objetivo desta prática é combinar estéreis com potencial para geração de ácidos com resíduos inertes, formando um depósito que neutralize a potencial geração de ácidos na pilha. Essa estratégia visa minimizar os impactos ambientais adversos.

Cada uma dessas abordagens possui variações que são adaptadas às características específicas dos resíduos de cada depósito, proporcionando flexibilidade e eficácia na gestão desses materiais.

A empresa Minerals Technology Center FLSmidth, em colaboração com a Goldcorp, desenvolveu uma solução inovadora denominada EcoTails® para o processo de construção de estruturas de co-disposição de rejeitos e estéril em operações de mineração (Fig. 2.5). O EcoTails consiste na combinação de rejeitos filtrados rapidamente com estéril em trânsito, resultando na produção de um produto geotécnico estável conhecido como geowaste. Segundo a empresa, quando o geowaste é devidamente misturado, torna-se facilmente transportável e exibe alta resistência quando empilhado. Essa tecnologia possibilita o desaguamento eficiente de rejeitos para operações de mineração em larga escala, mesmo em regiões com alta atividade sísmica.



**Figura 2.5 - Processo de mistura e disposição de estéril e rejeitos na co-disposição (adaptado de FLSMIDTH, 2019).**

Conforme ilustrado no fluxograma, o rejeito inicialmente passa por uma etapa de espessamento, seguida pelo bombeamento para a fase de filtragem, visando atingir altos teores de sólidos. Simultaneamente, o estéril é submetido a um processo de britagem e peneiramento para adequação granulométrica. Após esses procedimentos, ambos os materiais são misturados em correias transportadoras e, em seguida, direcionados por meio de uma empilhadeira para a pilha de co-disposição. Nesse local, os materiais são dispostos e compactados de forma apropriada. É importante ressaltar que esse processo pode ter alterações de acordo com as características dos rejeitos e estéril, bem como das particularidades do depósito mineral e da empresa de mineração.

## 2.5. MISTURA ENTRE REJEITOS E ESTÉREIS

As principais abordagens para projetos de misturas de estéreis e rejeitos de mineração foram elaboradas com foco na definição de uma proporção ótima entre esses materiais, de modo a garantir uma melhora no comportamento mecânico e hidráulico da estrutura final de disposição (Wickland *et al.*, 2006b; Jehring & Bareither, 2016; Hamade, 2017).

Neste estudo, são aplicados os conceitos propostos por Furnas (1928) e Wickland (2006), como a teoria do empacotamento de partículas para misturas binárias, com intuito de obter a proporção ótima entre rejeitos e estéreis de mineração.

De acordo com a teoria do empacotamento de partículas para misturas binárias, além da própria proporção de mistura ( $R$ ), a proporção de tamanhos de partículas na mistura e o peso específico individual dos diferentes materiais também tendem a afetar fortemente a proporção ótima de mistura ( $R_{ot}$ ). Furnas (1928) sugere que a proporção de tamanhos de partículas em uma mistura binária é definida como a proporção entre os diâmetros das partículas grandes e pequenas, onde os vazios em uma mistura binária diminuem com o aumento da proporção de tamanhos. Fraser (1935) argumenta que, para misturas binárias com proporções de tamanhos de partículas maiores que aproximadamente 7:1, as partículas menores podem ocupar os poros das partículas maiores.

Com base nessa relação de tamanhos, Furnas (1928) apontou que a densidade máxima ocorre em uma proporção infinita de tamanhos de partículas, teoricamente representada por uma mistura de partículas sólidas e água. Considerando a densidade dos componentes individuais, segue-se que uma mudança nesse parâmetro nos componentes individuais de uma mistura binária influenciará diretamente a densidade da mistura, alterando também a proporção da mistura ideal. Portanto, os principais fatores que afetam a densidade dos materiais na mistura incluem os tamanhos das partículas, a forma das partículas e o método de empacotamento, ou seja, o processo de realização da mistura.

A aplicação da teoria do empacotamento de misturas binárias no caso de estéreis e rejeitos pode ser válida devido à grande relação entre o diâmetro médio das partículas ( $D_{50}$ ) dos dois materiais. Além disso, quando a ação mecânica ou agitação é usada no processo de mistura, a influência no empacotamento de partículas é mínima.

A razão da mistura ( $R_{ot}$ ) de rejeitos e estéreis é definida como a divisão entre a massa seca de estéreis ( $M_{es}$ ) e a massa seca de rejeitos ( $M_{rj}$ ), com base nas seguintes premissas: (i) as misturas consistem de partículas sólidas (estéreis e rejeitos), água e ar; (ii) partículas de estéreis, rejeitos e água são incompressíveis; (iii) a suspensão de rejeitos é composta por partículas sólidas e água; (iv) as misturas são homogêneas, o que significa que rejeitos, estéreis e água estão distribuídos homogeneamente na massa da mistura; (v) a massa de ar é ignorada; e (vi) estéreis e rejeitos têm uma grande diferença no diâmetro médio de partícula, o que implica que as partículas de rejeitos são fisicamente muito menores do que a proporção crítica de entrada das aberturas entre as partículas de estéreis e (vii) o volume de estéreis é unitário ( $V_{es} = 1$ ). Com base nessas premissas, a formulação para ( $R_{ot}$ ) é dada por:

$$R_{ot} = \frac{M_{es}}{M_{rj}} = \frac{\rho_{es}V_{es}}{\frac{\rho_{polpa}V_{polpa}}{1+w_{rj}}} = \frac{\rho_{es}V_{es}}{\frac{\rho_{polpa}e_{es}}{1+w_{rj}}} \quad (2.1)$$

De acordo com a Equação 2.1,  $\rho_{es}$  é a massa específica do estéril,  $V_{es}$  é o volume do estéril,  $\rho_{polpa}$  é a massa específica da polpa/lama,  $V_{polpa}$  é o volume da polpa,  $w_{rj}$  é o teor de água dos rejeitos e  $e_{es}$  é o índice de vazios do estéril.

O conceito de proporção de mistura ótima ( $R_{ot}$ ) representa uma composição em que a matriz de rejeitos preenche os vazios dos estéreis sem comprometer os contatos partícula-partícula na matriz de estéreis, alcançando assim uma densidade máxima. Essa proporção ótima de mistura também é influenciada pela densidade de empacotamento das partículas individuais e pela distribuição de tamanhos de partículas, assim como apresentado anteriormente.

De forma geral, a resistência e a compressibilidade das misturas em que  $R \geq R_{ot}$  são predominantemente determinadas pelo material estéril, enquanto o comportamento hidráulico das misturas em  $R \leq R_{ot}$  é controlado pelos rejeitos (Wickland, 2006). Além disso, estudos indicam que a presença de partículas de estéril em misturas dominadas por rejeitos ( $R \leq R_{ot}$ ) aumenta a resistência ao cisalhamento e auxilia na transição do comportamento de cisalhamento com tendências contrativas para dilatativas (Khalili *et al.*, 2010; Jehring, 2014; Jehring & Bareither, 2016; Hamade, 2017; Castillo, 2019).

Os esquemas de arranjos das partículas de estéreis e de rejeitos atuando isoladamente, bem como os arranjos de potenciais misturas entre ambos os materiais, são ilustrados na Figura 2.6.

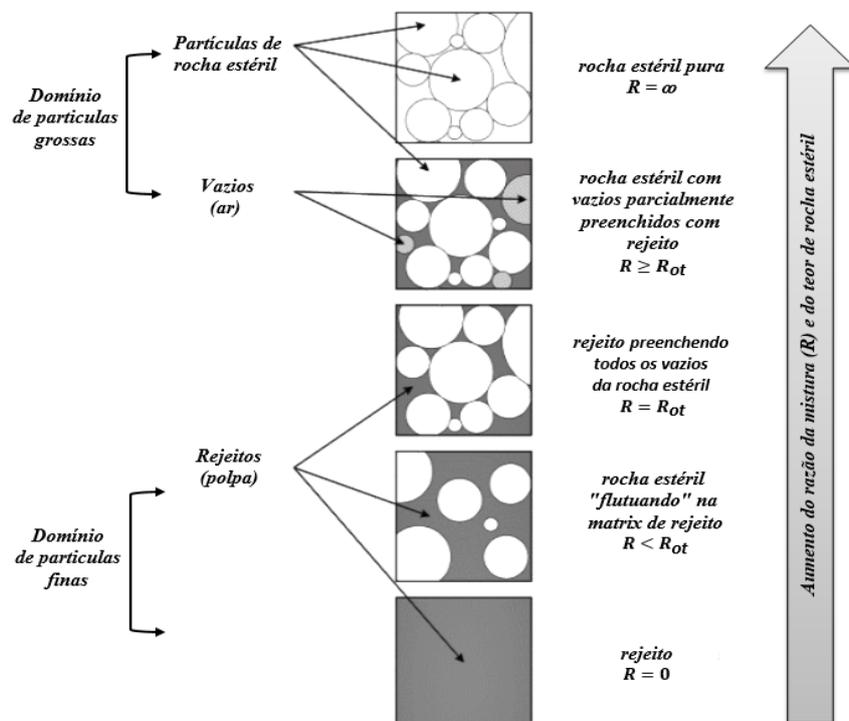
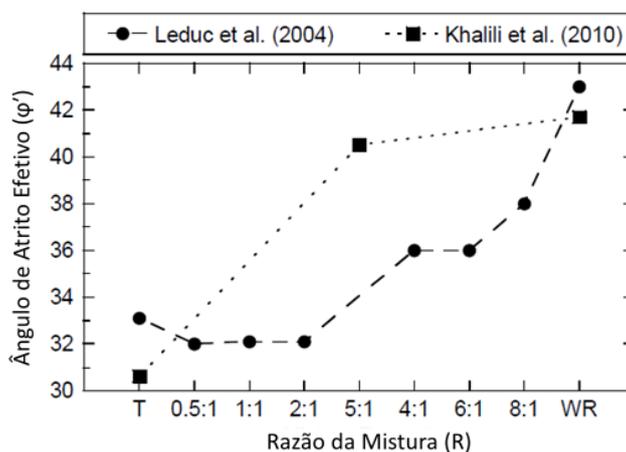


Figura 2.6 – Modelo da estrutura de partículas de estéreis e rejeitos co-misturados para diferentes proporções de mistura,  $R$  (adaptado de Wickland *et al.*, 2006b).

Com base nos arranjos apresentados na Figura 2.6, um exemplo prático da variação dos parâmetros de resistência em função da razão de misturas  $R$  pode ser observado na Figura 2.7. Jehring (2014), traçou a relação entre o ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) e a razão da mistura  $R$ , utilizando dados dos estudos de Leduc *et al.* (2004) e Khalili *et al.* (2010), que examinaram o comportamento de cisalhamento, tanto estático quanto cíclico, em misturas de rejeitos e estéreis.

Os resultados indicaram que o ângulo de atrito efetivo na mistura foi de  $40,5^\circ$ , valor semelhante ao dos estéreis ( $41,7^\circ$ ), enquanto os rejeitos apresentaram um ângulo de atrito efetivo de  $30,6^\circ$ , considerando os dados do trabalho de Khalili (2010). A análise dos dados de Leduc *et al.* (2004) revelou uma transição no comportamento da resistência ao cisalhamento da mistura. Nesse ponto, a influência dos rejeitos, que inicialmente controlavam a resistência devido a baixas razões de mistura ( $R$ ), passou a ser substituída pelo estéril, que assumiu o controle nas proporções mais elevadas de  $R$ .

Essa transição ocorreu à medida que os estéreis formaram contatos interpartículas contínuos em toda a mistura, provocando alterações no ângulo de atrito. Estes resultados ressaltam a importância da proporção entre estéreis e rejeitos na determinação das propriedades geotécnicas das misturas, destacando o impacto no comportamento de cisalhamento.



**Figura 2.7 – Relação entre o ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) e a razão de misturas  $R$  de rejeitos e estéreis de mineração, onde T são rejeitos puros e WR estéril puro (adaptado de Jehring, 2014).**

A co-disposição de estéreis e rejeitos de mineração pressupõe diferenças substanciais na proporção entre os diâmetros das partículas grandes e pequenas dos materiais. No entanto, dependendo da localização do depósito mineral, é viável considerar que o material estéril tenha

passado por alterações significativas devido a processos intempéricos. Isso pode resultar em uma composição heterogênea nesse material, abrangendo uma variedade de frações granulométricas, desde fragmentos de rocha até solos alterados. Portanto, é relevante considerar os conceitos relacionados à mistura de diferentes tipos de solos nos fundamentos da co-disposição, especialmente ao se avaliar estereis compostos por materiais finos, os quais exibem características semelhantes às de solos.

Vários pesquisadores investigaram misturas de solos, como areia-silte e areia-argila, e suas conclusões são similares aos princípios discutidos para co-disposição de estéril e rejeito (Pitman *et al.*, 1994; Thevanayagam, 1998; Thevanayagam & Mohan, 2000; Zhang & Li, 2010). De acordo com Cunha (2012), o comportamento mecânico das misturas de argila e areia é governado pelas características das matrizes argilosas ou arenosas, cujo domínio varia conforme a composição da mistura. Quando a matriz granular predomina, as propriedades geotécnicas da mistura, como resistência ao cisalhamento, coeficiente de permeabilidade e porosidade, são majoritariamente influenciadas pelas características da areia. Por outro lado, quando as propriedades da matriz argilosa são predominantes, estas determinam as características da mistura, sendo influenciadas principalmente pela mineralogia. A existência ou ausência de contato intergranular entre os grãos de areia é um fator determinante para identificar qual matriz está controlando o comportamento da mistura.

Thevanayagam (1998) investigou o impacto do teor de silte na resistência ao cisalhamento não drenado de areias siltosas, sugerindo que a mistura de areia siltosa pode ser descrita com relação a três índices de vazios relevantes: (i) índice de vazios global da mistura composta  $e_g$ , (ii) índice de vazio da fração fina  $e_{rj}$ , e (iii) índice de vazios da fração mais grosseira ( $e_{es}$ ). Thevanayagam (1998) derivou duas equações que relacionam os índices das frações finas e grossas em termos de  $t_f$  para uma mistura com a mesma densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ):

$$e_{es} = \frac{e_g + t_f}{1 - t_f} \quad (2.2)$$

$$e_{rj} = \frac{e_g}{t_f} \quad (2.3)$$

Quando o teor de finos é igual a zero,  $e_{es}$  é igual a  $e_g$ , devido a mistura não conter finos. Um aumento no teor de finos aumenta a magnitude de  $e_{es}$ , e um aumento em  $e_{es}$  acima da taxa do índice de vazios máximo do material não misturado leva a uma diminuição nos contatos de partículas grossas. Por outro lado, quando o teor de finos é igual a um,  $e_{rj}$  é igual a  $e_g$ , devido a mistura não conter partículas grossas. Uma diminuição no teor de finos resulta na diminuição

de  $e_g$  à medida que partículas grossas, sem espaços internos, começam a substituir a fração de finos.

Thevanayagam (1998) relatou que estes três índices de vazios poderiam ser usados para descrever com mais eficácia o comportamento de cisalhamento de uma dada mistura contendo frações distintas de partículas grosseiras e finas.

Em seu estudo, Thevanayagam (2007) analisou separadamente as misturas dominadas por fração grossa e as dominadas por frações finas para avaliar a influência da razão de cada uma na mistura. Para cada categoria de mistura, um índice de vazios equivalente foi introduzido para descrever de forma mais precisa os três índices de vazios ( $e_g$ ,  $e_{es}$ ,  $e_{rj}$ ). Estudos subsequentes sugeriram que esses índices de vazios equivalentes são uma ferramenta eficaz para relacionar o comportamento de cisalhamento não drenado de misturas de areia-siltosa à fração predominante na mistura (Castillo, 2019; Thevanayagam *et al.*, 2002; NI *et al.*, 2004; Rahman *et al.*, 2008; Bobei *et al.*, 2009). O índice de vazios equivalente à fração grossa predominante na mistura ( $e_{es}^*$ ) é dado por:

$$e_{es}^* = \frac{e_g + (1-b)t_f}{1 - (1-b)t_f} \quad (2.4)$$

Onde  $b$  é um parâmetro que varia de zero a um e representa a influência da fração mais fina na transferência de tensão durante o cisalhamento (Rahman *et al.*, 2008). O índice de vazio equivalente à fração fina ( $e_{rj}^*$ ) para misturas controladas por fração fina é:

$$e_{rj}^* = \frac{e_g}{t_f + \frac{d_r}{d_r^m}} \quad (2.5)$$

Onde  $d_r$  é a disparidade do tamanho de partícula (por exemplo, fração mais grossa -  $D_{10}$  / fração mais fina -  $D_{50}$ ) e  $m$  é um coeficiente que varia entre zero e um e depende das características das partículas e do empacotamento da fração mais fina. O parâmetro  $b$  na Eq. 2.4 e o parâmetro  $m$  na Eq. 2.5 são parâmetros de ajuste empíricos. Em geral,  $b$  e  $m$  diminuem com o aumento de  $d_r$  (Castillo, 2019; Thevanayagam *et al.*, 2007; Rahman *et al.*, 2008).

A Eq. 2.4 foi obtida assumindo que o  $G_s$  da fração grossa e fina são os mesmos (Hamade, 2017; Thevanayagam *et al.*, 2007). Para materiais com diferentes  $G_s$  tem-se a equação dada por:

$$e_{es}^* = \frac{e_g G_{s,es} + [t_f(1-b)](G_{s,rj} + e_g G_{s,rj} - e_g G_{s,es})}{G_{s,es}[1 - t_f(1-b)]} \quad (2.6)$$

Com base nas relações descritas, Thevanayagam & Mohan (2000) investigaram misturas de areia contendo diferentes proporções de finos não-plásticos para examinar o efeito dos grãos

grossos e finos no comportamento tensão-deformação de uma areia siltosa. Concluíram que teores de finos entre 20% e 30% na matriz granular resultam em uma transição entre dois comportamentos. Para teores de argila de 10%, a matriz granular domina a compressibilidade, enquanto para teores de finos de 40%, a matriz argilosa predomina.

Zhang e Li (2010) conduziram estudos experimentais com foco na porosidade da matriz granular dos solos. Observaram que solos com teor de areia abaixo de 70%, indicando um teor de finos acima de 30%, apresentam estrutura controlada pelos finos e são sensíveis às variações na umidade. Por outro lado, solos com teor de grãos superior a 70% possuem uma estrutura governada pela matriz granular, sendo estáveis diante das mudanças na umidade, independentemente do solo estar compactado, saturado ou seco.

Outros estudos, como os de Pitman *et al.* (1994) e Vallejo & Mawby (2000), também reforçam a influência significativa do teor de finos e do contato entre os grãos grosseiros no comportamento mecânico e hidráulico das misturas de solos. Isso ressalta a importância de uma análise detalhada para diferentes proporções de mistura na co-disposição, independentemente da granulometria dos materiais envolvidos. Tal análise é essencial para compreender a faixa em que ocorre a dominância de comportamento para diferentes razões de mistura e níveis de umidade. Essa abordagem visa identificar o ponto ideal para o desempenho tanto dos materiais misturados quanto das estruturas construídas com eles, levando em consideração tanto o estéril rochoso não alterado quanto aquele composto por solos.

## **2.6. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DA MISTURA DE ESTÉREIS E REJEITOS**

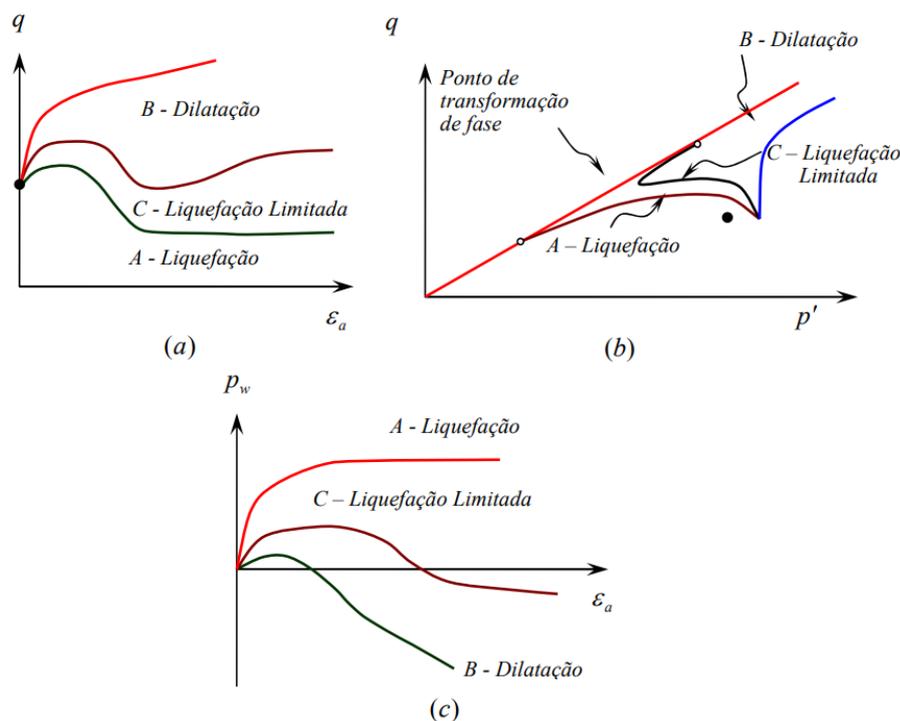
A avaliação dos parâmetros de resistência é essencial ao considerar a aplicação de novos materiais, assim como destacado por Hamade (2017). A literatura, conforme analisada por Wickland (2006), aponta que a resistência ao cisalhamento em misturas é influenciada pela presença ou ausência de contato entre partículas de maiores dimensões. De modo geral, a resistência ao cisalhamento da mistura está intimamente relacionada ao índice de vazios granular, ou índice de vazios das frações grosseiras, como o estéril ( $e_{es}$ ), fornecendo uma medida do arranjo ou empacotamento destas partículas de maior dimensão na mistura.

Os estudos de Hamade (2017) e Castillo (2019) focaram no potencial de ruptura em ensaios de cisalhamento não drenado em misturas de estéreis e rejeitos. Os resultados indicam que o desenvolvimento desse tipo de falha está associado ao carregamento concentrado na fração de rejeitos em misturas onde essa fração é dominante.

Essas análises contribuíram para uma compreensão mais aprofundada das interações entre os materiais e os fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento, destacando, por exemplo, a relevância da poropressão nesse contexto.

A geração de poropressão durante o cisalhamento não drenado, seja positiva ou negativa, afeta diretamente a resistência ao cisalhamento. A poropressão positiva é gerada a partir de uma tendência do material à contração (isto é, diminuir o volume) e pode levar a um comportamento de amolecimento por deformação, conhecido como *strain-softening*. A poropressão negativa é gerada a partir de uma tendência do material à dilatação (isto é, aumentar o volume) e pode levar a um comportamento de endurecimento por deformação, denominado *strain-hardening* (Kramer, 1996).

O comportamento do cisalhamento não drenado, considerando a tensão desviatória ( $q$ ) e o excesso de poropressão de água ( $u_e$ ) em relação à deformação axial ( $\varepsilon_a$ ) e a análise das trajetórias de tensões efetivas, é ilustrado na Figura 2.8.

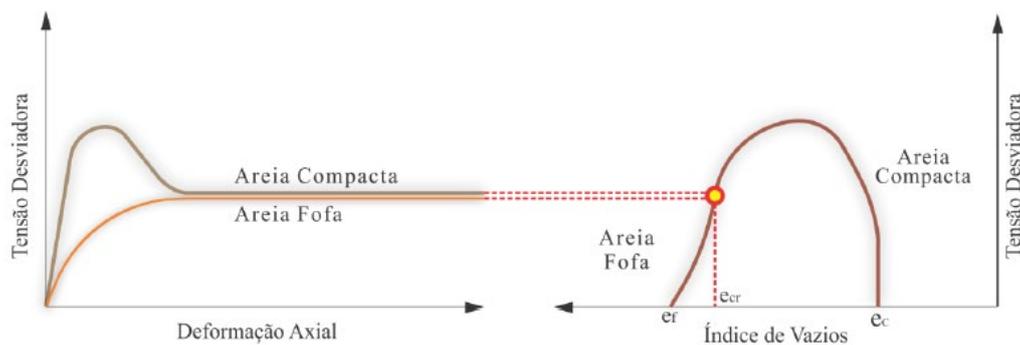


**Figura 2.8 – Comportamento típico de areias em ensaios triaxiais não-drenados monotônicos nos planos: a)  $\varepsilon_a; q$ ; b)  $p'; q$ ; c)  $p_w; \varepsilon_a$  (Kramer, 1996).**

Kramer (1996) apresentou três tipos de comportamentos diferentes de cisalhamento não drenado para solos sob compressão monotônica: (A) liquefação, (B) dilatação e (C) liquefação

limitada. Para o comportamento de liquefação, o solo exibe tendências contrativas, resultando na geração de excesso de poropressão positiva e, conseqüentemente, na perda de resistência ao cisalhamento. Esse fenômeno faz com que o material se comporte como um fluido, representando o cenário mais desfavorável em casos de ruptura não drenada. Para o comportamento dilatante, o solo apresenta tendências dilatativas, onde o excesso de poropressão negativa produz um aumento na resistência ao cisalhamento, caracterizando um comportamento *strain-hardening*. O comportamento de liquefação limitada, por sua vez, é um estágio intermediário entre as condições de contração e dilação, resultando em um leve aumento ou diminuição na resistência ao cisalhamento, dependendo da magnitude do excesso de poropressão.

Ao abordar o fenômeno da liquefação, é fundamental compreender o conceito de estado crítico do solo e sua relação com a suscetibilidade à liquefação. Casagrande, (1936) executou uma série de ensaios triaxiais drenados, sob condições de deformação controlada, utilizando amostras de areia fofa e densa. Os resultados experimentais indicaram que, sob uma mesma tensão efetiva, a densidade relativa dos materiais ensaiados convergia para um valor específico à medida que as amostras sofriam grandes deformações (Fig. 2.9). Nesses ensaios, a elevação de volume para areias compactas e a redução de volume para areias fofas durante a deformação cisalhante resultavam em uma mesma densidade crítica ou índice de vazios crítico ( $e_c$ ). Esse parâmetro representa a capacidade do solo de sofrer deformação sem modificar seu volume (Freire Neto, 2009; Guillén, 2008; Castilho, 2017).



**Figura 2.9 – Comportamento de areias fofas e compactas sob cisalhamento (Kramer, 1996).**

A definição do estado de um solo em termos de índices de vazios e do logaritmo da tensão efetiva de confinamento permitiu a elaboração de uma linha que separou as areias fofas e contrácteis das areias compactas e dilatantes, a qual foi denominada de Linha de Estado Crítico (LEC) ou *Critical State Line* (CSL). Essa linha, representada na Figura 2.10a, delimitou uma

fronteira entre os comportamentos de contração e expansão volumétrica, tornando-se um critério significativo para a determinação do limiar de suscetibilidade de um solo ao fenômeno da liquefação (Guillén, 2008; Freire Neto, 2009; Castilho, 2017).

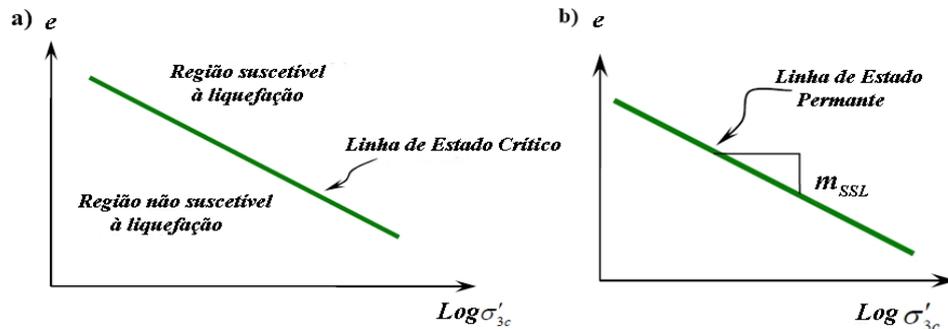


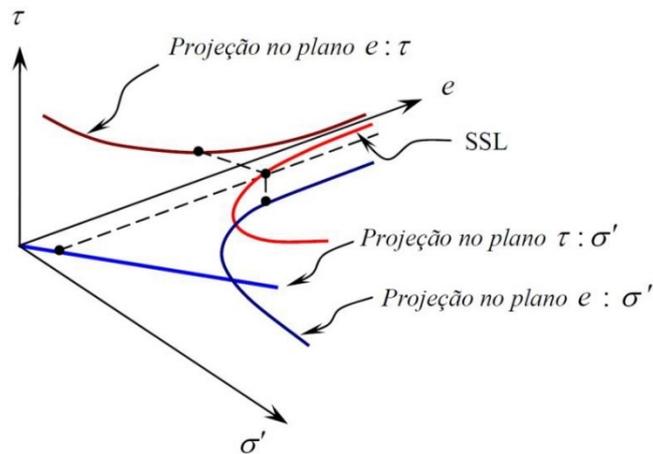
Figura 2.10 - a) Linha de Estado Crítico; b) Linha de estado Permanente (Kramer, 1996).

Solos saturados com índices de vazios altos o suficiente para serem localizados acima da Linha de Estado Crítico são considerados suscetíveis à liquefação, apresentando tendência à contração, ao passo que aqueles localizados abaixo dela são classificados como não-suscetíveis, mostrando uma propensão à dilatação.

Posteriormente às pesquisas de Casagrande, Castro conduziu uma série de ensaios triaxiais controlados por tensão. Nestas análises, as amostras fofas resultaram em ruptura por liquefação, culminando em um estado estacionário claramente definido ao término dos ensaios (Castro, 1969; Castro & Poulos, 1977). Poulos (1981) definiu o estado estacionário de deformação como sendo aquele em que a massa de partículas está continuamente se deformando com volume constante, tensão efetiva normal constante, tensão de cisalhamento constante e velocidade constante. A relação entre o índice de vazios no estado estacionário e a tensão efetiva média é representada por uma linha conhecida como Linha de Estado Estacionário (LEE), Linha de Estado Permanente (LEP) ou *Steady State Line* (SSL) - Figura 2.10b.

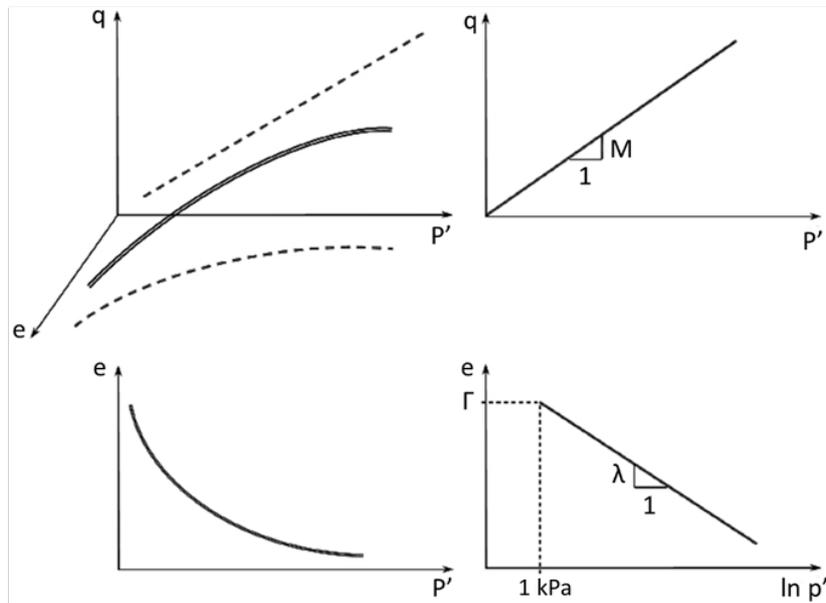
Solos localizados abaixo da SSL não são suscetíveis à liquefação, enquanto solos localizados acima somente serão suscetíveis à liquefação se a tensão cisalhante exceder a sua resistência residual (Guillén, 2008; Castilho, 2017).

De maneira geral, tanto a Linha de Estado Crítico quanto a Linha de Estado Permanente podem ser plotadas como curvas em um espaço tridimensional ( $e; \sigma'; \tau$  ou  $e; p'; q$ ) ou projetadas em planos como  $\tau$  vs  $\sigma'$  ou  $e_{constante}$  vs  $\sigma'$ . Na Figura 2.11 tem-se a representação da curva SSL no espaço tridimensional e sua projeção nos espaços bidimensionais.



**Figura 2.11 - Representação tridimensional da Linha de Estado Permanente no espaço  $e;\sigma';\tau$  e nos planos  $\tau;\sigma'$  e  $e;\sigma'$  (Kramer, 1996).**

Na Figura 2.12a tem-se a representação da Linha de Estado Crítico no espaço tridimensional ( $e;p';q$ ), enquanto que nas Figura 2.12b, 2.12c e 2.12d tem-se a projeção da mesma nos planos bidimensionais.



**Figura 2.12 - Representação da Linha de Estado Crítico no espaço  $p';q;e$  e nos planos bidimensionais (adaptado de Carneiro, 2021).**

A relação entre os parâmetros apresentados na Figura 2.12 são dados pelas equações:

$$e = \Gamma - \lambda * \ln p' \quad (2.7)$$

$$q = M * p' \quad (2.8)$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (2.9)$$

Onde:  $e$  é o índice de vazios;  $\Gamma$  é o intercepto da LEC com o eixo das ordenadas para o nível de tensão  $p' = 1$  kPa;  $\lambda$  é a inclinação da LEC; e  $p'$  é a tensão média efetiva.

A Linha de Estado Crítico é governada pela Equação 2.8 no plano  $p';q$  e pela Equação 2.7 no plano  $e; \ln p'$ . A magnitude da tensão desviatória ( $q$ ) necessária para manter o solo em fluxo contínuo é determinada pela Equação 2.9 do estado crítico. Essa equação, resultante da multiplicação da razão de atrito crítico ( $M$ ) pela tensão efetiva média ( $p'$ ), estabelece que o volume específico ocupado por partículas em fluxo diminuirá à medida que o logaritmo da tensão média efetiva aumentar (Fig. 2.12).

As constantes  $M$ ,  $\Gamma$  e  $\lambda$  na equação 2.7 são propriedades intrínsecas do solo, independentes das condições iniciais de estado de tensão e da estrutura do solo. O parâmetro  $M$  reflete a inclinação da linha de estados críticos no plano  $q;p'$ , e pode ser correlacionado ao ângulo de atrito no estado crítico ( $\varphi'_c$ ), conforme expresso pelas Equações 2.10 e 2.11, para compressão triaxial e extensão triaxial, respectivamente. Além disso,  $\Gamma$  está correlacionado de certa forma com o índice de vazios máximo (Jefferies & Been, 2016).

$$M_{tc} = \frac{6 \sin \varphi'_c}{3 - \sin \varphi'_c} \quad (2.10)$$

$$M_{te} = \frac{6 \sin \varphi'_c}{3 + \sin \varphi'_c} \quad (2.11)$$

Para quantificar a correlação entre o índice de vazios crítico ( $e_c$ ) e a tensão efetiva média ( $p'_c$ ) e determinar a LEC, pode-se tomar a relação semilogarítmica expressa por:

$$e_c = \Gamma - \lambda * \ln p'_c \quad (2.12)$$

Em que:  $e_c$  é o índice de vazios crítico; e  $p'_c$ , é a tensão efetiva média no estado crítico.

É relevante destacar que a correlação entre o volume específico crítico e a tensão efetiva média crítica não necessariamente segue uma equação logarítmica. Uma alternativa é utilizar uma equação de lei de potência, como indicada na Equação 2.13, para realizar um ajuste mais preciso para as linhas de estado crítico com curvaturas mais acentuadas.

$$e_c = Ca - Cb \left( \frac{p'}{p'_{ref}} \right)^{Cc} \ln p'_c \quad (2.13)$$

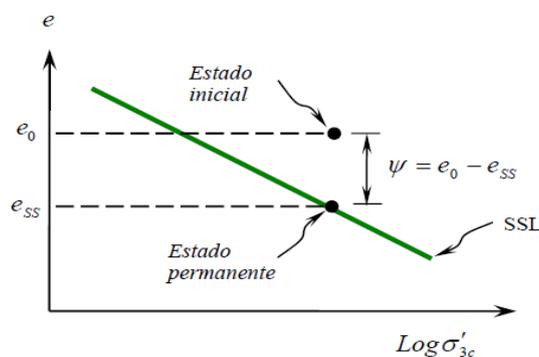
Onde  $Ca$ ,  $Cb$  e  $Cc$  são constantes de ajuste.

Ao analisar a Linha de Estado Permanente, observamos que o índice de vazios e a densidade relativa exercem uma influência limitada na avaliação da suscetibilidade à liquefação. Em outras palavras, um solo com um índice de vazios específico pode liquefazer sob altas tensões de confinamento, o que não ocorre sob baixas tensões de confinamento. Para abordar essa questão, introduziu-se o conceito de parâmetro de estado, definido por:

$$\psi = e_0 - e_{ss} \quad (2.14)$$

Onde  $e_0$  é o índice de vazios do solo *in situ* antes do cisalhamento, e  $e_{ss}$  é o índice de vazios na Linha de Estado Permanente sob a tensão de confinamento efetiva de interesse (Silva, 2010; Castilho, 2017; Alves, 2017).

Esse parâmetro de estado, representado na Figura 2.13, é útil para quantificar o comportamento contrativo ou dilatativo de um solo durante o cisalhamento não drenado, o que pode ser traduzido no potencial de liquefação. O potencial de liquefação está associado a  $\psi$  positivo ou a um ponto de estado inicial localizado acima do LEP. O comportamento de liquefação limitada está associado a um ponto inicial localizado próximo ao LEP, e o comportamento dilatante está associado a um  $\psi$  negativo, ou a um ponto de estado inicial abaixo do LEP (Guillén, 2008; Castilho, 2017).



**Figura 2.13 - Definição do parâmetro de estado  $\psi$  (Guillén, 2008)**

A avaliação do potencial de liquefação de um produto resultante da mistura de estéreis e rejeitos é importante para entender a aplicabilidade do material para projetos de engenharia geotécnica, onde este estudo deve ser realizado para diferentes proporções de mistura. Uma combinação da teoria da relação ótima de mistura ( $R_{ot}$ ) com o comportamento do material no estado permanente (SSL) pode fornecer uma avaliação e previsão do comportamento do potencial de liquefação das misturas (Hamade, 2017).

## 2.7. MODELAGEM CONSTITUTIVA

A modelagem constitutiva de solos desempenha um papel essencial na compreensão e quantificação do comportamento desses materiais em diversas condições de carregamento. Nas últimas décadas, foram dedicados esforços significativos para compreender as trajetórias complexas de carregamento por meio de ensaios laboratoriais e para desenvolver equações constitutivas capazes de reproduzir as características observadas tanto em laboratório quanto em campo.

Foram propostos diversos modelos constitutivos para reproduzir e prever o comportamento tensão-deformação dos solos, cada um apresentando suas vantagens e limitações, dependendo da aplicação específica. Esses modelos devem atender a critérios fundamentais, como estar em conformidade com os princípios teóricos da mecânica do contínuo, representar de forma precisa o comportamento observado em ensaios de laboratório ou campo, exigir parâmetros que possam ser obtidos por meio de ensaios convencionais de mecânica dos solos e ser eficientes computacionalmente (Guillén, 2008).

Os modelos clássicos como o modelo Linear Elástico e o modelo de Mohr-Coulomb têm sido amplamente utilizados na geotecnia devido à sua simplicidade e capacidade de estimar o comportamento tensão-deformação com base em parâmetros facilmente obtidos em laboratório.

Outro modelo simplificado, utilizado nos softwares comerciais, é o modelo Elástico Isotrópico. Neste modelo, a resposta elástica é descrita por dois parâmetros independentes: o módulo de Elasticidade ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). De acordo com o manual do Geostudio, o termo modificador 'linear' foi propositalmente excluído porque o modelo Elástico Isotrópico pode acomodar elasticidade não linear (manual Geostudio).

O desenvolvimento do modelo Cam-Clay Modificado representa um marco significativo na geotecnia, ao introduzir a solução numérica para problemas geotécnicos utilizando modelos constitutivos elasto-plásticos. Esse avanço permitiu simular carregamentos cíclicos, influenciando a exploração de teorias mais avançadas (Guillén, 2008).

O modelo NorSand, desenvolvido inicialmente por Jefferies (1993) e aprimorado ao longo do tempo com contribuições de outros pesquisadores, é de suma importância na modelagem de materiais de mineração, especialmente os rejeitos. Ele se fundamenta nos princípios da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.

O modelo Norsand surgiu da necessidade de se compreender o comportamento de areias fofas e densas em condições drenadas ou não drenadas, especialmente durante a construção de

estruturas. Destaca-se a importância do parâmetro de estado ( $\psi$ ) neste modelo, o qual tem grande peso nas modelagens, o que o torna capaz de capturar mudanças no comportamento do solo em resposta a variações no índice de vazios. Essa característica faz com que o modelo seja especialmente aplicável a problemas de liquefação estática e dilatância, justificando seu uso em análises de comportamento geotécnico de rejeitos de mineração (Carneiro, 2021; Araujo, 2022; Menezes, 2023).

As propriedades do solo requeridas pelo modelo NorSand são amplamente conhecidas e podem ser determinadas com facilidade por meio de ensaios de compressão triaxial, conforme discutido por Shuttle & Jefferies (2016).

Um aspecto fundamental do comportamento do solo incorporado no modelo NorSand é a dilatância, que representa a tendência dos solos a alterar seu volume durante o cisalhamento. Isto se dá devido ao comportamento de mudança de volume ser uma característica distintiva dos solos em relação a outros materiais de engenharia.

Conforme destacado por Shuttle & Jefferies, 2010, ao discutir sobre dilatância, é crucial atentar para a convenção de sinais adotada para sua representação. Isso se deve ao fato de que, comumente, a dilatância positiva é interpretada como um aumento de volume durante o cisalhamento, o que contrasta com a convenção positiva de compressão adotada na engenharia geotécnica. Essa discrepância na interpretação dos sinais pode levar a equívocos na análise do comportamento do solo.

Adicionalmente, é importante ressaltar que na literatura geotécnica há uma distinção relevante entre duas definições de dilatância: a dilatância absoluta (*dilatancy*), e a taxa de dilatação (*dilation rate*). A dilatância absoluta refere-se à mudança na deformação volumétrica que ocorre desde a condição inicial do solo. Por outro lado, a taxa de dilatação é definida como a razão entre a taxa, ou incremento, de mudança de volume e a taxa de deformação por cisalhamento, dada por:

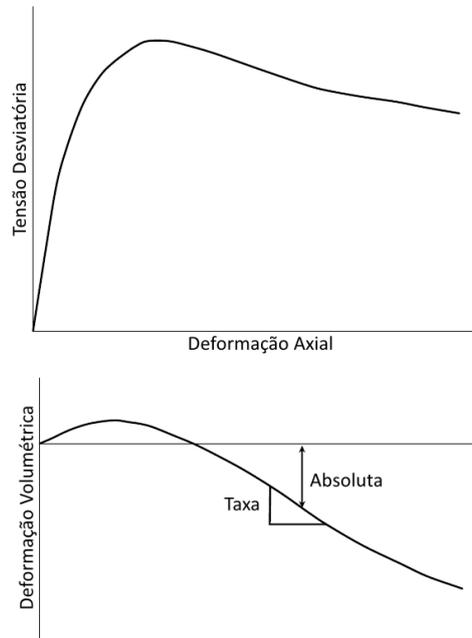
$$D = \frac{\varepsilon'_v}{\varepsilon'_q} = \frac{\varepsilon'_{vn+2} - \varepsilon'_{vn-2}}{\varepsilon'_{qn+2} - \varepsilon'_{qn-2}} \quad (2.15)$$

Onde:  $\varepsilon'_v$  é o incremento de deformação volumétrica; e  $\varepsilon'_q$  é o incremento de deformação distorcional. Sendo estes dois parâmetros obtidos por:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta e}{1+e_i} \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_q = \varepsilon_a - \frac{\varepsilon_v}{3} \quad (2.17)$$

A Figura 2.14 ilustra os conceitos de dilatância e taxa de dilatação. É importante notar que a definição de taxa de dilatação é mais amplamente utilizada na literatura técnica, servindo como fundamento para o desenvolvimento de teorias como a de tensão-dilatância e da lei de dilatância de estado, conforme descrito a seguir.



**Figura 2.14 - Dilatância absoluta e taxa de dilatação (adaptado de Jefferies & Been, 2016).**

Rowe (1962) demonstrou que a dilatação é um fenômeno presente ao longo do comportamento tensão-deformação de materiais particulados e não está restrita apenas à resistência de pico. Com base nessa observação, ele desenvolveu a teoria de tensão-dilatância, na qual correlacionou a razão da tensão mobilizada durante o cisalhamento com as taxas de deformação plástica. A Equação 2.18 representa a teoria de tensão-dilatância, onde a invariante de tensão ( $\eta$ ) é relacionada com a razão crítica de atrito ( $M_{tc}$ ) e à dilatância ( $D$ ) (Jefferies & Been, 2016).

$$\eta = M_{tc} - D \quad (2.18)$$

Onde,

$$\eta = \left( \frac{q}{p'} \right) \quad (2.19)$$

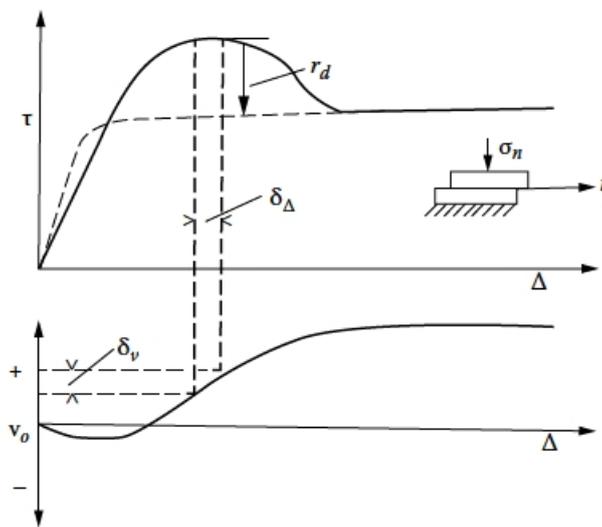
Para o ensaio triaxial, as invariantes de tensão efetiva média ( $p'$ ) e tensão desviadora ( $q$ ) são definidas por:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (2.20)$$

$$q = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \quad (2.21)$$

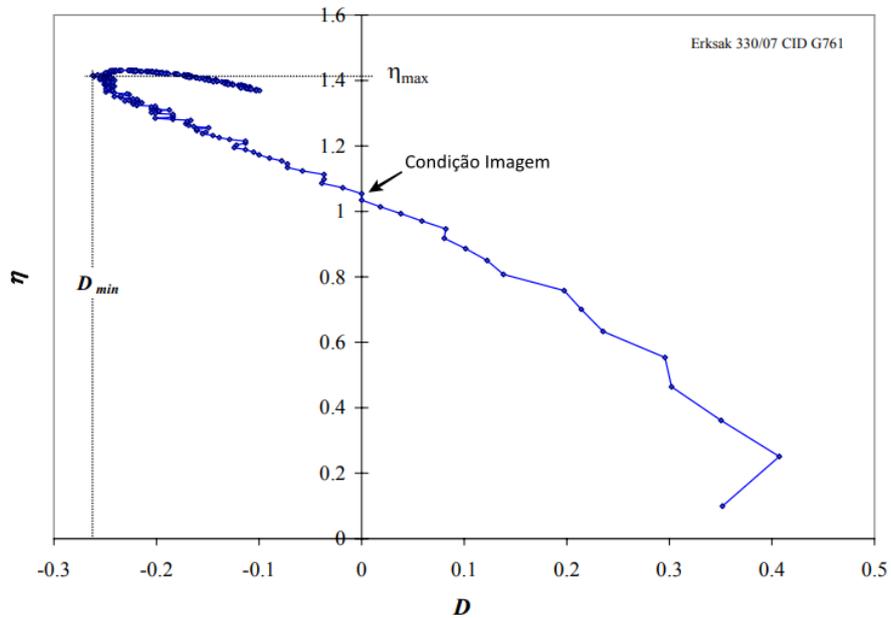
Shuttle & Jefferies (2010) explicam que, para materiais densos, tanto arenosos quanto argilosos, a dilatância se limita a um valor máximo, denominado  $D_{min}$ , para um determinado estado do solo.

No estado crítico, a dilatância é nula, e a resistência máxima, representada pelo invariante máximo de cisalhamento ( $\eta_{max}$ ), é alcançada quando a dilatância máxima ( $D_{min}$ ) é atingida (Fig. 2.15). Essa dinâmica destaca a importância da dilatância na compreensão do comportamento do solo pré-cisalhamento, especialmente no ponto de tensão máxima.



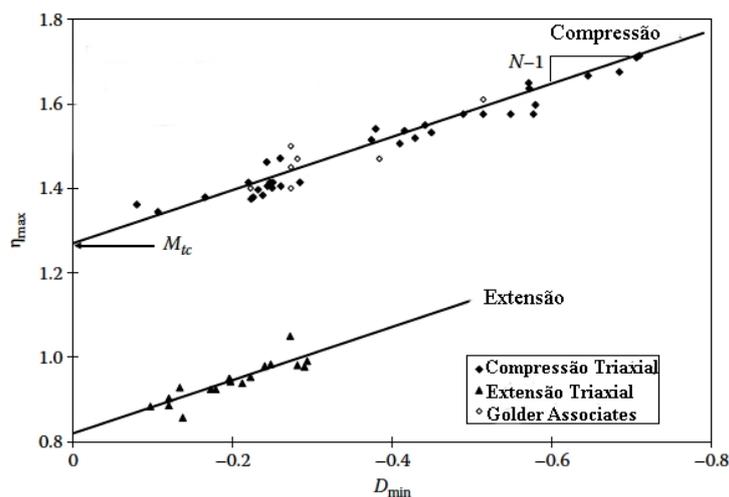
**Figura 2.15 - Ilustração da dilatância e componentes de ângulo de atrito (adaptado de Jefferies & Been, 2016).**

Outro aspecto relevante é a observação de uma condição imagem momentânea no material granular compacto (Fig. 2.16), similar ao estado crítico, que evidencia a transição na taxa de deformação volumétrica de contração para dilatação.



**Figura 2.16 - Relação tensão-dilatância em areia compacta drenada (adaptado de Shuttle & Jefferies, 2010).**

Os valores de  $\eta_{max}$  e  $D_{min}$  obtidos em ensaios triaxiais drenados podem ser representados no espaço de tensão-dilatância. Essa representação possibilita a determinação de  $M_{tc}$  e do acoplamento volumétrico entre deformações distorcional e média ( $N$ ), conforme ilustrado na Figura 2.17 (Jefferies & Been, 2016).



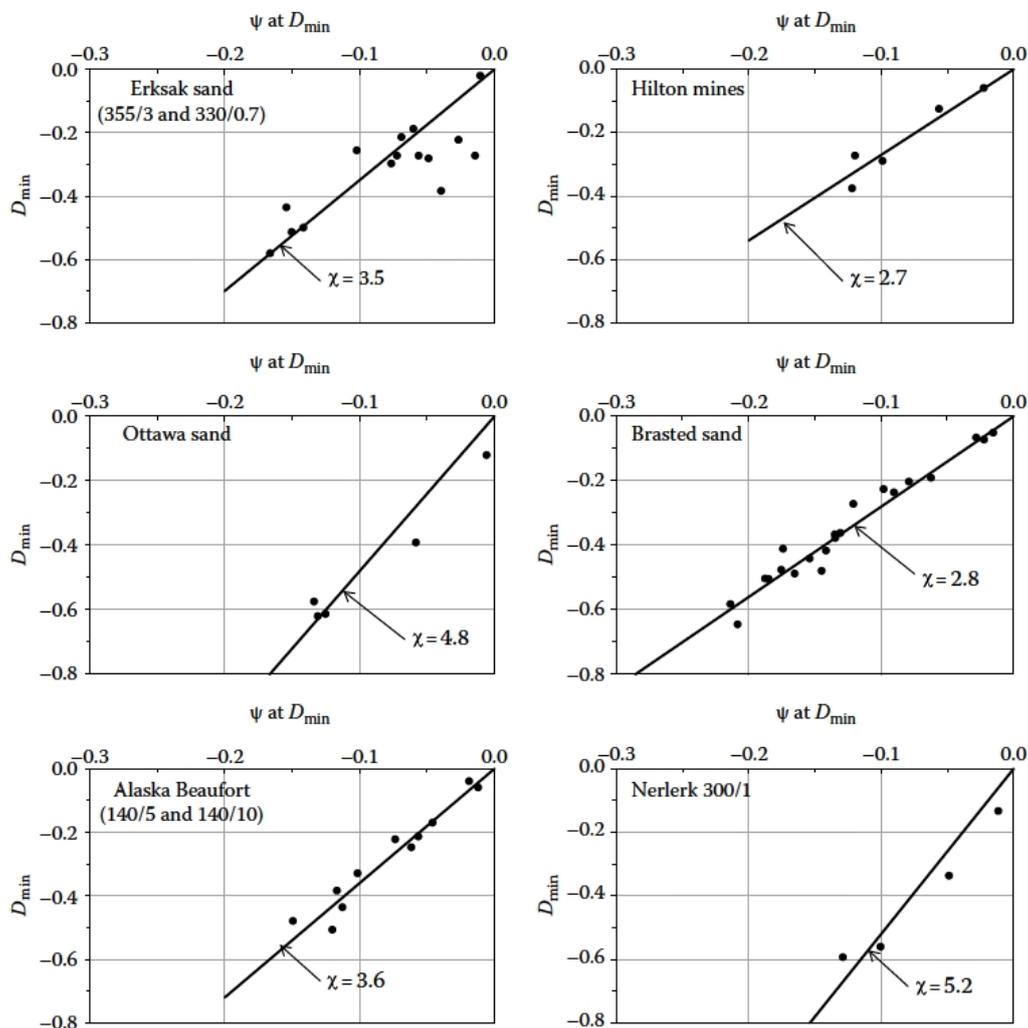
**Figura 2.17 - Dados experimentais para relação entre pico de resistência e pico de dilatância para areia Erksak em compressão e extensão triaxial (adaptado de Jefferies & Been, 2016).**

Com base na análise de dados provenientes de diversos materiais arenosos com distintos teores de finos, Shuttle & Jefferies (2010) propuseram uma relação singular entre o parâmetro de estado ( $\psi$ ) e a dilatância máxima ( $D_{min}$ ), conforme ilustrado na Figura 2.18 e definido por:

$$D_{min} = \chi_{tc} - \psi \quad (2.22)$$

Onde  $\chi_{tc}$  representa uma característica do solo derivada do ensaio de compressão triaxial drenado, e a dilatância máxima ( $D_{min}$ ) ocorre no ponto de máximo da razão de tensões ( $\eta_{máx}$ ).

A Figura 2.18 ilustra a derivação do parâmetro  $\chi$  para areias selecionadas de diferentes localizações.



**Figura 2.18 - Derivação do parâmetro  $\chi$  para areias selecionadas de diferentes localizações (adaptado de Jefferies & Been, 2016).**

É importante observar que embora o modelo Norsand adote o conceito de elasticidade isotrópica em sua formulação, esta pode não capturar completamente o comportamento anisotrópico dos materiais particulados. Porém, em vez de recorrer a modelos complexos para representar o comportamento anisotrópico, é mais eficaz começar com uma abordagem isotrópica. Assim, um modelo rígido ao cisalhamento tende a não ser o mais adequado, visto que deformações elásticas ao cisalhamento estão presentes em todo o solo.

A representação das condições elásticas pode ser descrita pela variação do módulo cisalhante ( $G$ ) com a tensão efetiva média ( $p'$ ), definida como:

$$G_{max} = G_{ref} \left( \frac{p'}{p'_{ref}} \right)^{n_p} \quad (2.23)$$

Onde  $G_{ref}$  é o módulo de cisalhamento na tensão de referência  $p'_{ref}$ , geralmente adotada como 100 kPa,  $p'$  é a tensão atual, e  $n_p$  é o expoente elástico, que depende do tipo de solo, sendo que  $n_p = 0$  indica um módulo constante,  $n_p = 1$  está associado a argilas e areias, geralmente apresentando  $n = 0,5$  (Jefferies & Been, 2016).

O parâmetro  $G_{max}$  geralmente pode ser obtido por meio de diferentes métodos, tanto em condições de campo quanto em laboratório, utilizando técnicas como testes de colunas ressonantes ou elementos de flexão. No entanto, em situações em que a medição direta do  $G_{max}$  não é viável, uma abordagem comum é sua estimativa com base em dados de materiais similares, seguida de uma calibração utilizando modelos de estado crítico, como o NorSand. Esta técnica é particularmente útil para ajustar as trajetórias de tensões derivadas de ensaios triaxiais, embora deva-se ressaltar que tal abordagem pode implicar na perda de precisão.

Além da caracterização do módulo de cisalhamento, a determinação dos parâmetros plásticos é de suma importância para a compreensão do comportamento dos solos, uma vez que as deformações plásticas constituem uma resposta do solo à aplicação de carga. Enquanto o módulo elástico ao cisalhamento controla as deformações elásticas, o endurecimento, representado pelo parâmetro plástico ( $H$ ) regula as deformações plásticas sob incrementos de tensão. Valores mais elevados de ( $H$ ) resultam em curvas tensão-deformação mais rígidas, exercendo influência significativa sobre a resistência do solo não drenado.

Shuttle & Jefferies (2010) destacam que tanto o módulo elástico ao cisalhamento quanto o módulo plástico podem estar intrinsecamente ligados à estrutura das partículas do solo, sofrendo influência significativa do processo de preparação da amostra. No entanto, até o momento, não foram desenvolvidas técnicas robustas para a determinação direta do módulo

plástico *in situ*. Assim, a avaliação do módulo plástico geralmente é realizada por meio do método da Modelagem Iterativa Direta (MID). Nesse procedimento, são explorados diferentes valores do parâmetro ( $H$ ) até que o modelo constitutivo adotado seja capaz de ajustar-se de maneira ótima aos dados experimentais disponíveis.

O módulo plástico é dependente do parâmetro de estado inicial, sendo subdividido em duas constantes,  $H_0$  e  $H_\psi$ , dadas por:

$$H = H_0 - H_\psi * \psi_0 \quad (2.24)$$

Onde  $H_0$  e  $H_\psi$  são constantes, sendo  $H_0$  o módulo de endurecimento plástico para a condição de parâmetro de estado igual a zero;  $H_\psi$  o módulo de endurecimento plástico como função do parâmetro de estado; e  $\psi_0$  o parâmetro de estado medido no início do carregamento usando índice de vazios inicial e índice de vazios crítico na tensão efetiva média inicial:  $\psi_0 = e_0 - (e_c \text{ em } p_0)$ .

## 2.8. MODELAGEM NUMÉRICA DE PILHAS DE CO-DISPOSIÇÃO

A modelagem numérica de pilhas de co-disposição de rejeitos e estéreis na mineração emerge como uma ferramenta crucial para compreender e antecipar o comportamento geotécnico dessas estruturas complexas. Para tal fim, podem ser empregados diferentes softwares comerciais, como o Seep/W, Sigma/W e Slope/W, integrados dentro do pacote Geostudio da Geoslope Internacional e o Plaxis, da Bentley Systems. A utilização dessas ferramentas permite a realização de análises acopladas, abrangendo tanto a deformação quanto o fluxo de água na pilha, enquanto incorpora a análise detalhada das interações entre tensão, deformação e adensamento do material. Essa abordagem computacional oferece uma plataforma robusta para a simulação e compreensão do comportamento dessas estruturas em condições diversas de operação e carregamento.

A formulação do processo de adensamento adotada pelos softwares é embasada na Teoria de Biot (1941), com adaptações das formulações da mecânica dos solos não saturados. Essa teoria foi adaptada para o contexto bidimensional, resultando em um conjunto de equações diferenciais governantes que são resolvidas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é amplamente reconhecido como uma das principais técnicas para a resolução numérica de equações diferenciais. Seu princípio reside na abordagem de aproximar funções contínuas por meio de um conjunto discreto de funções em um número

finito de subdomínios, chamados elementos. Essa discretização do domínio de interesse permite a transformação das equações diferenciais em um sistema de equações algébricas, que podem ser resolvidas computacionalmente. Essa metodologia oferece uma abordagem flexível e poderosa para a modelagem de uma ampla gama de problemas de engenharia, incluindo análises estruturais, térmicas, fluidodinâmicas e geotécnicas.

Além de considerar o comportamento da pilha sob o aspecto de tensão-deformação-adensamento, é possível acoplar o modelo para a análise de estabilidade por meio da resolução de formulações matemáticas dos métodos de equilíbrio-limite. Essa abordagem permite avaliar a estabilidade da pilha em relação a potenciais modos de falha, como deslizamento, tombamento ou queda de blocos, fornecendo uma análise abrangente da segurança da estrutura em diferentes condições operacionais e de construção.

Na modelagem numérica por meio de softwares específicos, uma variedade de tipos de elementos finitos pode ser empregada para realizar a discretização bidimensional do domínio, possibilitando a simulação do comportamento do material analisado. Essa abordagem permite a representação da estrutura da pilha, dos materiais de interface e de quaisquer outros elementos necessários para uma descrição precisa das condições reais de campo. Conforme observado por Silva (2020), essa representação proporciona informações detalhadas sobre deformações e tensões nos materiais, incluindo na interface entre eles, possibilitando a modelagem dos deslocamentos relativos entre os elementos constituintes do modelo e os processos construtivos, como os alteamentos das camadas de construção do aterro.

A análise por Método dos Elementos Finitos compreende etapas fundamentais que incluem a definição do domínio de análise e sua discretização em elementos finitos, a especificação das condições de contorno e condições iniciais, e a definição do modelo constitutivo dos materiais. Essas etapas são essenciais para a correta formulação e execução da análise numérica, garantindo que o modelo represente de forma precisa e adequada o comportamento do sistema físico em estudo.

Segundo as contribuições de Silva (2020) e Pereira (2005), o desenvolvimento teórico da análise de adensamento bidimensional, conforme proposto por Biot (1941), incorpora várias hipóteses simplificadoras. Estas incluem a suposição de isotropia do material, reversibilidade das relações tensão-deformação ao final das condições de equilíbrio, linearidade das relações tensão-deformação, deformações pequenas, incompressibilidade da água nos vazios do solo, presença de ar na água e validade da lei de Darcy para fluxo laminar.

Na aplicação do adensamento, é considerada a compactação do aterro por meio de camadas. É crucial determinar o número adequado de camadas na análise numérica, levando em consideração a região específica a ser analisada e a variável de interesse.

Durante a modelagem das condições de drenagem na etapa de construção, são empregados estágios de carregamento não drenado ou parcialmente não drenado, juntamente com estágios de dissipação de poropressões geradas. Essa abordagem permite considerar adequadamente os efeitos da drenagem e da dissipação de poropressões no comportamento do solo durante a construção e operação da pilha. A modelagem acoplada de consolidação, que satisfaz as equações de equilíbrio e de continuidade, é considerada apropriada para capturar de forma precisa e abrangente o comportamento do solo ao longo desses estágios, como destacado por Silva (2020) e Pereira (2005).

## **2.9. PESQUISAS SOBRE CO-DISPOSIÇÃO E MODELAGEM NUMÉRICA ENCONTRADOS NA LITERATURA**

A seguir tem-se um resumo de pesquisas publicadas sobre projetos de misturas homogêneas de estéreis e rejeitos de mineração e modelagem numérica aplicada a pilhas de co-disposição e a pilhas de rejeitos, apresentando os principais resultados e conclusões sobre o tema.

Os estudos conduzidos por Wickland (2006) tiveram como propósito explorar a técnica de co-disposição de estéreis e rejeitos de mineração na forma de pasta, considerando uma mistura homogênea entre os materiais denominada *paste rock*. Tanto na tese, Wickland (2006), quanto nos demais trabalhos correlatos do mesmo autor, foram abordados vários aspectos essenciais para a elaboração de projetos de co-disposição. O foco foi estabelecer uma conexão entre projetos de mistura e seu comportamento geotécnico, proporcionando uma base teórica sólida para a compreensão do caso.

As investigações abrangeram a realização de ensaios laboratoriais em amostras de misturas, como ensaios de compressão triaxial e uma análise de consolidação devido ao próprio peso do material em uma coluna em mesoescala. Os resultados obtidos indicaram que as misturas na proporção ideal exibiam compressibilidade semelhante à dos estéreis e permeabilidade comparável à dos rejeitos. A principal aplicação identificada foi o encapsulamento de estéreis com potencial para geração de drenagem ácida em rejeitos saturados.

Khalili (2010) conduziu uma pesquisa envolvendo ensaios de cisalhamento monotônico e cíclico em *paste rock* na razão ótima da mistura, por meio de uma série de ensaios triaxiais. A partir dos resultados foi constatado que a resistência ao cisalhamento das misturas foi geralmente semelhante à do estéril não misturado.

Jehring & Bareither (2016) realizaram ensaios triaxiais com misturas de estéreis e quatro tipos diferentes de rejeitos considerando a razão ótima da mistura, com ênfase na avaliação do potencial desses materiais para serem utilizados como cobertura geotécnica. Os resultados obtidos revelaram que as misturas apresentaram ângulos de atrito quase tão elevados quanto aqueles observados no estéril não misturado.

Hamade (2017) realizou ensaios triaxiais em misturas de estéreis sintéticos e rejeitos em diferentes razões de mistura, constatando que a resistência ao cisalhamento aumentou à medida que o teor de estéril, promovendo uma transição no comportamento de cisalhamento de contrativo para dilatativo.

Antonaki e Abdoun (2018) conduziram ensaios de centrífuga utilizando amostras de rejeitos e estéreis em diversas proporções de mistura, com o intuito de investigar o potencial de liquefação cíclica e consolidação decorrente do próprio peso do material. Os resultados revelaram que a inclusão de estéreis na mistura resultou em uma redução significativa no tempo de consolidação e no recalque. Além disso, observou-se uma melhoria substancial na resposta dinâmica em misturas próximas ao ponto de *just filled*.

Bareither, Gorakhki (2018) investigaram a compressão sob taxa de deformação constante de misturas de rejeitos filtrados não saturados e estéreis, denominadas como *geowaste*, em proporções de 0,4:1 e 1:1 de estéril para rejeitos. O objetivo foi avaliar o acúmulo de poropressão e estimar perfis de poropressão, tensão e peso específico dentro de um depósito de *geowaste* em escala real. Os resultados indicaram que a adição de estéril reduz ou elimina o desenvolvimento de poropressão. Especificamente, não foi observada poropressão positiva para a mistura na proporção de 1:1 a uma taxa de deformação de 3 mm/h.

Castillo (2019) conduziu uma pesquisa investigando o comportamento de resistência não drenada e análise de estado crítico por meio de ensaios triaxiais em uma mistura *geowaste* na proporção única de 1,2:1 de estéril para rejeitos. Os resultados indicaram que a mistura exibiu um comportamento de endurecimento sob deformação, uma resposta contrativa abaixo de 500 kPa de tensão confinante e um comportamento dilatativo a 500 kPa. A resistência não drenada

da mistura foi comparável à dos rejeitos não misturados em tensões confinantes de 50 e 100 kPa, porém demonstrou ser significativamente mais forte a 500 kPa.

Gorakhki, Bareither (2019) avaliaram as propriedades de condutividade hidráulica e retenção de água de uma mistura de rejeitos filtrados e estéreis em proporção de 0,4:1 de estéril para rejeitos, tanto em laboratório quanto em pilhas de teste em campo. Constatou-se que a condutividade hidráulica foi de  $1 \times 10^{-8}$  m/s nos ensaios de laboratório e aproximadamente 2 ordens de magnitude maior nos ensaios de campo.

Burden (2020) realizou um estudo abrangente sobre a aplicação de técnicas de co-disposição de rejeitos e estéreis para o empilhamento a seco em duas aplicações distintas. A primeira envolveu a mistura de rejeitos filtrados com estéreis, provenientes de uma mineradora de ouro, visando melhorar o desempenho geotécnico da pilha. A segunda aplicação foi a mistura de rejeitos de areias petrolíferas com material de sobreposição de xisto.

O estudo resultou em um modelo conceitual que descreve o comportamento das misturas com base na disposição das partículas, permitindo prever a estrutura e o comportamento da mistura conforme a proporção e a densidade. Foram realizadas investigações experimentais abordando o comportamento de compressão, a resposta da poropressão sob consolidação devido ao próprio peso das misturas e ensaios de cisalhamento direto em grande escala.

Os resultados indicaram que algumas misturas apresentaram resistência ao cisalhamento drenada superior aos estéreis puros. A adição de estéreis aos rejeitos filtrados reduziu o excesso de poropressão, melhorando a estabilidade e permitindo deposição mais rápida.

No estudo sobre a mistura de rejeitos de areias petrolíferas com material de sobreposição de xisto, foi explorada a co-disposição para lidar com grandes volumes de rejeitos finos fluidos. A pesquisa investigou o comportamento de compressão e a resposta da poropressão das misturas empilhadas, considerando processos complexos e dependentes do tempo relacionados à consolidação e transferência de umidade.

Souza (2020) conduziu uma avaliação do comportamento de pilhas de rejeito filtrado e pilhas de co-disposição utilizando a modelagem numérica para a construção das pilhas em sucessivos alteamentos até o final de sua vida útil. Foram utilizados modelos constitutivos como o Cam-Clay modificado e o modelo linear elástico. Além disso, foram realizadas análises de sensibilidade, considerando variações na sucção, altura de alteamento e taxa de disposição de poropressão. Análises de estabilidade, tanto drenadas quanto não drenadas, também foram conduzidas.

Os resultados da pesquisa indicaram que o modelo Cam-Clay modificado foi mais adequado para representar o comportamento do rejeito filtrado em questão. Além disso, as simulações drenadas revelaram diferentes taxas de alteamento entre as duas alternativas de pilhas.

Silva (2020) realizou uma avaliação das poropressões construtivas de uma pilha de resíduos de lama vermelha desaguados por filtros prensa por meio de simulação numérica. Os parâmetros geotécnicos do resíduo foram obtidos por ensaios de laboratório, e o modelo numérico foi calibrado com dados de monitoramento de um aterro experimental.

O modelo desenvolvido na pesquisa permitiu simular a construção da pilha em estágios, considerando análises acopladas de fluxo e deformação. O modelo considerou variações na umidade e na compactação do resíduo filtrado, além da velocidade de construção e da dissipação das poropressões ao longo do tempo com a implantação de um sistema de drenagem interno.

Os resultados demonstram a eficácia da metodologia na predição de poropressões construtivas em aterros de lama vermelha filtrada. Evidenciou-se a importância da umidade do resíduo durante a compactação e a necessidade de um sistema de drenagem interno para dissipação adequada das poropressões construtivas ao longo do tempo.

## **2.10. MINERAÇÃO DE FOSFATO E BENEFICIAMENTO DE ROCHA FOSFÁTICA**

O fosfato é um recurso mineral de extrema importância para a agricultura e a indústria química, desempenhando um papel fundamental na produção de fertilizantes, alimentos e produtos químicos. Sua essencialidade para a promoção do crescimento de plantas e, conseqüentemente, para a segurança alimentar global, confere ao processo de beneficiamento de rocha fosfática um caráter de vital importância. Neste capítulo tem-se uma análise concisa dos métodos de processamento empregados no beneficiamento de rocha fosfática, com ênfase em suas aplicações tanto no âmbito nacional, como internacional.

Os depósitos de rocha fosfática, em geral, são classificados em três categorias principais com base em sua origem e deposição (Gharabaghi *et al.*, 2010): depósitos sedimentares de origem marinha; depósitos ígneos e metamórficos; depósitos biogênicos derivados do guano de ave (Kawatra *et al.*, 2014).

No contexto brasileiro, a predominância de depósitos fosfáticos de origem ígnea caracteriza-se por uma mineralogia complexa, resultante da intensa atividade vulcânica histórica. Esta

complexidade mineralógica torna a lavra desses depósitos uma tarefa desafiadora, demandando processos de beneficiamento e concentração mais elaborados. Isso se deve ao baixo grau de uniformidade dos minérios, bem como ao baixo teor de apatita e ao elevado conteúdo de carbonatos presentes nos mesmos (Santos, 2010).

Os depósitos de fosfato na Austrália são predominantemente de origem sedimentar, especificamente originados de formações marinhas. Esses depósitos se formam ao longo de milhões de anos por meio da acumulação gradual de fosfatos de origem orgânica e inorgânica no fundo do mar. Embora existam algumas ocorrências de depósitos ígneos e metamórficos em algumas partes da Austrália, como resultado de atividades vulcânicas e metamorfismo, esses depósitos não são tão significativos quanto os sedimentares em termos de quantidade e importância econômica.

O beneficiamento de rocha fosfática envolve uma série de etapas complexas, incluindo britagem, moagem, flotação, lixiviação e outras técnicas especializadas. Cada etapa é projetada para separar os minerais de fosfato valiosos dos componentes indesejáveis, como impurezas minerais e materiais orgânicos. A escolha dos métodos de beneficiamento e a eficácia de cada etapa têm um impacto direto na qualidade e no valor dos produtos finais, bem como na minimização dos rejeitos.

A análise dos rejeitos é uma etapa crítica para avaliar os impactos químicos e ambientais do beneficiamento de rocha fosfática, pois estes podem conter minerais indesejáveis, impurezas e resíduos de reagentes químicos usados no processo de beneficiamento. Na Tabela 2.3 tem-se os minerais de ganga típicos para cada tipo de depósito de fosfato de origem ígnea (Kawatra *et al.*, 2014). Os minerais de ganga típicos associados aos fosfatos sedimentares incluem argilas, sílica, calcita e dolomita.

**Tabela 2.3 - Minerais de ganga típicos para os diferentes tipos de depósito de fosfato de origem ígnea.**

Depósito do tipo Ígneo	Ganga típica	Fórmula química
Carbonatítico (ex. Palabora, Jacupiranga, Araxá, Sillinjärvi)	Barita	BaSO <sub>4</sub>
	Calcita	CaCO <sub>3</sub>
	Dolomita	(CaMg)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
	Olivina	(Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
	Flogopita	KMg <sub>3</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(F,OH) <sub>2</sub>
	Pirocloro	(Na,Ca) <sub>2</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH,F)
	Quartzo	SiO <sub>2</sub>
	Vermiculita	(Mg,Fe,Al) <sub>3</sub> (Al,Si) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O
Nefelínico-sienito (Koala)	Nefelina	(Na,K)AlSiO <sub>4</sub>
	Feldspato alcalino	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> /NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
	Egirina	NaFe <sup>+3</sup> (Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )
	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
	Quartzo	SiO <sub>2</sub>
Piroxenita (Palabora)	Piroxênios	XY(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> X=Ca,Na,Fe <sup>+2</sup> ,Mg,Zn,Mn,Li Y=Cr,Al,Fe <sup>+3</sup> ,Mg,Mn,Sc,Ti,V,Fe <sup>+2</sup>
	Flogopita	KMg <sub>3</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(F,OH) <sub>2</sub>
	Vermiculita	(Mg,Fe,Al) <sub>3</sub> (Al,Si) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O

Com relação ao processamento de minérios de fosfato ígneo que contêm sílica e outros minerais de ganga, a flotação por espuma tem sido o método mais amplamente usado (Kawatra *et al.*, 2014). Mais de 60% do fosfato comercial no mundo é produzido via flotação (Abouzeid, 2008). A técnica explora as propriedades de hidrofobicidade e hidrofiliabilidade para separar a partícula mineral de interesse das impurezas. Partículas hidrofóbicas, com forte caráter apolar, aderem-se às bolhas de ar e percorrem um caminho ascendente, enquanto as hidrofílicas permanecem na fase aquosa e são retiradas pelo fundo do equipamento (Santos, 2010).

Para fosfatos ígneos siliciosos, os fluxogramas de processamento geralmente seguem um método direto de flotação, enquanto minérios ricos em barita, magnetita ou impurezas de calcita demandam processos mais complexos. No caso de reservas brasileiras carbonatíticas de baixo teor, a utilização de ácido graxo como coletor de apatita e amido de milho como depressor dos

minerais de ganga tem se mostrado altamente eficiente na flotação de apatita (Chaves, 2006; Santos, 2010; Kawatra *et al.*, 2014).

Quanto aos métodos de lavra e beneficiamento nas minas de fosfato de produção em larga escala, existe uma grande variedade de técnicas e equipamentos que podem ser empregados, sendo que a escolha depende da forma do depósito, distâncias envolvidas, viabilidade de água e outros fatores. O processo de concentração de fosfato começa pela etapa de cominuição, que pode incluir britagem e moagem, seguida por deslamagem em hidrociclones para remoção de material fino que pode atrapalhar a etapa de flotação. A presença de material magnético na polpa pode exigir uma etapa de separação magnética. Posteriormente, a polpa é condicionada e flotada (Peres & Araujo, 2007).

O beneficiamento de fosfatos sedimentares segue processos similares aos praticados em outras regiões do mundo. Em áreas onde os minérios são predominantemente silicosos, como no Vale dos Ossos da Flórida, o processo de beneficiamento envolve etapas como peneiramento, deslamagem e flotação, visando separar os minerais de fosfato dos minerais de ganga. No entanto, em depósitos de fosfatos sedimentares com altos teores de MgO, devido à presença significativa de dolomita, o processo de beneficiamento torna-se mais desafiador devido às propriedades mineralógicas semelhantes entre os minerais de fosfato e carbonato.

O beneficiamento de fosfatos ígneos pode variar consideravelmente, dependendo das características das gangas presentes. Um processo comum em todos os fluxogramas de beneficiamento de fosfato ígneo é a flotação da apatita com ácido graxo aniônico. A apatita ígnea responde de maneira mais eficaz à flotação aniônica de ácidos graxos em comparação com os fosfatos sedimentares, devido à sua natureza bem cristalizada e não porosa. O *tall oil* tem se mostrado um coletor aniônico eficaz para a apatita quando utilizado em condições básicas (pH 10-11,5). Uma alternativa eficaz ao *tall oil* é o óleo de farelo de arroz, graças ao seu alto teor de ácidos oleico e linoleico (Kawatra *et al.*, 2014).

A Tabela 2.4 apresenta alguns exemplos de reagentes utilizados na flotação do fosfato no Brasil e no mundo:

**Tabela 2.4 - Reagentes utilizados na flotação do fosfato no Brasil e no mundo.**

<b>Mineradora</b>	<b>Reagentes Utilizados na Flotação</b>
Complexo Carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil	Coletor de Ácido Graxo (Óleo de Talha ou Óleo de Farelo de Arroz), Amido Gelatinizado ou Caustificado
Processamento de depósitos ígneos finlandeses	Coletor Anfotérico N-Sarcosina, <i>Tall Oil</i> (Coletor para Calcita), Soda Cáustica, Outros Reagentes
Processamento de Fosfatos da Península de Kola, Rússia	<i>Tall Oil</i> , Petróleo Oxidado, Alcatrão de Gás de Óleo Secundário, Silicato de Sódio, Soda Cáustica
Processamento de minérios fosfatados ígneos sul-africanos	Coletor de Ácido Graxo de <i>Tall Oil</i> , Soda Cáustica, Silicato de Sódio, Éter de Nonilfenil Tetraglicol, Outros Reagentes

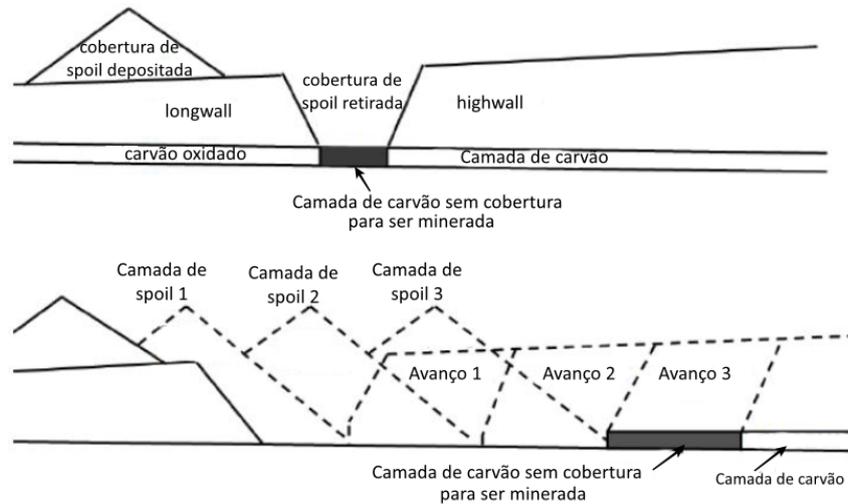
## **2.11. PILHAS DE DISPOSIÇÃO DE *SPOIL* DE CARVÃO MINERAL**

Na mineração de carvão a céu aberto geralmente aplica-se o método de lavra conhecido como lavra em tiras ou *strip mining*. Esta é uma técnica amplamente utilizada para extrair depósitos de carvão que se encontram próximos à superfície. A operação envolve a remoção do solo e das camadas de rochas que recobrem a camada de carvão, possibilitando a extração eficiente desse recurso valioso. No entanto, a operação de *strip mining* é complexa e apresenta uma série de desafios, especialmente em relação ao manuseio e disposição do material estéril de carvão, conhecido como *spoil* (Hartman & Mutmansky, 2002).

A lavra em tiras é reconhecida por ser um método de produção de baixo custo e alta produtividade, em comparação com a mineração subterrânea. Para iniciar o processo de *strip mining*, é feita a remoção do material superficial na etapa de decapeamento, que consiste na camada de solo e rochas que recobrem o depósito de carvão. Essa remoção se estende ao longo da extensão da camada de carvão e é gradualmente ampliado na direção do mergulho da camada mineralizada, formando uma parede vertical denominada *highwall*.

Conforme o decapeamento avança, o material removido pode ser depositado em uma pilha de estéril conhecida como *lowwall*, localizada atrás das máquinas em operação, ou pode ser descartado externamente. Essas pilhas de estéril podem atingir proporções consideráveis, especialmente em minas de carvão a céu aberto de grande escala, resultando em uma significativa quantidade de material estéril a ser gerenciado.

Na Figura 2.19 tem-se um exemplo ilustrativo dos procedimentos da escavação de carvão mineral e disposição do estéril.



**Figura 2.19 - Fundamentos da escavação do carvão mineral e disposição do *spoil* com uso de draglines (adaptado de Humphrey, 1984).**

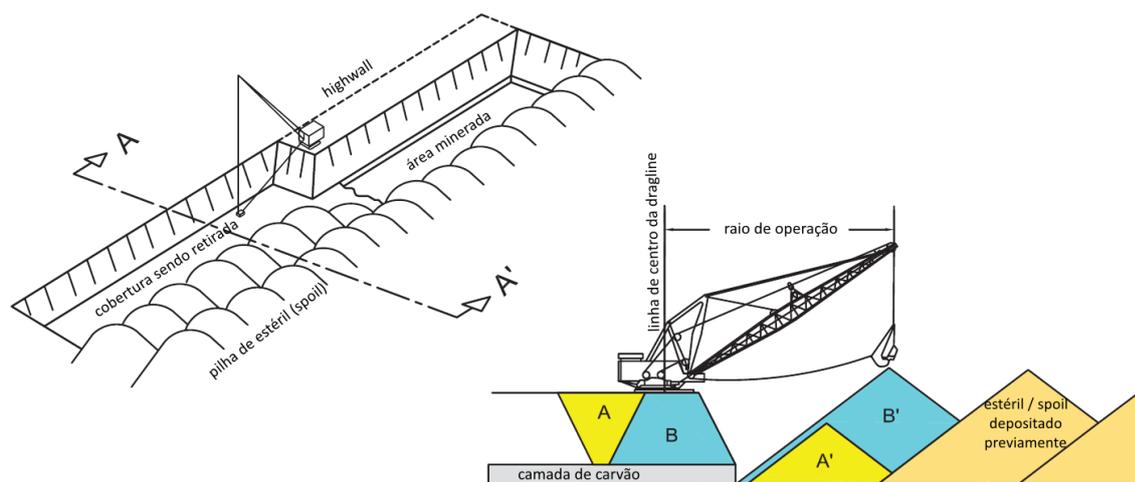
A execução do decapeamento é conduzida por meio de equipamentos de grande capacidade, como escavadeiras de arrasto, mais conhecidas como *draglines*, escavadeiras frontais ou por *bucket wheel excavators* (BWE), os quais escavam e depositam o material de forma contínua. Além disso podem ser usados caminhões basculantes, pás carregadeiras e outros equipamentos, que são selecionados de acordo com as características específicas do local da mina (Rocha, 2017; Hartman & Mutmansky, 2002). Na Figura 2,20 tem-se a operação típica de disposição de estéril por meio de *draglines* em uma mineração de carvão mineral.



**Figura 2.20 - Operação típica de dragline na cava, mostrando as características do perfil de inclinação da pilha de estéril ou pilha de *spoil* (Simmons & Yarkosky, 2017).**

Diversos métodos operacionais para *draglines* foram desenvolvidos visando otimizar o uso eficiente de uma gama de configurações de equipamentos para diferentes combinações de condições geológicas e geotécnicas. Esses métodos compartilham características comuns, mas alguns possuem relevância específica para o gerenciamento dos riscos associados a potenciais instabilidades geotécnicas, incluindo os perfis de disposição de estéril, bancos operacionais para a *dragline*, ou ambos.

Um exemplo de método operacional é o *sidecasting* (Fig. 2.21), o qual é empregado quando a distância entre os locais de escavação e despejo é mínima. Nele, os materiais inicialmente escavados são depositados sequencialmente nos pontos mais baixos dentro do perfil de estéril, o que pode acarretar implicações significativas para a estabilidade geotécnica desse perfil. Todos os outros métodos operacionais envolvem a *dragline* operando a partir de um banco, movendo o material da área de escavação (*highwall*) para a área de disposição (*lowwall*).



**Figura 2.21 – Ilustração do método operacional *sidecast* para draglines (adaptado de Simmons & Yarkosky, 2017)**

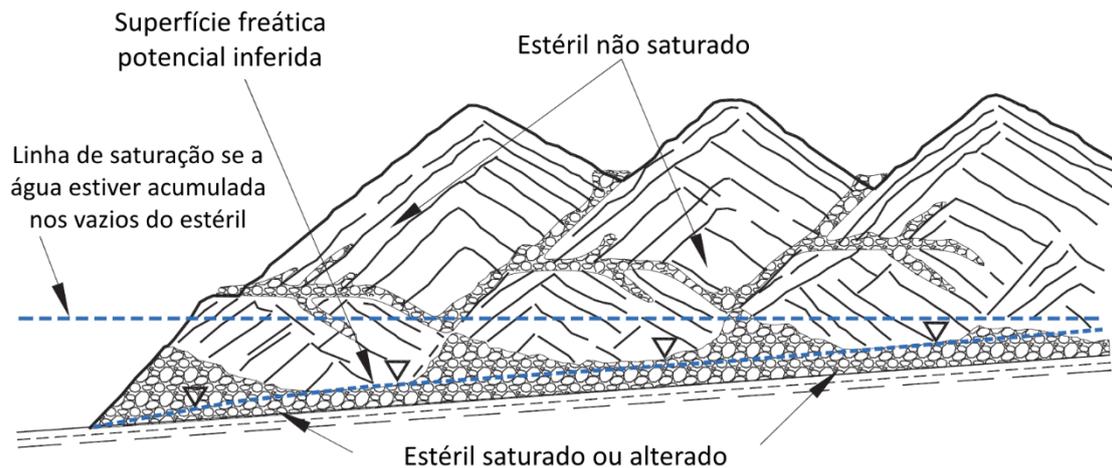
Uma das principais preocupações na mineração de *strip mining* é a estabilidade das pilhas de *spoil*, especialmente quando elas são depositadas sobre materiais mais fracos no piso da mina. A composição do estéril pode variar significativamente com base na geologia da região, resultando em uma heterogeneidade que torna o comportamento do estéril imprevisível em termos de resistência e estabilidade. Essa variação pode criar desafios adicionais, uma vez que a interação entre as pilhas de *spoil* e os materiais subjacentes pode ocasionar deslizamentos, recalques ou instabilidades.

Além disso, a quantidade massiva de *spoil* gerada durante o processo de *strip mining* também apresenta preocupações ambientais, uma vez que a disposição inadequada pode resultar em contaminação do solo e da água. Portanto, a gestão adequada das pilhas de *spoil* e a avaliação contínua da estabilidade dessas pilhas são aspectos críticos da mineração de carvão a céu aberto, visando minimizar os impactos ambientais e garantir a segurança das operações de mineração (Vangness, 2020).

De acordo com Simmons (1995), a maioria dos incidentes envolvendo falhas em encostas de material estéril de carvão pode ser atribuída a uma combinação dos seguintes fatores: a presença de materiais de piso fracos, a ocorrência de bandas fracas dentro das camadas de carvão, condições subótimas do material estéril no piso, frequentemente associadas ao teor de água, inclinações acentuadas do piso e, o uso de métodos de escavação em bancadas no interior da mina que incorporam técnicas de desmonte com uso de explosivos.

Os resíduos depositados, quando analisados sob a ótica da mecânica dos solos, podem ser caracterizados como uma massa granular consolidada ou como um aterro de rocha contendo

finos, os quais são depositados de forma gradual e incremental. Durante o processo de deposição, ocorre a formação de superfícies internas inclinadas, nas quais as partículas tendem a se orientar de maneira preferencial (Fig. 2.22). Além disso, devido à dinâmica do processo de deposição, as partículas de maior tamanho tendem a ser segregadas e depositadas na base da pilha de estéril. É importante ressaltar que essa deposição pode gerar uma certa heterogeneidade nos materiais, o que resulta em propriedades potencialmente anisotrópicas.



**Figura 2.22 - Seção esquemática da estrutura formada no estéril depositado por dragline mostrando a superfície freática potencial e a zonagem típica do material (adaptado de Simmons, & Mcmanus, 2004).**

Durante a estação das chuvas, minas de carvão a céu aberto podem enfrentar eventos significativos de inundação, resultando na desintegração do estéril e do material presente no piso das pilhas e da cava, levando à formação de lama e materiais finos. Vale ressaltar que, enquanto o estéril tende a exibir características dúcteis e deformáveis, a lama e outros materiais presentes no piso das estruturas e da cava podem apresentar rigidez e fragilidade. Como resultado, as pilhas de estéril podem ser suscetíveis a falhas por deslizamento no contato entre esses materiais menos flexíveis (Vangsness, 2020).

De acordo com as diretrizes normativas vigentes, é requerida a remoção integral desse material fino ou a redução da altura das pilhas construídas sobre ele, impondo maior complexidade e custos adicionais às operações (Vangsness, 2020).



**Figura 2.23 - Instabilidade do talude da pilha de *spoil* devido a deposição sobre material de base de baixa resistência mecânica (Simmons & Yarkosky, 2017).**

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa abordou a análise de resíduos de mineração de diferentes origens, visando explorar o comportamento mecânico e hidráulico desses materiais sob variadas condições. Os conjuntos de materiais estudados foram coletados de diferentes fontes, incluindo: rejeito e estéril provenientes de uma mineração de fosfato localizada no Brasil; estéril e lama de uma mineração de carvão mineral na Austrália, denominados *spoil* e *mud*; estéril e lama de uma mineradora de fosfato na Austrália, denominados *shale* e *slime*. O objetivo central foi ampliar a base de dados e aprofundar a compreensão do comportamento mecânico e hidráulico desses materiais quando não misturados e quando misturados, validando, assim, os conhecimentos e resultados obtidos.

#### 3.1. MISTURA DE REJEITOS E ESTÉREIS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO E PROCESSAMENTO DE FOSFATO DO BRASIL

##### 3.1.1. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

Foram utilizados rejeitos e estéreis de mineração e processamento de fosfato do Brasil (Fig. 3.1). As amostras foram compostas de rejeito gerado na etapa de flotação no beneficiamento mineral, amostrado na praia da barragem de rejeitos e também de material estéril, gerado na mina, e amostrado na pilha de disposição de estéreis.

Com base em informações obtidas por meio de diálogos diretos com especialistas atuantes em uma mineradora de fosfato no Brasil, foi constatado que a razão entre a produção de estéril e rejeito neste contexto específico é de 2,4:1 (razão definida em massa úmida).



Figura 3.1 - Amostras de: a) rejeito, e; b) estéril.

Em uma análise táctil visual, o rejeito consistiu basicamente de um material aparentemente arenoso, com uma coloração amarronzada evidente, não coeso e com uma textura granular, sugerindo a presença de partículas minerais de tamanhos variados, o qual seria um reflexo das diferentes frações de minerais presentes no material.

O estéril apresentou uma coloração amarelada característica, com composição granulométrica variando desde finos até grosseiros, incluindo uma fração de pedregulho. Após o umedecimento e lavagem, foi possível observar que o estéril poderia conter argilo-minerais em sua composição, os quais tendem a influenciar as propriedades de coesão e plasticidade do material.

Percebeu-se que o estéril tende a se fragmentar facilmente, característica que sugere que ele está sujeito a processos de desagregação devido à alteração ao longo do tempo. Esta característica do estéril é bastante peculiar com relação aos estéreis presentes em outras minerações, visto que a faixa granulométrica média,  $D_{50}$ , é menor do que a geralmente encontrada, assim como discutido o Capítulo 4.

### **3.1.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA**

As amostras de materiais utilizadas nesta pesquisa foram caracterizadas geotecnicamente de acordo com os requisitos das normas da American Society for Testing and Materials (ASTM).

As amostras foram submetidas à ensaios de massa específica segundo a norma ASTM D854-14 (ASTM, 2014). A massa específica também foi obtida utilizando balões volumétricos e um analisador de densidade automático, marca Quantachrome Instruments e modelo PENTAPYC 5200e (Fig. 3.2). Vale ressaltar que para o teste do pentapicnômetro foi considerado o estéril que passou pela peneira de 2,0 mm, enquanto no método do picnômetro (ASTM, 2014) foi considerado o material passante na peneira de 4,75 mm.



**Figura 3.2 - Ensaio de massa específica utilizando: a) balões volumétricos; b) analisador automático (pentapicnômetro).**

Foram realizados ensaios de limites de consistência de acordo com a norma ASTM D4318-17e1 (ASTM, 2017b). Os ensaios de limites de consistência foram fundamentais para a caracterização da plasticidade e a coesão dos materiais, sendo realizados os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade (Fig 3.3).



**Figura 3.3 - Ensaio de limites de consistência: a) limite de liquidez; b) limite de plasticidade.**

O ensaio de peneiramento e sedimentação seguiu as recomendações da norma ASTM D6913-17e1 (ASTM, 2017c) e ASTM D7928-21e1 (ASTM, 2021a). As curvas granulométricas foram

obtidas considerando o ensaio de peneiramento grosso e fino inicialmente, sem uso de defloculante e sem agitação com copo de dispersão. Posteriormente foi realizado o ensaio conjunto de peneiramento e sedimentação com e sem o uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio). Os ensaios buscaram avaliar se haveria alguma alteração nas curvas granulométricas devido à adesão dos siltes e argilas no material estéril, comportamento observado em análise tátil-visual. O material foi classificado de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) conforme ASTM D2487-17e1 (ASTM, 2017a).

Na Fig. 3.4 tem-se o conjunto de peneiras sobre agitador eletromecânico e a representação de algumas das frações granulométricas de estéril e rejeito após o ensaio.



**Figura 3.4 – Ensaio de peneiramento. a) conjunto de peneiras sobre agitador eletromecânico; b) frações granulométricas de estéril, e; c) frações granulométricas de rejeito.**

Os parâmetros de compactação, como massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótima do rejeito, estéril e misturas, foram determinados pelo ensaio de Proctor Normal, segundo a norma ASTM D698-12 (ASTM, 2021b).

Os índices máximos de vazios ( $e_{max}$ ) dos estéreis e rejeitos foram determinados conforme ASTM 4254-16 (ASTM, 2016a), utilizando-se os dois métodos: A e B.

### 3.1.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL

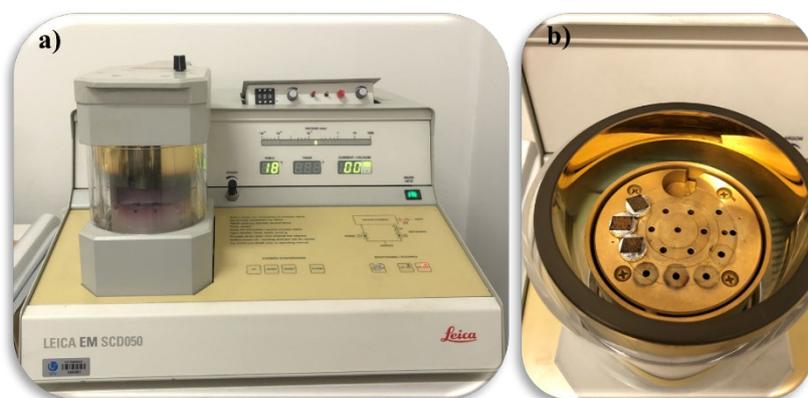
Foram conduzidas análises químicas e microestruturais nas amostras de rejeitos e estéril, com o propósito de investigar a influência significativa de siltes e argilas nas curvas granulométricas do estéril. As análises químicas foram realizadas por meio do método de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS), utilizando um detector de raios X para identificar os principais elementos presentes nos materiais. Estas análises foram conduzidas na Universidade Federal de Catalão (UFCAT), utilizando duas amostras representativas de cada material, a fim de obter uma caracterização abrangente da composição química e das propriedades microestruturais das amostras em estudo.

A caracterização microestrutural foi conduzida utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do modelo Zeiss EVO MA10. Este equipamento foi empregado para examinar detalhadamente a estrutura e morfologia das amostras com alta resolução, possibilitando a identificação de características microscópicas relevantes para a compreensão das propriedades e comportamento dos materiais em estudo. A análise foi realizada no Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) da Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).



Figura 3.5 – Caracterização microestrutural com uso de microscópio eletrônico de varredura.

Foram confeccionadas amostras quadradas com dimensões de 1 cm x 1 cm a partir do revestimento ou impregnação com ouro, realizado utilizando o equipamento Leica EM SCD050 (Fig. 3.6). Essa etapa foi essencial para tornar as amostras condutivas, viabilizando a análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).



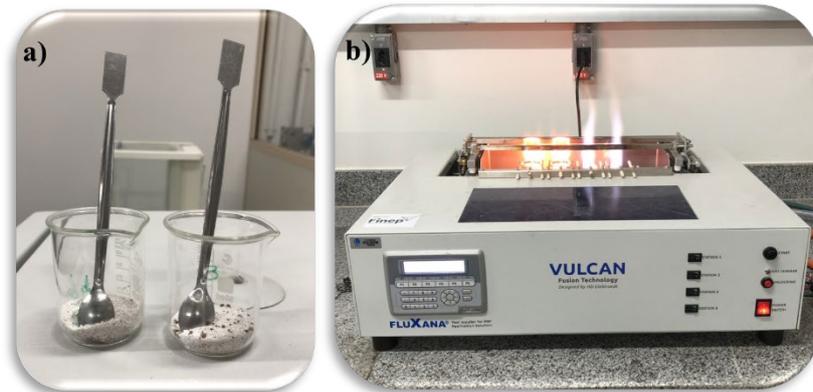
**Figura 3.6 - Impregnação das amostras com ouro.**

Análises químicas quantitativas de óxidos foram realizadas utilizando Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) (Fig. 3.7). Esses procedimentos foram realizados no Laboratório Multiusuário em Energias Renováveis (LAMER), localizado na Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Para as análises, foi empregado um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X da marca Bruker, modelo S8 Tiger.



**Figura 3.7 - Análises químicas por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X.**

As amostras das análises químicas quantitativas de óxidos foram preparadas por meio da fusão dos rejeitos e estéril, resultando em pastilhas, as quais apresentaram maior homogeneidade e forneceram resultados superiores em comparação com a técnica de prensagem. Para a moldagem das pastilhas, foi utilizada uma máquina de fusão Vulcan 4 MA (Fig. 3.8).



**Figura 3.8 – a) preparação das amostras de rejeitos e estéril; b) fusão das amostras em pastilhas.**

A técnica de Difractometria de Raios X (XRD) foi utilizada para identificar, caracterizar e quantificar as fases minerais. A pesquisa foi realizada em um difratômetro Rigaku, modelo Geigerflex D/MAX-2A/C, do Laboratório de Difractometria de Raios da Universidade de Brasília (UnB).

#### **3.1.4. RAZÃO ÓTIMA DA MISTURA**

A razão ótima de mistura ( $R_{ot}$ ) foi determinada com base em relações de volume e massa, conforme a Equação 2.1.

As misturas foram realizadas considerando o teor de sólidos na polpa de rejeitos de 60%, o que corresponde a um teor inicial de umidade de 66,67%. Este teor representa a condição da polpa de rejeitos quando bombeada para a barragem de rejeitos. Além disso, foram considerados dois tipos distintos de amostras de estéril para realização das misturas, amostradas em locais diferentes da pilha de estéril, cada uma apresentando índices de vazios máximos diferentes entre si.

Considerando as misturas do rejeito com os dois tipos de amostras de estéril, foi possível estabelecer as curvas que relacionam a razão ótima da mistura com os índices de vazios máximo do estéril. A partir dessa relação definiu-se as proporções ideais de massa seca de estéril e rejeito

para o preparo das misturas a serem ensaiadas nos ensaios mecânicos e hidráulicos. Inicialmente, as amostras de misturas foram preparadas com base em uma polpa de rejeitos com teor de umidade de 66,7%. Posteriormente, foram formuladas misturas com teores de umidade superiores e inferiores a este valor previamente calculado, a fim de avaliar seu impacto nas propriedades das misturas resultantes.

Além disso, foram conduzidos experimentos com misturas que não estavam na razão ótima, mantendo um teor de umidade próximo ao ótimo determinado nos ensaios de compactação. Esses procedimentos visaram investigar o comportamento das misturas em condições próximas às ideais, mas fora dos parâmetros ótimos estabelecidos, fornecendo informações adicionais sobre suas características mecânicas e hidráulicas.

Um exemplo representativo das misturas, considerando uma razão ótima de mistura ( $R_{ot}$ ) de 2,0 e outra de 2,5, pode ser visualizado na Figura 3.9. Percebe-se a diferença na umidade das amostras, onde a amostra de  $R_{ot} = 2,5$  possui um teor de umidade mais elevado.



**Figura 3.9 - Exemplo de misturas com  $R_{ot} = 2$  e  $R_{ot} = 2,5$ .**

### **3.1.5. ANÁLISES MECÂNICAS**

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento e de deformabilidade, essenciais para a avaliação do comportamento mecânico tanto dos materiais individualmente quanto misturados, foram obtidos por meio da execução de ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais.

Os procedimentos adotados para a realização do ensaio de cisalhamento direto foram conduzidos conforme a norma ASTM D3080 (ASTM, 2011). Tais ensaios foram realizados em condições não inundadas e inundadas, permitindo uma avaliação abrangente das propriedades de cisalhamento dos materiais em diferentes ambientes.

A fim de garantir a conformidade com as normas estabelecidas, foi realizada uma etapa de peneiramento considerando a fração de 6,35 mm do estéril e das misturas, devido ao tamanho máximo dos grãos, assegurando assim a adequação da altura dos corpos de prova.

Embora seja reconhecido que o tamanho das partículas exerce uma influência significativa nos parâmetros geotécnicos dos materiais, como evidenciado por Xu *et al.* (2018), onde observou-se uma redução substancial nos parâmetros de resistência ao cisalhamento com a diminuição da granulometria, é importante observar que o estéril investigado possui uma granulometria menor do que aquela comumente observada. Este material exibe uma suscetibilidade considerável à fragmentação sob carga, devido a seu estado de alteração. Aproximadamente 85% da granulometria das amostras de estéril são inferiores à dimensão especificada para o peneiramento. Portanto, nesse contexto específico, é válido observar que a influência da granulometria tende a ser menos significativa do que aquela geralmente observada para outros materiais.

Os corpos de prova foram moldados por compactação, seguindo padrões específicos de dimensionamento. Para os rejeitos, as dimensões médias dos corpos de prova foram de 10x10x2 cm (comprimento, largura e altura), enquanto para os estéreis e misturas, as dimensões foram de 10x10x4 cm. Os corpos de prova foram moldados diretamente dentro da caixa de cisalhamento, adotando um processo que consistiu na deposição do material em três camadas distintas. Após a compactação manual de cada camada, esta era escarificada para garantir uma distribuição uniforme da compactação ao longo da altura do corpo de prova. Esse procedimento foi essencial para garantir a consistência dos resultados nos ensaios de cisalhamento direto.

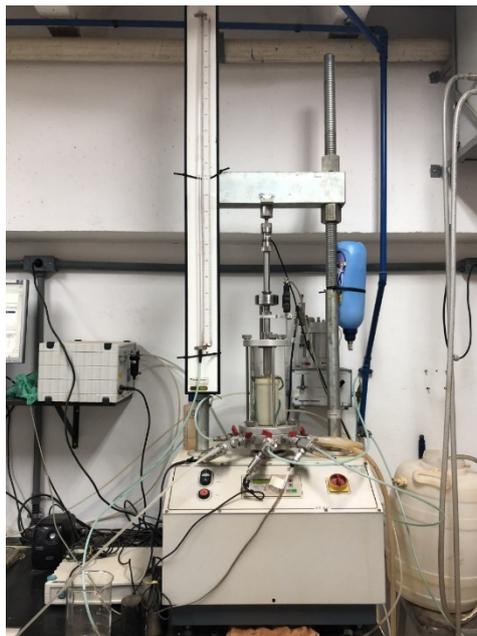
Os corpos de prova foram moldados considerando uma massa específica seca 13% menor do que a máxima obtida no ensaio de compactação, visando representar condições mais abrangentes do desempenho do material em campo. Essa abordagem leva em consideração as dificuldades em se manter os teores de umidade em níveis ótimos para a compactação, visto que a permeabilidade destes materiais, por serem granulares, tende a ser relativamente alta. Portanto, estudos realizados em condições de compactação diferentes do ótimo podem importantes para a avaliação do comportamento mecânico dos materiais.

Na realização dos ensaios, foram utilizados dois equipamentos distintos, os quais diferiram quanto à deformação horizontal máxima permitida e às tensões normais aplicadas nos ensaios. Foram aplicados esforços normais de 25, 50, 100 e 200 kPa, e em alguns casos 400 kPa (Fig. 3.10).



**Figura 3.10 – Equipamento de cisalhamento direto para grandes deslocamentos.**

Para os ensaios triaxiais utilizou-se o equipamento *Triaxial Shear Test System LT 1000 Set* da marca *Wille Geotechnik GmbH* (Fig. 3.11). Foram preparados corpos de prova de dimensões de aproximadamente 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, sendo que, diferente dos ensaios de cisalhamento direto, os corpos de prova foram moldados por compactação estática por meio de uma Prensa CBR/Marshall Automatizada da marca Solotest, com velocidade constante de 1,26 mm por minuto.



**Figura 3.11 – Equipamento Triaxial.**

Durante o processo de moldagem dos corpos de prova, o material foi compactado em três camadas distintas de mesma massa e mesma energia de compactação, seguindo uma abordagem semelhante ao ensaio de Proctor Normal. Ao contrário dos corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento direto, os corpos de prova utilizados nos ensaios triaxiais foram moldados com base na massa específica seca máxima e na umidade ótima. Essa análise permitiu a avaliação de diferentes cenários de compactação quando comparados com os ensaios de cisalhamento direto, proporcionando uma representação mais abrangente do comportamento mecânico desses materiais.

O programa experimental consistiu na realização de ensaios triaxiais convencionais do tipo drenado (CD) e não drenado (CU) para todos os materiais ensaiados. Foram utilizadas tensões efetivas de confinamento de 50, 100 e 200 kPa e em alguns casos 400 kPa. As misturas foram preparadas na proporção de 2,5:1 (estéril para rejeito) e umidade de 15%. Vale ressaltar que foi considerado um índice de vazios ( $e_{es}$ ) de 1,41 para o estéril utilizado na realização das misturas.

Também foram realizados dois ensaios específicos para o rejeito na condição drenada, nos quais os corpos de prova foram moldados utilizando uma massa específica seca 13% menor do que àquela obtida nos ensaios de compactação. Adotou-se essa abordagem com objetivo de se avaliar uma provável aproximação dos resultados dos ensaios triaxiais drenados com ensaios realizados no equipamento de cisalhamento direto. Embora sejam ensaios diferentes, com características únicas para a obtenção dos parâmetros de resistência, essa análise permitiu a comparação dos resultados e contribuiu para uma melhor compreensão da consistência entre diferentes métodos de caracterização geotécnica.

O processo de saturação dos corpos de prova foi feito inicialmente por percolação ascendente de água através das amostras e posteriormente utilizando contra-pressão, onde monitorou-se o parâmetro  $B$  de Skempton até que se obtivesse um valor próximo a 0,95, sendo que para os casos em que se utilizou uma tensão confinante igual ou maior do que 200 kPa não conseguiu um valor tão elevado de saturação.

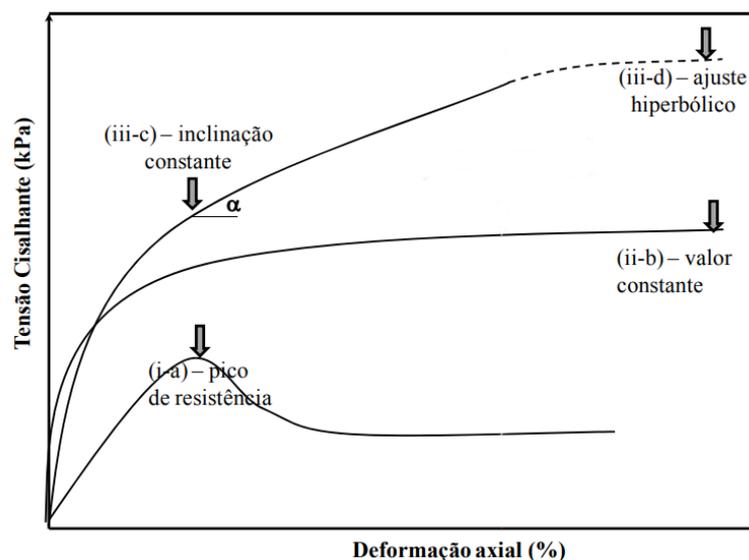
Com base nas curvas de consolidação, foi possível determinar a taxa de cisalhamento de cada corpo de prova. O cálculo foi realizado de acordo com a norma ASTM D3080 (ASTM, 2011), utilizando o método de Taylor para definir o tempo necessário para 90% de consolidação primária, denominado parâmetro  $t_{90}$  (Taylor, 1948). Foi utilizada nos ensaios de cisalhamento direto uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min, menor que a calculada, para padronizar os ensaios. No caso dos ensaios triaxiais, utilizou-se uma taxa de deslocamento de 0,15 mm/min,

também menor do que a calculada, sendo que, em sua maioria, os ensaios foram conduzidos até uma deformação axial de 15%, com o objetivo de atingir um estado estacionário.

O critério de ruptura utilizado para os ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais seguiu o método (a) e (b) citado por Pereira (2013), que considera diferentes formatos de curvas de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal (Fig. 3.12), onde:

- i. para curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal que apresentam picos bem definidos, com posterior queda nas tensões cisalhantes mobilizadas, a tensão no pico é considerada a tensão de ruptura (a);
- ii. para curvas que apresentam uma constância ou pouca variação, o valor máximo ou último da tensão cisalhante é considerado a tensão de ruptura (b);
- iii. para curvas que apresentam características de *strain hardening*, ou seja, tensão cisalhante contínua crescente, a ruptura pode ser definida pelo ponto correspondente ao início de constância da inclinação (c) ou pelo prolongamento da curva com auxílio do ajuste hiperbólico estimando um valor de resistência constante (d).

No caso de curvas com características de *strain hardening* optou-se por considerar a tensão de ruptura aquela correspondente a 10% da deformação horizontal, evitando viés do equipamento e padronizando todos os resultados.



**Figura 3.12 – Critérios de ruptura para diferentes formatos de curvas de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal (Pereira, 2013).**

Para realizar o ensaio de adensamento, foram seguidos os procedimentos da norma ASTM D2435/D2435M:2021 (ASTM, 2021c), utilizando o método oedométrico para obter as

propriedades de consolidação unidimensional por meio de carregamento incremental (Fig. 3.13). As leituras foram feitas em intervalos de 1/8 min, 1/4 min, 1/2 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h, a partir do momento da aplicação do incremento de carga. A sequência de cargas variou de 5 a 1600 kPa. Após o carregamento, foi realizado o descarregamento do corpo de prova.



**Figura 3.13 – Equipamento de adensamento unidimensional.**

Os corpos de prova de estéril e rejeitos foram moldados com um anel de diâmetro de 7,5 cm e altura de 2,0 cm (SP1 - amostra 1), sendo posteriormente saturados em água destilada dentro da célula de adensamento. Além disso, foi realizado um ensaio com um anel de dimensões maiores, com 11,3 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura (SP2 - amostra 2), a fim de avaliar a influência do tamanho do anel nos resultados dos ensaios. As amostras de misturas foram preparadas apenas nas dimensões maiores. A prensa utilizada no ensaio foi do tipo Bishop.

A partir dos resultados das leituras, foram plotados gráficos de altura do corpo de prova em função do tempo para cada incremento de carga. Com base nesses gráficos, foi calculado o coeficiente de adensamento, seguindo o método proposto por Taylor.

Os principais resultados obtidos no ensaio de adensamento foram os parâmetros de deformabilidade, expressos pelo coeficiente de adensamento ( $C_v$ ) e pelo índice de compressão ( $C_c$ ). Esses parâmetros foram obtidos por meio da construção gráfica das curvas com base nas leituras realizadas durante a execução do ensaio.

### 3.1.6. ANÁLISES HIDRÁULICAS

Para determinar o parâmetro de permeabilidade, foi realizado um ensaio de carga variável de acordo com a norma NBR D14545:2021 (ABNT, 2021), diretamente na prensa triaxial. As cargas hidráulicas foram aplicadas e medidas por meio de uma bureta de vidro graduada em milímetros, que foi instalada no equipamento. As amostras foram saturadas com água destilada, percolada de forma ascendente em quantidade equivalente a duas vezes o volume do corpo de prova. Durante o ensaio, foram feitas cinco medidas de permeabilidade, com um gradiente hidráulico de 2.

Em complemento às propriedades hidráulicas dos materiais foram realizados ensaios de papel filtro em corpos de prova moldados nas mesmas condições dos ensaios triaxiais e oedométrico. Obtiveram-se as sucções dos materiais para diferentes teores de umidade, definidos em função dos graus saturação desejados. Os ensaios de papel filtro seguiram os procedimentos indicados na ASTM D5298 (2016a).

O conjunto de amostras consistiu em um número específico de corpos de prova: 10 corpos de prova para o rejeito, 10 para o estéril e 9 para as misturas. Cada corpo de prova foi cuidadosamente identificado para fins de rastreabilidade ao longo do ensaio, sendo que para cada conjunto de amostras foi realizada a variação da saturação dos corpos de prova, cobrindo uma faixa de 5% a 100%, conforme necessário para construir as curvas de retenção de água.

Os corpos de prova foram moldados diretamente em tubos PVC cilíndricos de aproximadamente 2 cm de altura e 5 cm de diâmetro (Fig. 3.14a e 3.14b). O controle do grau de saturação durante o ensaio foi essencial, sendo realizado por meio das variações de peso dos corpos de prova, tanto pela secagem quanto pela adição de água, de forma controlada, até atingir o próximo nível desejado de saturação, mantendo a umidade ótima dos materiais como referência.

Após atingir a porcentagem de saturação correspondente à pré-definida, iniciou-se o processo de montagem do ensaio segundo a norma, alocando os corpos de prova selados com plástico filme e papel alumínio no interior de uma caixa de isopor durante um período de 15 dias, a fim de garantir que o conjunto material-papel filtro atingisse o equilíbrio.

O processo de moldagem e preparação dos corpos de prova para o ensaio de papel filtro pode ser visto na Fig. 3.14.

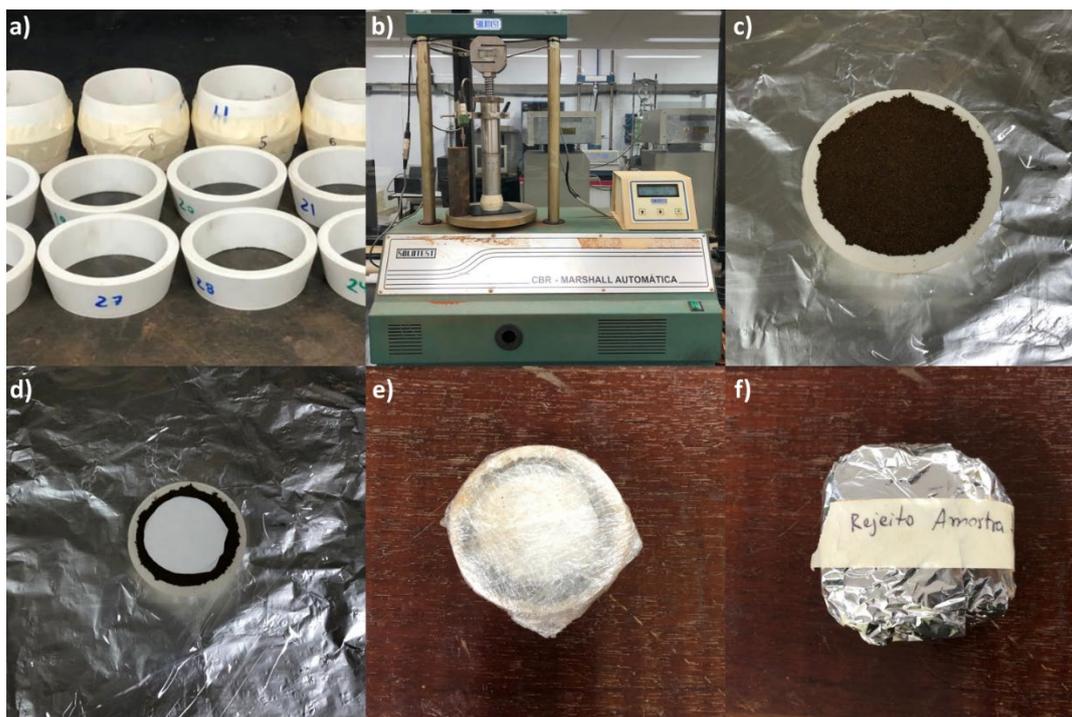


Figura 3.14 – Moldagem e preparação dos corpos de prova para o ensaio de papel filtro: a) tubos PVC; b) compactação; c) corpo de prova compactado; d) inserção de papel filtro duplo no topo e base; e) selagem com plástico filme; f) recobrimento com papel alumínio e identificação.

O papel filtro usado foi da marca Quanty, sendo que as equações de calibração utilizadas para a obtenção dos valores de sucção a partir das umidades são:

$$\text{Sucção (kPa)} = e^{[161,44-w]/24,07}, \text{ para } w > 55\% \quad (3.1)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = e^{[79,782-w]/6,26}, \text{ para } w \leq 55\% \quad (3.2)$$

Dentre os métodos amplamente reconhecidos na literatura para ajustar curvas experimentais ao modelo teórico de retenção de água no solo, destacam-se as contribuições de Gardner (1958), Brooks & Corey (1964), Van Genuchten (1980) e Cavalcante & Zornberg (2017). O ajuste dos dados experimentais ao modelo teórico de Van Genuchten (1980) foi empregado neste estudo visando a obtenção dos parâmetros necessários para a descrição do comportamento de retenção de água do solo, definidos por:

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\psi|)^n]^m} \quad (3.3)$$

Onde  $m = (1 - 1/n)$ , (Mualem, 1976);  $\alpha$  e  $n$  são parâmetros de ajuste;  $\theta(\psi)$  a umidade volumétrica;  $\psi$  o potencial matricial;  $\theta_r$  é o teor de umidade volumétrica residual e  $\theta_s$  é o teor de umidade volumétrica saturado.

### 3.1.7. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS E MODELAGEM NUMÉRICA DE PILHAS DE CO-DISPOSIÇÃO DE REJEITOS E ESTÉREIS DE MINERAÇÃO

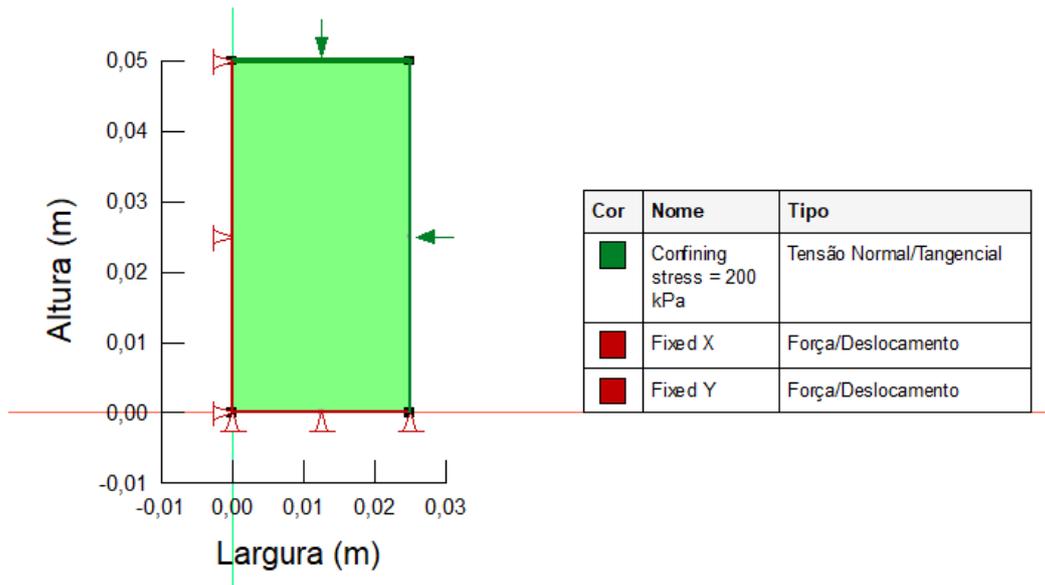
A calibração dos modelos constitutivos dos solos foi conduzida utilizando duas ferramentas de software distintas: o Plaxis, com auxílio do subprograma *SoilTest*, e o Sigma/W, integrado no pacote Geostudio versão 2023 da Geoslope Internacional. Este processo buscou avaliar a capacidade de diferentes modelos constitutivos de solos em se ajustarem aos resultados laboratoriais obtidos nos ensaios triaxiais.

As simulações foram realizadas para os ensaios triaxiais consolidados drenados (CD) e consolidados não drenados (CU). Utilizando o software Sigma/W, observou-se que o modelo Norsand apresentou a melhor aderência aos dados obtidos nos ensaios, sendo este o modelo selecionado e adotado para a pesquisa em questão. Outros modelos foram avaliados no *SoilTest*, porém, não demonstraram uma aderência satisfatória para ambos os tipos de ensaio (CU e CD).

Os ensaios foram simulados utilizando um modelo 2D axisimétrico, no qual uma linha de simetria é assumida em relação às linhas centrais verticais e horizontais do corpo de prova. Dessa forma, apenas  $\frac{1}{4}$  da amostra é representada na simulação. As dimensões simuladas da amostra foram de 0,025 m por 0,05 m, correspondendo à metade da largura e altura de uma amostra triaxial de tamanho convencional. Esse tipo de abordagem reduz a complexidade computacional e o tempo de processamento necessário para as simulações, mantendo ao mesmo tempo a representatividade essencial do comportamento mecânico do material.

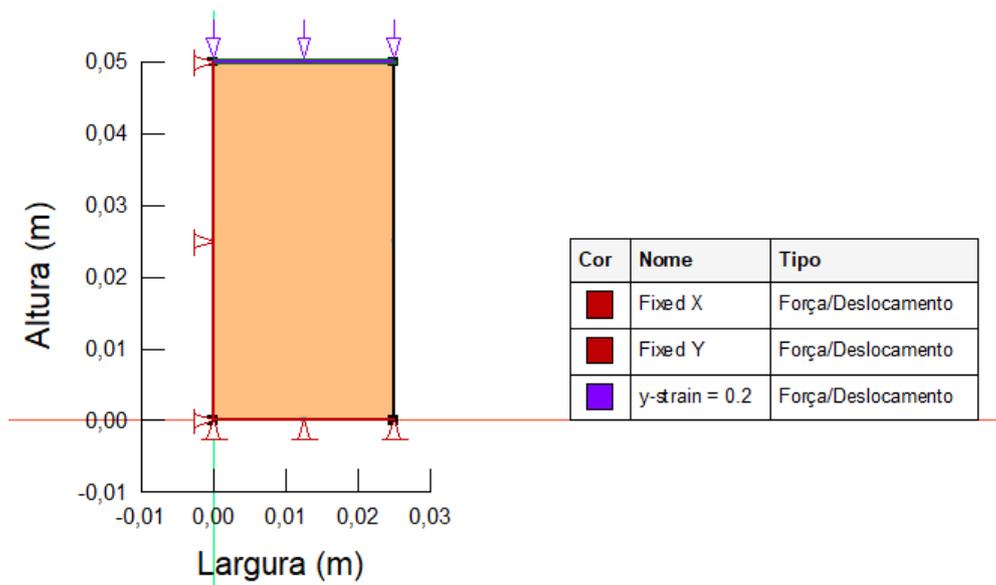
A simulação compreendeu as duas etapas do ensaio, sendo a fase de consolidação seguida pela fase de cisalhamento, cada uma com duração de um dia. Durante a primeira fase, foi realizada a consolidação isotrópica, na qual a tensão confinante foi variada de acordo com o ensaio triaxial simulado. O estado de tensão isotrópica foi simulado aplicando uma condição de contorno de tensão normal no topo e no lado direito da amostra, igual à tensão confinante desejada (50, 100 e 200 kPa). O estágio de consolidação foi definido como a condição inicial para a simulação subsequente de cisalhamento.

Além disso, foram aplicadas condições de contorno de deslocamento nulo na direção  $y$  nos elementos de base, enquanto os elementos de fronteira laterais esquerdos tiveram seus deslocamentos na direção  $x$  restringidos. O modelo geométrico e as condições iniciais para o ensaio triaxial na etapa de consolidação podem ser observados na Figura 3.15.



**Figura 3.15 – Modelo geométrico e condições iniciais da etapa de consolidação para modelagem numérica do ensaio triaxial.**

Na fase de cisalhamento, foi adotada uma taxa de deformação como condição de contorno. O controle da taxa de deformação foi realizado pela definição de uma função tempo versus deslocamento, que relaciona um número específico de etapas de tempo com o deslocamento da amostra em cada uma dessas etapas. Cada etapa de tempo foi considerada como equivalente a 500 passos, enquanto o deslocamento vertical final foi definido como 0,01 m, resultando em deformações axiais de 0,2 ou 20%. O modelo geométrico e as condições de contorno para a etapa de cisalhamento estão ilustradas na Figura 3.16.



**Figura 3.16 - Modelo geométrico e condições iniciais da etapa de cisalhamento para modelagem numérica do ensaio triaxial.**

Após a calibração dos modelos constitutivos do solo realizou-se a modelagem numérica de uma pilha de co-disposição hipotética utilizando os softwares Sigma/W e Slope/W, integrados no pacote Geostudio versão 2023 da Geoslope Internacional. Essas ferramentas possibilitaram a realização de análises acopladas de deformação e fluxo na pilha, incorporando a análise tensão-deformação-adensamento, seguida por uma análise de estabilidade de pilha.

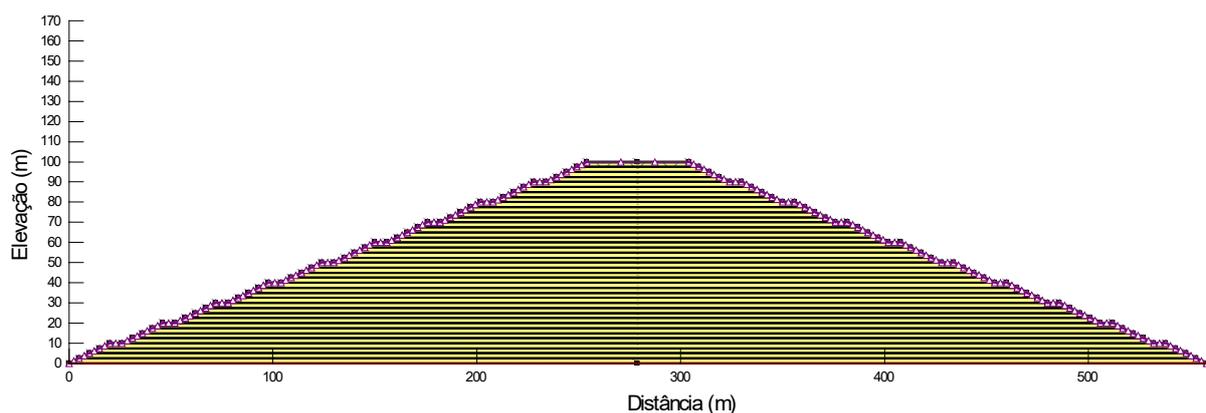
O modelo numérico foi empregado de modo a se avaliar a geração de poropressões durante a construção de uma pilha hipotética de 100 m de altura, com taludes de 10 m de altura e inclinação entre bermas de 2,0H:1,0V, sendo as bermas de 6m de largura. O carregamento devido a construção da pilha se deu pela simulação de sucessivos alteamentos, cada um com 2,5 m de altura, totalizando 40 alteamentos ao final do processo. Cada uma das camadas foi realizada individualmente e em 10 etapas de construção. Cada etapa de carregamento construtivo foi tratada como um problema transiente, onde o programa adiciona o peso de cada camada de forma sequencial, o que seria equivalente a fazer alteamentos de 25 cm, o que é bem representativo da condição de campo.

A discretização do modelo utilizou elementos de 5 m, uma escolha que foi determinada pelo tempo computacional necessário para a resolução do modelo. Essa discretização permitiu uma representação eficiente do comportamento do sistema, mantendo um equilíbrio adequado entre precisão e demanda computacional.

Foram aplicadas condições de contorno de deslocamento nulo nas direções  $x$  e  $y$  nos elementos de base. Além disso, a condição de contorno de vazão ( $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) foi aplicada às laterais e ao topo de cada alteamento, simulando a saída do excesso de água com a consolidação dos aterros.

Alguns pesquisadores, como Silva (2020) e Souza (2020), realizaram simulações de pilhas de rejeito considerando outras abordagens para definição das condições de contorno laterais à estrutura. Logo, ressalta-se a existência de diversas metodologias para a simulação das condições de pilhas, devendo-se avaliar cada uma delas. Além disso, é de suma importância a calibração do modelo numérico por meio de pilhas experimentais e instrumentação, de modo a garantir a representatividade do modelo.

Os efeitos de sucção foram considerados mediante a definição de funções de teor de umidade volumétrico e de condutividade hidráulica para os materiais, de modo a se realizar análises não saturadas na pilha. Os detalhes da geometria da pilha hipotética podem ser observados na Figura 3.17.



**Figura 3.17 - Detalhes da geometria da pilha hipotética de co-disposição e condições de contorno.**

O processo de alteamento foi conduzido utilizando o modelo Norsand e análises não drenadas. As análises contemplaram a influência de diferentes velocidades de alteamento na geração de poropressões na pilha. Foram consideradas taxas de alteamento de 155 cm/dia, 10 cm/dia, 5 cm/dia e 2,5 cm/dia.

A taxa de alteamento de 155 cm/dia foi considerada nas simulações para se avaliar uma situação hipotética crítica, na qual uma velocidade de alteamento elevada poderia resultar em uma geração de excessos de poropressões. Esse cenário crítico permite identificar os limites operacionais e de segurança durante a construção da pilha, fornecendo informações valiosas para o projeto e gerenciamento da obra.

A análise de estabilidade da pilha hipotética foi realizada com o software Slope/W, pela aplicação do método de equilíbrio limite, por Morgenster-Price, e pelo método *Cuckoo Search* (CS), de modo a se definir o fator de segurança da pilha hipotética modelada.

O fator de segurança representa a relação entre as forças resistivas e as forças mobilizadas no sistema, sendo essencial para determinar se a estrutura é capaz de resistir a condições de carregamento específicas sem sofrer falhas ou colapsos.

O método de equilíbrio limite, frequentemente utilizado para realizar análises de estabilidade em estruturas geotécnicas, fundamenta-se no princípio do equilíbrio de forças e momentos agindo sobre uma massa de solo ou talude. Esse método considera o solo como um material que pode falhar ao longo de superfícies de deslizamento potenciais, denominadas superfícies de ruptura.

As análises de estabilidade realizadas por meio do método de equilíbrio limite consistem no cálculo do fator de segurança ao longo dessas superfícies de ruptura. O fator de segurança fornece uma medida quantitativa da estabilidade da estrutura em relação às condições de carregamento aplicadas.

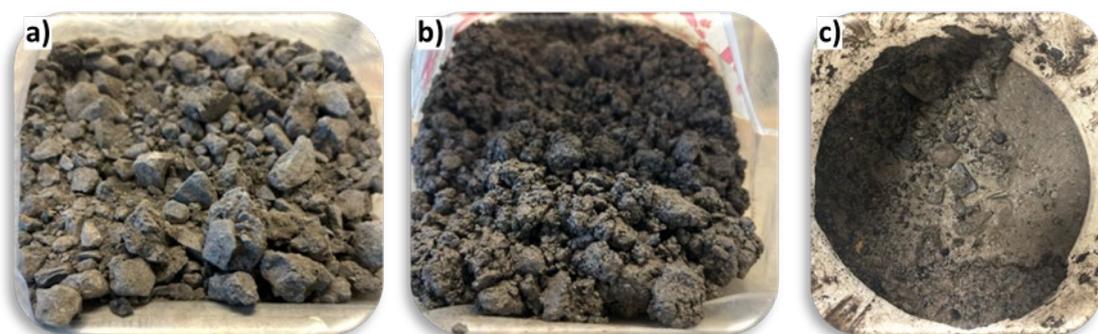
O método CS é um algoritmo de busca metaheurística aplicado para encontrar soluções ótimas em problemas de otimização de superfícies de ruptura na análise de estabilidade de taludes. Esta abordagem é inspirada no comportamento de reprodução dos cucos na natureza e tem sido eficaz na resolução de uma variedade de problemas de otimização complexos.

Ao aplicar o método CS na análise de estabilidade de taludes, é importante considerar a profundidade mínima da superfície de ruptura, que neste caso foi estabelecida em 15 metros durante as simulações. Esta profundidade mínima buscou evitar falhas superficiais e rasas nas bancadas do talude, garantindo uma análise mais precisa e representativa das condições reais de estabilidade.

## **3.2. MISTURA DE RESÍDUOS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DA AUSTRÁLIA**

### **3.2.1. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DE UMA MINERADORA DE CARVÃO MINERAL NA AUSTRÁLIA**

Na Figura 3.18 tem-se as amostras de estéreis de carvão mineral, consistindo do estéril não alterado (*spoil*) e do estéril alterado ou lama (*mud*), ambos provenientes de uma mineradora de carvão mineral à céu aberto na Austrália. As amostras de estéril alterado, ou lama, foram obtidas de duas localizações diferentes, sendo identificadas como *mud 01* e *mud 02*.



**Figura 3.18 – Amostras de resíduos de carvão: a) *Spoil*; b) *Mud01*; c) *Mud02*.**

O estéril de carvão mineral (*spoil*) apresenta uma ampla distribuição granulométrica, com predominância de partículas de tamanho médio a grosso. Isso pode incluir desde partículas de

areia e cascalho até fragmentos maiores de rochas. No entanto, também pode conter uma proporção significativa de partículas finas, como argilas e siltes. Visualmente, o estéril de carvão mineral possui uma coloração variada, geralmente em tons de marrom, cinza e preto, refletindo a composição mineralógica e o teor de matéria orgânica. A textura pode variar de granular a coesa, dependendo da proporção de partículas finas presentes.

A lama (*mud02*) é composta principalmente por partículas finas, como argilas e siltes. Devido ao processo de erosão e carreamento, pode conter uma alta proporção de material em suspensão, resultando em uma distribuição granulométrica predominantemente composta por partículas pequenas.

A partir de uma descrição tátil-visual, a lama apresenta coloração em tons de marrom-escuro a preto, dependendo do teor de matéria orgânica e outros materiais presentes. Ao toque, é comum ter uma textura muito suave e pegajosa devido à alta proporção de partículas finas.

A amostra de *mud01* possui um caráter intermediário entre o *spoil* e o *mud02*.

### 3.2.2. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DE UMA MINERADORA DE FOSFATO AUSTRALIANA

Na Figura 3.19 tem-se as amostras de estéril, denominado *shale* e lama, denominada *slime*, ambos gerados nos processos de lavra e beneficiamento de fosfato de uma empresa de mineração na Austrália. Diferente do depósito de fosfato brasileiro, o depósito mineral australiano é de origem sedimentar, sendo assim, tem-se uma formação geológica totalmente diferente.



Figura 3.19 – Amostras de resíduos de fosfato: a) *Slimes*; b) *Shale*.

O estéril (*shale*) consiste de um folhelho, uma rocha sedimentar de grão fino. De acordo com a descrição mineralógica fornecida, além de minerais argilosos, o estéril é composto por quantidades variáveis de quartzo, feldspato, calcita e outros minerais.

Esses minerais conferem ao estéril propriedades geotécnicas características, como uma estrutura laminada de camadas finas e paralelas, resultantes da deposição sequencial de sedimentos ao longo do tempo.

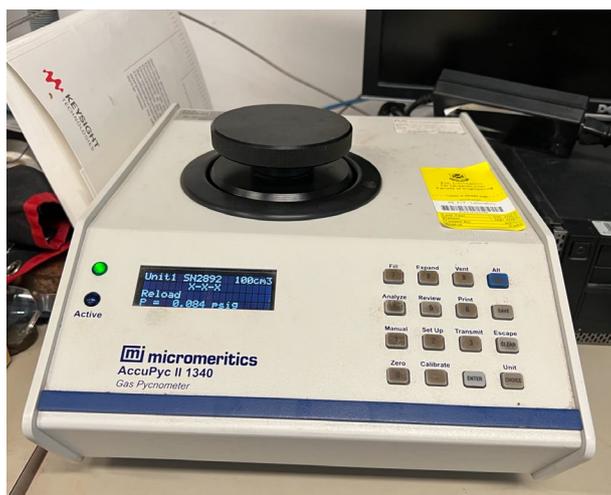
Visualmente, o estéril apresenta uma coloração que varia de tons de branco à marrom claro, com uma superfície geralmente lisa a levemente rugosa, dependendo do grau de compactação e cimentação dos sedimentos. Sua dureza é moderada, sendo difícil de quebrar com as mãos e tendendo a fraturar em camadas paralelas.

A lama (*slime*) em estudo consiste de um subproduto gerado como resultado do processo de produção de fertilizantes a partir de minérios de fosfato. Composta principalmente por partículas finas e coloidais, a lama é o resultado do processo de produção de ácido fosfórico. Essa lama apresenta uma textura suave e altamente moldável devido à sua alta plasticidade. Visualmente, ela exibe uma coloração amarelada e clara.

### **3.2.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DA AUSTRÁLIA**

As amostras utilizadas nesta etapa da pesquisa foram caracterizadas geotecnicamente no Centro de Engenharia Geotécnica da Universidade de Queensland (UQ) de acordo com os requisitos das normas estabelecidas pela American Society for Testing and Materials (ASTM) e Australia Standards (AS).

A massa específica de todas as amostras coletadas foi determinada de acordo com a norma AS 1289.3.5.2-2002, utilizando um picnômetro de hélio a vácuo (Fig. 3.20). Os resultados foram obtidos como a média de 10 leituras no equipamento, considerando as amostras secas em estufa a 60 graus Celsius.



**Figura 3.20 - Gas Pycnometer**

Os valores máximos de razão de vazios ( $e_{max}$ ) das amostras analisadas foram determinados de acordo com a ASTM 4254-16 (ASTM 2016b), utilizando o Método A e o Método B.

### **3.2.4. RAZÃO ÓTIMA DA MISTURA DOS MATERIAIS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DA AUSTRÁLIA**

A determinação da razão ótima de mistura ( $R_{ot}$ ) foi conduzida com base em análises das proporções volumétricas, empregando a Equação 2.1 como método de cálculo. Para as amostras provenientes da operação de mineração de carvão mineral, estabeleceu-se um teor de sólidos de 80% para o *mud01*, refletindo o teor de sólidos presentes no material antes da etapa de mistura. Este parâmetro foi definido como a proporção de sólidos contidos no *mud01* na condição de campo (*in situ*), antes de ser submetida ao processo de mistura. Por outro lado, para as amostras oriundas da exploração de fosfato, adotou-se um teor de umidade de 35% para o *slime*, correspondendo a um teor de sólidos de 74%.

Além das amostras preparadas na razão ótima de mistura, para as amostras provenientes da mineração de carvão mineral, foram preparadas várias proporções de misturas secas entre estéril e *mud01*. Essas misturas foram preparadas em proporções de 4:1, 3:1 e 2:1, baseadas na umidade natural, ou seja, como amostrada *in situ*. O propósito desse procedimento foi estabelecer uma base comparativa destas misturas em relação à mistura preparada na proporção ótima ( $R_{ot}$ ) e aos materiais não misturados.

Para as amostras provenientes da mineração de fosfato, foram realizados ensaios apenas nos materiais não misturados e nas amostras preparadas na razão ótima de mistura.

### 3.2.5. ANÁLISES MECÂNICAS DOS MATERIAIS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DA AUSTRÁLIA

O comportamento mecânico dos materiais individuais e misturados foi avaliado por meio de ensaios de cisalhamento direto, seguindo os procedimentos delineados na norma ASTM D3080 (ASTM 2011).

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados utilizando duas configurações distintas de equipamentos. Uma delas consistiu em um aparato maior, onde a caixa de cisalhamento possuía dimensões de 150 mm x 150 mm x 130 mm (comprimento, largura, altura). Já a outra configuração utilizou caixas de cisalhamento menor, com dimensões de 100 mm x 100 mm x 30 mm ou 60 mm x 60 mm x 30 mm.

Para a preparação das amostras para os ensaios de cisalhamento direto, foram adotadas diferentes abordagens devido às características granulométricas distintas de cada material e às limitações dos equipamentos utilizados. No caso do estéril de carvão, as amostras foram peneiradas a seco abaixo de 19 mm, em conformidade com as especificações do equipamento de teste, que possui dimensões de 150 mm x 150 mm x 130 mm.

Já para as amostras de estéril da mineração de fosfato, devido ao tamanho máximo dos grãos representativos para realização de ensaios mecânicos em equipamentos menores, estas foram peneiradas a seco abaixo de 6,35 mm. Essa escolha buscou assegurar a uniformidade do tamanho das partículas e a adequação aos equipamentos de menor escala utilizados nos ensaios.

Para ambas as configurações de caixas de cisalhamento, pequenas e grandes, foram realizados no mínimo três ensaios para cada tipo de material, aplicando tensões normais nominais de 200, 500 e 1.000 kPa. Essas tensões foram selecionadas para simular depósitos de aproximadamente 10 m, 25 m e 50 m. Cada amostra foi preparada sem compactação (solta), diretamente na caixa de cisalhamento, de modo a se assentar sob a tensão normal aplicada na etapa de consolidação. Esse procedimento visou representar fielmente as condições de campo e garantir resultados representativos do comportamento dos materiais em diferentes profundidades do depósito.

A taxa de cisalhamento de cada amostra foi determinada a partir dos gráficos de consolidação. Para isso, seguiu-se o método prescrito na norma ASTM D3080 (ASTM, 2011), utilizando o método proposto por Taylor para calcular o tempo necessário para que 90% da consolidação primária fosse alcançada, denominado como parâmetro  $t_{90}$  (Taylor, 1948). Durante o estágio de cisalhamento, uma taxa relativamente baixa de 0,1 mm/min foi aplicada para as caixas de cisalhamento menores, com dimensões de 60 mm x 60 mm x 30 mm e 100 mm x 100 mm x 30

mm, enquanto uma taxa de 1 mm/min foi utilizada para a caixa de cisalhamento maior. Essa abordagem buscou promover um comportamento drenado durante os ensaios. A taxa de cisalhamento foi selecionada de forma a ser inferior à calculada, assegurando assim a uniformidade e a precisão dos resultados.

### 3.2.6. ANÁLISES HIDRÁULICAS DOS MATERIAIS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DA AUSTRÁLIA

Foram realizadas uma série de ensaios de consolidação sob alta pressão utilizando um consolidômetro de grandes dimensões, especialmente desenvolvido para testar a consolidação de polpas e lamas de rejeitos, conforme exemplificado na Figura 3.21. Esse equipamento foi projetado e fabricado pela Wille Geotechnik para atender às necessidades do Centro de Engenharia Geotécnica da Universidade de Queensland. Sua capacidade de avaliar o impacto do carregamento contínuo em amostras de rejeitos, incluindo a medição do excesso de poropressão, oferece uma compreensão mais aprofundada do comportamento desses materiais em condições específicas. Além disso, o consolidômetro permite a drenagem tanto na parte superior quanto na inferior da célula de consolidação, o que viabiliza a simulação de diversas condições *in situ*. Os ensaios realizados seguiram as diretrizes estabelecidas pela norma AS 1289.6.6.1 (2020).

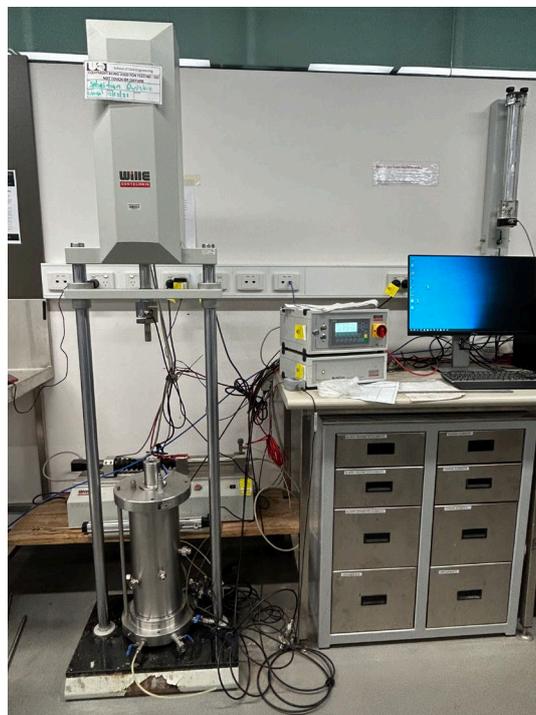


Figure 3.21 – Consolidômetro de rejeitos de grandes dimensões.

O consolidômetro foi projetado para acomodar amostras cilíndricas com um diâmetro de 150 mm e uma altura de 410 mm, sendo possível a aplicação de uma tensão máxima de 566 kPa, medida tanto na parte superior quanto na inferior da célula. Essa disposição facilita a avaliação do atrito com a parede do cilindro, contribuindo para uma análise abrangente dos resultados. Além disso, o instrumento possui sete transdutores de poropressão estrategicamente posicionados para medir a poropressão em diferentes alturas dentro do cilindro.

De modo geral, o consolidômetro de grande dimensão oferece vantagens significativas frente as inúmeras limitações dos equipamentos tradicionais. Além de permitir a análise de materiais com dimensões maiores em termos de altura e diâmetro, bem como materiais com elevada umidade e resistência, o equipamento possui a capacidade de avaliar a drenagem de maneira controlada, possibilitando simular condições realistas de campo. Também é possível a realização de medições precisas das tensões aplicadas, poropressões e deformações nas amostras.

Nos ensaios conduzidos, a drenagem dentro do cilindro de consolidação foi realizada a partir do topo do equipamento, simulando a drenagem ascendente da lama sobre uma fundação impermeável. Durante os ensaios, uma carga máxima de 500 kPa foi aplicada incrementalmente a uma taxa de 1 kPa/min, garantindo uma aplicação uniforme e controlada da carga sobre as amostras. Após atingir a tensão máxima, a carga foi mantida em um nível constante até que as poropressões se dissipassem do corpo de prova, permitindo uma completa avaliação da consolidação e do comportamento do material testado.

A condutividade hidráulica de cada amostra foi determinada usando a metodologia introduzida por Davison & Atkinson (1990), conforme expresso na Eq. 3.4. É importante observar que o método convencional comumente empregado em ensaios de consolidação padrão não pôde ser aplicado neste caso, devido à característica de taxa de carregamento constante do consolidômetro.

$$k = \left( \frac{\gamma_w * Ha}{2 * u_e} \right) \left( \frac{\Delta h}{\Delta t} \right) \quad (3.4)$$

Onde:  $k$  é a condutividade hidráulica da amostra;  $\gamma_w$  é o peso específico da água;  $Ha$  é a altura atual da amostra;  $u_e$  é o excesso de poropressão na base da amostra;  $\Delta h$  é a variação de altura da amostra durante uma variação selecionada no tempo; e  $\Delta t$  é a variação de tempo.

## 4. RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1. CO-DISPOSIÇÃO DE REJEITOS E ESTÉREIS DA MINERAÇÃO E PROCESSAMENTO DE FOSFATO NO BRASIL

#### 4.1.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS (REJEITO E ESTÉRIL)

Na Tabela 4.1 tem-se um resumo dos resultados dos ensaios de caracterização. Com base nos resultados dos ensaios de avaliação dos índices de consistência, limites de liquidez e plasticidade, evidenciou-se que os rejeitos apresentam características não plásticas, não possuindo parâmetros de consistência. Por outro lado, os estéreis exibem um limite de liquidez de 38%, limite de plasticidade de 24% e índice de plasticidade de 14%.

A massa específica determinada usando o penta picnômetro automático foi de 3,15 g/cm<sup>3</sup> e 3,47 g/cm<sup>3</sup> para os rejeitos e estéreis, respectivamente. Utilizando a técnica do picnômetro e balão volumétrico, os valores de massa específica de 3,14 g/cm<sup>3</sup> para rejeitos e 3,68 g/cm<sup>3</sup> para estéreis foram obtidos. As discrepâncias nos valores de massa específica dos estéreis se devem à restrição do penta picnômetro em relação às frações granulométricas utilizadas, as quais são menores que 2 mm, em contraste com a técnica do picnômetro e balão volumétrico, que considera frações inferiores a 4 mm.

**Tabela 4.1– Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.**

Amostras	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	WL (%)	WP (%)	IP (%)
Rejeito	3,14	NL	NP	-
Estéril	3,68	38	24	14

Os ensaios de distribuição granulométrica, conforme mostrado na Tabela 4.2 e na Figura 4.1, foram conduzidos de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), considerando as proporções de cascalho, areia, silte e argila na fração de material testado. Os rejeitos foram classificados como SM e os estéreis como SC.

**Tabela 4.2 - Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.**

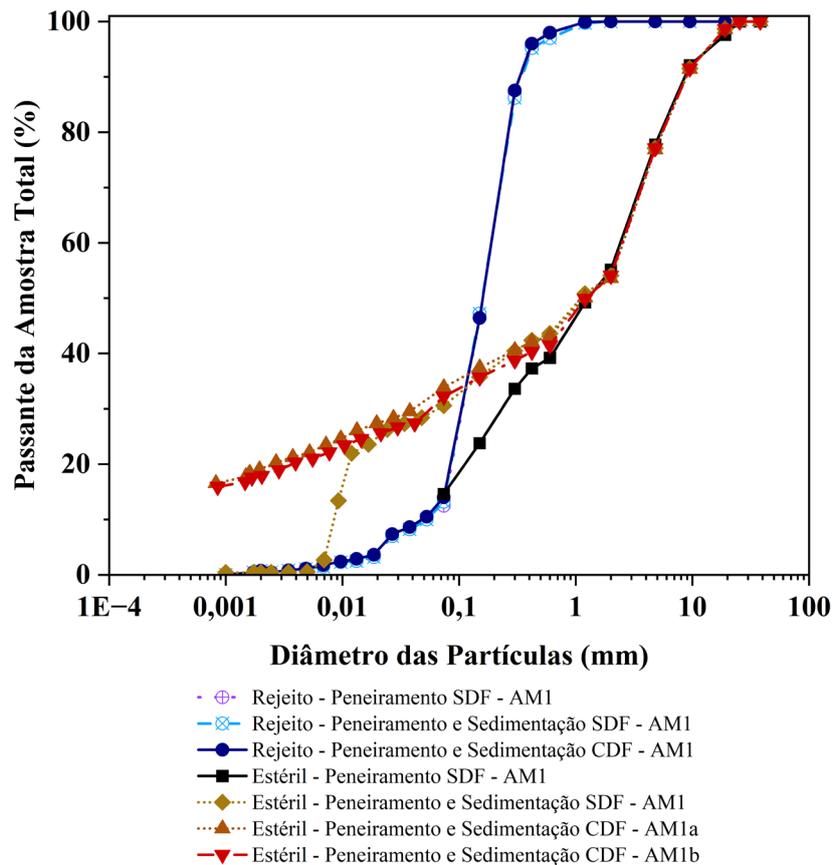
Amostras/Ensaio	Granulometria (%)					Classificação SUCS
	Argila e Silte	Areia			Pedregulho	
		Fina	Média	Grossa		
Rejeito – Peneiramento (CDF)*	12,49	83,06	4,45	-	-	SM
Rejeito – Peneiramento e Sedimentação (CDF)**	14,01	82,00	3,99	-	-	SM
Rejeito – Peneiramento e Sedimentação (SDF)**	13,2	82,74	4,06	-	-	SM
Estéril – Peneiramento (SDF)**	14,59	22,71	17,85	22,60	22,25	SC
Estéril – Peneiramento e Sedimentação (SDF)**	30,59	11,8	11,70	23,00	22,92	SC
Estéril AM1 – Peneiramento e Sedimentação (CDF)*	33,88	8,23	11,52	23,25	23,13	SC
Estéril AM2 – Peneiramento e Sedimentação (CDF)*	32,2	8,12	13,77	23,02	22,90	SC

\* CDF – com uso de defloculante; \*\* SDF – sem uso de defloculante; AM1 e AM2 – amostras 1 e 2; obs: não houve agitação no copo de dispersão nos ensaios com apenas o peneiramento.

A análise da distribuição granulométrica revelou que os rejeitos são compostos principalmente de areia fina, representando 82,6% do total, com uma parcela de 4,2% de areia média, enquanto os teores de argila e silte giram em torno de 13,2%. Devido à natureza não coesiva dos siltes e argilas, o uso de defloculante não alterou a distribuição granulométrica das partículas.

A influência do defloculante na caracterização foi verificada apenas nas amostras de estéril. Presume-se que a condição *in situ* desse material tenha uma distribuição granulométrica mais próxima dos resultados obtidos sem o uso de defloculante e sem agitação no copo de dispersão. Houve uma distinção bem marcante entre as curvas obtidas com e sem o uso de defloculante, bem como entre curvas sem o uso de defloculante e considerando agitação ou não agitação com o copo de dispersão antes do peneiramento da fração fina.

Observa-se que as presenças de siltes e argilas influenciam as curvas granulométricas do estéril. Há uma tendência à agregação de partículas mais finas, tanto em torno delas mesmas quanto aderindo às partículas maiores, particularmente no caso de materiais que não foram submetidos à agitação antes da peneiração.



**Figura 4.1 – Análise granulométrica.**

Os resultados da caracterização geotécnica indicaram que o estéril contém mais finos do que os materiais comumente estudados para co-disposição, apresentando uma fração granulométrica bem distribuída. Os grãos maiores no estéril tendem a fragmentar devido à processos de intemperismo intenso. Observa-se que há uma menor proporção entre o tamanho médio dos grãos,  $D_{50\text{estéril}}:D_{50\text{rejeito}} = 7,5$ , enquanto que para outros resíduos de mineração esta proporção tende a ser igual ou maior do que 20. Apesar disso, ainda há uma relação adequada, maior do que 7:1, de acordo com as considerações da teoria de empacotamento de misturas binárias de Furnas (1928) e Wickland *et al.* (2006b).

Considerando a alteração da distribuição granulométrica dos estéreis com o uso de defloculantes e dado que uma variedade de produtos químicos é empregada no processo de beneficiamento mineral do fosfato para modificar as propriedades dos materiais e concentrar o mineral de interesse, é possível que ocorram alterações na condição *in situ* dos estéreis, caso estes sejam misturados com rejeitos, resultando em frações mais finas que podem influenciar o comportamento mecânico e hidráulico da mistura.

Estudos realizados por Shokouhi (2015) e Vangness (2020) abordaram a influência de diferentes tipos de água na curva granulométrica de materiais de mineração, incluindo água de processo, água deionizada e água de torneira. Os resultados indicaram uma significativa influência desses tipos de água nos resultados obtidos. Portanto, diante da observação de alterações na curva granulométrica com o uso de defloculantes nos estéreis, é importante considerar, em estudos futuros, o impacto da utilização da água de processo nesses materiais destinados à co-disposição.

Estudos sobre a degradação do estéril, especialmente da fração grosseira sob a ação de defloculante, imersão em água de processo ou agitação mecânica, também são importantes de se realizar. Essas análises podem impactar as características físicas, as curvas de distribuição granulométrica, bem como o comportamento dos resíduos de mineração.

Com relação as particularidades granulométricas do estéril, foi observado que a realização de ensaios em laboratório com este tipo de material poderia ser vantajosa, visto que a maioria dos equipamentos utilizados são de menor escala, permitindo um estudo mais realista e representativo das condições observados em campo.

Foram verificados os índices de vazios máximos ( $e_{max}$ ) do rejeito e estéril. Para o rejeito, aplicando os métodos *A* e *B* da norma vigente, não foi observada diferença significativa nos resultados, sendo o  $e_{max}$  de 1,13 e 1,12, respectivamente para cada método. Para o estéril, realizou-se o ensaio em duas amostras, coletadas em locais diferentes na pilha de estéril, sendo considerado apenas o método B, uma vez que o tamanho máximo dos grãos não era compatível com o procedimento do método A. Os valores obtidos para o  $e_{max}$  foram de 1,21 e 1,45, respectivamente.

#### **4.1.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL (REJEITO E ESTÉRIL)**

Na Tabela 4.3 tem-se os resultados das análises químicas realizadas pelo método de Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), os quais identificaram os principais elementos presentes nos materiais. Percebe-se uma predominância do elemento ferro, sendo 38% para o rejeito e 62% para o estéril. No rejeito, o elemento sílica quase se equipara ao ferro em termos percentuais, totalizando 30%, enquanto que o titânio corresponde a 11% e cálcio a 8,5%. Ao contrário, no estéril, a sílica corresponde a 12%, praticamente se igualando ao alumínio, que

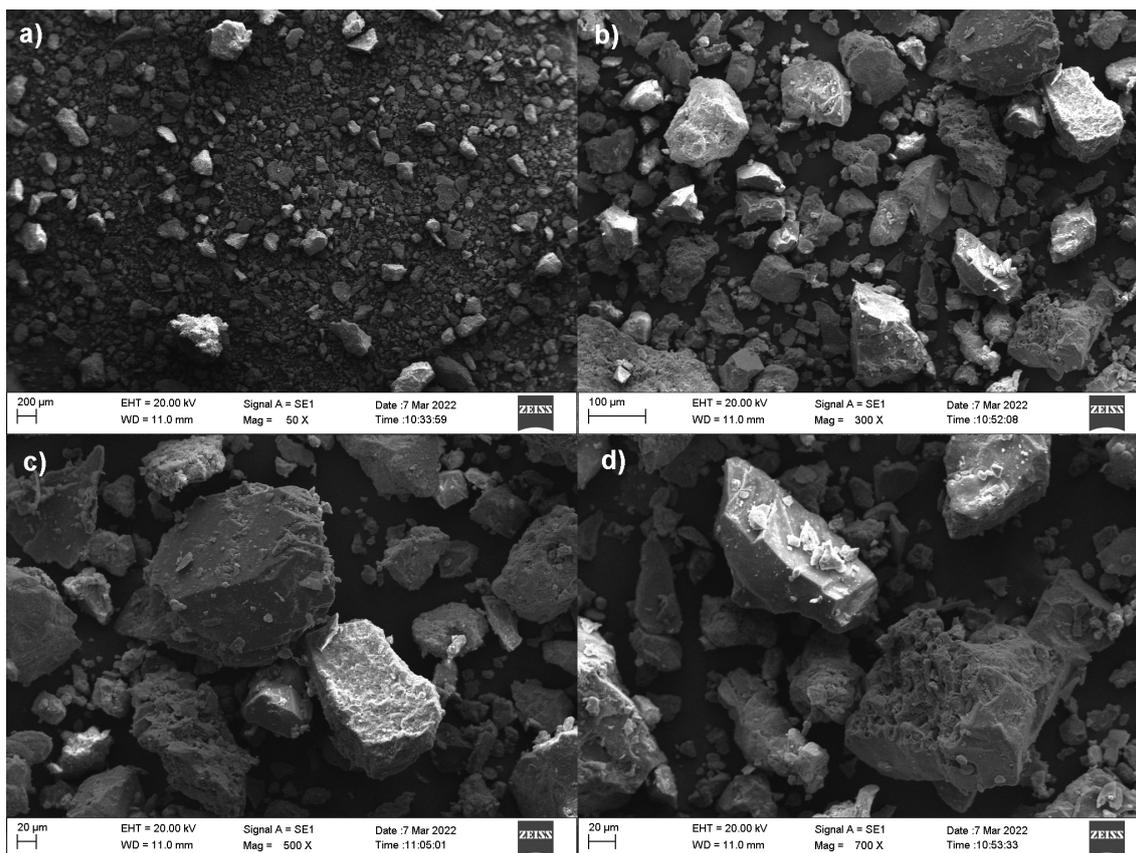
representa 11%. O percentual restante, representando menos de 15%, refere-se à fósforo e às terras raras.

**Tabela 4.3 – Resumo dos resultados da análise química realizada em 4 amostras.**

Amostras							
AM1 - Rejeito		AM2 - Rejeito		AM3 - Estéril		AM4 - Estéril	
Elementos	%	Elementos	%	Elementos	%	Elementos	%
<b>Fe</b>	37,672	<b>Fe</b>	38,595	<b>Fe</b>	61,9	<b>Fe</b>	61,636
<b>Si</b>	30,592	<b>Si</b>	29,458	<b>Si</b>	12,051	<b>Si</b>	11,363
<b>Ti</b>	10,748	<b>Ti</b>	10,877	<b>Al</b>	10,646	<b>Al</b>	10,932
<b>Ca</b>	8,559	<b>Ca</b>	8,419	<b>Ti</b>	4,755	<b>Ba</b>	5,38
<b>P</b>	5,011	<b>P</b>	5,138	<b>Ba</b>	4,603	<b>Ti</b>	4,306
<b>Ce</b>	1,859	<b>Ce</b>	2,116	<b>P</b>	2,285	<b>P</b>	2,285
<b>Mn</b>	1,185	<b>Mn</b>	1,07	<b>Sr</b>	1,322	<b>Sr</b>	1,261
<b>Zr</b>	0,849	<b>Zr</b>	1,047	<b>Zr</b>	0,728	<b>Zr</b>	1,071
<b>Sr</b>	0,813	<b>Sr</b>	0,783	<b>Ca</b>	0,559	<b>Ca</b>	0,518
<b>Mg</b>	0,65	<b>Mg</b>	0,771	<b>Mn</b>	0,386	<b>Nb</b>	0,402
<b>Nb</b>	0,641	<b>Nb</b>	0,679	<b>Nb</b>	0,304	<b>Mn</b>	0,385
<b>Al</b>	0,567	<b>Al</b>	0,425	<b>K</b>	0,171	<b>K</b>	0,126
<b>K</b>	0,274	<b>K</b>	0,284	<b>S</b>	0,088	<b>S</b>	0,098
<b>V</b>	0,178	<b>Cr</b>	0,161	<b>Cu</b>	0,087	<b>Cu</b>	0,088
<b>Br</b>	0,172	<b>Zn</b>	0,15	<b>Zn</b>	0,073	<b>Zn</b>	0,073
<b>Zn</b>	0,157	<b>Y</b>	0,028	<b>Y</b>	0,042	<b>Y</b>	0,043
<b>Ni</b>	0,043					<b>Br</b>	0,036
<b>Y</b>	0,031						

Pela caracterização microscópica, realizada com o uso de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para o rejeito e estéril, foi possível observar a disposição, forma e possível adesão dos grãos finos nos estéreis e rejeitos. Na Figura 4.2 tem-se a amostra de rejeito observada com diferentes resoluções pelo MEV, considerando um aumento variando de 50 (Fig. 4.2a) à 700 vezes (Fig. 4.2d).

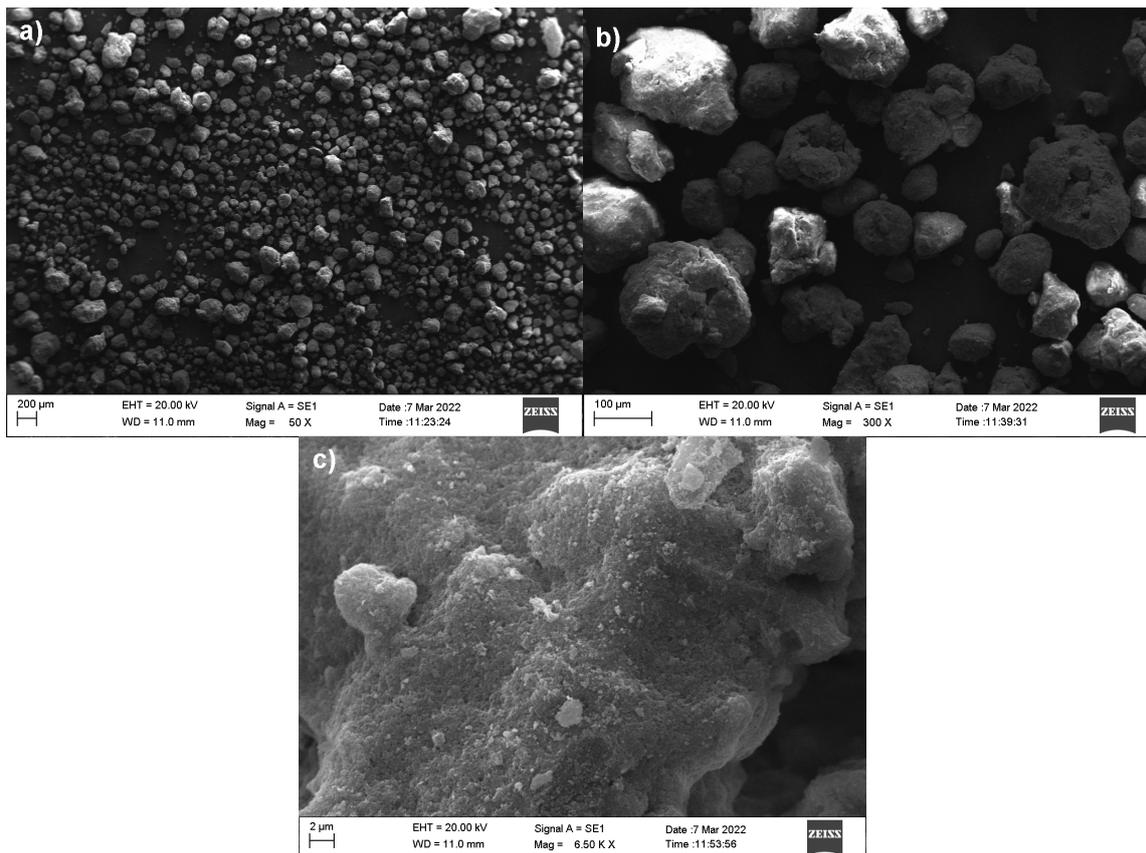
Devido ao fato de os materiais terem sido submetidos à secagem em estufa, observa-se a ausência de qualquer aspecto coesivo entre os grãos, o que é provavelmente atribuído à remoção da água. É importante ressaltar que a coesão aparente entre os grãos é observada quando há presença de água. Além disso, é notável que a maioria dos grãos apresenta uma forma bastante angulosa.



**Figura 4.2 – Microscopia eletrônica de varredura no rejeito: a) aumento de 50x; b) aumento de 300x; c) aumento de 500x; d) aumento de 700x.**

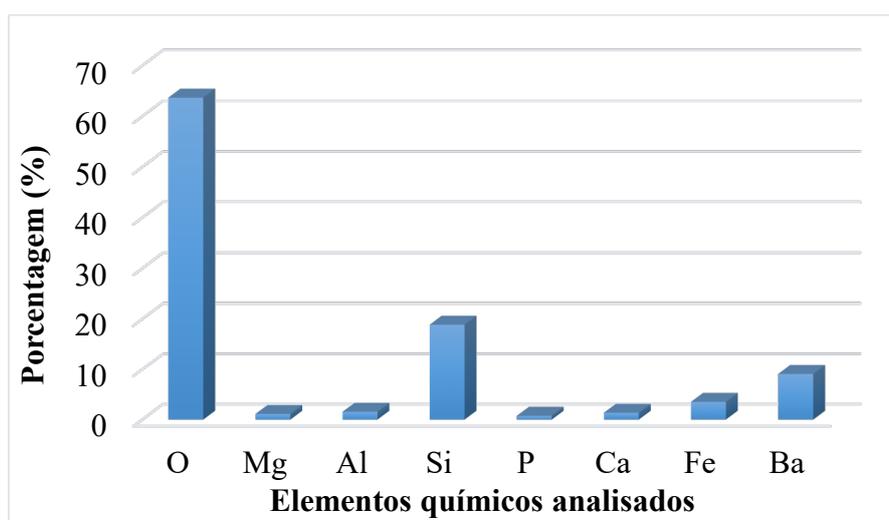
Na Figura 4.3, é possível observar a amostra de estéril em diferentes resoluções pelo MEV, com ampliações de 50, 300 e 6,5 mil vezes. Devido à etapa anterior de secagem prévia em estufa, nota-se que os grãos maiores estão soltos. No entanto, é perceptível que esses grãos maiores são formados ou pela aglomeração de grãos menores ou pela adesão desses grãos menores na superfície das partículas maiores. Além disso, a forma dos grãos é mais arredondada e sem angulações.

É interessante observar na Figura 4.3c a aderência dos grãos de silte e argila na superfície de uma partícula maior na amostra de estéril. Esse aspecto também foi observado na análise tátil-visual, onde esse material mais fino tende a aderir completamente à superfície de determinadas partículas e é removido apenas após lavagem com agitação e/ou uso de defloculante. Esse fenômeno de adesão dos grãos menores à superfície das partículas maiores pode ter implicações significativas no comportamento dos materiais, especialmente em relação à sua resistência e permeabilidade.



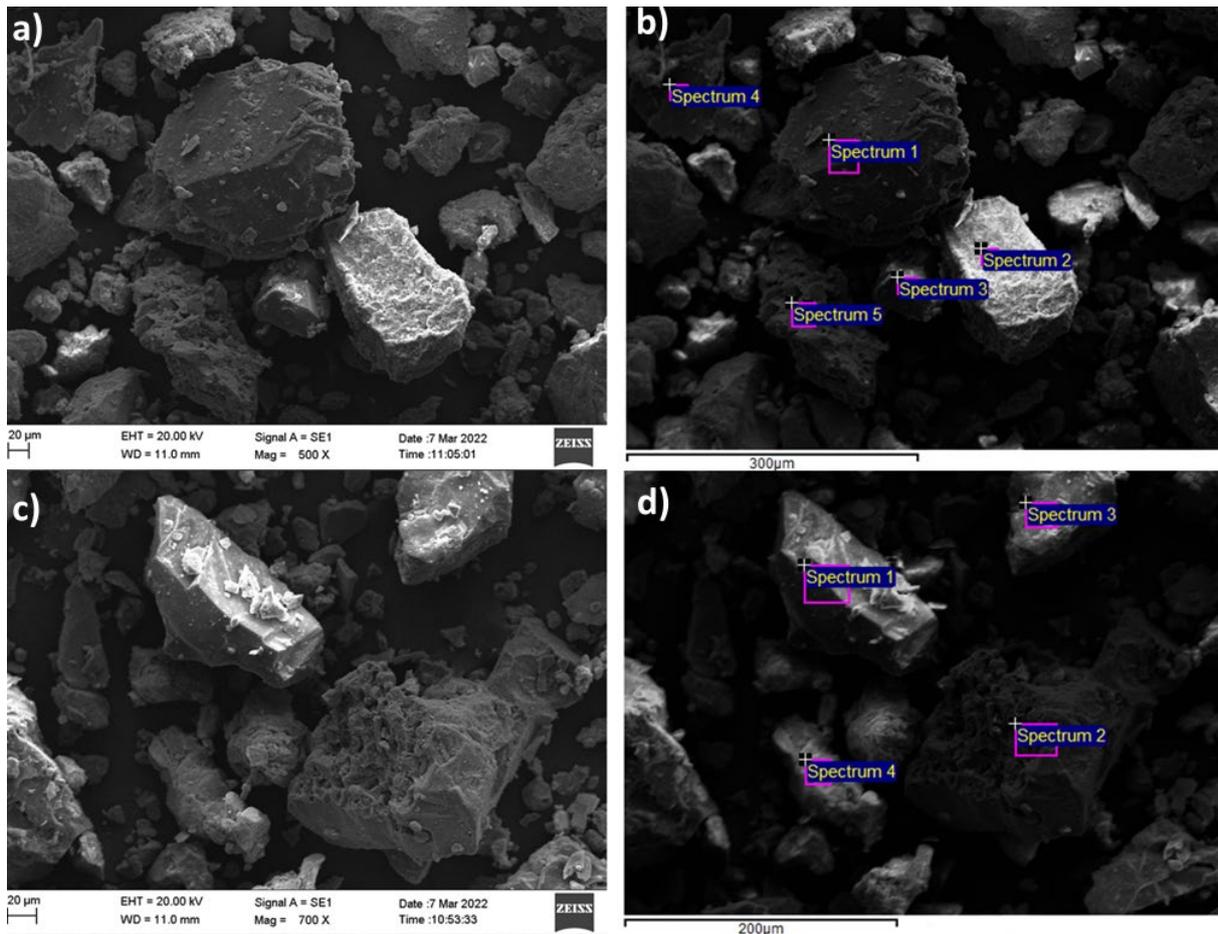
**Figura 4.3 – Microscopia eletrônica de varredura no estéril: a) aumento de 50x; b) aumento de 300x; c) aumento de 6500x.**

Na Figura 4.4, são apresentados os resultados do EDS para a área delimitada pela imagem de resolução de 50 vezes do rejeito no MEV. Esses resultados são representados graficamente, permitindo identificar que a composição predominante da amostra é atribuída a silicatos, e em menor proporção minerais de ferro e de bário.



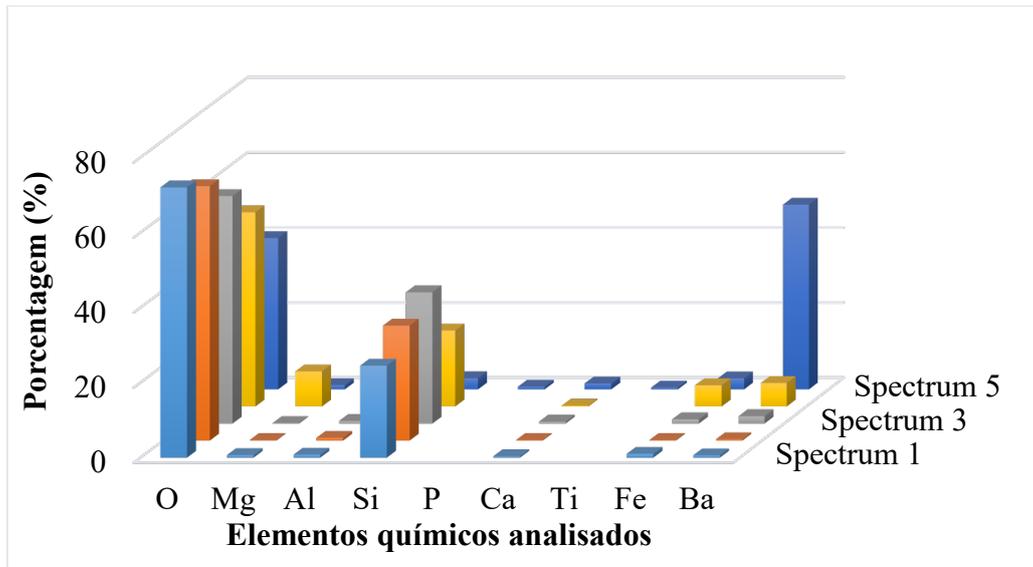
**Figura 4.4 – Composição química por EDS obtida no mapeamento da imagem do MEV aumentada 50x para o rejeito.**

Na Figura 4.5a, é apresentada a imagem obtida por MEV com um aumento de 500 vezes do rejeito, juntamente com as áreas selecionadas dessa mesma imagem para realização da análise de Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) (Fig. 4.5b). Por outro lado, na Figura 4.5c, temos a imagem obtida por MEV com um aumento de 700 vezes do rejeito, enquanto que na Figura 4.5d são exibidas as áreas selecionadas da imagem para realização da análise EDS.



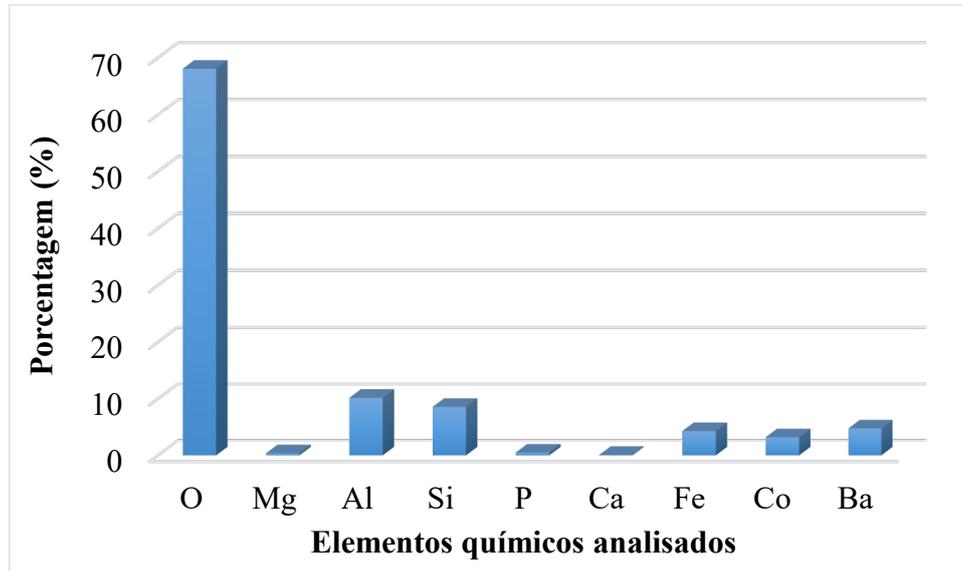
**Figura 4.5 – Seleção dos locais de mapeamento dos elementos químicos do rejeito com EDS: a) e b) imagem aumentada de 500x no MEV; c) e d) imagem aumentada 700x.**

Na Figura 4.6, são exibidos os resultados obtidos em cada uma das áreas selecionadas para análise do EDS apresentados na Figura 4.5b. A análise dos resultados permitiu identificar a predominância dos elementos Si e Ba nas áreas selecionadas, sugerindo a presença de minerais silicatados, bem como de minerais de bário, partículas identificadas na imagem como possuindo estrutura aparentemente mais porosa (Espectro 5, Fig. 4.5b).



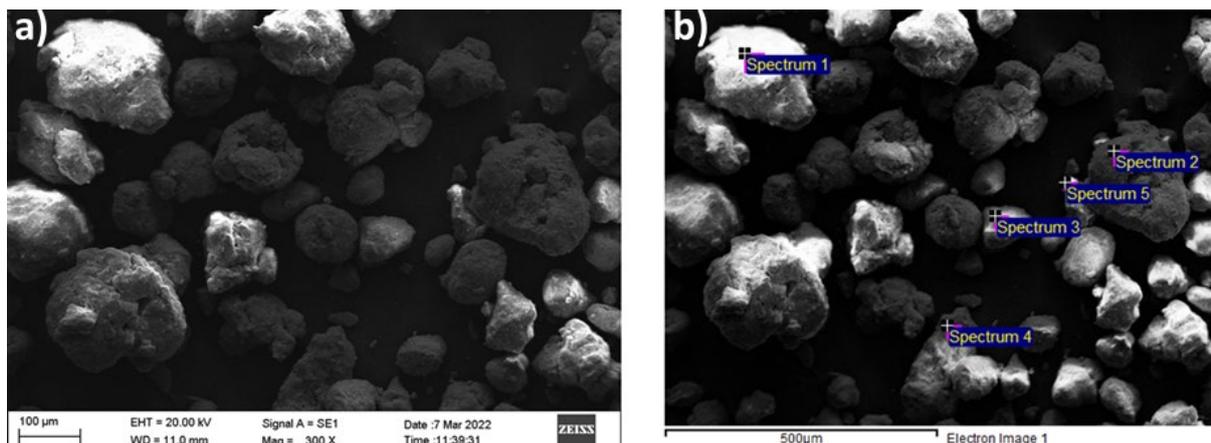
**Figura 4.6 - Composição química por EDS obtida para os 5 pontos mapeados da imagem do MEV aumentada 500x para o rejeito.**

Na Figura 4.7, são apresentados os resultados do EDS para a imagem obtida por MEV do estéril com uma resolução de 50 vezes, os quais estão representados graficamente. Observa-se que nesta amostra, os elementos presentes em maior quantidade são Al e Si, provavelmente atribuídos à constituição de minerais silicatados.

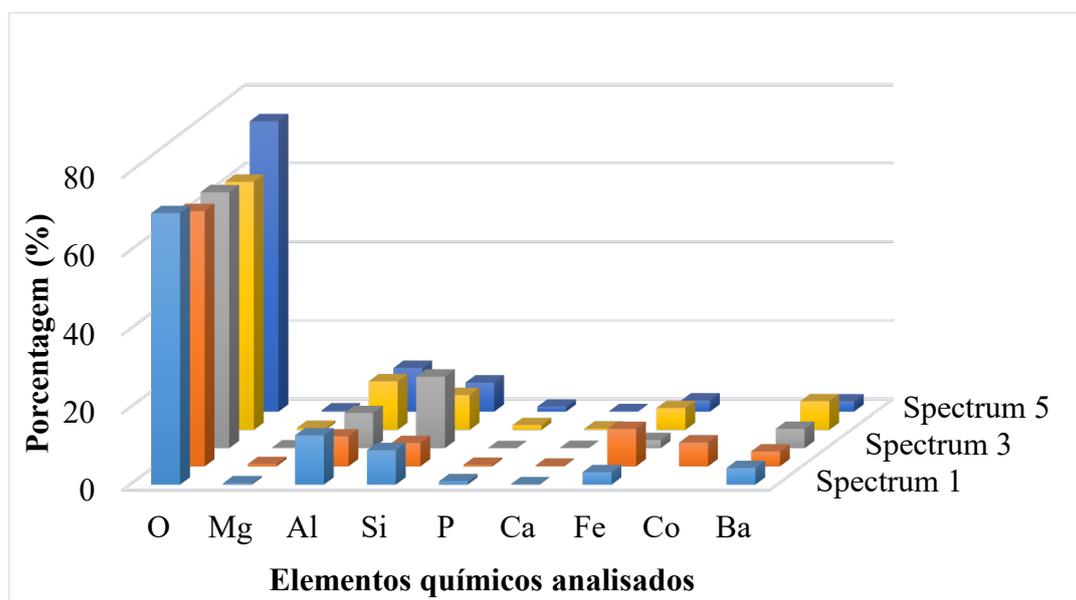


**Figura 4.7 - Composição química por EDS obtida no mapeamento da imagem do MEV aumentada 50x para o estéril.**

Analisando a imagem da amostra de estéril pelo MEV com uma resolução de 300 vezes, observa-se, pelos resultados do EDS, uma grande variabilidade na distribuição dos elementos nas áreas selecionadas. Isso sugere uma maior presença de finos de diferentes minerais aderidos à superfície de partículas maiores ou partículas de finos aglomeradas (Fig. 4.8 e Fig. 4.9).

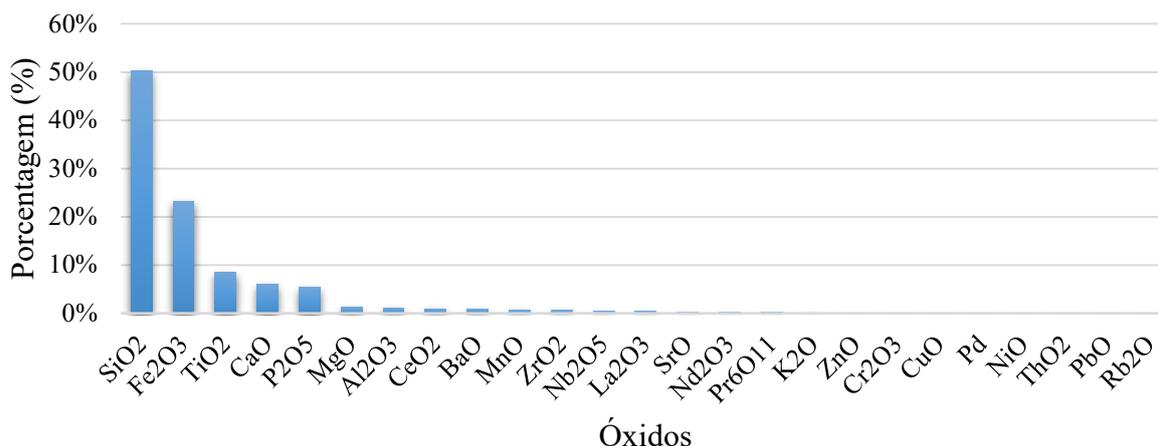


**Figura 4.8 – Seleção dos locais de mapeamento dos elementos químicos do estéril com EDS (imagem aumentada de 300x no MEV).**



**Figura 4.9 – Composição química por EDS obtida no mapeamento da imagem do MEV aumentada 300x para o estéril.**

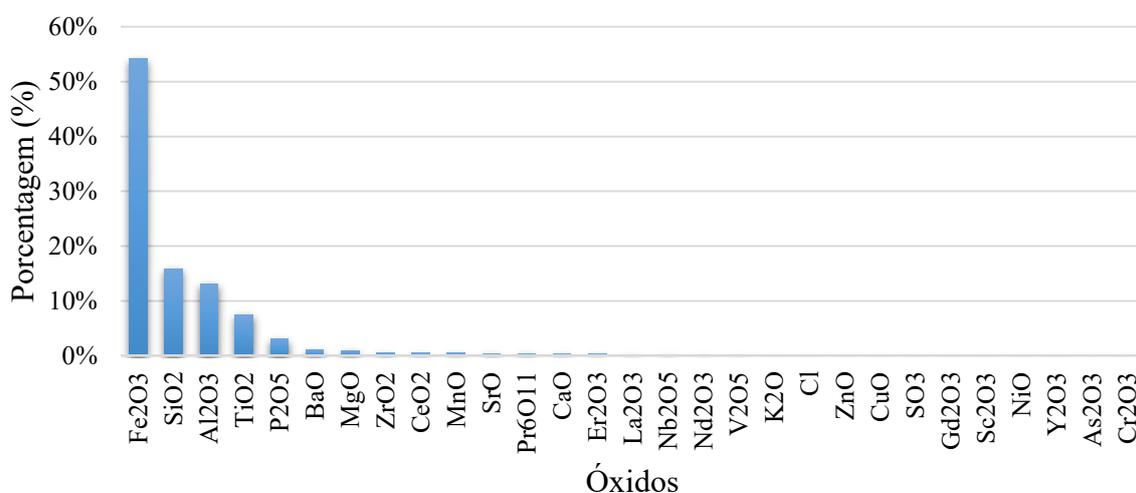
Pela Fluorescência de Raios X (FRX) foi possível determinar os principais óxidos presentes nas amostras de rejeito e estéril (Fig. 4.10). Para as amostras de rejeito os principais óxidos foram  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ , constatando-se a grande quantidade de silicatos e minerais que contém ferro em sua constituição, como por exemplo a magnetita, minério comum como ganga nas principais reservas de fosfato no Brasil e que tende a ser disposto separadamente em forma de pilhas após ser retirado do circuito de beneficiamento nas etapas de separação magnética na planta.



**Figura 4.10 – Resultados das análises FRX nas amostras de rejeito.**

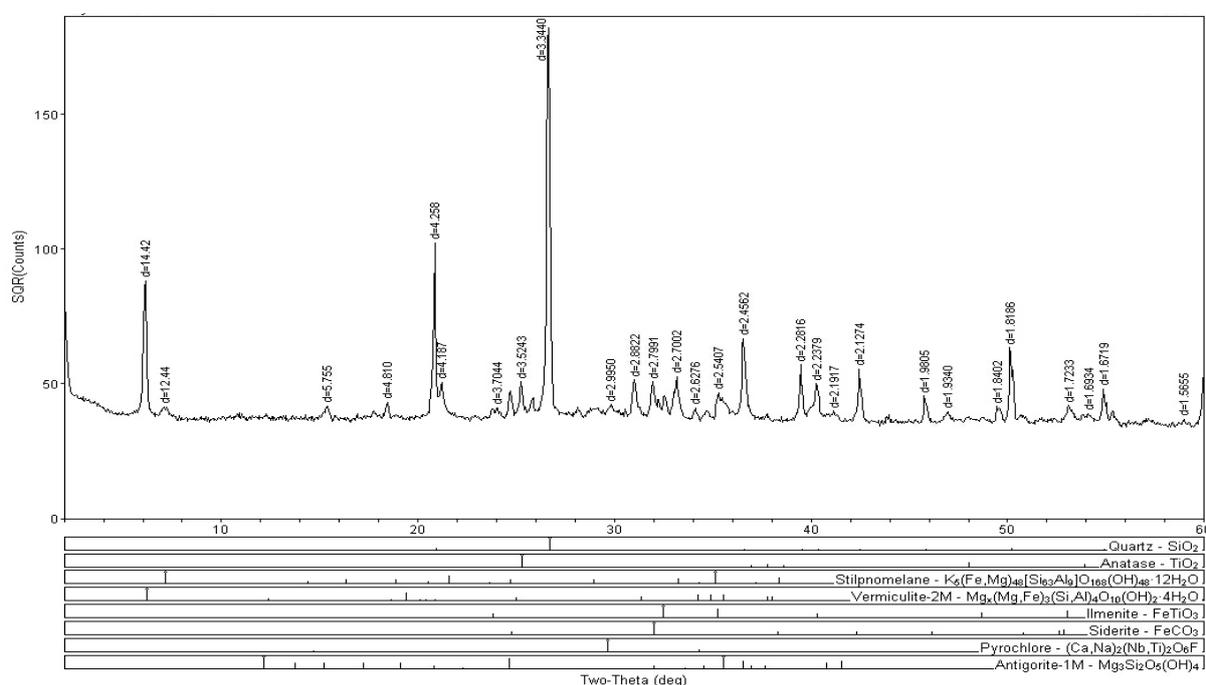
Os principais óxidos presentes nas amostras de estéril (Fig. 4.11) foram Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Neste caso a maior parte dos óxidos são provenientes de minerais que contém ferro em sua constituição, como a magnetita, enquanto que os outros óxidos aparecem em quantidades bem menores, explicando assim a maior massa específica dos estéréis.

Considerando que óxidos como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub> são alguns dos principais constituintes dos filossilicatos, e que a composição química dos principais depósitos brasileiros de fosfato possuem estes minerais, é possível sugerir que os estéréis aqui apresentados possuem em sua constituição minerais do grupo dos filossilicatos, que podem ser: vermiculita, biotita, tetraferrihogopita, flogopita, muscovita, sendo que a vermiculita, biotita e flogopita possuem em sua composição tanto óxidos de ferro e alumínio quanto de magnésio.



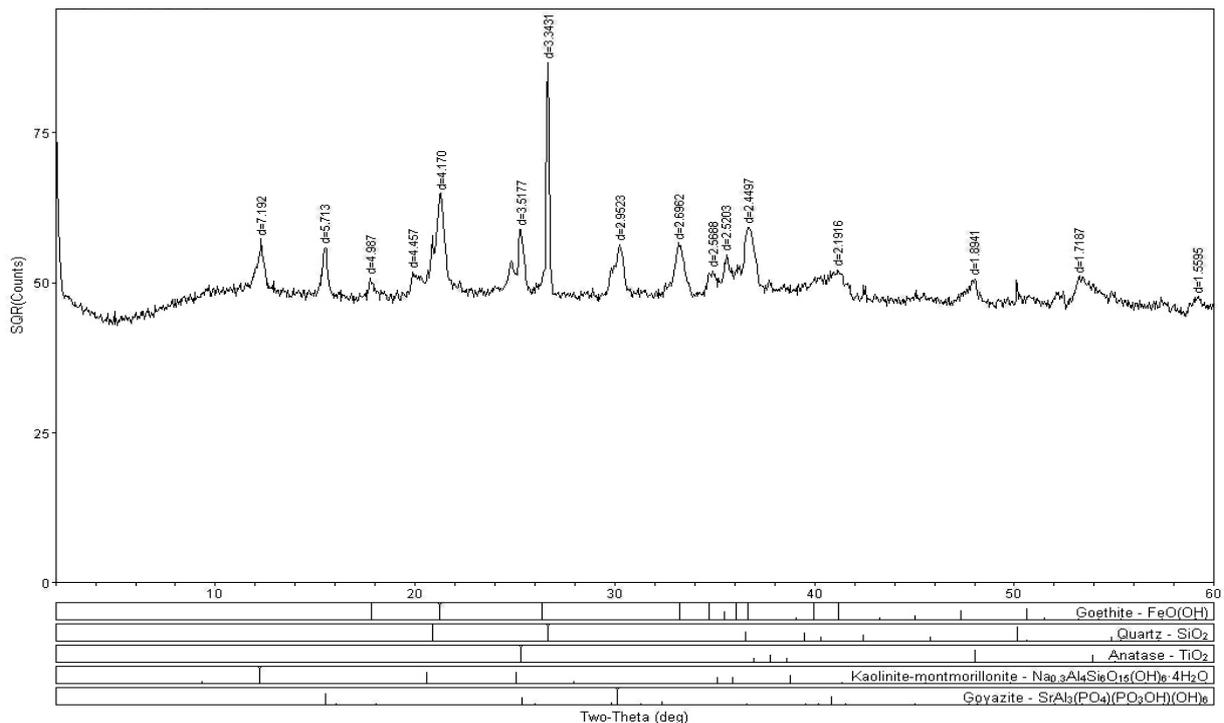
**Figura 4.11 – Resultados das análises FRX nas amostras de estéril.**

De modo a avaliar qualitativamente os minerais constituintes das amostras, foi utilizada a técnica de difratometria de raios-X (DRX). Os difratogramas do rejeito apresentaram os seguintes constituintes minerais: quartzo, anatásio, stilpnomelano, vermiculita, ilmenita, siderita, pirocloro, antigorita (Fig. 4.12). Considerando as análises de fluorescência de raios X e os principais minerais constituintes das jazidas de fosfato, possivelmente o mais adequado seria a identificação de magnetita no lugar de ilmenita e siderita, o que pode ser explicado devida a identificação ser realizada por um software que contém uma extensa base de dados, que tende a identificar minerais com picos próximos e constituição similar.



**Figura 4.12 – Resultados das análises DRX nas amostras de rejeito.**

Os principais constituintes minerais da amostra de estéril foram: quartzo, caulinita, montmorilinita, anatásio, goyazita e goethita (Fig. 4.13). De acordo com as características da jazida, a identificação mais adequada neste caso seria identificação de apatita no lugar de goyazita e magnetita no lugar de goethita.

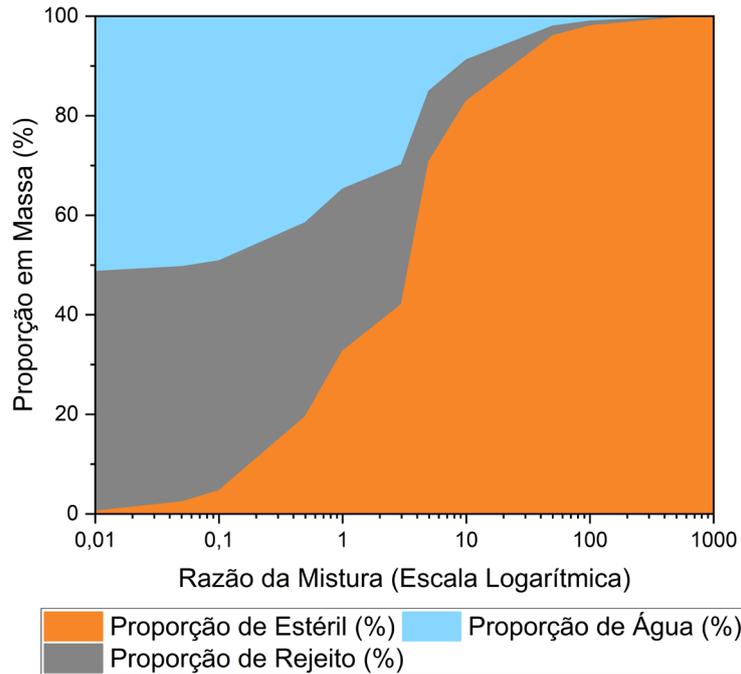


**Figura 4.13 – Resultados das análises DRX nas amostras de estéril.**

De modo geral, provavelmente não foram identificados alguns constituintes minerais que se tem indicação nas outras análises químicas realizadas (EDS e FRX), porém foi possível perceber a presença de argilominerais, principalmente nas amostras de estéreis, os quais tendem a influenciar o comportamento destes materiais e das misturas, tanto nas propriedades mecânicas quanto hidráulicas.

#### 4.1.3. RAZÃO DA MISTURA (REJEITO E ESTÉRIL)

A determinação da Razão de Ótima Mistura ( $R_{ot}$ ) foi conduzida a partir da aplicação das relações de massa e volume, de acordo com a Equação 2.1. A investigação se baseou na teoria do empacotamento e em suposições desse modelo para derivar as proporções de massa em uma faixa de valores de  $R$  para o teor de sólidos inicialmente especificado. Este processo é ilustrado na Figura 4.14, onde a massa total da mistura é considerada como a soma das massas do rejeito ( $M_{rej}$ ), do estéril ( $M_{est}$ ) e da água ( $M_w$ ). Foi considerado um teor de sólidos na polpa de rejeitos de 60%, correspondente ao teor de sólidos quando a polpa é bombeada para a barragem de rejeitos, conforme informado pela empresa. O teor de umidade do estéril foi assumido como sendo de 1%.



**Figura 4.14 – Proporção em massa vs razão da mistura ( $R$ ).**

Pela Figura 4.14 é possível observar a variação nas proporções de massa para diferentes razões da mistura, abrangendo desde uma proporção composta essencialmente de rejeito até uma composta basicamente por estéril, representando os extremos do gráfico. Estas proporções de massa foram subsequentemente convertidas em proporções de volume, conforme ilustrado na Figura 4.15, usando:

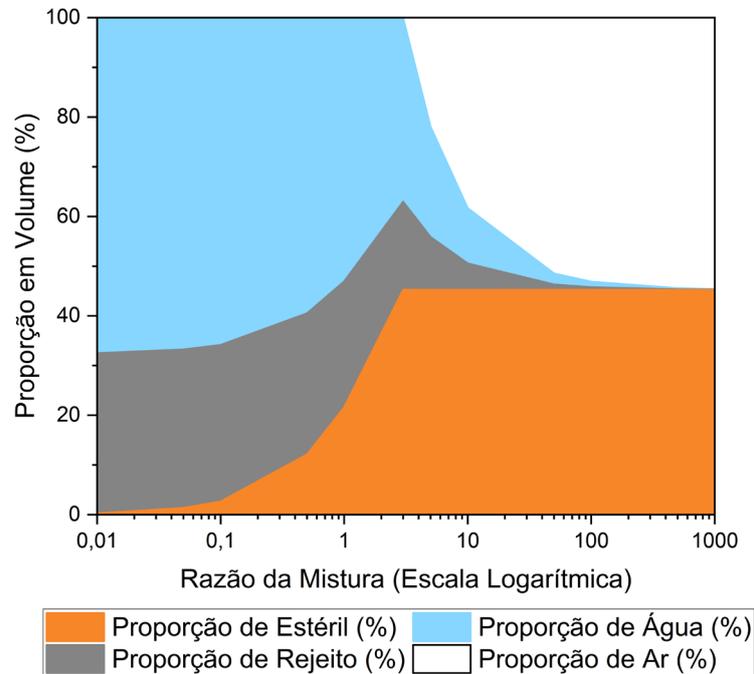
$$\text{massa específica } (\rho) = M/V \quad (4.1)$$

$$\text{volume total } (V) = V_{ar} + V_{rej} + V_{est} + V_w \quad (4.2)$$

Onde  $M$  é a massa da mistura,  $V$  é o volume total da mistura,  $V_{ar}$  é o volume de ar,  $V_{rej}$  é o volume de rejeito,  $V_{est}$  é o volume de estéril e  $V_w$  é o volume de água.

A Figura 4.15 é uma representação bidimensional de um diagrama de fase, o qual demonstra o efeito da razão de mistura com base nas quatro fases presentes na mistura: estéril, rejeito, água e ar. Para construir o gráfico, foi assumido que o volume de vazios do estéril permaneceria inalterado com a adição de rejeitos até o ponto em que o volume da polpa de rejeitos ultrapassasse o volume de vazios no estéril, indicando que os rejeitos preencheram completamente os espaços vazios nos poros do estéril.

Considerou-se inicialmente um volume de vazios de 1,21 ( $e_{max}$ ) para o estéril, enquanto que as massas específicas dos grãos foram de 3,68 g/cm<sup>3</sup> para o estéril, 3,14 g/cm<sup>3</sup> para o rejeito e 1,00 g/cm<sup>3</sup> para água.



**Figura 4.15 – Proporção em volume vs razão da mistura ( $R$ ).**

Observa-se que as misturas com valores de  $R$  maiores que aproximadamente 3:1 ( $R_{ot}$ ) irão conter ar. Isso ocorre porque o volume da polpa de rejeitos é inferior ao volume dos vazios no estéril. Por outro lado, para proporções de mistura inferiores a 3:1, o volume da polpa de rejeitos excede o volume de vazios no estéril.

Wickland *et al.* (2006b) destacam que este diagrama de fases não determina necessariamente o que é fisicamente viável, mas sim oferece uma representação visual de como as diferentes fases podem se acomodar com base em várias razões de mistura. Esta perspectiva é fundamental para compreender as limitações e potenciais de diferentes composições de mistura.

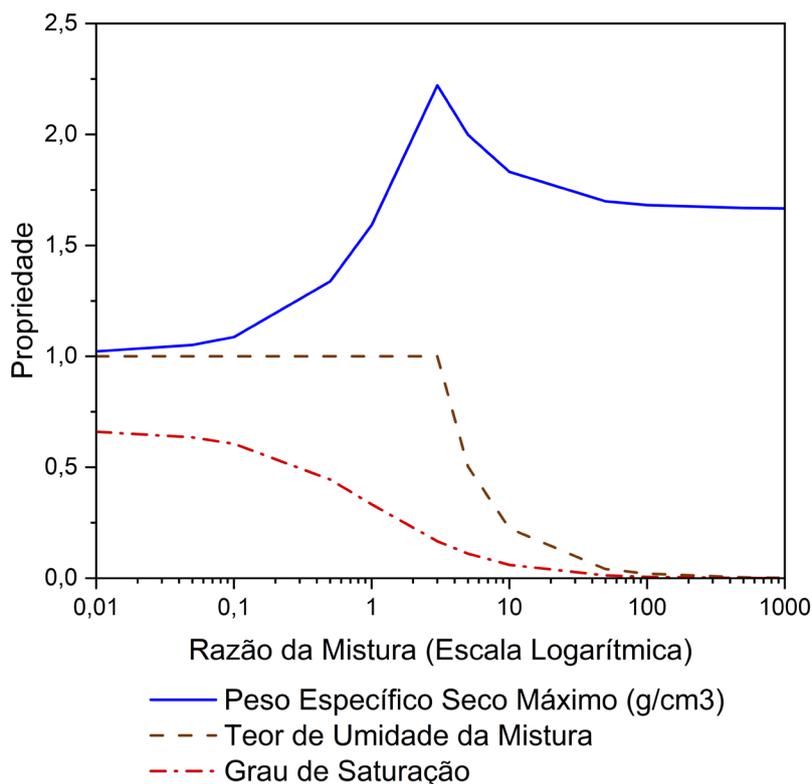
A partir das relações estabelecidas entre a razão da mistura e as proporções em massa e volume, conforme ilustrado nas Figuras 4.14 e 4.15, foi possível derivar diversas propriedades geotécnicas relacionadas à massa específica para as misturas. Estas propriedades incluem o teor de umidade, a massa específica seca e o grau de saturação, os quais foram representados na Figura 4.16. Tal representação foi obtida mediante a aplicação de:

$$\text{Teor de umidade} = 100\% \times M_w / (M_{rej} + M_{est}) \quad (4.3)$$

$$\text{Massa específica seca} = (M_{rej} + M_{est}) / (V_{ar} + V_{rej} + V_{est} + V_w) \quad (4.4)$$

$$\text{Grau de saturação} = 100\% \times V_w / (V_{ar} + V_w) \quad (4.5)$$

Por meio da Figura 4.16 torna-se evidente a presença de um valor máximo para o peso específico seco. Este ponto crítico representa a Razão de Ótima Mistura ( $R_{ot}$ ), na qual o espaço vazio dentro do estéril é completamente preenchido pela polpa de rejeitos. Essa condição é alcançada quando a razão entre estéril e de rejeito é de 3:1.



**Figura 4.16 – Propriedade geotécnica vs razão da mistura ( $R$ ).**

Ao analisar o grau de saturação na Figura 4.16, observa-se que há uma saturação de 100% para proporções de mistura onde o volume de rejeitos excede o volume do espaço vazio do estéril. Em contrapartida, a saturação é inferior a 100% quando o volume de rejeitos é menor que o espaço vazio presente no estéril, caracterizando razões de mistura superiores a 3:1.

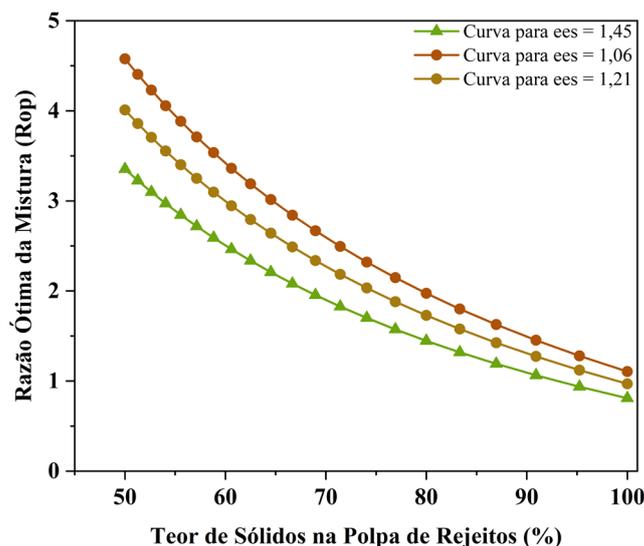
Outro aspecto importante a se notar na Figura 4.16 é a diminuição do teor de umidade para as misturas à medida que a proporção de estéril para rejeitos aumenta. Quanto menor a quantidade de estéril em massa seca, maior é o teor de umidade presente na mistura.

É importante ressaltar que as relações apresentadas nas Figuras 4.14 a 4.16, assim como a razão ótima de mistura ( $R_{ot}$ ) encontrada, são resultado das propriedades específicas para os rejeitos e

estéreis estudados, tais como o índice máximo de vazios do estéril e o teor inicial de umidade da polpa de rejeitos (ou teor de sólidos).

Com base nesse entendimento, foi construído um gráfico que ilustra a variação da razão ótima de mistura para diferentes teores de sólidos na polpa de rejeitos, variando de 50% a 100% (Figura 4.17). Essa análise permite avaliar qual seria a proporção ideal caso fossem adotadas técnicas para aumentar o teor de sólidos da polpa antes da realização da mistura, sendo uma abordagem valiosa para o planejamento e a otimização de processos de disposição.

Devido a variabilidade dos parâmetros geotécnicos dos materiais na mina, bem como a possibilidade de separar granulometricamente o estéril antes de se realizar a mistura, plotou-se também as curvas da razão ótima para diferentes índices de vazios máximo do estéril ( $e_{es} = 1,06$  e  $e_{es} = 1,45$ ).



**Figura 4.17 – Razão da mistura ótima ( $R_{ot}$ ) vs teor de sólidos na polpa de rejeitos.**

Pela Figura 4.17, é possível observar que o  $R_{ot}$  da mistura obtida com estéril com índice de vazios máximo de 1,21 tende a ser igual ou inferior a 4:1. Observa-se também que a sensibilidade do  $R_{ot}$  baseado em  $e_{max}$  tende a diminuir com o aumento do teor de sólidos da polpa.

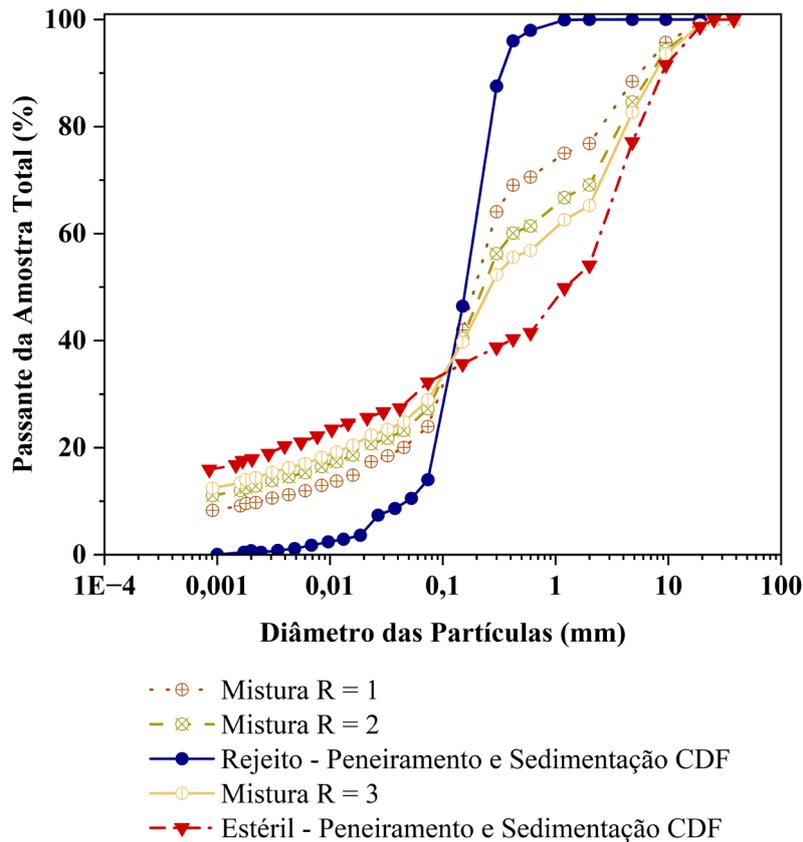
Avaliando a proporção ótima para a polpa de rejeitos com 60% de sólidos, tem-se que:  $R_{ot} = 3,4$  para um  $e_{es} = 1,06$ ;  $R_{ot} = 3,0$  para um  $e_{es} = 1,21$ ;  $R_{ot} = 2,5$  para um  $e_{es} = 1,45$ . Esses resultados indicam a influência significativa do índice de vazios máximo do estéril na determinação da Razão de Ótima Mistura, demonstrando a importância de considerar possíveis

alterações das características geotécnicas específicas dos materiais na medida que se tem o avanço das operações de lavra.

De acordo com profissionais atuantes em uma mineradora de fosfato no Brasil, a razão entre a produção de estéril e rejeito, nesse contexto específico, é de 2,4:1, sendo que esta razão não está definida em massa seca. Essa informação foi obtida por meio de diálogos diretos com especialistas. No âmbito do presente estudo, foram conduzidos ensaios em misturas de estéril e rejeito na razão de 2,5:1 e 3:1, considerando uma razão em massa seca, sendo condizente com a geração de resíduos comumente obtida nas indústrias de mineração em questão.

Foram determinadas curvas de distribuição granulométrica teóricas das misturas considerando as frações granulométricas dos estéreis e rejeitos, levando em conta as condições de agitação mecânica e uso de defloculante. Isso foi feito para obter uma aproximação da curva real das misturas, uma vez que o estéril pode deflocular ou se degradar devido à presença da água de processamento e produtos químicos presentes no rejeito, ou devido aos métodos utilizados para realizar as misturas.

As curvas foram geradas para misturas com  $R=1$ ,  $R=2$  e  $R=3$  (Fig. 4.18). Observa-se que a fração fina das misturas é semelhante à dos estéreis (com tamanho de partícula  $\leq 0,075$  mm), e que as misturas apresentaram uma distribuição granulométrica mais homogênea em comparação com os materiais não misturados.



**Figura 4.18 – Distribuição granulométrica teórica para as misturas de rejeitos e estéril.**

#### 4.1.4. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO – PROCTOR NORMAL

O ensaio Proctor Normal foi realizado segundo estabelecido pela norma ASTM D698-12 (ASTM, 2021b) para o rejeito, estéril e mistura com  $R_{ot} = 3,0$ . Os parâmetros e curvas de compactação dos materiais, determinados pelo ensaio de Proctor Normal, são apresentados na Figura 4.19.

Para o rejeito, foi observada uma umidade ótima de 18% e uma massa específica seca de 1,74 g/cm<sup>3</sup>. No caso do estéril, foi identificada uma umidade ótima de 15% e uma massa específica seca de 2,29 g/cm<sup>3</sup>. Já para a mistura com  $R_{ot} = 3,0$ , a umidade ótima foi de 14,4% e a massa específica seca foi de 2,27 g/cm<sup>3</sup>.

Dessa forma, a partir dos resultados dos ensaios de Proctor Normal nos materiais, constatou-se que a compactação da co-disposição foi influenciada principalmente pelo estéril. Isso é evidenciado pelo fato de que a umidade ótima e a massa específica da co-disposição são praticamente as mesmas do estéril.

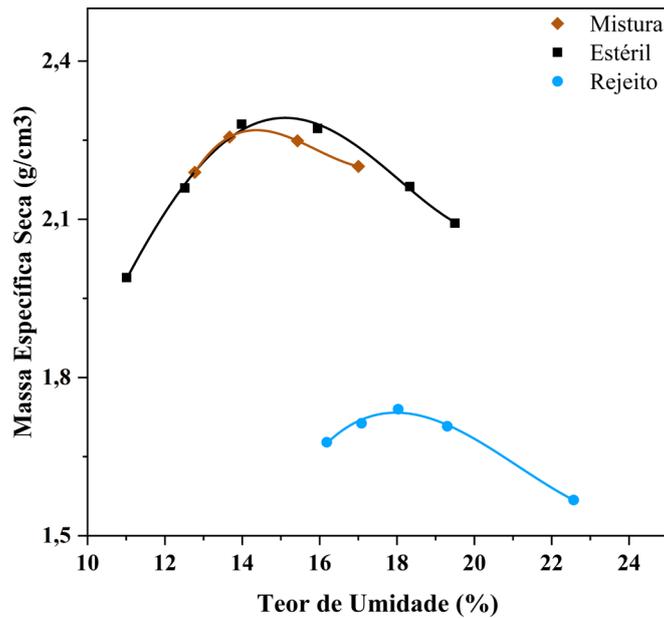


Figura 4.19 – Curva de compactação do rejeito, estéril e mistura com  $R_{ot} = 3,0$ .

É evidente que a curva de compactação do estéril e da mistura são bastante semelhantes, indicando que o estéril exerce um impacto significativo na determinação da umidade ótima e da massa específica seca das misturas. A principal diferença entre estas curvas está no ramo úmido, enquanto o ramo seco permanece comparativamente próximo quando as curvas são comparadas.

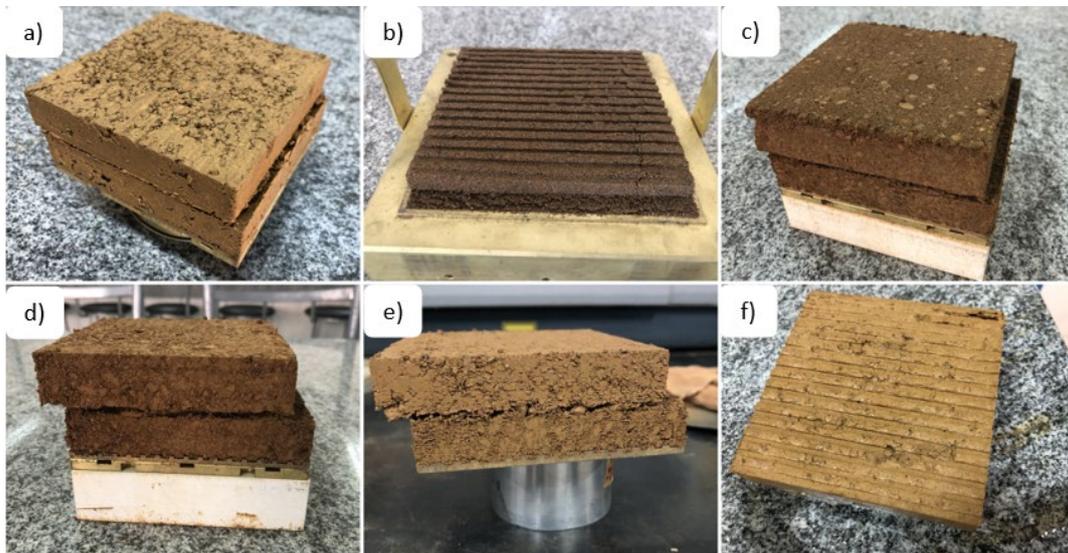
#### 4.1.5. CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto foi conduzido considerando corpos de prova preparados para os materiais não misturados e misturas realizadas com diferentes Razões Ótimas ( $R_{ot}$ ), conforme definido na Figura 4.17, na curva para o estéril com índice de vazios máximo ( $e_{es}$ ) igual a 1,21. As propriedades iniciais dos materiais durante a preparação dos corpos de prova estão apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4– Resumo das propriedades das misturas.

Amostras	$R$	$e_{es}$	Teor de sólidos da polpa de rejeitos (%)	Teor de umidade do corpo de prova - w (%)
Mistura 1 ( $R_{ot}$ )	2,0	1,21	74	11,5
Mistura 2 ( $R_{ot}$ )	2,5		67	14,3
Mistura 3 ( $R_{ot}$ )	3,0		60	16,5
Mistura 4	3,0		63	15,0

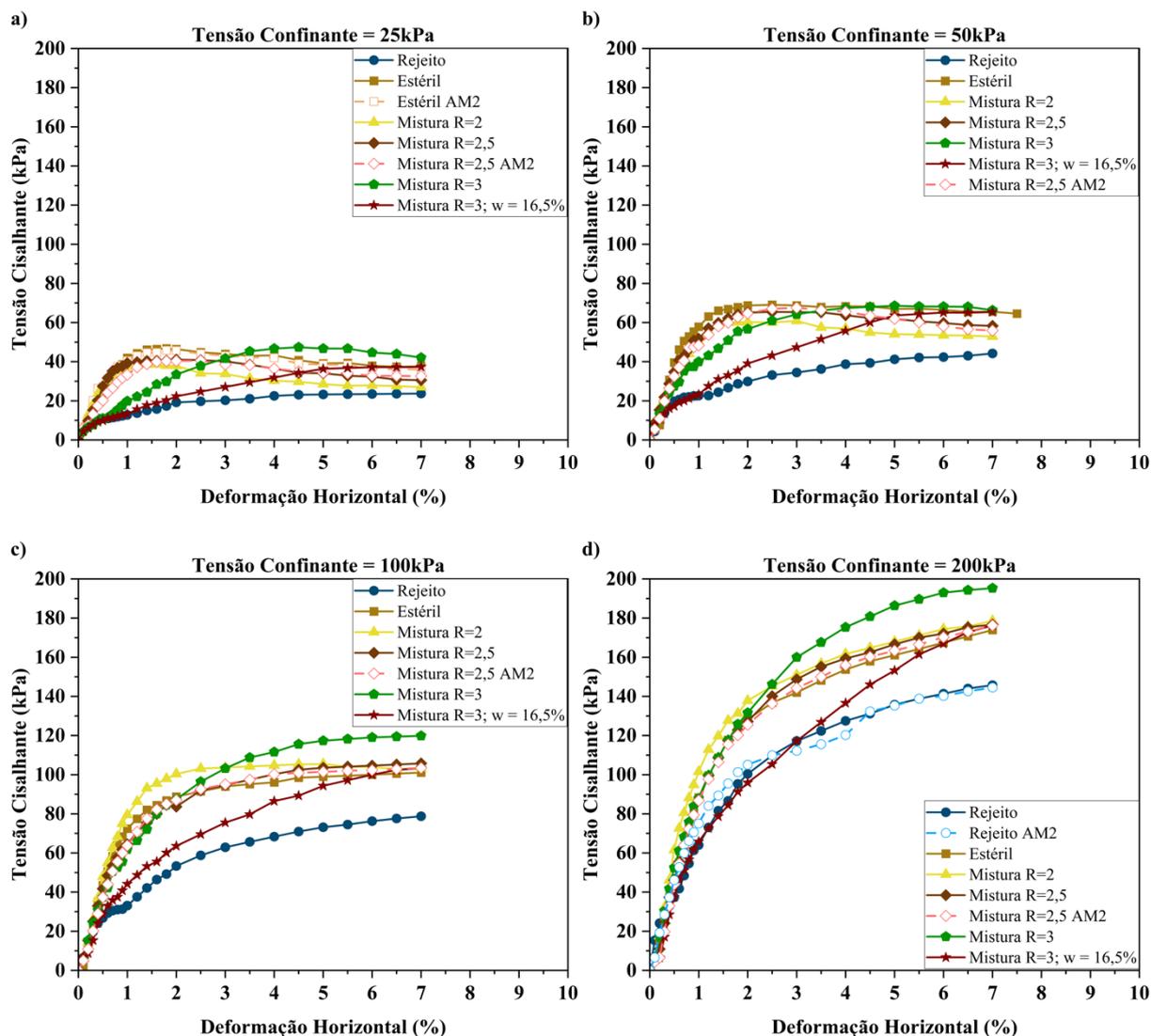
Inicialmente, foi preparada uma mistura com  $R_{ot} \approx 2,0$ . Em seguida, aumentou-se a quantidade de estéril e água para as misturas subsequentes, respeitando as proporções até obter um  $R_{ot} \approx 2,5$  e  $R_{ot} \approx 3,0$ . Finalmente foi possível comparar a mistura na condição ideal ( $R_{ot} \approx 3,0$ ) com misturas realizadas com uma polpa de rejeitos com teores de sólidos diferentes desta condição. Não foi possível realizar misturas com  $R_{ot} > 3,0$  devido ao elevado teor de umidade do corpo de prova. Optou-se também por executar ensaios para a mistura com uma umidade próxima à umidade ótima do estéril e da mistura (15%), ou seja, reduziu-se o teor de umidade na polpa de rejeitos utilizada na mistura. Os corpos de prova cisalhados de todos os materiais podem ser vistos na Figura 4.20.



**Figura 4.20 – Corpos de prova cisalhados: a) Estéril; b) Rejeito; c) Mistura com  $R_{ot} \approx 2,0$ ; d) Mistura com  $R_{ot} \approx 2,5$ ; e) Mistura com  $R_{ot} \approx 3,0$  e umidade de 15%; f) Mistura com  $R \approx 3,0$  e umidade de 16,5%.**

Considerando as curvas de consolidação, determinou-se a taxa de cisalhamento de cada corpo de prova, de acordo com o método de Taylor (Taylor, 1948). Todos os materiais consolidaram quase que instantaneamente após a aplicação das tensões normais, sendo que a aplicação das tensões permaneceu até se observar a estabilização dos deslocamentos verticais. A taxa de cisalhamento média observada para os materiais foi de 3,02 mm/min, sendo que foi utilizada nos ensaios de cisalhamento direto uma taxa de cisalhamento de 0,5 mm/min, menor que a calculada, de modo a padronizar os ensaios e garantir a drenagem dos corpos de prova.

Na Figura 4.21, são exibidos os resultados dos ensaios de cisalhamento direto conduzidos em corpos de prova compostos por estéril, rejeito e misturas, considerando uma variedade de valores para a razão de mistura ( $R$ ). Os gráficos representam as relações entre a deformação horizontal e as tensões cisalhantes aplicadas durante os ensaios.



**Figura 4.21 – Relações entre deformação horizontal e tensões cisalhantes no cisalhamento direto dos materiais isolados e misturas ( $R_{ot} \approx 2,0$ ,  $R_{ot} \approx 2,5$ ,  $R_{ot} \approx 3,0$  com  $w=16,5\%$ ,  $R \approx 3,0$  com  $w=15\%$ ).**

Devido às restrições da máquina de ensaio utilizada, o deslocamento horizontal foi limitado ao valor de 7 mm, portanto, houve uma aproximação dos valores das tensões cisalhantes máximas para tensões normais iguais e superiores a 100 kPa. Subsequentemente, os ensaios foram realizados em outro equipamento, o qual permitiu a aplicação de deslocamentos horizontais maiores, proporcionando uma análise mais refinada dos resultados para a definição da envoltória de resistência e compreensão do comportamento mecânico dos materiais.

Apesar das limitações da primeira campanha de ensaios, os resultados proporcionaram condições para compreender preliminarmente o comportamento mecânico dos estéreis, rejeitos e misturas. Esses resultados permitiram a identificação das razões de mistura mais vantajosas para serem exploradas nos ensaios subsequentes.

Observa-se que os estéreis e misturas possuem uma tensão máxima maior que os rejeitos. Embora a resistência de pico não seja tão claramente definida nos resultados obtidos sob tensões normais de 100 e 200 kPa, é perceptível que o comportamento de resistência ao cisalhamento das misturas tende a convergir para o comportamento observado nos estéreis para tensões normais mais elevadas. A única exceção é a mistura com  $R_{ot} \approx 3,0$  e teor de umidade de 16,5%. Para baixas tensões normais, nota-se que quanto menor for a proporção de estéril na mistura, menor será a resistência pós-pico da mistura, tendendo a se aproximar da resistência máxima dos rejeitos para tensões normais de 25 kPa. No entanto, pode-se observar que a resistência máxima, mesmo para misturas com  $R_{ot} \approx 2,0$  e  $2,5$ , é inferior à do estéril e superior à tensão cisalhante máxima do rejeito.

Conforme observado nas curvas de compactação, o teor de umidade pode exercer uma certa influência sobre o comportamento dos materiais de co-disposição em comparação com o estéril, especialmente no ramo úmido das curvas.

A partir das análises realizadas, nota-se que as misturas com teor de umidade abaixo ou igual do ótimo tendem a exibir um comportamento mecânico semelhante ao do estéril. No entanto, quando consideramos misturas com teor de umidade acima do ótimo, como a amostra com  $R_{ot} \approx 3,0$  e umidade de 16,5%, ocorre uma alteração no comportamento desse material. Nesse contexto, a mistura com um teor de umidade mais elevado, posicionando-a no ramo úmido da curva de compactação, apresenta um comportamento mais plástico. Assim, a tensão cisalhante máxima tende a aumentar de forma menos acentuada com o aumento da deformação horizontal. Por outro lado, o estéril e as diferentes misturas ( $R_{ot} \approx 2,0$ ,  $R_{ot} \approx 2,5$  e  $R \approx 3,0$  com teor de umidade de 15% apresentaram um comportamento mais dúctil, com resistência máxima em baixas tensões normais e pequenas deformações horizontais.

É possível notar que, em um teor de umidade próximo ao teor de umidade ótimo do estéril e das misturas, a mistura com  $R \approx 3,0$  apresentou tensões de cisalhamento ligeiramente maiores do que todas as outras amostras, mostrando que uma mistura com esse teor de umidade pode ter um desempenho um pouco melhor do que materiais não misturados.

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto com deslocamentos horizontais maiores, incluindo ensaios com tensões normais superiores a 200 kPa. Na preparação do corpo de prova foi utilizada uma amostra diferente de estéril, com  $e_{es} = 1,45$ . Pela Equação 2.1 foi determinado um  $R_{ot} \approx 2,5$  para as misturas. No processo de preparação dos corpos de prova, adotou-se um teor de umidade de 15%, pois observou-se que os resultados obtidos para esta condição foram

ligeiramente superiores aos da condição de umidade ideal para a mistura no  $R_{ot}$ . Para fins comparativos, também foram realizadas misturas com  $R \approx 3,0$ .

As propriedades iniciais dos materiais na preparação dos corpos de prova são detalhadas na Tabela 4.5, considerando nas misturas a utilização de material estéril com índice de vazios de 1,45.

**Tabela 4.5 - Resumo das condições iniciais dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto.**

Material	Ensaio	$\sigma_{normal}$ (kPa)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{inicial}$	w (%)
Rejeito	natural	50	1,49	1,11	17,96
		100	1,49	1,11	17,20
		200	1,49	1,10	17,73
		400	1,50	1,09	17,45
	inundado	50	1,49	1,10	17,30
		100	1,50	1,09	17,28
		200	1,50	1,08	17,40
Estéril	natural	50	2,00	0,84	14,80
		100	2,00	0,84	15,05
		200	2,00	0,84	15,53
		400	2,00	0,84	14,30
	inundado	50	2,00	0,84	14,93
		100	2,01	0,83	15,90
		200	2,01	0,83	15,60
Mistura	R = 2,5	50	2,04	0,81	14,41
		100	2,04	0,81	14,36
		200	2,04	0,80	14,87
		400	2,04	0,81	14,91
	R = 3,0	50	2,04	0,80	14,35
		100	2,05	0,79	14,89
		200	2,04	0,80	14,54
		400	2,05	0,80	14,70

Na Figura 4.22 tem-se as relações entre a deformação horizontal e a deformação vertical e entre a tensão de cisalhamento e a deformação horizontal.

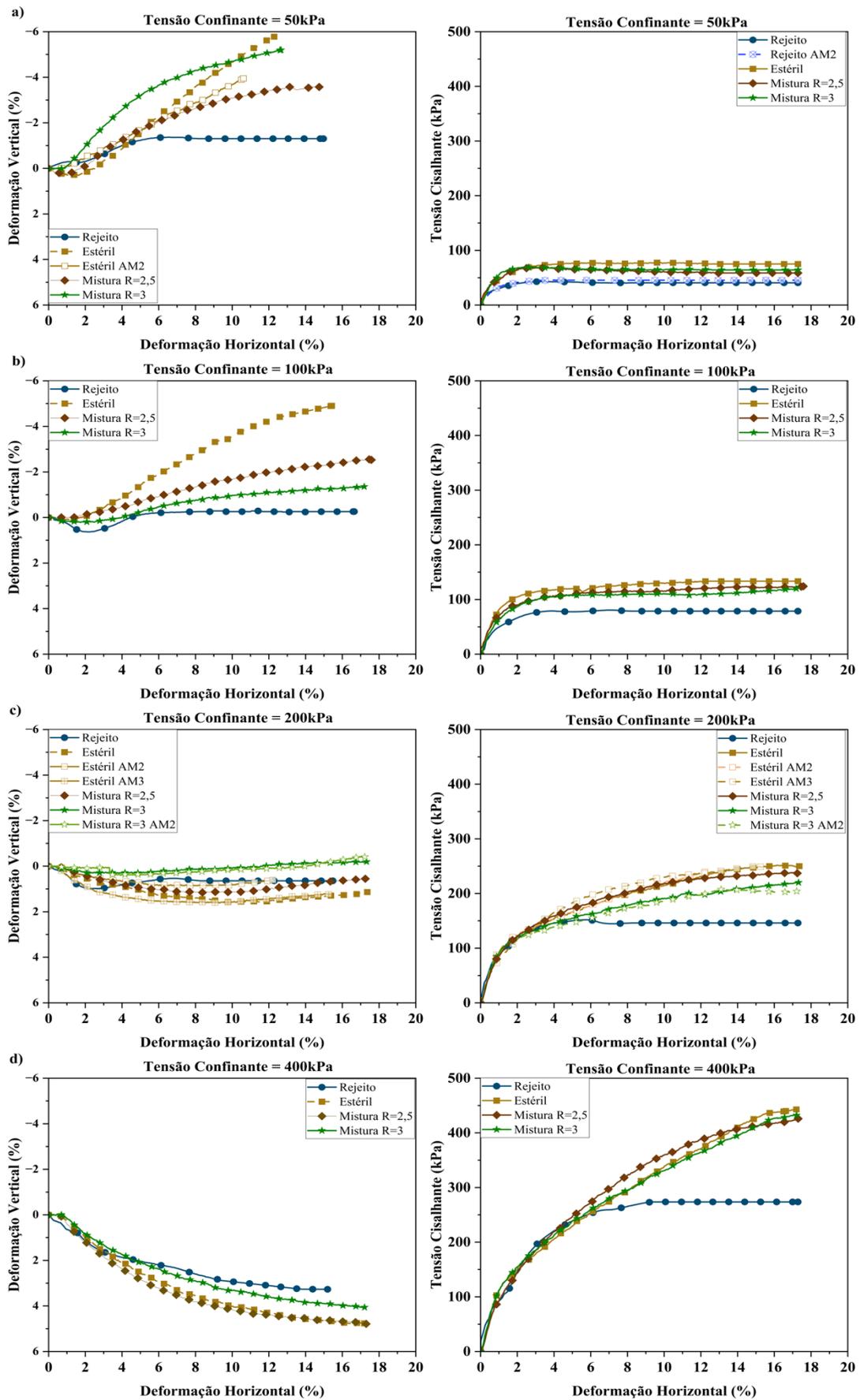


Figura 4.22 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto dos materiais não misturados e das misturas realizadas com estéril com  $e_{max} = 1,45$  ( $R \approx 2,5$ ,  $R \approx 3,0$  com com  $w = 15\%$ ).

Nos gráficos de deformação vertical *versus* deformação horizontal, é possível observar que os materiais exibem um comportamento dilatativo sob baixas tensões e compressivo quando sujeitos a tensões próximas a 200 kPa. Percebe-se que o estéril e as misturas possuem uma variação na deformação vertical superior ao rejeito, indicando que estes materiais quando submetidos a esforços cisalhantes tendem a deformar e sofrer uma alteração volumétrica maior antes da ruptura. Este comportamento se deve principalmente a plasticidade observada no estéril, que tende a aumentar a coesão deste material e das misturas.

Ao analisar a relação entre a tensão de cisalhamento e a deformação horizontal, observa-se um padrão semelhante ao dos ensaios anteriores (Fig. 4.21). É evidente que o estéril exibe uma tensão máxima ligeiramente superior à de todos os outros materiais para tensões normais inferiores a 100 kPa. Conforme as tensões normais aumentam, é notável que o comportamento de resistência ao cisalhamento das misturas também tende a se assemelhar ao do estéril. Além disso, à medida que a tensão normal aumenta, são necessárias maiores deformações horizontais para alcançar o máximo esforço de cisalhamento, sendo este menos evidente para o estéril e as misturas.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados no rejeito na condição inundada são apresentados na Figura 4.23a, enquanto que os resultados para o estéril são mostrados na Figura 4.23b. Observa-se que as tendências de comportamento são mantidas e a resistência ao cisalhamento, conforme esperado, é reduzida. No entanto, é observada uma diferença no comportamento entre as condições dos corpos de prova. Sob condição saturada, há uma tendência para um comportamento compressivo. Por outro lado, na condição não saturada, há uma tendência de comportamento dilatante.

A obtenção dos parâmetros de resistência se deu pela construção da envoltória de Mohr-Coulomb, considerando como a tensão de ruptura aquela correspondente a 10% da deformação horizontal nas curvas de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal (Fig. 4.24), considerou-se também a correção de área para a tensão normal e cisalhante. Os resultados de interceptos coesivos e ângulos de atrito interno para os materiais podem ser observados na Tabela 4.6.

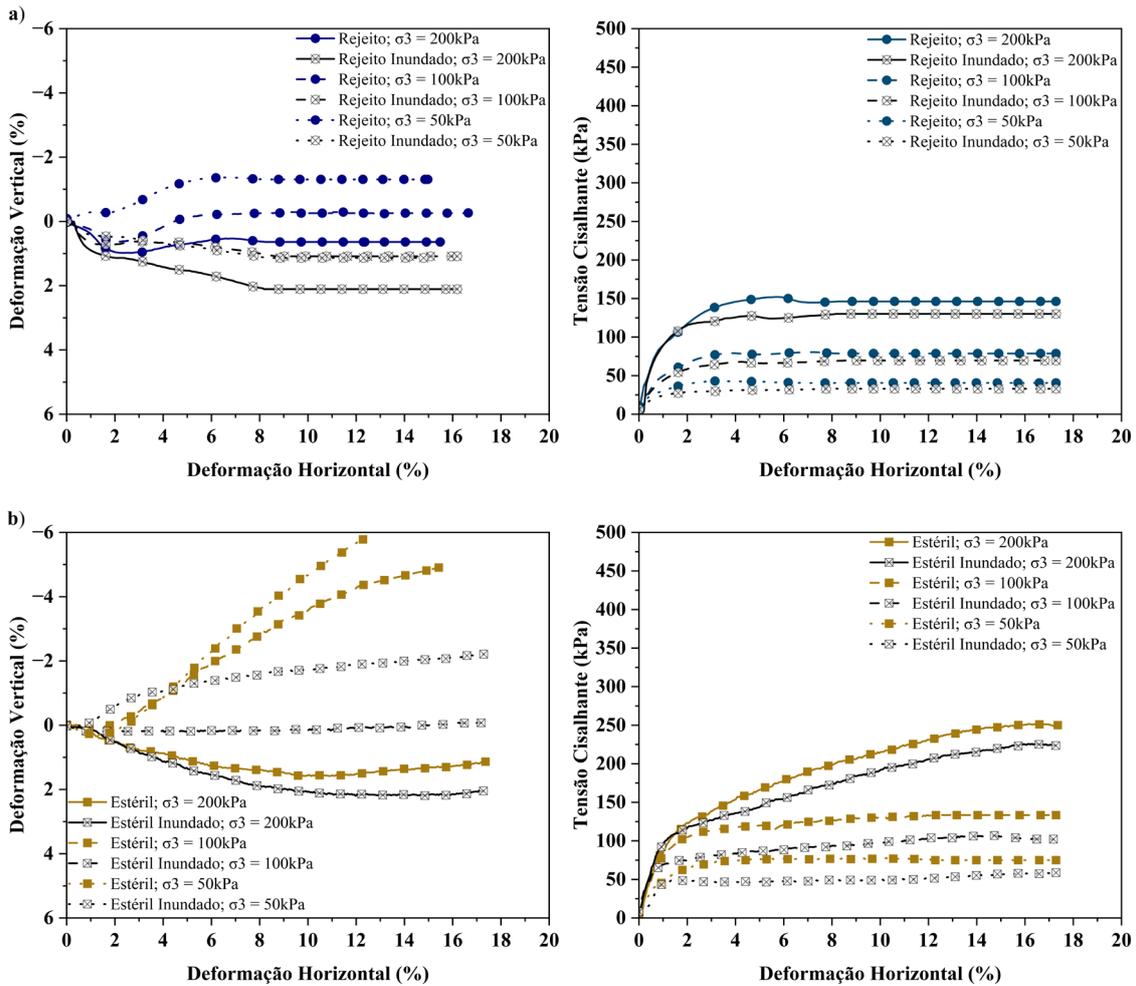


Figura 4.23 – Ensaio de cisalhamento direto na condição inundada (50, 100 e 200 kPa) para: a) os rejeitos; b) os estéreis.

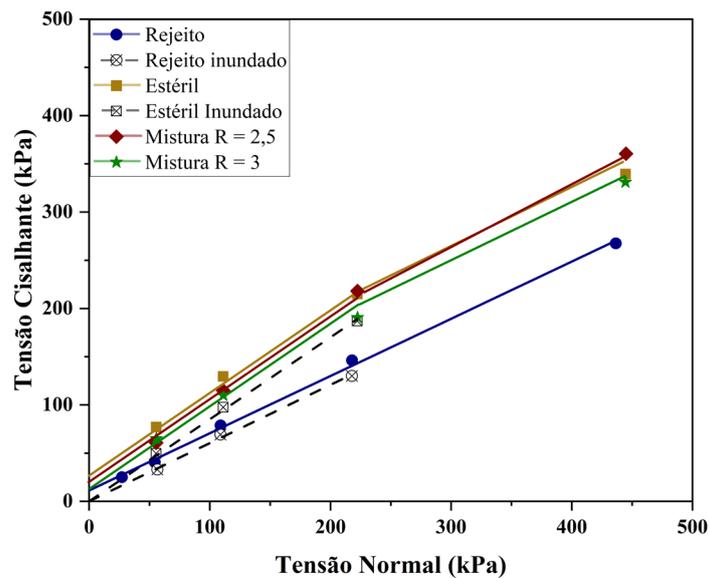


Figura 4.24 – Envolvórias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para os materiais não misturados e misturas ( $R \approx 2,5$ ,  $R \approx 3,0$  com  $w=15\%$ ).

**Tabela 4.6 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para os materiais não misturados e misturas ( $R \approx 2,5$ ,  $R \approx 3,0$  com  $w=15\%$ ),..**

<b>Material</b>	<b>Ângulo de Atrito (°)</b>	<b>Intercepto Coesivo (kPa)</b>
<b>Estéril</b>	40	28
<b>Estéril - Ensaio Inundado</b>	40	0
<b>Rejeito</b>	31	11
<b>Rejeito - Ensaio Inundado</b>	31	0
<b>Mistura <math>R=2,5</math></b>	40	13
<b>Mistura <math>R=3,0</math> e <math>w=15\%</math></b>	40	19

Observa-se que as misturas apresentam melhoria da resistência ao cisalhamento quando comparadas com o rejeito, porém esse ganho se deve principalmente ao ângulo de atrito. A resistência ao cisalhamento do estéril é a mesma das misturas, assim, o benefício das misturas é sobre o rejeito, no particular ao ângulo de atrito. Observando o intercepto coesivo, a mistura com  $R \approx 2,5$  possui um valor próximo ao obtido no rejeito, sendo que este parâmetro pode ser resultante exclusivamente da sucção, tendo em vista que a coesão verdadeira do rejeito e estéril é nula, assim como pode ser visto nos ensaios inundados. Devido ao surgimento desta coesão aparente nos materiais, elevando os valores do intercepto coesivo, a resistência ao cisalhamento dos mesmos pode ser avaliada com menor viés por meio do ângulo de atrito, o qual não se altera quando considerados os ensaios naturais e inundados para os materiais, ou ainda, quando se tem diferentes razões da mistura.

Ao se extrapolar os resultados com vistas as implicações práticas da disposição de misturas em pilhas de co-disposição, observa-se que as misturas apresentam uma resistência ao cisalhamento superior em comparação com os rejeitos não misturados, com um destaque especial para o ângulo de atrito interno. Essa melhoria significativa na resistência ao cisalhamento, quando comparada aos rejeitos, ressalta o potencial benéfico da prática de co-disposição na estabilidade de pilhas de disposição. Além disso, nota-se que na mistura o controle tecnológico pode ser mais flexível, devido à pequena variação dos parâmetros de resistência para diferentes razões da mistura. Isso implica que, mesmo com variações nas condições de mistura ou em diferentes proporções de rejeitos e água, as características de resistência permanecem relativamente estáveis, porém devem ser realizados ensaios de compactação adicionais de modo a garantir que essa flexibilidade também se dê quanto ao

controle da compactação, visto que diferentes teores de umidade geram diferentes condições de compactação, alterando o peso específico final obtido.

Adicionalmente, os valores de coesão dependem da condição não saturada, o que não pode ser garantido na pilha de co-disposição, que estará sujeita a eventos chuvosos. Dessa forma, em condições críticas, o ângulo de atrito tende a ser semelhante ao do estéril, com intercepto coesivo nulo. Devido ao nível de tensão, porções do maciço próximo à face dos taludes poderiam ser críticas, principalmente pela ocorrência de frente de saturação durante períodos chuvosos.

Outro ponto a ser observado seria uma tendência de envoltória de resistência ao cisalhamento bilinear do estéril, cuja tensão normal próxima de 200 kPa é um valor de referência da mudança de comportamento (Tabela 4.7). Devido à predominância do estéril nas misturas, verificou-se a mesma mudança de resistência após valores de tensão superiores à ordem de 200 kPa. Logo, para o estéril, o ângulo de atrito passa a ser 31° e o intercepto coesivo 82 kPa. Em contraste, para as misturas com  $R \approx 2,5$ , o ângulo de atrito torna-se 31° e o intercepto coesivo 68 kPa. Para as misturas com  $R \approx 3,0$ , o ângulo de atrito torna-se 33° e o intercepto coesivo 68 kPa. Para validar esse comportamento seria necessário a realização de ensaios sob maior tensão normal, além da avaliação de outros modelos de comportamento de material, como modelos de envoltórias curvas.

**Tabela 4.7 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para bilinearidade**

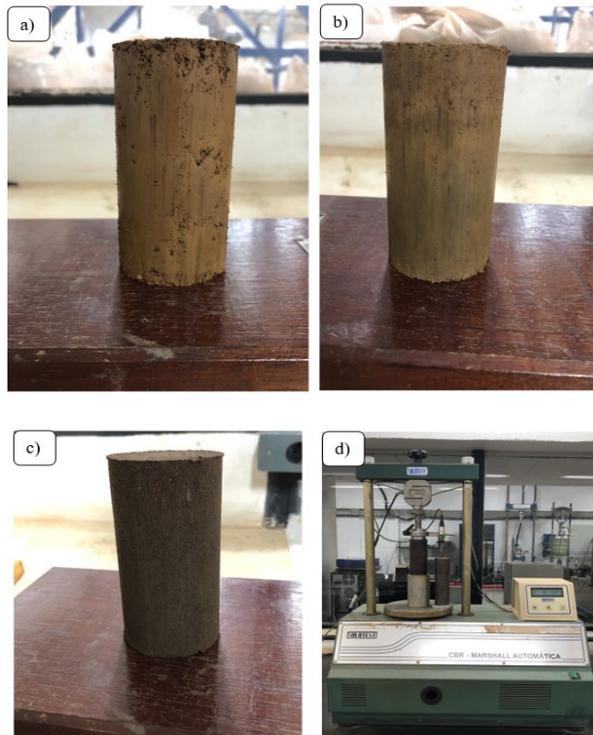
<b>Material</b>	<b>Ângulo de Atrito (°)</b>	<b>Intercepto Coesivo (kPa)</b>
Estéril	31	82
Mistura $R=2,5$	31	68
Mistura $R=3.0$	33	68

#### **4.1.6. ENSAIOS TRIAXIAIS**

A resistência ao cisalhamento também foi avaliada por meio de ensaios triaxiais convencionais, abrangendo condições drenadas e não drenadas. Na Figura 4.25 tem-se a representação da moldagem dos corpos de prova das amostras de rejeito, estéril e mistura.

Devido ao rejeito ser um material não coesivo e de moldagem complexa para ensaios triaxiais, optou-se pela compactação estática utilizando a prensa CBR. Essa abordagem permitiu a obtenção de corpos de prova considerando as condições ótimas de massa específica seca e

umidade, garantindo que os corpos de prova apresentassem resistência suficiente para serem transportados e manuseados durante a preparação dos ensaios.



**Figura 4.25 - Corpos de prova e moldagem para ensaios triaxiais: a) Estéril; b) Mistura com  $R \approx 2,5$ ; c) Rejeito; d) Moldagem por compactação estática usando Prensa CBR/Marshall.**

As relações entre a tensão desviatória ( $\Delta\sigma$  ou  $\sigma_d$ ) e o excesso de poropressão ( $u_e$ ) em relação à deformação axial ( $\varepsilon_a$ ) para o rejeito, estéril e misturas são apresentadas na Figura 4.26, considerando os ensaios consolidados e não drenados (CU).

Ao analisar a relação entre a tensão desviatória ( $\Delta\sigma$ ) e a deformação axial ( $\varepsilon_a$ ) nos ensaios do tipo CU, é possível observar que o rejeito apresentou uma tensão máxima superior em comparação aos demais materiais em todas as tensões confinantes avaliadas. As misturas apresentaram valores ligeiramente mais altos de tensão máxima em relação ao estéril.

Os materiais analisados mostraram uma tendência de ruptura dúctil para o ensaio triaxial não drenado e frágil para o drenado. De maneira geral, observa-se uma estabilização das resistências máximas em quase todos os ensaios. Além disso, nota-se um aumento consistente da rigidez com o aumento da tensão de confinamento para todos os materiais ensaiados.

Devido à compactação dos corpos de prova, todos os materiais apresentaram uma tendência inicial de contração durante o carregamento, com um excesso de poropressão positivo ( $+u_e$ ), seguido por uma tendência de expansão com a deformação axial contínua, com excesso de poropressão negativo ( $-u_e$ ). O rejeito apresentou as maiores variações de excesso de

poropressão, dilatando-se visivelmente mais do que os outros materiais. Nenhum corpo de prova rompeu nesse tipo de ensaio (CU), apenas ocorreu um aumento diametral conforme a deformação axial aumentava.

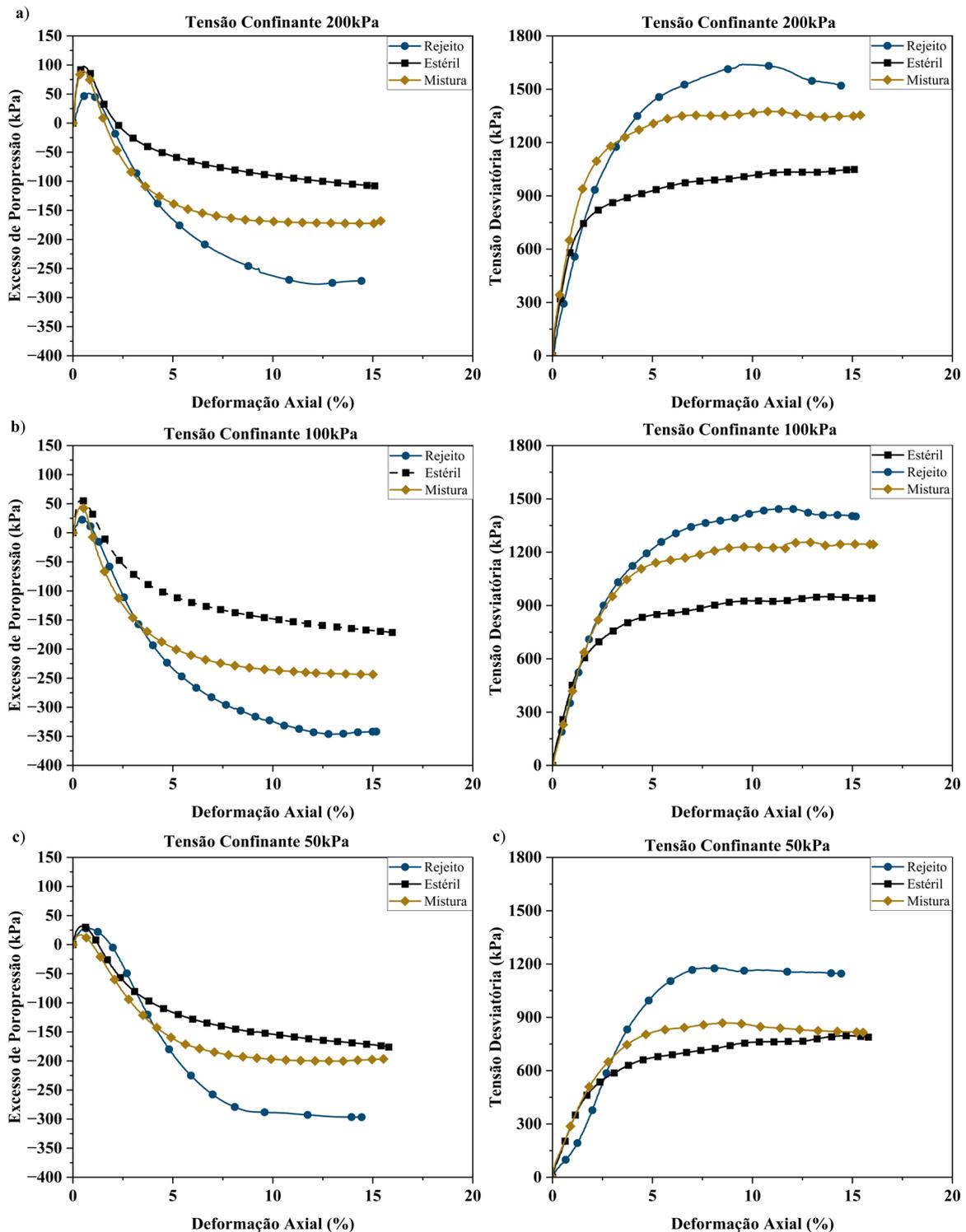


Figura 4.26 – Relações de tensão desviatória e o excesso de poropressão em relação à deformação axial dos materiais isolados e misturas para ensaio CU ( $R \approx 2,5$  com  $w=15\%$ ).

Os resultados dos ensaios triaxiais consolidados e drenados (CD) podem ser visualizados na Figura 4.27, onde são apresentadas as relações entre a tensão desviatória ( $\Delta\sigma$ ) e variações volumétricas em relação à deformação axial ( $\epsilon_a$ ).

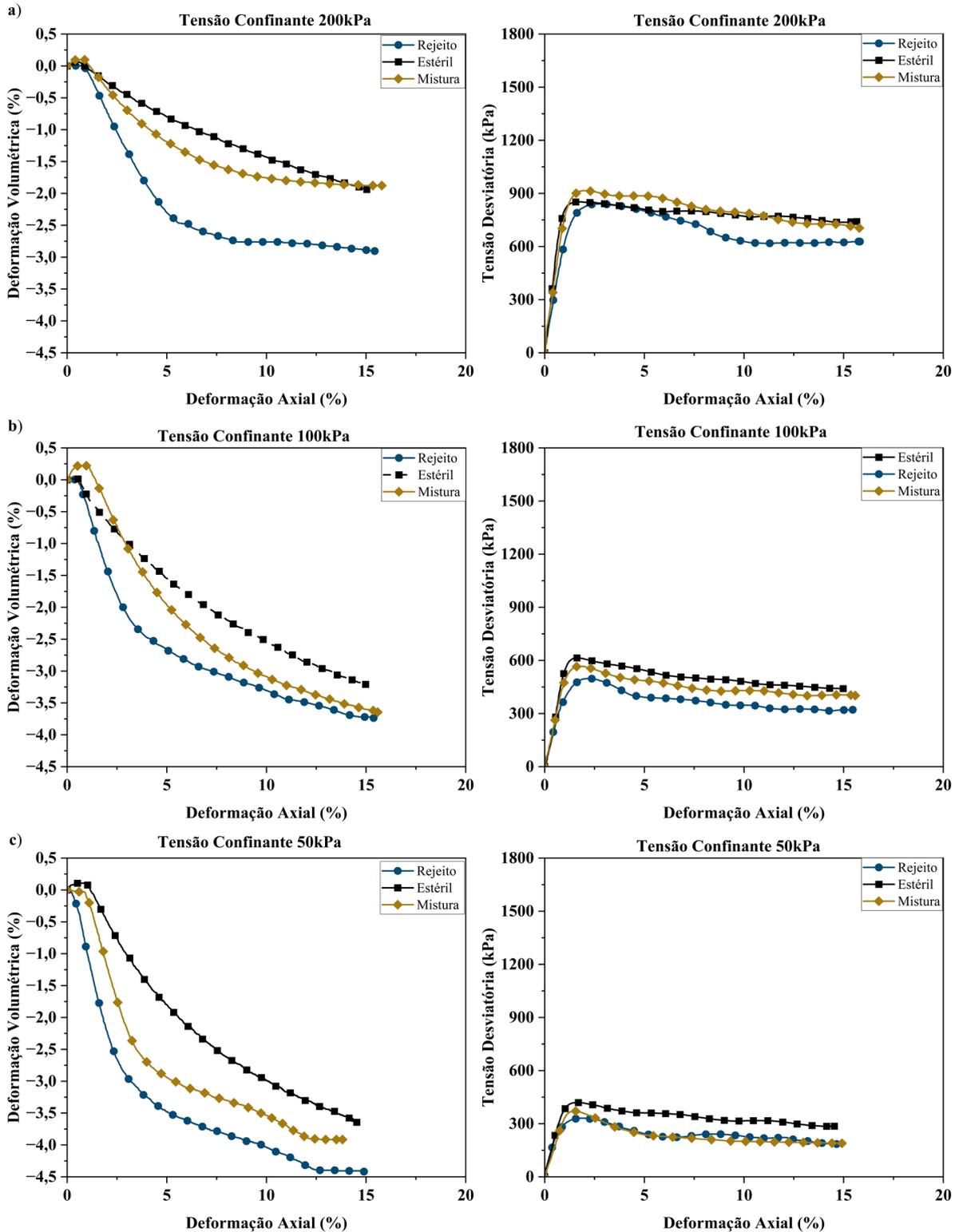


Figura 4.27 - Relações de tensão desviatória e variação volumétrica em relação à deformação axial dos materiais isolados e misturas para ensaio CD ( $R \approx 2,5$  com  $w=15\%$ ).

As curvas de tensão desviatória *versus* deformação axial para o estéril e para as misturas apresentaram tendências de comportamento semelhantes, exceto para a mistura ensaiada sob uma tensão confinante de 50 kPa, que exibiu um máximo de resistência ligeiramente inferior ao do estéril.

Nos ensaios drenados, é possível notar que o rejeito apresentou tensões de cisalhamento inferiores ao estéril e às misturas, o que é diferente do observado nos ensaios não drenados.

Quanto as deformações volumétricas, pode-se considerar que todos os materiais apresentaram a mesma tendência, dilatando-se com relação ao cisalhamento do corpo de prova. As deformações volumétricas apresentaram valores próximos, com uma variação máxima de aproximadamente 1% ao final do ensaio no caso dos rejeitos.

Na Figura 4.28 tem-se a representação dos corpos de prova ao final dos ensaios CU e CD. Observa-se que os corpos de prova nos ensaios não drenados não apresentaram um plano de cisalhamento bem definido, havendo aumento do diâmetro com a deformação axial. Já nos ensaios drenados, é possível observar um plano de cisalhamento em todos os corpos de prova. Comparativamente com o estéril e misturas, verifica-se uma maior variação volumétrica do rejeito.



**Figura 4.28 – Corpos de prova cisalhados: a) estéril CD; b) rejeito CD; c) estéril CU; d) rejeito CU.**

Os resultados dos ensaios triaxiais estão resumidos na Tabela 4.8, incluindo dados como o tipo de ensaio realizado, as condições iniciais de massa específica seca e umidade dos corpos de prova, os índices de vazios, tensões efetivas aplicadas e as deformações axiais na ruptura.

**Tabela 4.8 - Resumo dos resultados dos ensaios triaxiais para os materiais isolados e mistura ( $R_{ot} \approx 2,5$  com  $w=15\%$ ).**

Material	Ensaio	Dados iniciais do CP		Dados na etapa de cisalhamento				
		$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w_{inicial}$ (%)	$e_0$	$\sigma_3$ (kPa)	$p'$ (kPa)	$q$ (kPa)	$\epsilon_a$ (%)
Rejeito	CD	1,73	17,76	0,816	50	160,47	331,41	1,90
		1,76	17,82	0,788	100	264,94	497,81	1,86
		1,76	17,08	0,780	200	481,61	840,96	2,74
	CU	1,74	18,09	0,807	50	737,06	1146,18	10,00
		1,74	17,69	0,804	100	907,11	1401,04	10,00
		1,75	18,16	0,791	200	985,70	1520,07	10,00
	CD	1,49	17,79	1,122	50	95,04	135,12	7,68
		1,51	17,82	1,080	100	193,35	280,04	14,70
	Estéril	CD	2,28	15,75	0,616	50	191,85	419,55
2,28			15,60	0,611	100	304,92	614,76	1,59
2,29			15,38	0,607	200	492,54	877,63	2,78
CU		2,27	14,99	0,624	50	490,26	788,82	10,00
		2,28	15,31	0,611	100	585,41	941,35	10,00
		2,31	15,09	0,594	200	657,44	1048,64	10,00
Mistura	CD	2,26	15,09	0,627	50	174,27	372,81	1,49
		2,26	15,30	0,625	100	288,02	567,06	1,88
		2,28	15,40	0,617	200	505,36	916,09	2,00
	CU	2,24	15,70	0,641	50	518,32	815,02	10,00
		2,26	15,15	0,625	100	726,02	1147,05	10,00
		2,27	14,60	0,619	200	819,64	1354,45	10,00

#### 4.1.7. ENVOLTÓRIAS E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, foram conduzidas análises das trajetórias de tensões e envoltórias em termos de  $q$  vs  $p'$ . Na Figura 4.29, as trajetórias de tensões dos ensaios consolidados drenados (CD) e consolidados não drenados (CU) são apresentadas em termos de tensões efetivas.

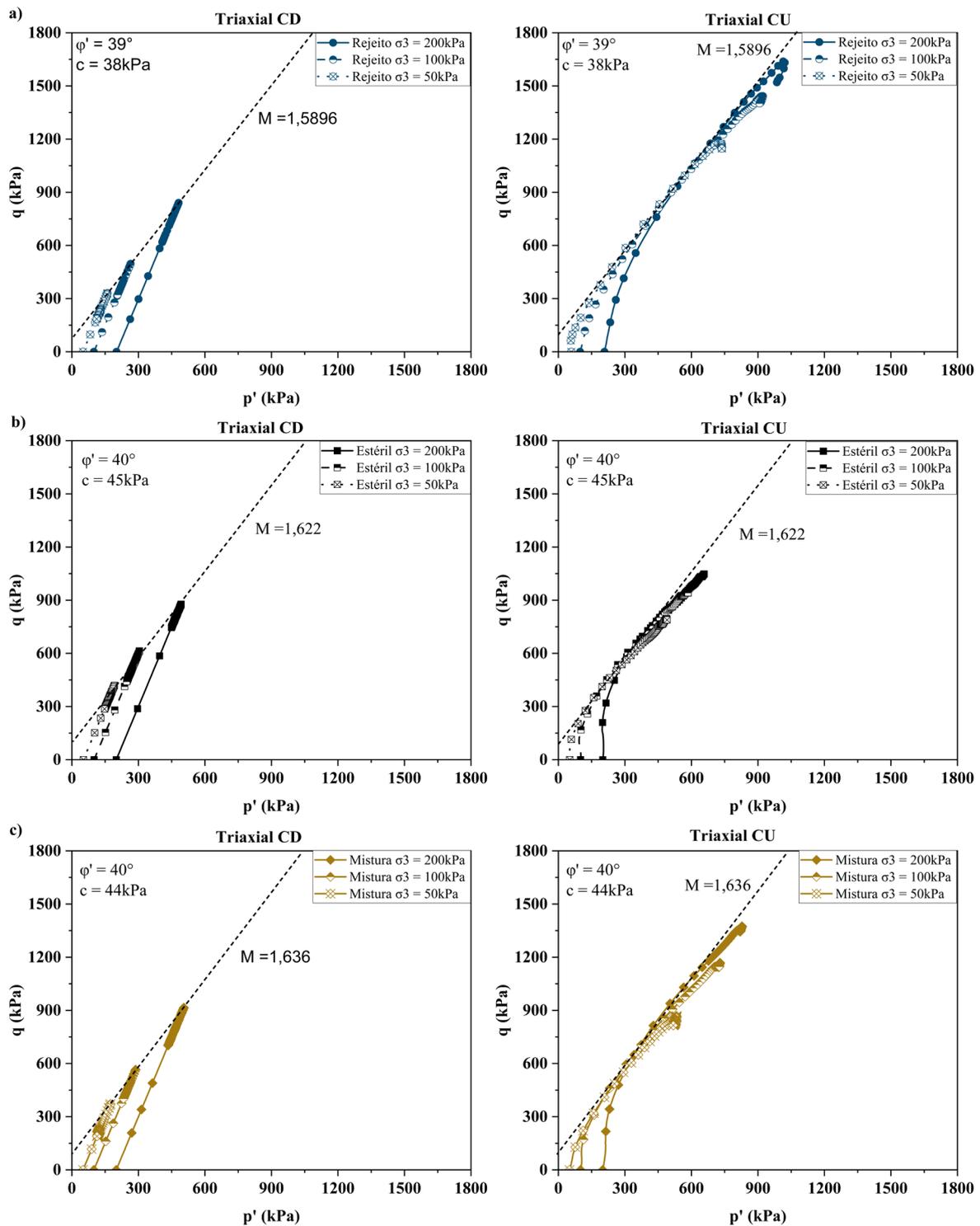


Figura 4.29 - Trajetórias de tensão dos ensaios do tipo CD e CU - envoltórias tipo  $q;p'$ .

Para cada material, foram determinadas as envoltórias de resistência, tanto para os ensaios consolidados drenados (CD) quanto para os ensaios consolidados não drenados (CU), definindo assim os parâmetros geotécnicos, como o ângulo de atrito e a coesão. Observou-se uma consistência no parâmetro  $M$  entre os ensaios drenados e não drenados.

Os parâmetros de resistência para todos os materiais analisados, determinados a partir da construção da envoltória  $q$  vs.  $p'$ , são apresentados na Figura 4.30. O rejeito com uma massa específica 13% menor foi ensaiado apenas sob tensões confinantes de 50 e 100 kPa.

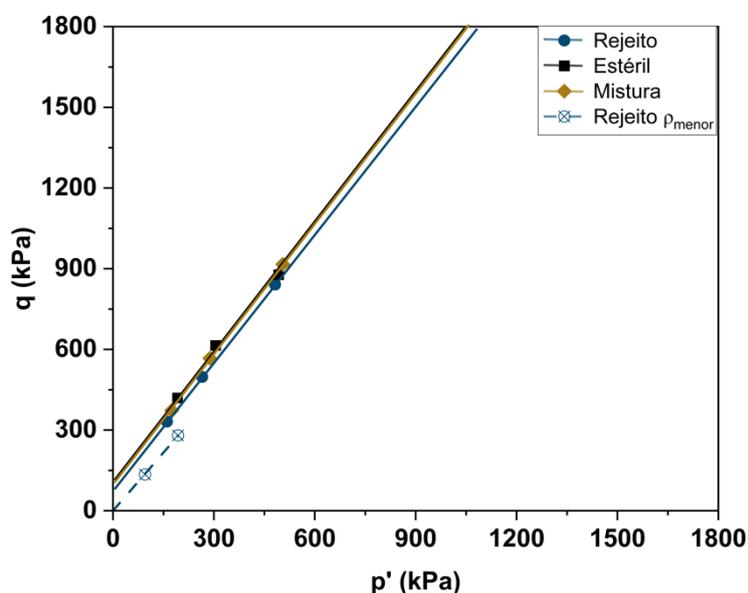


Figura 4.30 – Envoltórias de resistência dos ensaios triaxiais para os materiais isolados e mistura ( $R_{ot} \approx 2,5$  com  $w=15\%$ ).

Os resultados de interceptos coesivos e ângulos de atrito para os materiais podem ser observados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Parâmetros de resistência dos ensaios triaxiais para os materiais não misturados e mistura.

Material	Ângulo de Atrito ( $^{\circ}$ )	Intercepto Coesivo (kPa)
Estéril	40	45
Rejeito	39	38
Mistura $R_{ot}=2,5$	40	44
Rejeito $\rho_{menor}$	31	0

Observa-se que os estéreis e misturas exibiram valores de ângulos de atrito e interceptos coesivos semelhantes, enquanto que a principal diferença destes em relação aos rejeitos foi nos valores de intercepto coesivo.

No caso do rejeito que foi ensaiado com uma massa específica inferior àquela do teor de umidade ótimo, percebe-se que houve uma redução significativa do ângulo de atrito ( $8^\circ$ ), sendo que o intercepto de coesivo obtido foi nulo.

#### **4.1.8. LINHA DE ESTADO CRÍTICO (LEC)**

Para a determinação da linha de estado crítico, geralmente são necessários ensaios triaxiais em grandes deformações, o que nem sempre é viável devido a limitações técnicas, como a resistência da membrana, efeitos de embarrigamento do corpo de prova ou restrições do equipamento triaxial.

Os ensaios realizados neste estudo não abrangeram grandes deformações, resultando em uma aproximação da Linha de Estado Crítico. Para a análise do estado crítico nos ensaios do tipo CD e CU, foram considerados os dados que atingiram um estado estacionário de deformação volumétrica ( $\varepsilon_v$  constante para o ensaio tipo CD) ou um estado estacionário para a razão de tensões efetivas médias ( $\sigma'_1/\sigma'_3$  constante para o ensaio tipo CU).

Observa-se que os parâmetros de intercepto coesivo, obtidos a partir das trajetórias de tensão no estado crítico dos materiais, foram nulos (Fig. 4.31). No entanto, os ângulos de atrito permaneceram com valores semelhantes aos obtidos anteriormente. Além disso, destaca-se uma consistência no parâmetro  $M_{tc}$  entre os ensaios drenados e não drenados nesta condição.

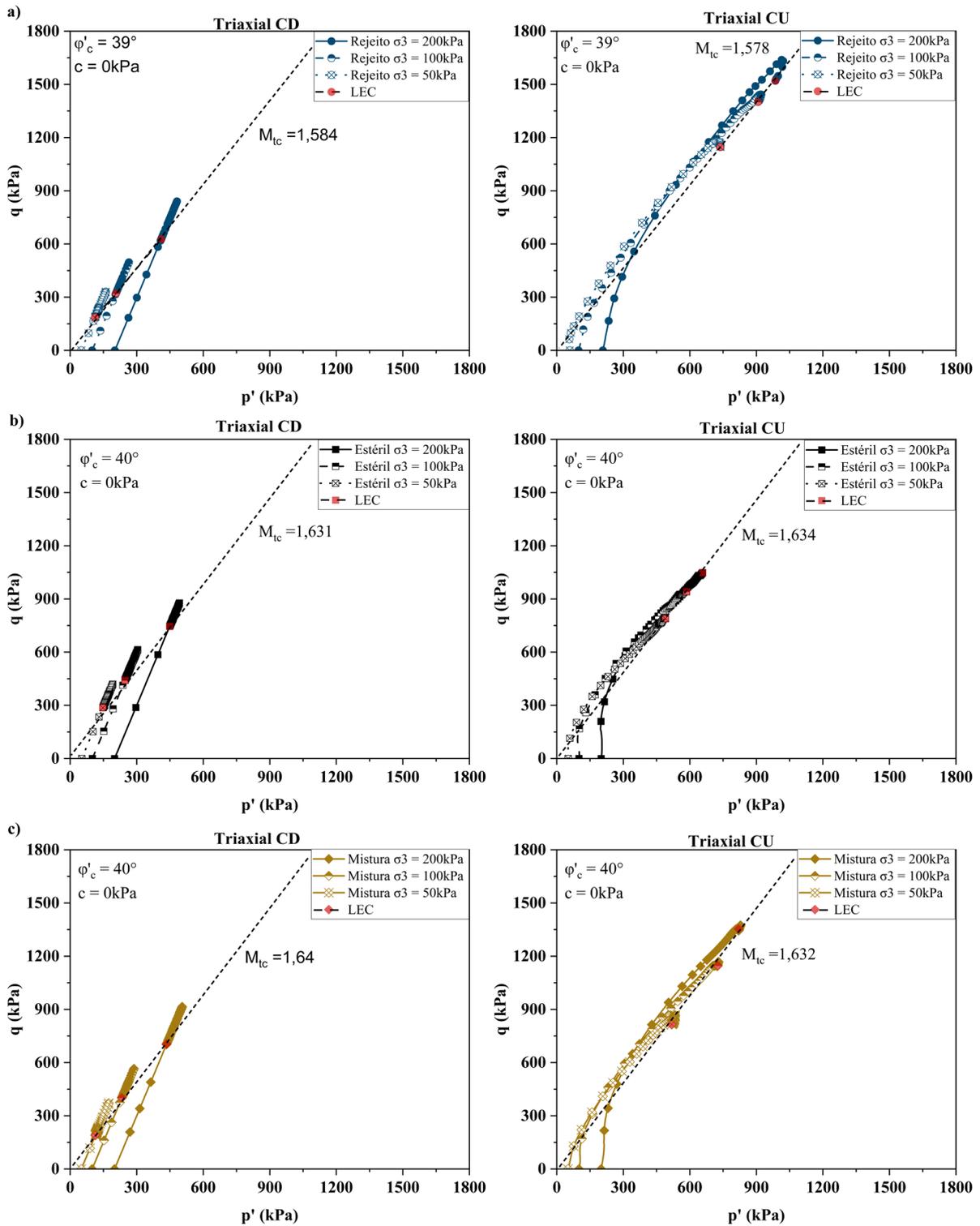


Figura 4.31 - Trajetórias de tensão no estado crítico para os ensaios do tipo CD e CU - envoltórias tipo  $q;p'$ .

#### 4.1.9. VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Na Tabela 4.10, são apresentados de forma comparativa os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais. Essa análise comparativa permite uma avaliação abrangente do comportamento mecânico dos materiais em diferentes condições de carregamento e confinamento. Os dados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto fornecem informações específicas sobre a resistência ao cisalhamento em condições de tensão normal constante, enquanto os ensaios triaxiais oferecem uma compreensão mais completa das propriedades de resistência sob diferentes níveis de confinamento e drenagem.

**Tabela 4.10 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto e ensaio triaxial**

Material	Triaxial		Material	Cisalhamento Direto	
	Ângulo de Atrito (°)	Intercepto Coesivo (kPa)		Ângulo de Atrito (°)	Intercepto Coesivo (kPa)
Estéril	40	45	Estéril - Natural	40	28
Estéril - LEC	40	0	Estéril - Inundado	40	0
Rejeito	39	38	Rejeito - Natural	31	11
Rejeito – LEC	39	0	Rejeito – Inundado	31	0
Mistura $R_{ot}=2,5$	40	44	Mistura $R_{ot}=2,5$	40	13
Mistura $R_{ot}=2,5$ - LEC	40	0	Mistura $R_{ot}=3.0$	40	19
Rejeito $\rho_{menor}$	31	0	-	-	-

Ao examinar os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, é possível observar que a diferença mais notável entre os parâmetros de resistência dos materiais está relacionada ao intercepto coesivo. Enquanto os valores de ângulo de atrito variam pouco entre as diferentes condições de ensaios para o estéril, misturas e rejeito, os resultados obtidos indicam uma disparidade significativa nos valores de coesão, sendo que esta tende a aumentar conforme tem-se o aumento na quantidade de estéril nas misturas, assim como esperado.

Por outro lado, avaliando os resultados dos ensaios triaxiais, observa-se que as misturas e os estéreis apresentam praticamente os mesmos valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo, com apenas pequenas variações em comparação com os rejeitos.

Ao comparar o intercepto coesivo dos materiais observado na Linha de Estado Crítico, torna-se evidente que esse parâmetro pode ser resultado exclusivamente da sucção, uma vez que a coesão verdadeira é nula. O mesmo comportamento é observado nas condições inundadas no caso dos ensaios realizados por cisalhamento direto.

Comparando-se os resultados dos ensaios de cisalhamento direto com os resultados do ensaio triaxial para o rejeito, preparado com massa específica seca 13% inferior à associada ao teor de umidade ótimo, foi observada uma semelhança nos valores do ângulo de atrito (aproximadamente 31°). A discrepância nos resultados sugere que as condições de preparação dos corpos de prova entre os dois tipos de ensaios diferentes tendem a influenciar os parâmetros de resistência. Nota-se que, em condições similares de preparação, considerando a mesma massa específica para os corpos de prova de rejeito, os parâmetros para diferentes ensaios tendem a se assemelhar.

A Tabela 4.10 permitiu identificar eventuais discrepâncias ou consistências entre os resultados dos dois tipos de ensaio, destacando as diferenças no comportamento mecânico dos materiais em diferentes regimes de tensão e deformação, assim como observado nos parâmetros de resistência dos materiais. É importante ressaltar que, assim como observado, ao comparar os resultados dos diferentes ensaios, como o cisalhamento direto e o triaxial, que os diferentes métodos de ensaio podem fornecer resultados variados devido às suas abordagens distintas e às condições específicas em que foram realizados.

#### **4.1.10. PARÂMETROS DO MODELO NORSAND NO ESTADO CRÍTICO (LEC).**

Os principais parâmetros empregados no modelo constitutivo Norsand foram determinados exclusivamente para as misturas de estéril e rejeito, uma vez que a modelagem numérica da pilha de disposição foi conduzida unicamente para esse tipo de material.

A Linha de Estado Crítico foi analisada no plano  $\ln p'$  vs  $e$ , permitindo compreender qual o impacto do índice de vazios na resistência e no comportamento da mistura. Na Figura 4.32 tem-se a relação da LEC no plano  $\ln p'$  vs  $e$ .

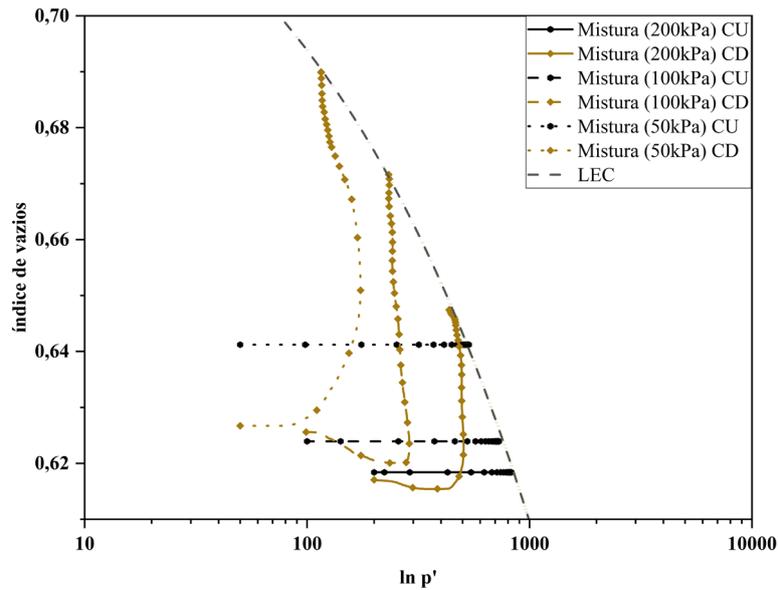


Figura 4.32 – Projeção da Linha de Estados Críticos no plano  $e;p'$ .

A LEC foi ajustada empregando-se uma linha curva baseada nos parâmetros  $C_a$ ,  $C_b$  e  $C_c$ , conforme a Equação 2.13. Sendo  $C_a = 0,7521$ ,  $C_b = 0,0583$  e  $C_c = 0,3884$ .

Conforme discutido na abordagem do estado crítico associado à resistência de pico e dilatação, foram identificados e determinados os parâmetros pertinentes à teoria de tensão-dilatância, bem como os parâmetros relacionados ao estado de tensão e dilatação ( $M_{tc}$ ;  $N_{tc}$ ;  $\chi_{tc}$ ).

Para cada uma das amostras foram calculados o  $D_{min}$ , o  $\psi$  na dilatação máxima e o invariante de tensões  $\eta_{max}$ , que representa a razão entre  $q$  e  $p'$ . A Figura 4.33 ilustra os resultados da dilatação máxima em função do parâmetro de estado das misturas, a partir da qual obteve-se o parâmetro  $\chi_{tc}$ .

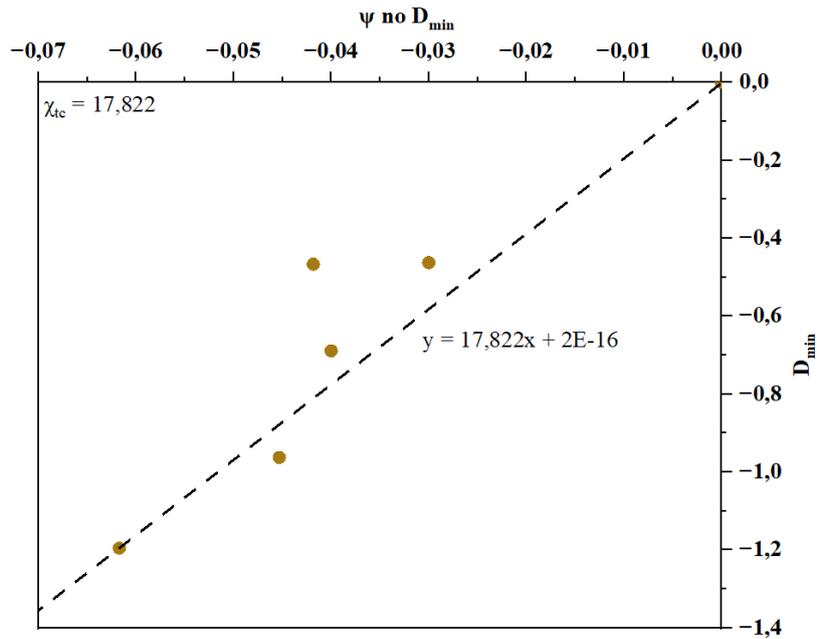


Figura 4.33 - Dilatação máxima ( $D_{min}$ ) em função do Parâmetro de Estado ( $\psi$ ).

Na Figura 4.34 tem-se a relação de  $\eta_{max}$  e  $D_{min}$ , da qual foram derivados os parâmetros  $N$  e  $M_{tc}$ . Observa-se que houve uma pequena diferença entre o parâmetro  $M_{tc}$  obtido a partir da curva de estado crítico e o obtido a partir desta relação, a qual representa uma discrepância de aproximadamente  $1^\circ$ .

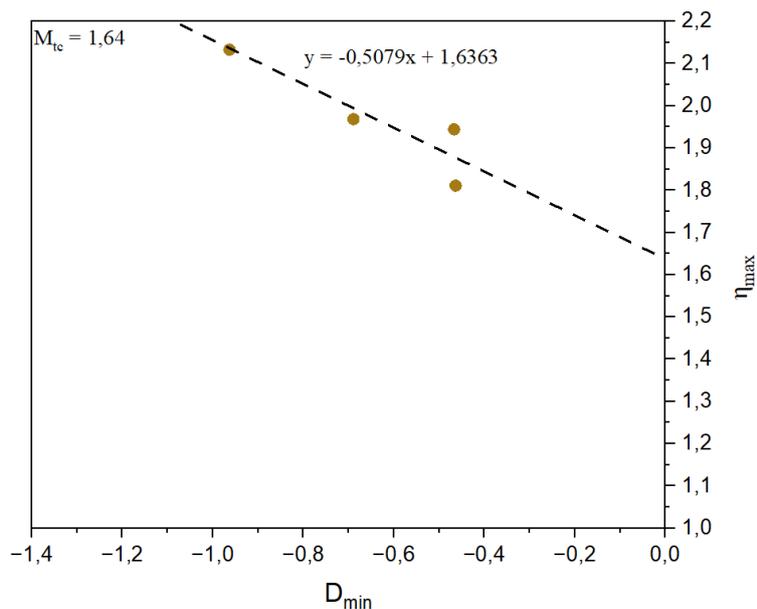
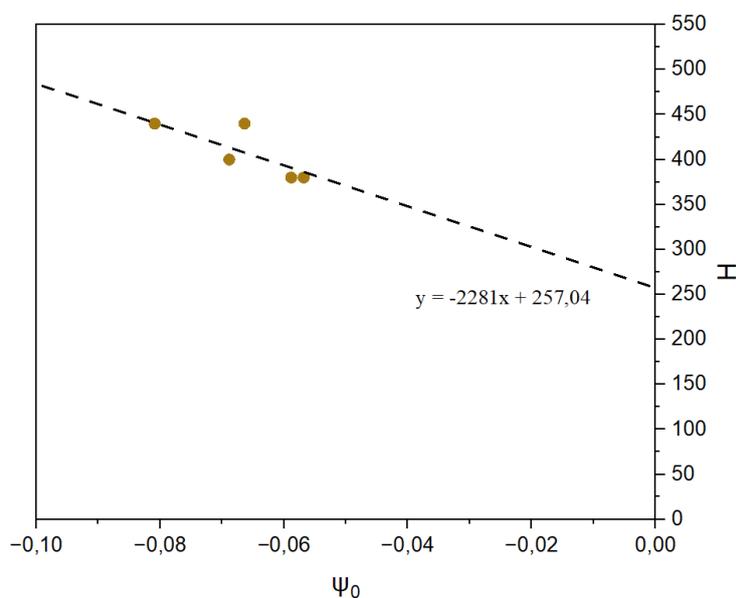


Figura 4.34 – Razão de Tensões ( $\eta_{max}$ ) em função da Dilatância Máxima ( $D_{min}$ ).

Para determinação do módulo de cisalhamento elástico ( $G_{máx}$ ) e do módulo plástico ( $H$ ), foi empregado o modelo de estado crítico Norsand. Esses parâmetros foram estimados inicialmente e, em seguida, calibrados utilizando modelagem numérica. Esse processo permitiu ajustar as curvas de tensões desviatórias do modelo aos dados laboratoriais dos ensaios triaxiais. Essa abordagem foi adotada para garantir uma representação precisa do comportamento mecânico dos materiais em estudo, considerando tanto as características do solo quanto as condições específicas dos ensaios realizados.

Na Figura 4.35, é apresentada a relação entre o módulo plástico e o parâmetro de estado inicial. A partir dos dados dessa relação, foram determinados os parâmetros  $H_o = 257$  e  $H_\psi = 2281$ .



**Figura 4.35 – Parâmetro de Endurecimento ( $H$ ) em função do Parâmetro de Estado ( $\psi$ ).**

Na Figura 4.36, é apresentada a relação entre o módulo de cisalhamento elástico e a tensão efetiva. A partir dos dados dessa relação, foram determinados os parâmetros  $G_{ref} = 35775$  e  $G_{exp} = 0,31$ , sendo este também definido como parâmetro  $m$ .

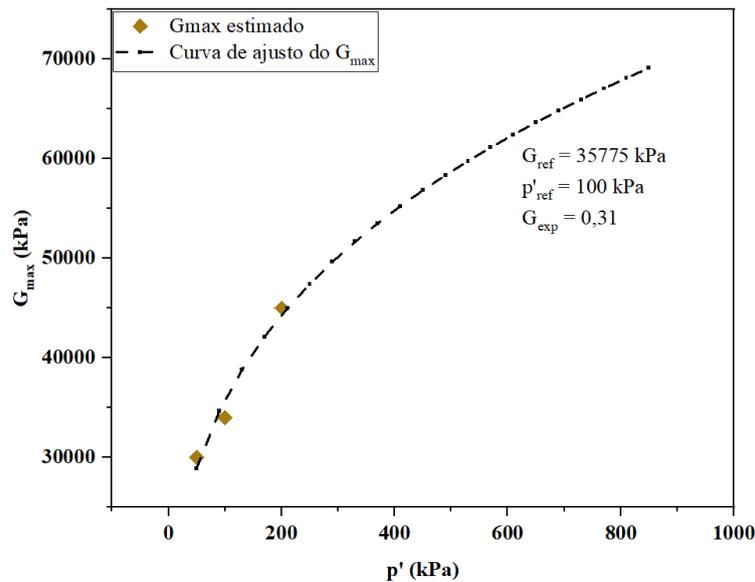


Figura 4.36 – Módulo de Cisalhamento Elástico ( $G_{max}$ ) e função da Tensão Efetiva ( $p'$ ).

#### 4.1.11. ENSAIO DE PERMEABILIDADE

A permeabilidade dos rejeitos, estéreis e misturas foi determinada por meio do ensaio de permeabilidade a carga variável. Esse ensaio foi realizado diretamente na prensa triaxial, utilizando amostras moldadas de acordo com as especificações mencionadas sobre a preparação dos corpos de prova para o ensaio triaxial. Durante o ensaio, as cargas hidráulicas foram aplicadas e medidas por meio de uma bureta de vidro graduada em milímetros, que foi instalada no equipamento. As amostras foram saturadas com percolação ascendente de água, sendo o volume de percolação correspondente a duas vezes o volume do corpo de prova.

Para cada corpo de prova ensaiado, foram realizadas cinco medidas de permeabilidade, sendo a média considerada como o valor final do parâmetro. Um gradiente hidráulico de 2 foi utilizado durante o ensaio. Os coeficientes de permeabilidade médios dos materiais podem ser vistos na Tabela 4.11, sendo  $k_{20}$  o coeficiente de permeabilidade padronizado para uma temperatura de 20°C.

Tabela 4.11 - Parâmetro de permeabilidade para os materiais isolados e mistura.

Material	K (cm/s)	$K_{20}$ (cm/s)
Estéril	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$
Rejeito	$5,09 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
Mistura ( $R=2.5$ )	$2,97 \cdot 10^{-5}$	$2,63 \cdot 10^{-5}$

Tanto o estéril quanto a mistura apresentaram permeabilidades que se aproximaram consideravelmente, demonstrando características típicas de areia fina, sendo a permeabilidade da mistura ligeiramente menor. O rejeito, por sua vez, exibiu uma permeabilidade típica de areias grossas, da ordem de  $10^{-3}$  cm/s.

Apesar do estéril conter frações de partículas maiores em relação ao rejeito, é possível observar uma permeabilidade menor nesse material. Isso se deve, principalmente, ao fato do estéril conter partículas coesivas e uma distribuição granulométrica mais bem graduada, abrangendo desde partículas grandes até argilas e siltes coesivos, conforme observado nas análises de distribuição granulométrica e análises químicas e microestruturais. Adicionalmente, o ensaio foi realizado em corpos de prova compactados com massa específica seca máxima e umidade ótima. Essas características contribuem para uma menor permeabilidade do estéril em comparação ao rejeito.

#### 4.1.12. ENSAIOS OEDOMÉTRICOS

A Figura 4.37 ilustra os resultados dos ensaios de adensamento realizados em corpos de prova de rejeito, estéril e misturas com  $R = 2,5$  e umidade de 15%. Foram realizados dois ensaios no estéril e no rejeito, e um ensaio nas misturas, considerando corpos de prova preparados próximos à massa específica seca máxima e umidade ótima. Os corpos de prova de rejeito e estéril foram moldados com um anel de diâmetro de 7,5 cm e altura de 2,0 cm (SP1 - amostra 1) e com um anel de 11,3 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura (SP2 - amostra 2), sendo as amostras moldadas apenas nas dimensões maiores.

É interessante notar que as curvas índice de vazios *versus* logaritmo da tensão efetiva ( $e - \sigma'$ ) para os dois ensaios realizados no rejeito mostram uma tendência de comportamento semelhante. No caso do estéril, apesar das amostras terem sido preparadas com uma pequena diferença no índice de vazios inicial, é possível notar que elas tendem a apresentar o mesmo comportamento na descarga e recarga. Isso pode indicar que as dimensões maiores do anel podem não ter uma influência significativa nos resultados, mesmo quando se considera uma variação maior no tamanho das partículas para o estéril. É plausível considerar que, nesses casos, um menor índice de vazios na amostra de estéril levará a uma maior deformação durante o ensaio. A mistura apresentou uma diferença um pouco maior nos parâmetros quando comparada aos outros materiais, porém não muito significativa.

Os resultados dos parâmetros de adensamento ( $C_v$ ) estão na Tabela 4.12. Os rejeitos possuem um valor médio de  $C_c$  igual a 0,087 e  $C_v$  de 0,074 para a amostra 1 e  $C_c$  igual a 0,10 e  $C_v$  de 0,077 para a amostra 2. O estéril apresenta um valor médio de  $C_c$  igual a 0,085 e  $C_v$  de 0,074 para os ensaios com corpo de prova de menores dimensões (SP1), sendo o  $C_c$  igual a 0,091 e  $C_v$  de 0,11 para a amostra de maiores dimensões (SP2). As misturas possuem um valor médio de  $C_c$  igual a 0,072 e  $C_v$  de 0,095, sendo que o coeficiente de adensamento está compreendido entre os valores obtidos para o estéril e misturas.

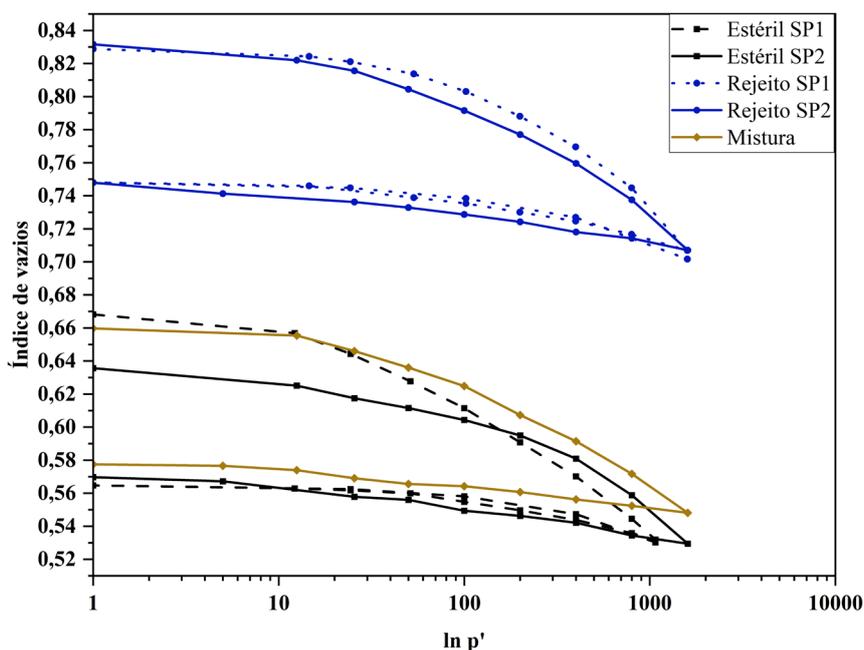


Figura 4.37 – Curva de adensamento unidimensional para os materiais isolados e mistura ( $R \approx 2,5$  com  $w=15\%$ ).

Tabela 4.12 - Parâmetro de adensamento oedométrico.

Amostras	Rejeito (SP1)	Rejeito (SP2)	Estéril (SP1)	Estéril (SP2)	Misturas (SP2)
<b>Tensão Aplicada (kPa)</b>	<b><math>C_v</math> (cm<sup>2</sup>/seg)</b>				
50	$7,55 \cdot 10^{-2}$	$7,82 \cdot 10^{-2}$	$7,50 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-1}$	$9,71 \cdot 10^{-2}$
100	$7,45 \cdot 10^{-2}$	$7,75 \cdot 10^{-2}$	$7,44 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$9,59 \cdot 10^{-2}$
200	$7,33 \cdot 10^{-2}$	$7,64 \cdot 10^{-2}$	$7,36 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$	$9,44 \cdot 10^{-2}$
400	$7,21 \cdot 10^{-2}$	$7,48 \cdot 10^{-2}$	$7,26 \cdot 10^{-2}$	$1,10 \cdot 10^{-1}$	$9,22 \cdot 10^{-2}$
Média	$7,38 \cdot 10^{-2}$	$7,67 \cdot 10^{-2}$	$7,39 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$9,49 \cdot 10^{-2}$

#### 4.1.13. ENSAIOS DE PAPEL FILTRO

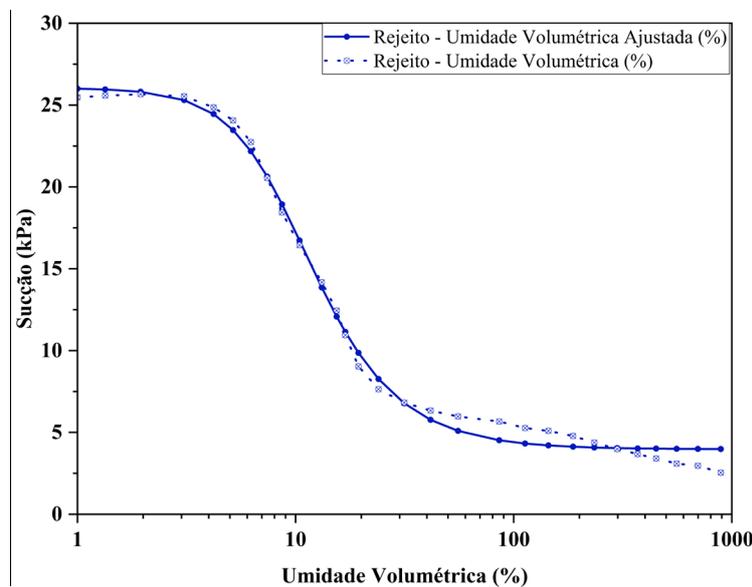
As sucções dos materiais para diferentes teores de umidade foram obtidas a partir de ensaios de papel filtro em corpos de prova moldados nas mesmas condições dos ensaios triaxiais.

Na Tabela 4.13 tem-se os parâmetros das curvas características de retenção de água para o rejeito, estéril e misturas realizadas no  $R = 2,5$  e umidade de 15%, obtidos do ajuste matemático pelo modelo de Van Genuchten.

**Tabela 4.13 - Parâmetro de ajuste das curvas de retenção de água pelo modelo de Van Genuchten.**

Material	Parâmetros - Equação de Van Genuchten				
	$\alpha$	n	$\theta_r$	$\theta_s$	m
Rejeito	0,109323	2,650446	0,039744	0,260426	0,622705
Estéril	9,13E-05	1,894502	0	0,160325	0,472157
Mistura	0,001659	1,337139	0	0,16587	0,252135

Na Figura 4.38 tem-se a curva característica de retenção de água em função da umidade volumétrica do rejeito e também a curva de ajuste matemático realizado pelo modelo de Van Genuchten.



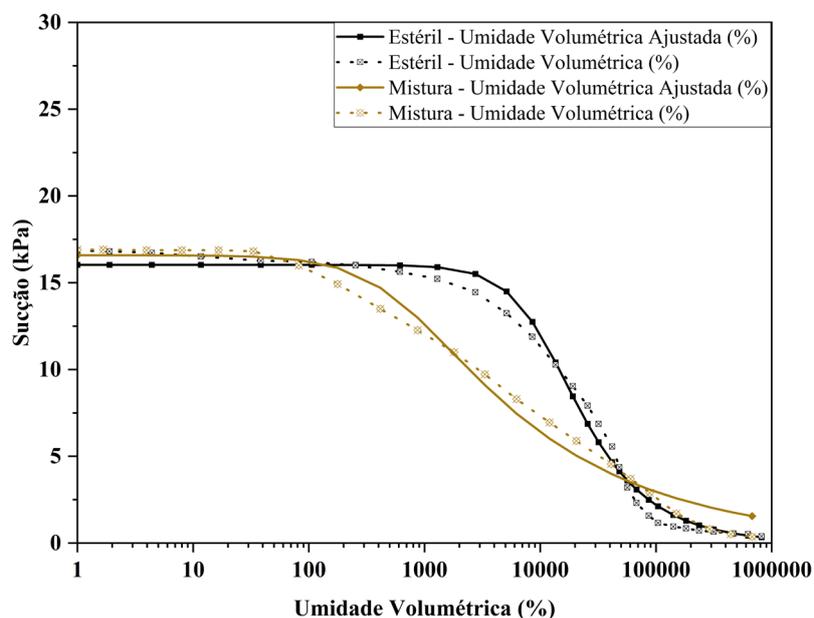
**Figura 4.38 - Curva característica de retenção de água no rejeito.**

Analisando a relação entre a sucção e a umidade volumétrica para o rejeito pode-se notar que a curva apresenta características similares a materiais arenosos, com perda da umidade

volumétrica para um pequeno aumento da sucção matricial. A pressão de entrada de ar neste caso é da ordem de 3 – 5 kPa e o teor de umidade residual é 85 kPa.

Na Figura 4.39 tem-se a curva característica de retenção de água no estéril e na mistura com  $R = 2,5$  e as curvas de ajuste matemático realizado pelo modelo de Van Genuchten. Devido a fração granulométrica do estéril compreender uma maior quantidade de argilas e siltes e ser mais bem distribuída do que o rejeito, percebe-se que a curva característica de retenção de água neste caso é mais suave, apresentando uma menor queda dos valores de umidade volumétrica com o aumento da sucção matricial. A pressão de entrada de ar é da ordem de 1000 kPa e o teor de umidade residual é 100000 kPa.

A mistura apresentou um comportamento intermediário entre o estéril e o rejeito. Este comportamento pode ser esperado devido a influência da fração de rejeito presente. A curva característica de retenção de água para a mistura possui uma tendência similar ao estéril, porém com uma pressão de entrada de ar menor, da ordem de 200 kPa, e com teor de umidade residual igual ou maior.



**Figura 4.39 – Curva característica de retenção de água no estéril e mistura com  $R=2,5$  e umidade de 15%.**

Na Figura 4.40, são apresentadas as curvas características de retenção de água e os ajustes matemáticos para todos os materiais, plotados juntos para facilitar a compreensão do comportamento. A análise da figura revela a predominância do estéril no comportamento das

misturas, com a influência dos rejeitos afetando principalmente a pressão de entrada de ar e a inclinação das curvas de retenção de água das misturas.

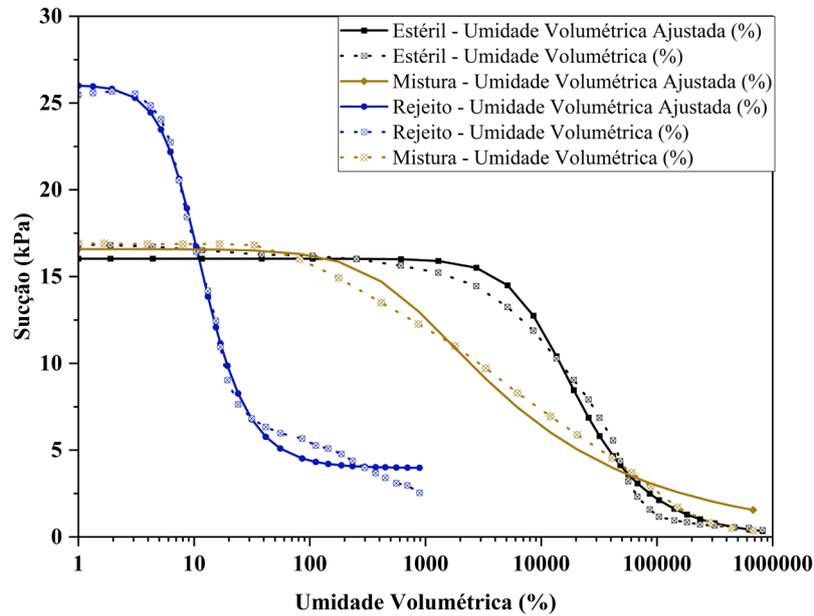
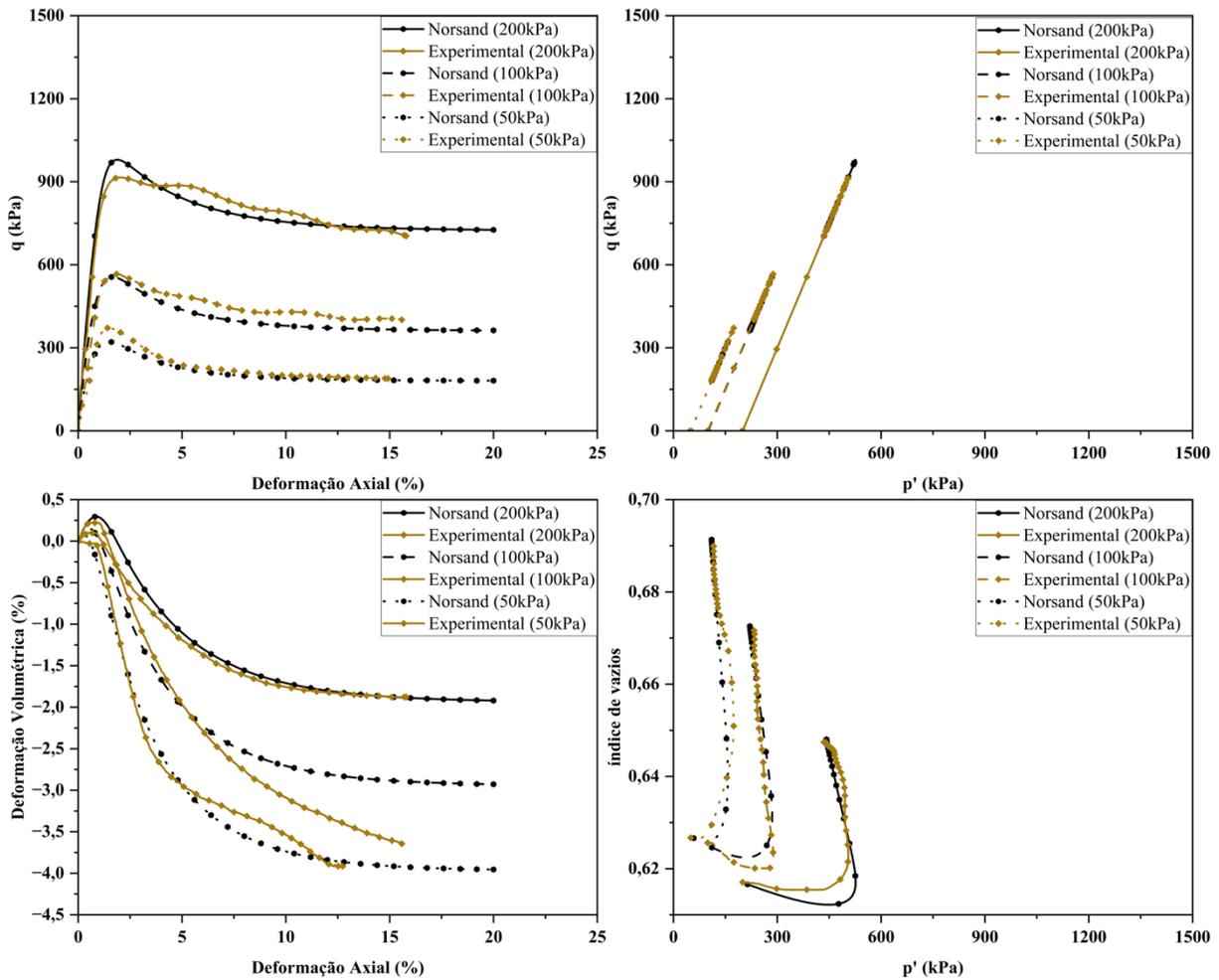


Figura 4.40 – Curva característica de retenção de água para todos os materiais.

#### 4.1.14. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS DE MISTURAS REJEITOS E ESTÉREIS DE MINERAÇÃO

Considerando os parâmetros de estados críticos definidos para as misturas de rejeitos e estéreis, procedeu-se com a calibração dos resultados dos ensaios triaxiais com relação ao modelo constitutivo Norsand. Durante a calibração, foram consideradas as análises de tensão desviadora, excesso de poropressão, deformação volumétrica, trajetória de tensões e variação do índice de vazios.

Na Figura 4.41, apresenta-se a calibração das curvas de tensão desviadora em função da deformação axial, as trajetórias de tensões ( $q$  versus  $p'$ ), a relação entre a deformação volumétrica e a deformação axial, e a variação do índice de vazios em relação  $p'$  para o ensaio triaxial consolidado e drenado.

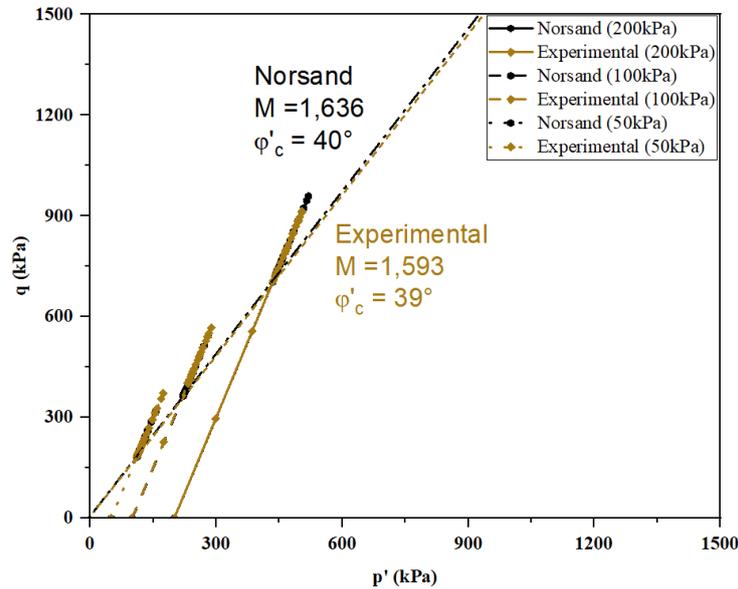


**Figura 4.41 – Calibração dos resultados dos ensaios triaxiais CD ao modelo Norsand.**

Observa-se uma aderência entre as curvas modeladas pelo método Norsand com relação as curvas obtidas dos resultados experimentais para os ensaios triaxiais do tipo CD. Especificamente, as curvas de tensão desviatória em relação à deformação axial exibiram valores máximos de tensão e tensões residuais consistentes entre os três ensaios analisados. Além disso, as variações nos índices de vazios mostraram uma boa correspondência com os resultados do modelo Norsand. Em relação às deformações volumétricas, evidencia-se que o ensaio conduzido com uma tensão de confinamento de 100 kPa alcançou uma convergência satisfatória somente para deformações axiais inferiores a 7%, divergindo em deformações axiais mais elevadas. Por outro lado, os ensaios realizados com tensões confinantes de 50 e 200 kPa apresentaram uma convergência consistente com os resultados do modelo ao longo de todo o intervalo de deformações axiais analisadas.

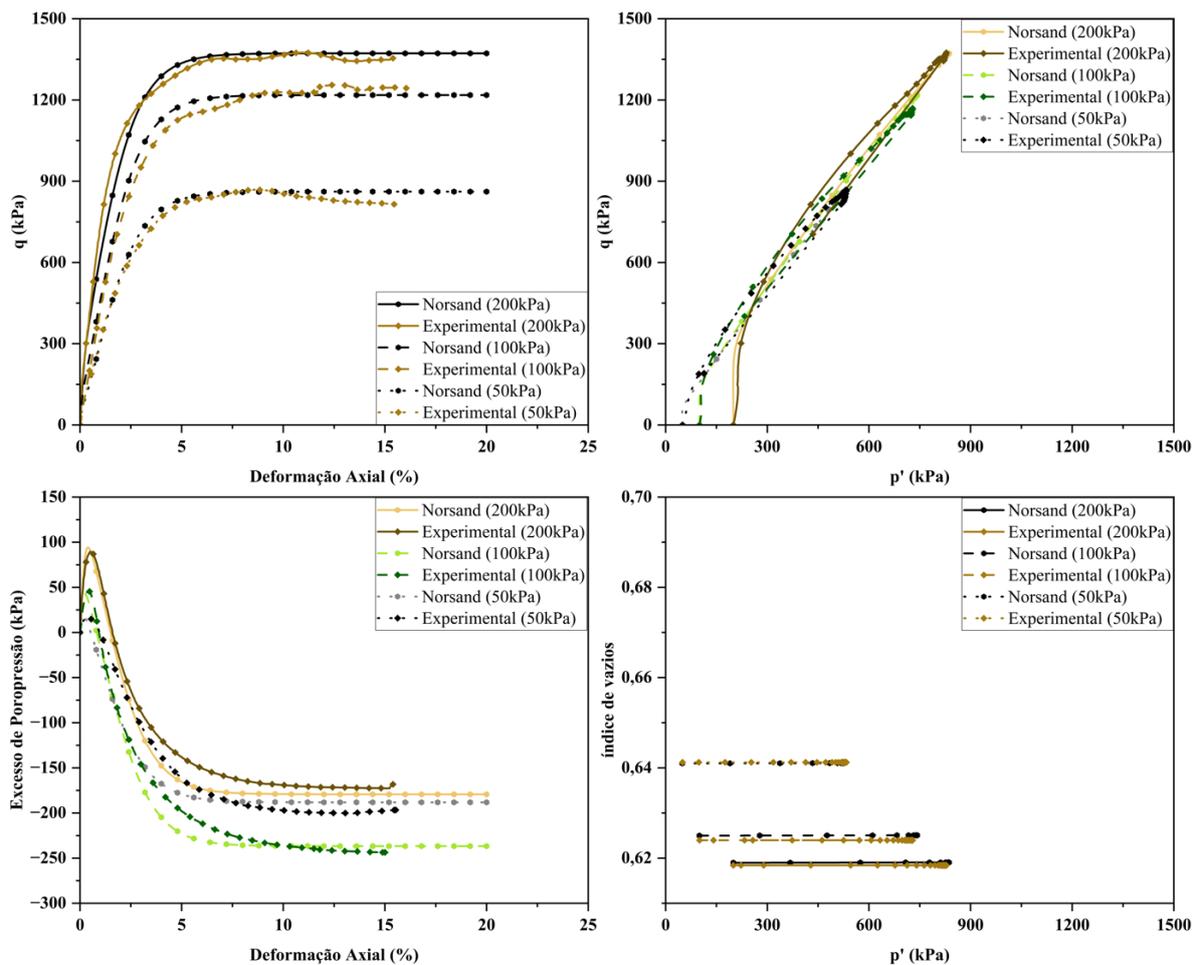
Analisando as trajetórias de tensões e plotando a linha de estado crítico (LEC), Figura 4.42, observa-se que as tanto os dados experimentais quanto os modelados apresentaram

similaridades significativas em termos de inclinação ( $M_{\text{Norsand}} = 1,636$ ;  $M_{\text{Experimental}} = 1,593$ ) e de ângulo de atrito crítico ( $\varphi'_{c\text{Norsand}} = 40^\circ$ ;  $\varphi'_{c\text{Experimental}} = 39^\circ$ ).



**Figura 4.42 – Calibração dos resultados de Trajetória de Tensões experimentais CD ao modelo Norsand.**

Na Figura 4.43, são exibidas a calibração das curvas de tensão desviadora em função da deformação axial, as trajetórias de tensões ( $q$  versus  $p'$ ), a relação entre excesso de poropressão e deformação axial, e a variação do índice de vazios em relação a  $p'$  para o ensaio triaxial consolidado e não drenado.

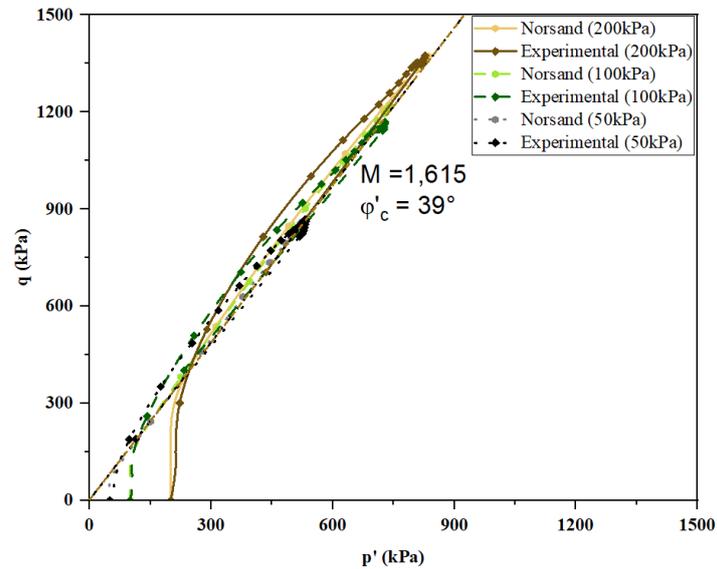


**Figura 4.43 – Calibração dos resultados dos ensaios triaxiais CU ao modelo Norsand.**

Considerando os resultados dos ensaios triaxiais do tipo CU, observou-se uma boa correspondência entre os dados modelados e os obtidos em laboratório para as curvas de tensão desviadora em função da deformação axial e para a variação do índice de vazios. As curvas de excesso de poropressão em relação à deformação axial, obtidas pelo modelo Norsand, convergiram com os dados experimentais para grandes deformações axiais, alcançando valores constantes bastante próximos aos observados.

Ao analisar as trajetórias de tensões (Fig. 4.44), nota-se que, embora as curvas modeladas demonstrem um aumento da tensão desviadora ( $q$ ) até um determinado ponto, seguido por um aumento linear de  $q;p'$ , os dados reais exibem um aumento não linear. No entanto, ambos os conjuntos de resultados compartilham a mesma inclinação ( $M = 1,615$ ) e o mesmo ângulo de atrito crítico ( $39^\circ$ ).

Analisando as trajetórias de tensões (Fig. 4.44), percebe-se que, enquanto as curvas modeladas apresentaram aumento da tensão desviatória ( $q$ ) até um certo valor, com posterior aumento linear de  $q;p'$ , os dados reais apresentaram um aumento não linear, porém ambos os resultados apresentaram a mesma inclinação  $M = 1,615$  e o mesmo ângulo de atrito crítico,  $39^\circ$ .



**Figura 4.44 - Calibração dos resultados de Trajetória de Tensões experimentais CU ao modelo Norsand.**

Os parâmetros geotécnicos do modelo Norsand para as misturas de rejeito e estéril, obtidos na calibração pela modelagem numérica, são listadas na Tabela 4.14.

**Tabela 4.14 – Parâmetros do modelo constitutivo Norsand para misturas de rejeito e estéril.**

Tipo de ensaio		CD			CU		
Tensão Confinante	$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	50	100	200
Parâmetros do Estado Crítico (CSL curva)	$C_a$	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752
	$C_b$	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058
	$C_c$	0,388	0,388	0,388	0,388	0,388	0,388
Plasticidade	$M_{tc}$	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64
	$N$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	$\chi_{tc}$	17,82	17,82	17,82	17,82	17,82	17,82
	$H_0$	257	257	257	257	257	257
	$H_\psi$	2281	2281	2281	2281	2281	2281
	$S$	0	0	0	0	0	0
Rigidez	$G_{max}$ (Mpa)	28,90	35,77	44,28	28,90	35,77	44,28
	$G_{ref}$ (Mpa)	35,78	35,78	35,78	35,78	35,78	35,78
	$p_{ref}$ (kPa)	100	100	100	100	100	100
	$\nu$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	$G_{exp}$	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Estado Inicial do Solo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	21	21	21	21	21	21
	$e_0$	0,627	0,625	0,617	0,641	0,625	0,619
	$k_0$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	$OCR$	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15

#### 4.1.15. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CONSTRUÇÃO DE UMA PILHA DE CO-DISPOSIÇÃO DE ESTÉREIS E REJEITOS

A simulação numérica de uma pilha hipotética de co-disposição de estéril e rejeito envolveu a avaliação da estimativa de poropressões construtivas na estrutura, considerando a análise acoplada tensão-deformação, adensamento e fluxo. Incorporou-se os parâmetros geotécnicos das misturas com uso do modelo constitutivo Norsand. Além disso, foram considerados os processos de dissipação das poropressões ao longo do tempo, tanto durante a construção quanto após sua conclusão, juntamente com os efeitos de sucção nos materiais.

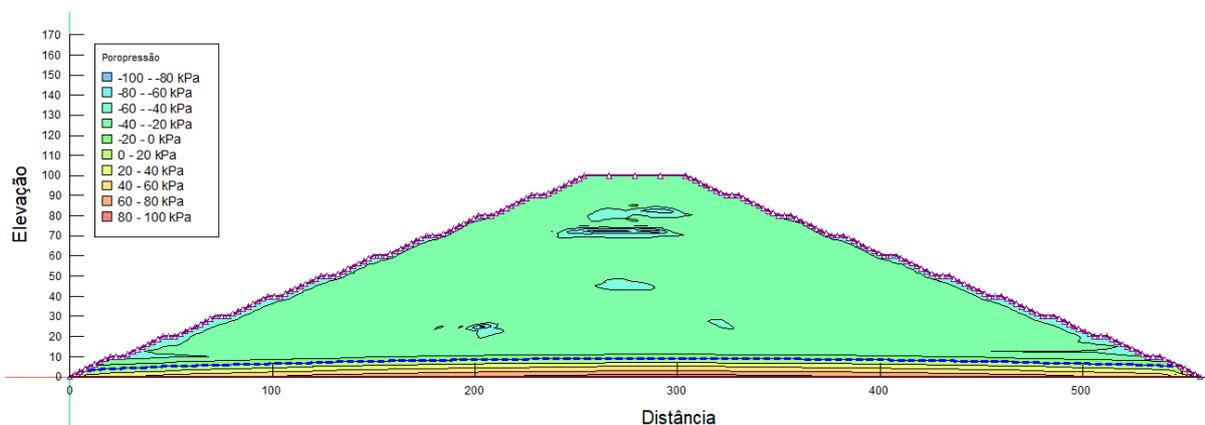
Inicialmente, procedeu-se com a avaliação do impacto da velocidade de alteamento na geração de poropressões na pilha. Foram consideradas construções com diferentes velocidades: 155 cm/dia, 10 cm/dia, 5 cm/dia e 2,5 cm/dia. É importante ressaltar que os tempos de construção adotados foram hipotéticos, desconsiderando limitações operacionais como disponibilidade de equipamentos, mão de obra e condições climáticas adversas. Os cenários simulados foram descritos na Tabela 4.15, com destaque para o cenário 01, o qual foi concebido para investigar

o comportamento da geração de poropressões em uma situação hipotética extrema de altíssima velocidade de construção.

**Tabela 4.15 – Descrição das especificidades de cada cenário simulado.**

Cenário Simulado	Taxa de Alçamento (cm/dia)	Tempo construtivo da pilha (dias)	Tempo construtivo da pilha (anos)	Tempo construtivo de cada alçamento de 2,5 m (dias)
01	155	64,52	0,18	1,61
02	10	1000	2,74	25
03	5	2000	5,48	50
04	2,5	4000	10,96	100

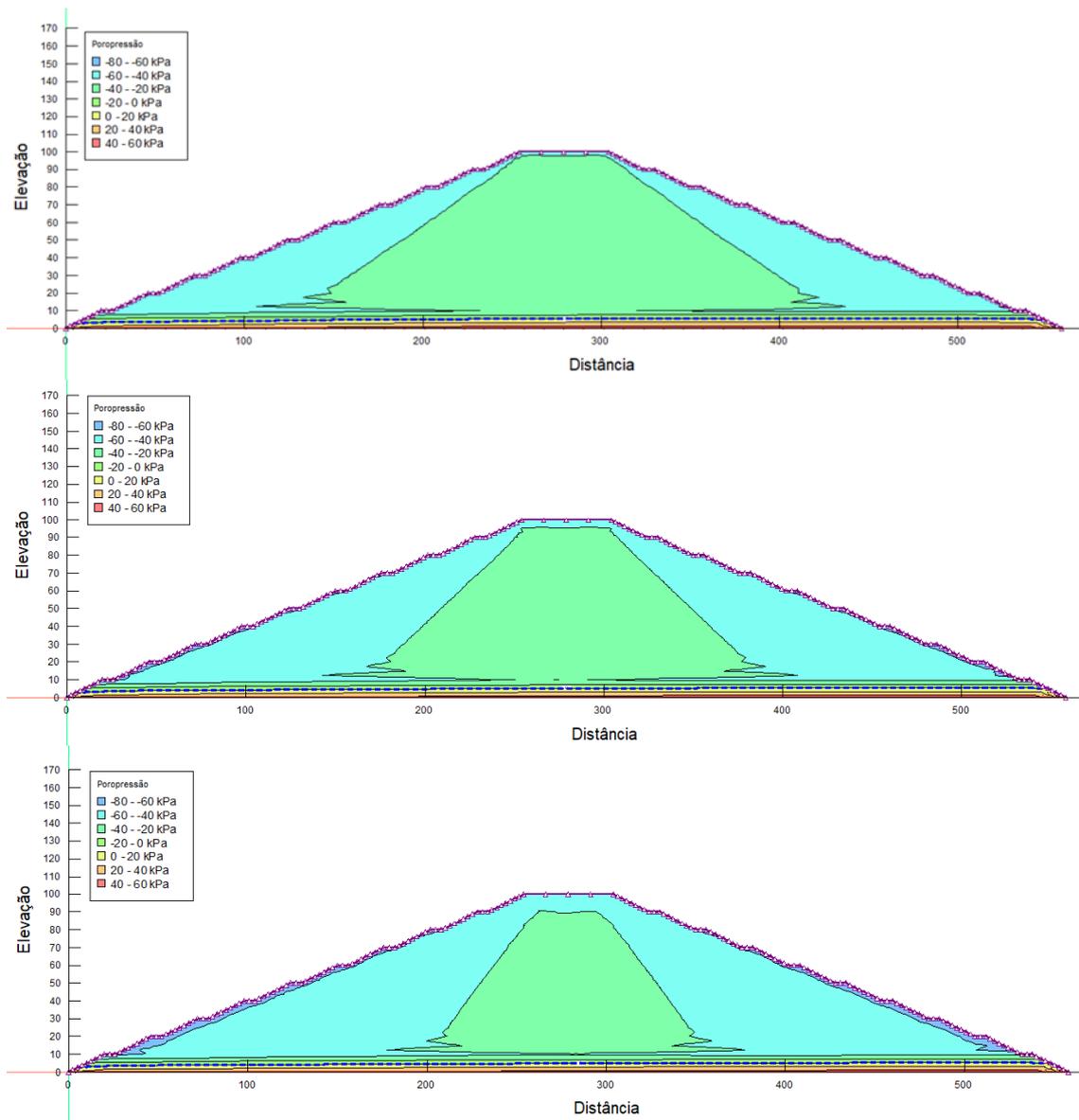
Na Figura 4.45, tem-se as isolinhas de poropressões geradas na pilha de co-disposição, considerando o final de construção para o cenário 01, no qual a velocidade de alçamento foi de 155 cm/dia. Percebe-se que, mesmo utilizando uma alta velocidade de construção e alçamento, não há geração de excesso de poropressão. Isso se deve ao fato de que o material de co-disposição apresenta uma permeabilidade da ordem de  $10^{-5}$  cm/s. Conseqüentemente, não ocorre acúmulo significativo de água na pilha, uma vez que o material possui uma capacidade intrínseca de drenagem.



**Figura 4.45 – Cenário 01, considerando uma taxa de alçamento de 155 cm/dia.**

Considerando o final de construção da pilha para o cenário 02, 03 e 04, representados na Figura 4.46, nos quais foram adotadas velocidades de alçamento de 10 cm/dia, 5 cm/dia e 2,5 cm/dia, respectivamente, observa-se que os valores de poropressões são menores em comparação com o cenário 01, não havendo a geração de excesso de poropressão. Esses cenários são mais condizentes com as taxas de alçamento típicas adotadas pelas empresas de mineração na atualidade.

Uma diferença significativa observada nos resultados em relação ao primeiro cenário é nas zonas acima da linha freática, correspondente à zona não saturada da pilha. Nessas áreas, verifica-se uma menor umidade devido ao maior tempo disponível para drenagem nessa região, resultante das velocidades de alteamento mais baixas. Esse efeito é consequência do menor volume de material adicionado diariamente, permitindo que a água presente seja drenada com maior eficiência ao longo do tempo.

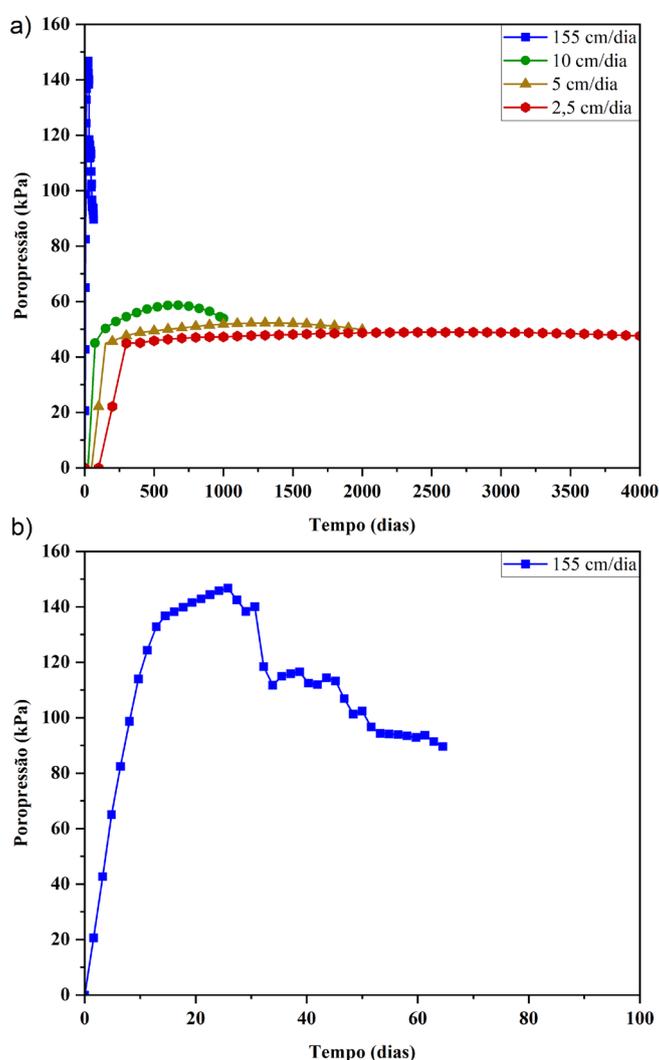


**Figura 4.46 – Modelo de pilha de co-disposição para: a) Cenário 02 (taxa de alteamento de 10 cm/dia); b) Cenário 03 (taxa de alteamento de 5 cm/dia), e; c) Cenário 04 (taxa de alteamento de 2,5 cm/dia).**

De modo a avaliar as poropressões construtivas na base da pilha, considerando as diferentes taxas de alteamento, foi elaborado um gráfico de poropressões em função do tempo para um nó

da malha de elementos finitos no local de interesse. Na Figura 4.47a, são apresentadas as poropressões nesse nó obtidas para todos os cenários, enquanto na Figura 4.47b, são exibidas apenas as poropressões do cenário 01, devido ao tempo final de construção ser menor que nos demais cenários, possibilitando uma melhor visualização dos resultados.

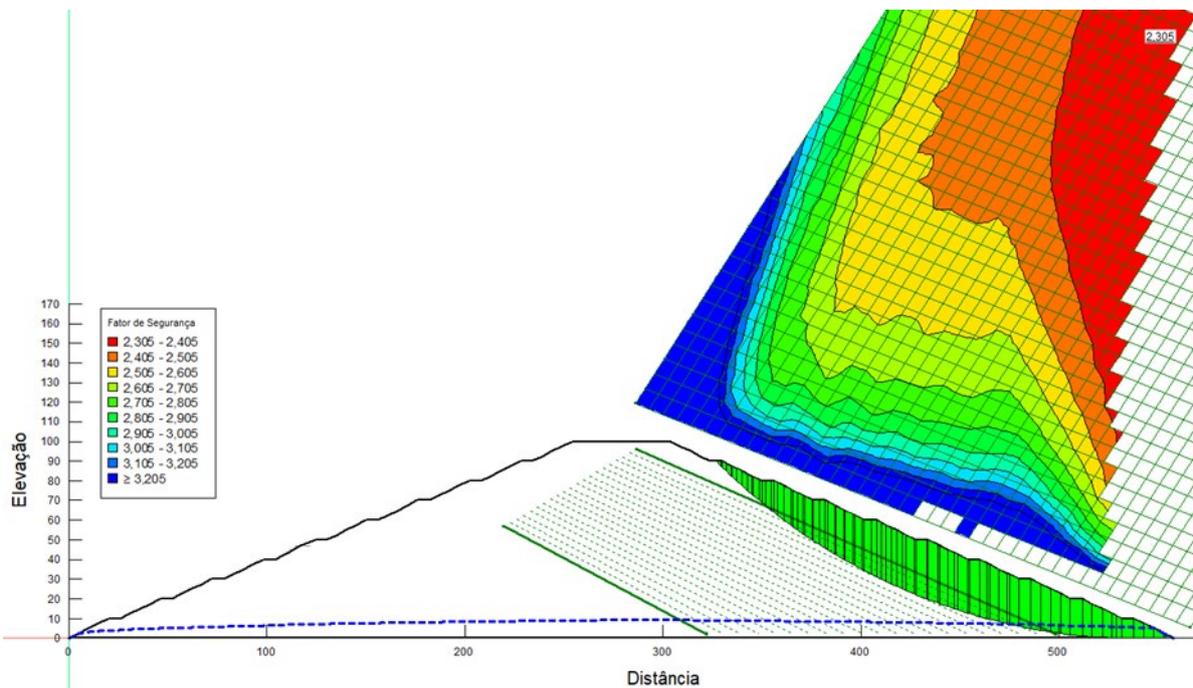
Observa-se que o cenário 01 apresenta os maiores valores de poropressão, conforme esperado, devido à sua altíssima velocidade de alteamento. No entanto, há uma rápida dissipação dessas poropressões devido à permeabilidade característica de areias finas do material de construção. Em contrapartida, as poropressões nos outros cenários são menores devido às taxas de alteamento mais baixas. Nota-se que essas poropressões tendem a se estabilizar para taxas de alteamento ainda menores, como observado nos cenários 03 e 04.



**Figura 4.47 – Resultados das poropressões obtidas para os cenários simulados: a) Cenário 01, 02, 03, 04; b) Cenário 01.**

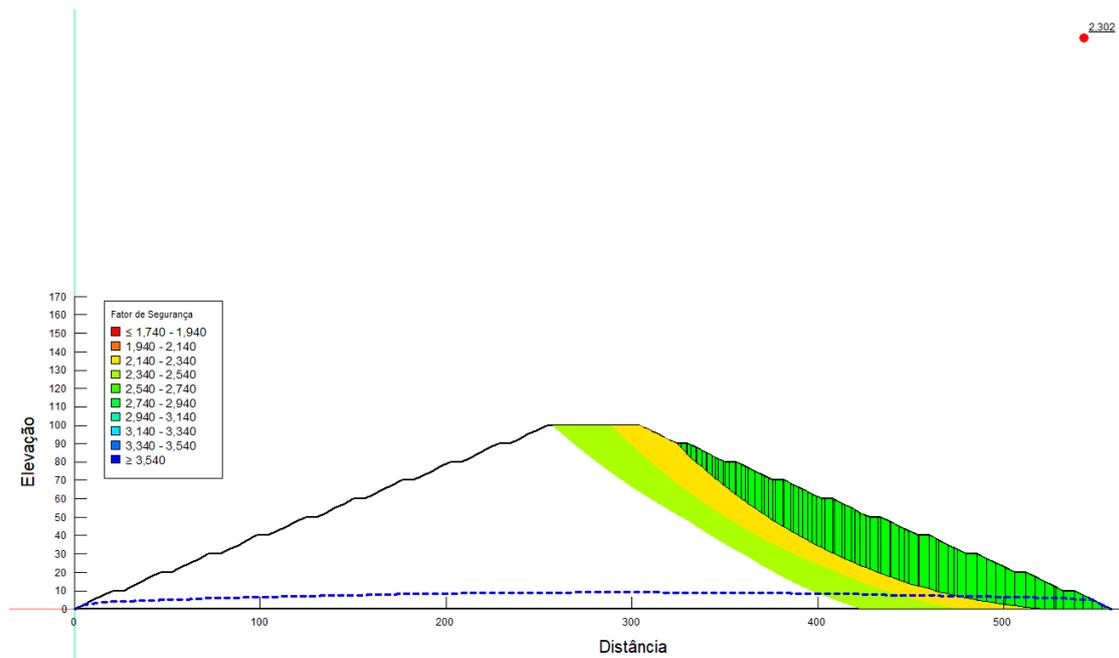
Foram realizadas análises de estabilidade da pilha hipotética de co-disposição, empregando dois métodos diferentes: o método de equilíbrio limite por Morgenstern-Price e o método Cuckoo search. Essas análises consideraram uma profundidade mínima da superfície de ruptura de 15 metros, visando evitar a consideração de superfícies de ruptura muito pequenas ou superfícies localizadas na face dos taludes. Utilizou-se os parâmetros de coesão e ângulo de atrito obtidos a partir de ensaios triaxiais.

Com base na análise de estabilidade por equilíbrio limite (Fig. 4.48), foi obtido um fator de segurança (FS) de 2,3, o que representa um valor significativamente superior ao fator de segurança mínimo exigido pelas normas aplicáveis para a superfície de ruptura global para pilhas de estéril (ABNT, 2017a). De acordo com a norma, sob condições normais, o fator de segurança mínimo é de 1,5, enquanto que, considerando uma superfície freática crítica, o fator de segurança mínimo é de 1,3.



**Figura 4.48 – Análise de estabilidade por Equilíbrio Limite (Morgenstern-Price).**

A estabilidade da pilha hipotética, analisada pelo método Cuckoo search, resultou em um fator de segurança de 2,3, semelhante ao obtido pelo método anterior. A Figura 4.49 ilustra a superfície de ruptura crítica e o mapa das superfícies de ruptura em relação ao fator de segurança (FS).



**Figura 4.49 - Análise de estabilidade pelo método Cuckoo Search.**

O propósito da modelagem numérica foi investigar a possibilidade de ocorrer a geração de excessos de poropressões durante a construção de pilhas de co-disposição de rejeitos e estéril provenientes de operações de mineração de fosfato. Essas simulações foram direcionadas especificamente para este material em questão. Embora a análise de estabilidade não tenha sido o foco principal do trabalho, foi relevante apresentar um estudo simplificado para compreender como as misturas de rejeitos e estéril se comportam quando dispostas em pilhas compactadas.

Apesar dos resultados indicarem uma possível dissipação de poropressões e drenabilidade intrínseca do material de co-disposição, é importante reconhecer que o comportamento dessas estruturas de disposição é bastante complexo. Neste sentido, existem diversas abordagens e metodologias para a definição das condições de contorno em tais modelos numéricos, além de outras considerações pertinentes ao ambiente real de campo.

A escolha de uma abordagem específica pode influenciar significativamente nos resultados obtidos. Outros autores e pesquisadores já conduziram modelagens utilizando metodologias diferentes e obtiveram resultados divergentes em relação à geração de poropressão em pilhas, tendo em vista o uso de distintas condições de contorno e modelos constitutivos. Esse fato ressalta a necessidade de uma análise cuidadosa e criteriosa das metodologias adotadas, pois a condição de drenabilidade na face dos taludes pode afetar as poropressões geradas.

Dada essa complexidade do comportamento das pilhas de disposição de rejeitos e estéril, é importante considerar a representatividade do modelo em relação aos dados reais, como informações provenientes de instrumentação e monitoramento geotécnico da estrutura geotécnica.

## 4.2. CO-DISPOSIÇÃO DE ESTÉREIS E LAMAS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DE CARVÃO MINERAL DA AUSTRÁLIA.

### 4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE CARVÃO MINERAL

Na Tabela 4.16, é apresentado um resumo dos resultados dos ensaios de caracterização para o estéril (*spoil*) e a lama de carvão mineral (*mud01* e *mud02*). Utilizando um picnômetro automático, obteve-se um  $\rho_s$  de 2,27 g/cm<sup>3</sup> para o *mud01*, 2,52 g/cm<sup>3</sup> para o *mud02* e de 2,54 g/cm<sup>3</sup> para o *spoil*. O teor de umidade apresentado refere-se à condição *in situ*, na qual o material foi amostrado.

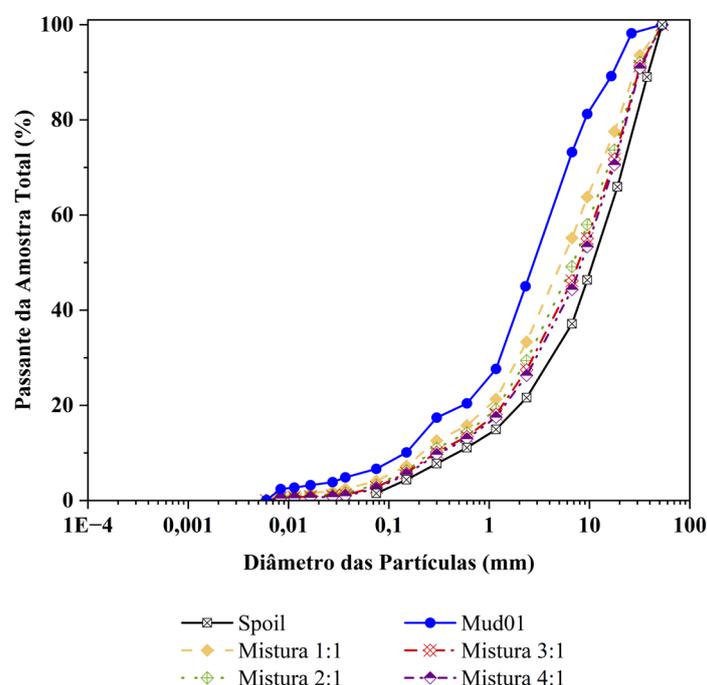
**Tabela 4.16 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização para as amostras de *spoil* e *mud*.**

Amostra	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade – Como amostrado (%)	Índice de vazios máximo ( $e_{max}$ )
<i>Mud01</i>	2,27	16,52	-
<i>Mud02</i>	2.52	20.28	-
<i>Spoil</i>	2,54	2,20	0,79

O ensaio de índice de vazios máximo ( $e_{max}$ ) foi realizado para o *spoil*. No entanto, para as amostras de *mud*, a realização desse ensaio mostrou-se inviável devido a algumas limitações técnicas. A principal dificuldade surgiu da necessidade de secagem e subsequente fragmentação do material aglomerado para determinação precisa do índice de vazios máximo. Este processo de secagem e fragmentação poderia causar a quebra de grãos e provocar alterações significativas nas características físicas do material.

A distribuição granulométrica apresentada na Figura 4.50 foi obtida considerando tanto o *spoil* quanto o *mud01*, assim como as curvas teóricas das misturas com diferentes razões de massa seca, incluindo proporções de 1:1, 2:1, 3:1 e 4:1. Observa-se uma proximidade nos valores das

frações granulométricas do *spoil* e do *mud01*, o que sugere que o *mud01* não sofreu significativa alteração na zona onde foi amostrado.



**Figure 4.50 – Distribuição granulométrica para os materiais não misturados e curvas teóricas das misturas com diferentes razões em massa seca (à seco e após inundado por 24h).**

A distribuição granulométrica para o *mud01* e *mud02* pode ser observada na Figura 4.51. Além disso, foi realizada a investigação das potenciais alterações e desagregações das partículas do *spoil*, mediante um processo de peneiramento sob condições úmidas, precedido pela imersão do material em água por um período de 24 horas.

Após a imersão e subsequente peneiramento, observou-se uma mudança significativa nas dimensões das partículas do *spoil*, resultando em uma aproximação das frações granulométricas deste material em relação ao *mud02*. Este fenômeno evidencia a suscetibilidade do *spoil* às variações de umidade, sublinhando a importância de considerar tais transformações nas propriedades físicas e granulométricas ao se projetar e operar estruturas geotécnicas, como pilhas de estéril de carvão mineral e pilhas de co-disposição.

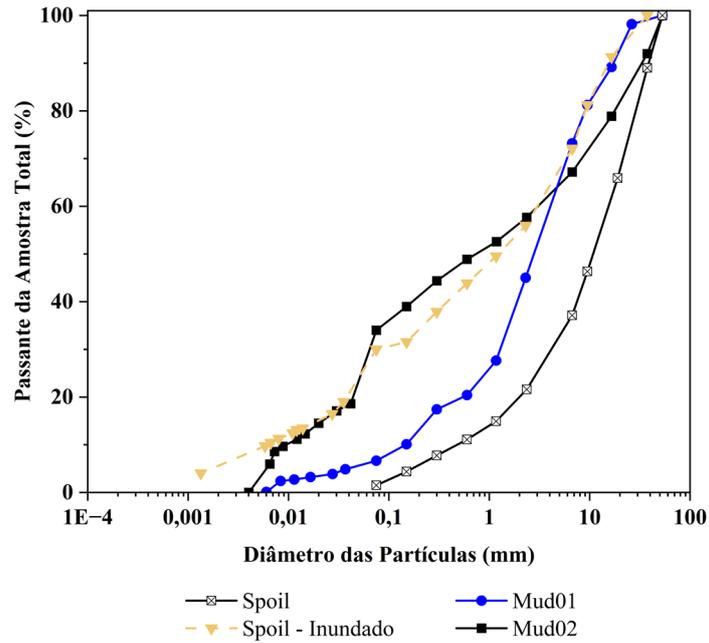


Figure 4.51 – Distribuição granulométrica para o *mud01*, *mud02* e *spoil* considerando peneiramento após inundado em água por 24h.

#### 4.2.2. RAZÃO DA MISTURA PARA SPOIL e MUD DE CARVÃO MINERAL

A razão ótima da mistura ( $R_{ot}$ ) foi obtida a partir das relações de massa e volume para o *spoil* e *mud01*, conforme a Equação 2.1, levando em consideração os resultados de caracterização obtidos. A fim de levar em conta a variabilidade nos parâmetros geotécnicos e possíveis alterações no teor de sólidos das amostras de *mud01* durante as estações seca e chuvosa, as curvas de razão ótima da mistura foram plotadas em relação ao teor de sólidos, conforme ilustrado na Figura 4.52.

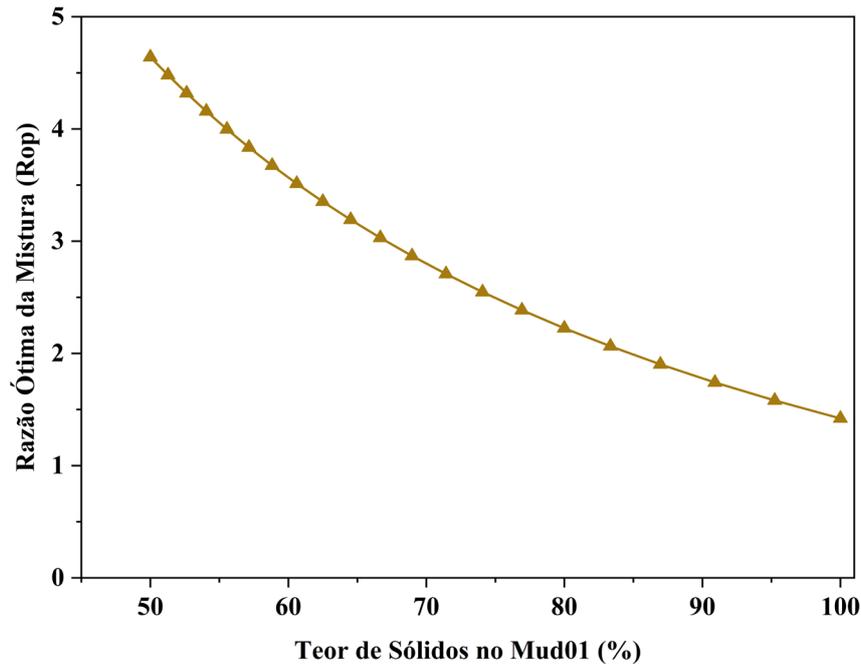


Figura 4.52 – Razão da mistura ótima ( $R_{ot}$ ) vs teor de sólidos nas lamias de carvão.

Com base na Figura 4.52, pode-se observar que a razão ótima da mistura ( $R_{ot}$ ) é de 4:1, considerando um teor de umidade dessas lamias de 80%, correspondente a um teor de sólidos de 56%.

#### 4.2.3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO *SPOIL*, MUD E MISTURAS

Considerando os ensaios de cisalhamento direto, todos os materiais foram ensaiados sob um mínimo de três tensões normais distintas: 200, 500 e 1000 kPa. Os ensaios envolveram diferentes condições de preparo da mistura, incluindo amostras preparadas com teor de umidade conforme amostrado (*in situ*) e na proporção ótima da mistura ( $R_{ot}$ ). Além disso, foram utilizados diferentes tamanhos de caixas de cisalhamento para os ensaios.

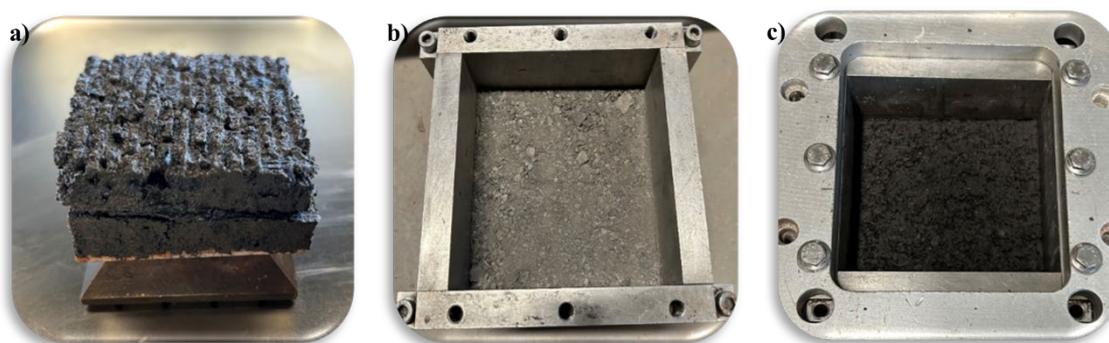
A consideração do uso de amostras com teor de umidade natural (como amostrado), assim como informado na Tabela 4.16, sugere a possibilidade de uma distribuição granulométrica menor para esses materiais em comparação com a observada na análise do *spoil* antes e após inundação (Fig. 4.51), as quais refletem a possibilidade de desagregação e alteração em condições de maior umidade.

As considerações específicas sobre os ensaios de cisalhamento direto realizados para cada material estão detalhadas na Tabela 4.17. Essas considerações incluem informações sobre o teor de umidade utilizado durante a preparação das amostras, bem como detalhes sobre o tamanho das caixas de cisalhamento empregadas.

**Tabela 4.17 – Resumo das considerações de ensaio de cisalhamento direto.**

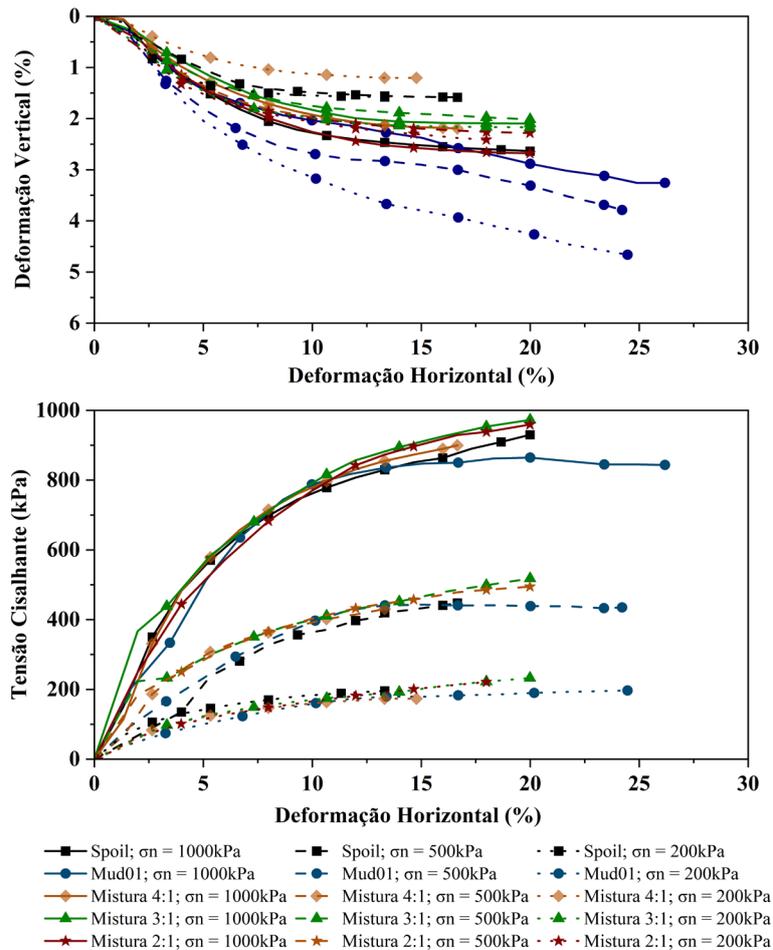
Amostras	Tamanho da caixa de cisalhamento	Teor de umidade
<i>Spoil</i>	150mmx150mmx130mm	Conforme amostrado
<i>Mud01</i>	60mmx60mmx30mm	Conforme amostrado
<i>Mud01</i>	100mmx100mmx30mm	Conforme amostrado
<i>Mud02</i>	60mmx60mmx30mm	Conforme amostrado
Mistura <i>Spoil</i> x <i>Mud01</i> 4:1	150mmx150mmx130mm	Conforme amostrado
Mistura <i>Spoil</i> x <i>Mud01</i> 4:1	150mmx150mmx130mm	$R_{ot}$
Mistura <i>Spoil</i> x <i>Mud01</i> 3:1	150mmx150mmx130mm	Conforme amostrado
Mistura <i>Spoil</i> x <i>Mud01</i> 2:1	150mmx150mmx130mm	Conforme amostrado
Mistura <i>Mud01</i> x <i>Mud02</i>	60mmx60mmx30mm	Conforme amostrado

Os corpos de prova cisalhados dos materiais são apresentados na Figura 4.53.



**Figura 4.53 – Amostras cisalhadas de resíduos de carvão: a) *Mud01*; b) *Spoil*; c) Mistura 4:1.**

Na Figura 4.54, são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto conduzidos em amostras de *spoil*, *mud01* considerando ensaios realizados na caixa de cisalhamento de dimensão de 60 mm x 60 mm x 30 mm, e misturas com diferentes razões secas, incluindo 4:1, 3:1 e 2:1. Os gráficos exibem as relações entre as tensões de cisalhamento *versus* a deformação horizontal e a deformação vertical *versus* a deformação horizontal.



**Figura 4.54 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto dos materiais isolados e das misturas realizadas de resíduos de carvão.**

Com base no gráfico de tensão de cisalhamento *versus* deformação horizontal, é possível observar que tanto o *spoil* quanto o *mud01* exibem uma tendência semelhante para deformações horizontais de até 15%. Especificamente, o *spoil* demonstra uma resposta de endurecimento, caracterizada por um aumento consistente nas tensões de cisalhamento à medida que a deformação horizontal aumenta. Em contraste, o *mud01* atinge um máximo de tensão de cisalhamento e mantém-se estável.

Todas as misturas exibiram um comportamento mecânico dominado pelo *spoil*, seguindo a mesma tendência desse material. É plausível que o efeito de endurecimento observado no *spoil* e misturas possa ser atribuído às dimensões do equipamento usado no ensaio, comportamento já observado em outros ensaios realizados com diferentes materiais.

Ao analisar o gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal, torna-se evidente que o *mud01* exibe uma deformação vertical mais significativa em comparação com os outros materiais. Essa observação pode ser atribuída ao maior teor de umidade neste material, bem

como à relação entre o tamanho da caixa de cisalhamento e a deformação na etapa de cisalhamento, que é avaliada como uma porcentagem da altura da caixa de cisalhamento.

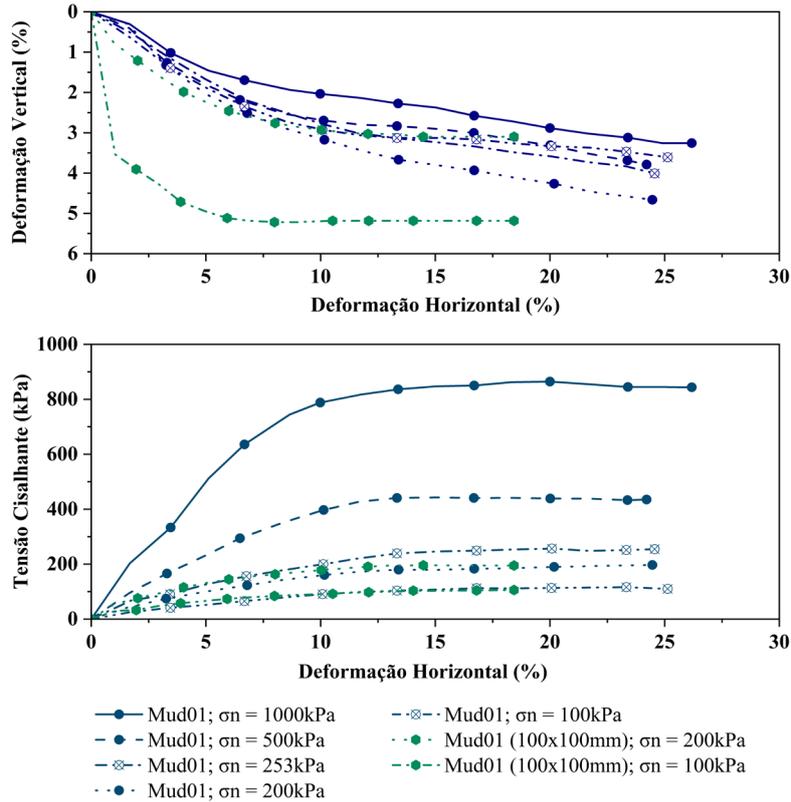
Durante a etapa de cisalhamento, quanto maior a tensão normal aplicada, menor foi a deformação vertical observada para o *mud01*. Por outro lado, para o *spoil* e as misturas, uma tendência oposta é observada, na qual a deformação vertical aumenta à medida que a tensão normal é aumentada. Essa divergência de comportamento pode ser atribuída à natureza dos materiais.

No caso do *spoil* e das misturas, a maior deformação vertical pode ser resultado da quebra de grãos e do ajuste dos grãos à caixa de cisalhamento, especialmente para as partículas maiores presentes no *spoil*.

As misturas 3:1 e 2:1 exibiram uma pequena deformação vertical em relação ao aumento das tensões normais em comparação com os outros materiais, sugerindo a possibilidade de estar ocorrendo uma melhor disposição de partículas nessas misturas

Devido à quantidade significativa de partículas grosseiras no *mud01*, os ensaios de cisalhamento direto também foram realizados em uma caixa de cisalhamento com dimensões maiores, de 100 mm x 100 mm e uma altura de amostra de 30 mm. Essa abordagem foi adotada para comparar e avaliar os efeitos do tamanho da caixa de cisalhamento no comportamento mecânico deste material.

É importante notar que não foram observadas variações significativas na relação entre a tensão de cisalhamento e a deformação horizontal nos ensaios realizados para a caixa com dimensões de 100 mm x 100 mm x 30 mm em comparação com a caixa com dimensões de 60 mm x 60 mm x 30 mm, considerando tensões normais de 100 e 200 kPa. Esse resultado sugere que os efeitos das dimensões da caixa de cisalhamento no comportamento do *mud01* são mínimos.

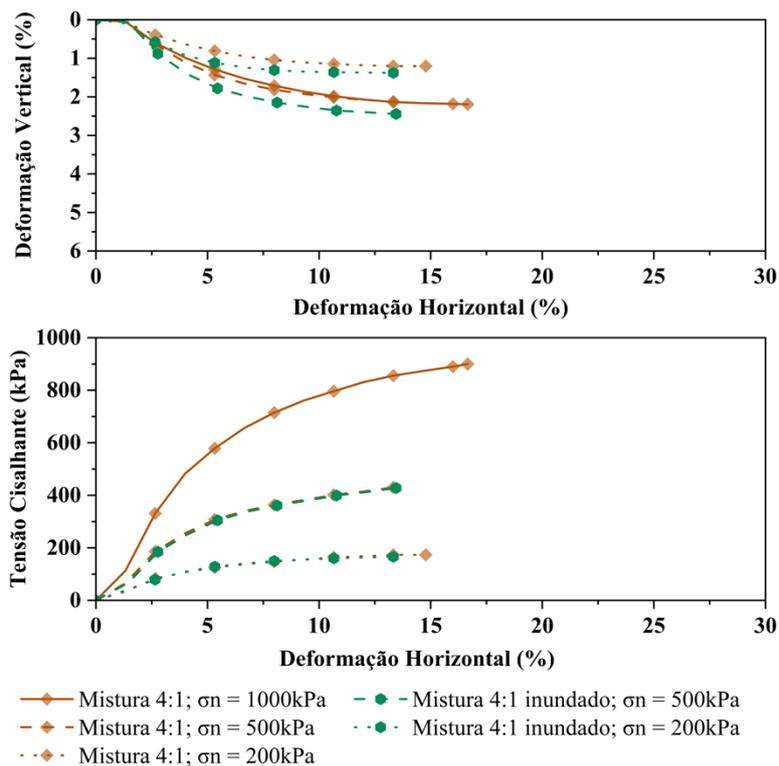


**Figura 4.55 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizadas na lama (*mud01*) de carvão com diferentes dimensões da caixa de cisalhamento.**

O gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal revela que podem haver maiores deformações verticais para dimensões maiores da caixa de cisalhamento. No entanto, é importante observar que, no ensaio considerando uma tensão normal de 100 kPa, a deformação vertical foi significativamente maior do que o esperado.

Foram realizados ensaios considerando uma razão de mistura de 4:1 para as amostras, as quais foram preparadas com *mud01* com teor de umidade de 80%, conforme definido como a razão de mistura ideal ( $R_{oi}$ ), ilustrado na Figura 4.52. O principal objetivo desses ensaios foi possibilitar uma comparação direta da resistência ao cisalhamento destas misturas no  $R_{oi}$  com amostras preparadas em um teor de umidade natural (*in situ*).

Essa abordagem foi motivada pelas disparidades substanciais observadas nas propriedades físicas e na degradação do material durante os processos de peneiramento com teor de umidade natural e após saturado.



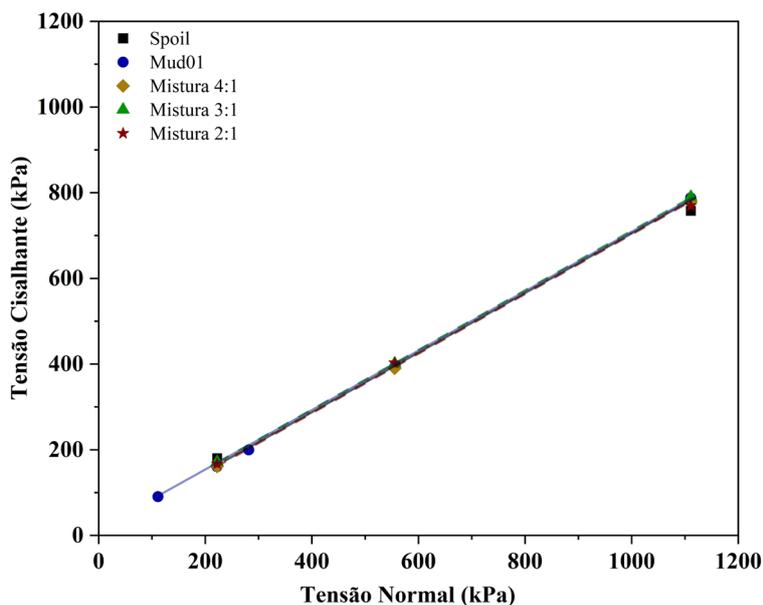
**Figura 4.56 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizadas nas misturas 4:1 na umidade natural dos materiais de carvão e com 80% de teor de umidade (razão ótima).**

É perceptível que as curvas exibem uma tendência semelhante quando submetidas às tensões normais analisadas, de 200 e 500 kPa. Uma observação importante é que não houve alteração no comportamento para as duas condições, mesmo ao considerar um teor de umidade mais elevado ( $R_{ot}$ ), apesar das expectativas com base nas características das curvas granulométricas, que sugeriam uma maior degradação dos materiais nessas condições. Portanto, nota-se que o aumento do teor de umidade não resultou em mudanças significativas no comportamento mecânico do material durante o ensaio de cisalhamento direto.

É possível que ensaios de cisalhamento direto inundados por 24 horas possam apresentar padrões diferentes. No entanto, é importante observar que tais ensaios não foram conduzidos nas misturas.

A Figura 4.57 apresenta as envoltórias geradas para determinação dos parâmetros de resistência para as misturas entre *spoil* e *mud01*. Devido ao comportamento de endurecimento por deformação exibido pelo *spoil* e pelas misturas, não foram observados valores de máxima tensão de resistência ao cisalhamento distintos e bem definidos em nenhuma das envoltórias plotadas. Conseqüentemente, os valores de tensão resistência ao cisalhamento foram avaliados em uma deformação horizontal padronizada de 10% para todos os ensaios conduzidos. Além

disso, é importante mencionar que esse cálculo considerou correções de área tanto para as tensões normais quanto para as tensões cisalhantes.



**Figura 4.57 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para os materiais isolados e misturas dos materiais de carvão.**

Os resultados da análise, incluindo os interceptos coesivos e os ângulos de atrito interno para os materiais, estão resumidos na Tabela 4.18.

**Tabela 4.18– Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto dos materiais de carvão.**

Material	Ângulo de Atrito (°)	Intercepto Coesivo (kPa)
<i>Mud01</i> (60x60mm)	35,2	3
<i>Spoil</i> (150x150mm)	35	7
Mistura 4:1 (150x150mm)	35	6
Mistura 3:1 (150x150mm)	35	6
Mistura 2:1 (150x150mm)	35	6

Observa-se que todos os materiais considerados exibem ângulos de atrito e intercepto coesivo semelhantes, apresentando uma variação mínima entre os valores obtidos. No entanto, é importante destacar que esses resultados foram obtidos ao analisar as tensões cisalhantes sob 10% de deformação horizontal. No caso da utilização das tensões cisalhantes máximas, tem-se

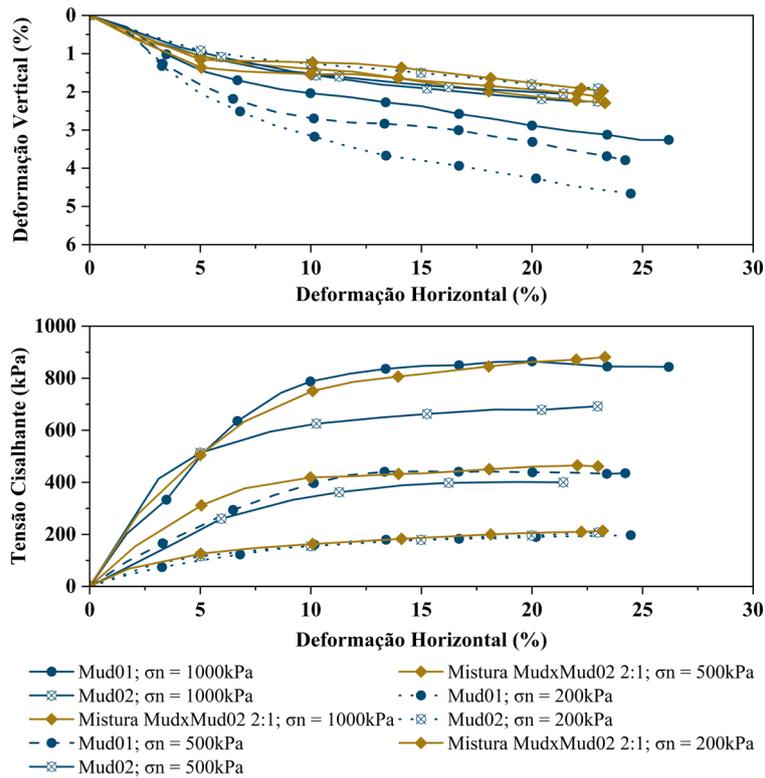
que a distinção entre os parâmetros de resistência seria mais evidente, como evidenciado na Tabela 4.19, porém os resultados nessa análise podem ser tendenciosos e não representativos, visto que os materiais exibem comportamento *strain-hardening*. Portanto, apesar de apresentarem um ângulo de atrito similar, observa-se que os interceptos coesivos do *mud01* são menores, indicando que as misturas são predominantemente influenciadas pelo *spoil*.

**Tabela 4.19 - Parâmetros de resistência dos materiais de carvão avaliando tensão cisalhante máxima.**

<b>Material</b>	<b>Ângulo de Atrito (°)</b>	<b>Intercepto Coesivo (kPa)</b>
<i>Mud01</i> (60x60mm)	34,2	15
<i>Spoil</i> (150x150mm)	36	44
Mistura 4:1 (150x150mm)	36	48
Mistura 3:1 (150x150mm)	36	49
Mistura 2:1 (150x150mm)	36	46

Reconhecendo as similaridades nos parâmetros entre o *spoil* e o *mud01*, um segundo tipo de lama de estéril foi ensaiada. Essa segunda amostra, denominada *mud02*, possui uma fração granulométrica com maior quantidade de partículas finas, logo foi comparado o desempenho do *mud01* e *mud02* e realizadas misturas compostas por ambos os tipos material. Essa escolha buscou explorar a possibilidade de aprimoramento da resistência ao cisalhamento misturando as variedades de lamas mais grossa e mais fina.

Os resultados dos ensaios realizados no *mud01*, *mud02* e nas misturas desses dois tipos de lamas são apresentados na Figura 4.58.

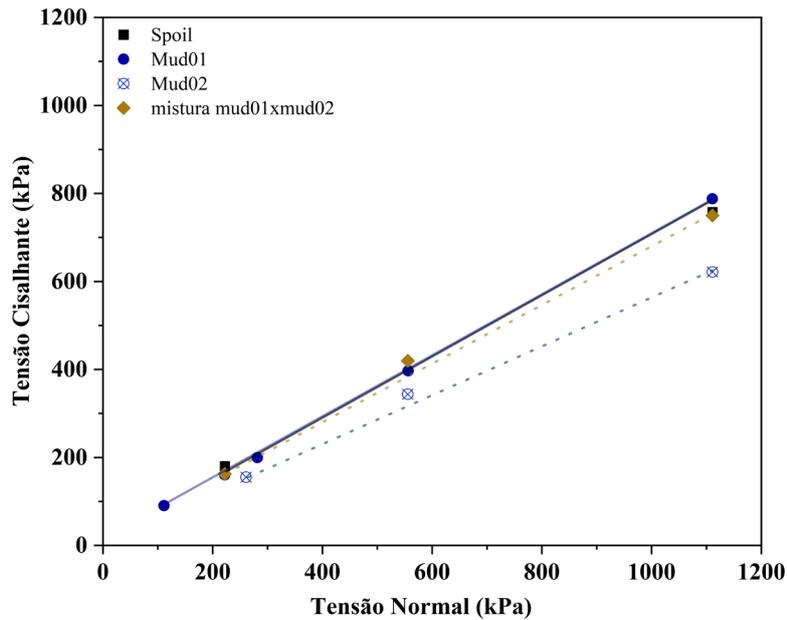


**Figura 4.58 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizadas para os materiais isolados e misturas entre lamas de carvão.**

Embora ambos os materiais tenham apresentado tensões de cisalhamento máximas similares sob tensões normais de até 200 kPa, fica evidente que para tensões normais mais altas o *mud02* exibe tensões de cisalhamento máximas significativamente menores, indicando uma resistência ao cisalhamento inferior. Além disso, foi observado um aumento substancial nos parâmetros de resistência do *mud02* quando misturado com o *mud01*.

Pelo gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal observa-se que as misturas e o *mud02* têm praticamente a mesma tendência com relação às deformações verticais, o que implica a dominância do *mud02* nesse comportamento.

A Figura 4.59 mostra os parâmetros de resistência, seguindo os mesmos critérios definidos anteriormente. Os resultados dos interceptos coesivos e dos ângulos de atrito interno para os materiais estão apresentados na Tabela 4.20.



**Figura 4.59 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para os materiais isolados e misturas das lamina de carvão.**

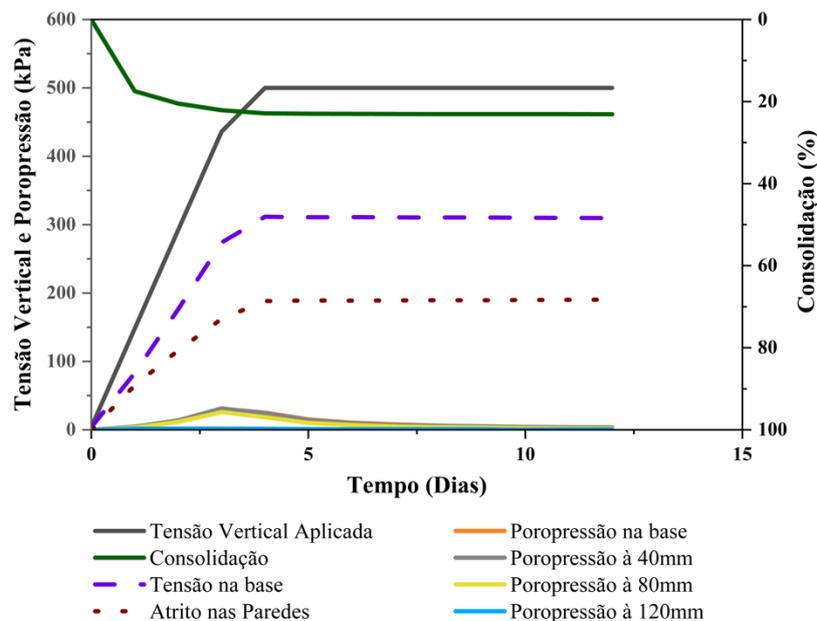
**Tabela 4.20– Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto das lamina de carvão.**

Material	Ângulo de Atrito (°)	Intercepto Coesivo (kPa)
<i>Mud01</i> (60x60mm)	35	3
<i>Spoil</i> (150x150mm)	34.6	7
<i>Mud02</i> (60x60mm)	29	8
Mistura 2:1 (60x60mm)	35	6

Com base nos parâmetros de resistência, observa-se a dominância da lama com frações mais grosseiras na mistura, assim como observado nas misturas entre lamina e estéril não alterado. Nesse caso, tem-se um aumento do ângulo de atrito na mistura significativo com relação à lama mais alterada.

No ensaio de consolidômetro de grande dimensão, foi considerada uma proporção de mistura de 4:1. Diante da considerável variabilidade no teor de umidade na mina, onde o material pode variar de condições totalmente saturadas durante a estação chuvosa a condições não saturadas e secas em outros períodos, optou-se por utilizar o teor de umidade para a preparação das amostras com base na razão de mistura ótima ( $R_{ot}$ ).

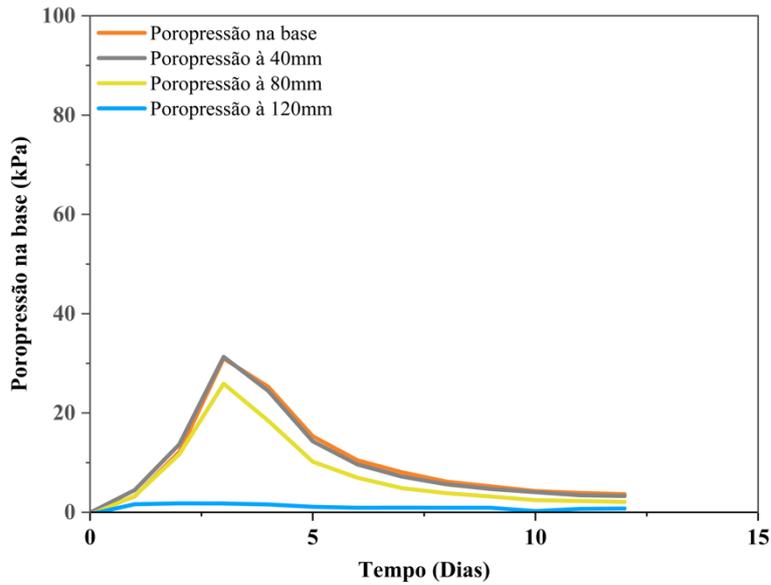
Os resultados dos ensaios, incluindo tensões verticais aplicadas no corpo de prova, consolidação, atrito nas paredes e poropressões, são representados graficamente na Figura 4.60. Percebe-se que a maior parte da consolidação do corpo de prova ocorreu dentro do primeiro dia de ensaio, com um valor máximo ocorrendo logo após a aplicação da carga máxima. Apesar do uso de vaselina nas paredes do cilindro, foi calculado um atrito significativo nas paredes, atingindo um valor máximo de 190 kPa.



**Figura 4.60 – Resultados do ensaio de adensamento para misturas de 4:1 na razão ótima no consolidômetro de lama em larga escala - tensões, poropressão e consolidação.**

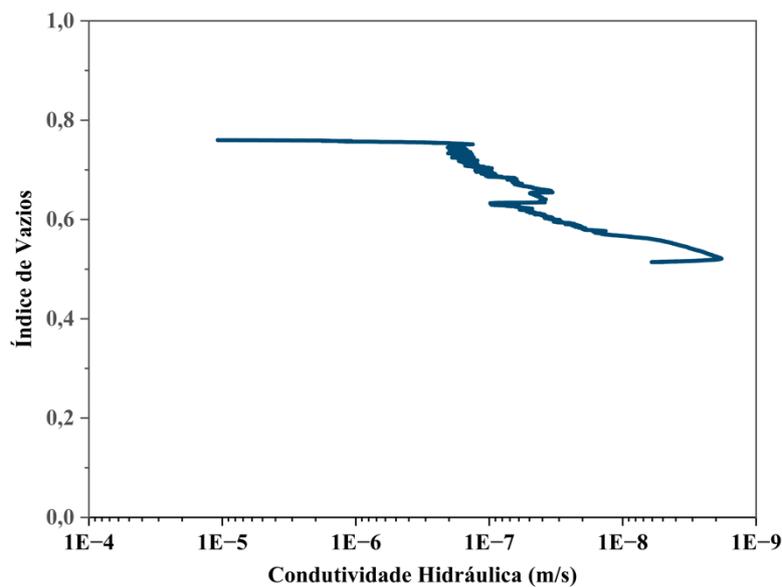
As poropressões foram registradas em diferentes alturas: 120, 80 e 40 mm acima da base, assim como na base da amostra. Essas poropressões aumentaram proporcionalmente ao incremento da tensão vertical aplicada, resultando em uma subsequente redução da poropressão após 3,5 dias de carregamento.

De modo a facilitar a clareza na visualização dos dados, plotou-se os resultados de poropressão para diferentes alturas do cilindro (Fig. 4.61). Torna-se evidente que tanto as poropressões na base quanto aquelas a uma altura de 40 mm exibem os valores mais elevados, seguindo uma tendência consistente de dissipação. Essa observação sugere que os excessos de poropressões se dissipam efetivamente ao longo do tempo, indicando condições geotécnicas favoráveis.



**Figura 4.61 – Ampliação das curvas de excesso de poropressão da mistura de 4:1 na razão ótima.**

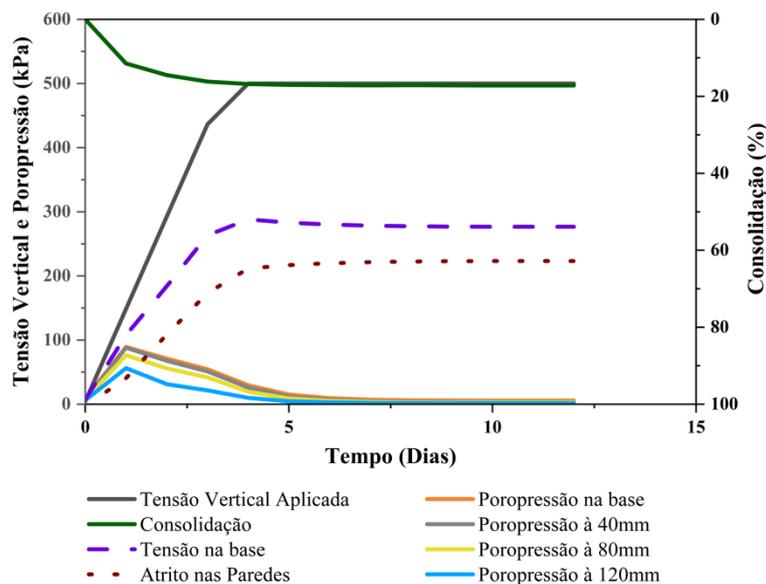
A condutividade hidráulica para a mistura foi calculada usando a Equação 3.4 (Fig. 4.62). No entanto, devido à granulometria da mistura e ao teor de umidade, a poropressão inicial foi negativa, indicando um efeito de sucção dentro da amostra. Conseqüentemente, não foi possível determinar a condutividade hidráulica para índices de vazios variando de 0,97 a 0,76. A condutividade hidráulica calculada ao final do ensaio foi de  $1,82E-09$  m/s.



**Figure 4.62 – Condutividade hidráulica para a mistura com  $R_{ot} = 4$ .**

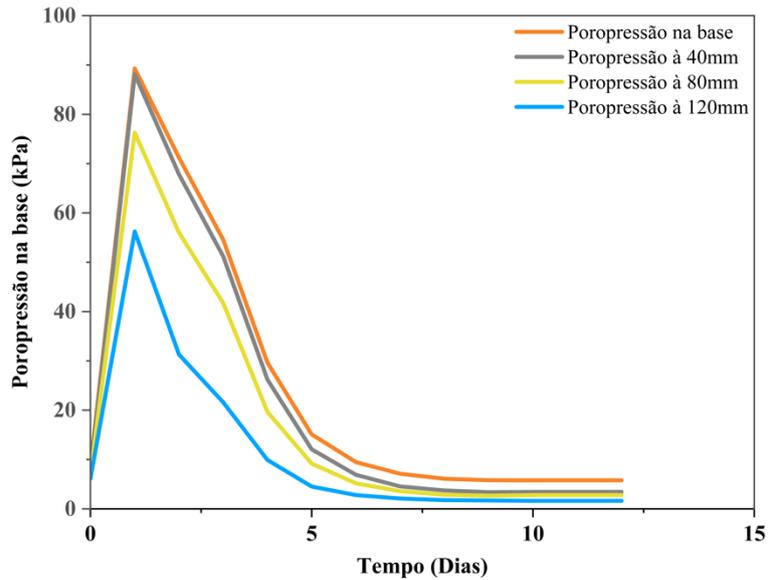
O ensaio de consolidômetro de grande dimensão também foi realizado para uma razão de mistura de 2:1 em condições totalmente saturadas. Observa-se uma menor consolidação nessa mistura em comparação com a razão de 4:1 (Fig. 4.63). No entanto, é importante ressaltar que essa menor consolidação pode ser atribuída ao atrito nas paredes do cilindro, devido a uma menor lubrificação, ou ao tamanho das partículas em comparação com a proporção de mistura de 4:1, que são menores. As partículas menores podem sofrer menos quebra ou ter maior dificuldade em se rearranjar.

Devido ao maior teor de umidade na mistura, foi possível observar um aumento na poropressão de aproximadamente 60 kPa em relação à mistura com  $R_{ot} = 4$  (Fig. 4.63). Ao contrário da mistura com  $R_{ot} = 4$ , até mesmo o transdutor de poropressão localizado a 120 mm acima da base registrou valores positivos significativos desse parâmetro. No entanto, há uma diminuição na poropressão após 1,3 dias de carregamento. Isso sugere que a poropressão está sendo dissipada ao longo do tempo, possivelmente devido à compactação e rearranjo das partículas no material.



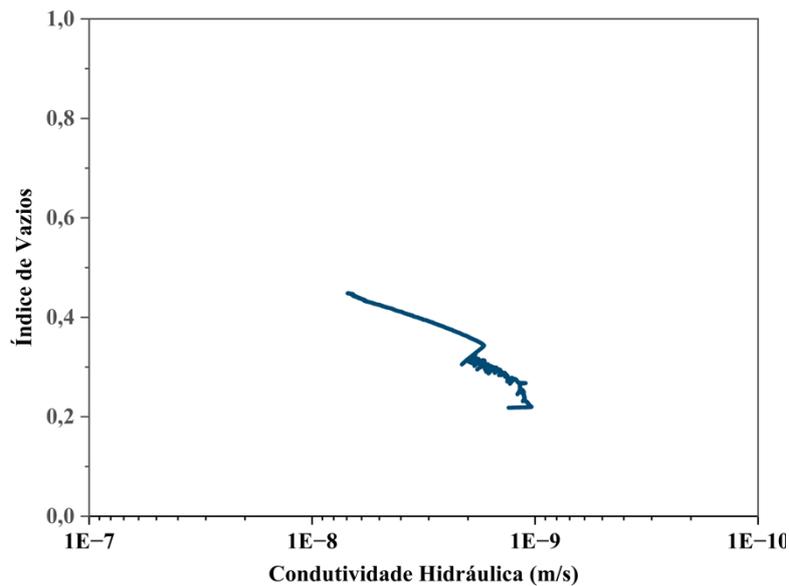
**Figura 4.63 – Resultados do ensaio de adensamento para misturas de 2:1 na razão ótima no consolidômetro de lama em larga escala - tensões, poropressão e consolidação.**

A representação das poropressões para diferentes alturas do cilindro pode ser vista na Figura 4.64.



**Figura 4.64 – Ampliação das curvas de excesso de poropressão para misturas 2:1 na razão ótima.**

A condutividade hidráulica relacionada ao índice de vazios é representada na Figura 4.65. Como resultado da razão de mistura seca de 2:1, fica evidente que os intervalos de condutividade hidráulica diminuíram em comparação com a mistura com  $R_{ot} = 4$ . Neste caso, o valor calculado ao final do ensaio foi de  $1,03E-09$  m/s. Essa análise destaca a influência significativa das partículas mais finas dentro dessa mistura na condutividade hidráulica, sugerindo sua dominância neste cenário específico.



**Figure 4.65 – Condutividade hidráulica para a mistura com  $R = 2$ .**

Os resultados das análises, tanto mecânicas quanto hidráulicas, apontam para a viabilidade da utilização de misturas como uma alternativa mais favorável em termos de critérios de disposição. A combinação tanto de diferentes tipos de lama quanto de lama com o *spoil* pode resultar em melhorias nas propriedades geotécnicas dos materiais mais alterados, podendo elevar a estabilidade das estruturas de disposição na mineração de carvão. Dadas as atuais preocupações relacionadas à gestão adequada das pilhas de *spoil* e aos riscos de instabilidades e deslizamentos associados à presença de materiais alterados, como as lamas, a consideração de realização de misturas para co-disposição pode ser vista como uma opção promissora.

Este método, sobretudo, demonstrou um comportamento mecânico predominantemente influenciado pelo *spoil* ou pelo material mais grosseiro, alinhando-se à tendência geral desses materiais. Além disso, a geração de poropressões, mesmo em misturas com alto teor de umidade, tende a se dissipar em pouco tempo. Adicionalmente, a condutividade hidráulica das misturas tende a reduzir para valores da ordem de  $10E-9$  m/s após a consolidação, indicando uma permeabilidade baixa, o que contribui para a estabilidade e segurança das pilhas.

Ressalta-se a importância da avaliação da compactação desses materiais nas pilhas, como evidenciado nas análises das misturas para estéril e rejeito em uma mineração do Brasil, onde amostras mais compactadas apresentaram um aumento significativo na resistência, buscando assim minimizar os impactos ambientais e elevando a segurança das operações.

### **4.3. CO-DISPOSIÇÃO DE ESTÉREIS E LAMAS DE OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO DE FOSFATO DA AUSTRÁLIA.**

No caso dos estéreis e lamas provenientes da mineração e processamento de fosfato na Austrália, foi conduzida uma análise simplificada. Foram realizados apenas ensaios básicos de caracterização e análises mecânicas, empregando ensaios de cisalhamento direto.

#### **4.3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (*SHALE* E *SLIME*)**

Na Tabela 4.21, são resumidos os resultados dos ensaios de caracterização das amostras de estéril, denominadas de *shale*, e das lamas, denominadas de *slimes*.

Foram analisadas duas amostras de *shale* para a obtenção da massa específica dos grãos e do índice de vazios máximo. A amostra designada como *shale01* foi peneirada considerando a fração granulométrica de 19 mm, enquanto que a amostra denominada *shale02* foi selecionada com base em uma fração granulométrica peneirada abaixo de 6,35 mm. O objetivo foi avaliar

possíveis alterações na massa específica dos grãos e índices de vazio máximo devido a variações nas frações granulométricas analisadas.

Utilizando o picnômetro automático, obteve-se um  $\rho_s$  de 3,0 g/cm<sup>3</sup> para a lama (*slime*), 2,67 g/cm<sup>3</sup> para o *shale01* e de 2,68 g/cm<sup>3</sup> para o *shale02*. O teor de umidade apresentado refere-se ao teor de umidade natural (*in situ*).

Percebe-se que mesmo utilizando frações granulométricas distintas para o *shale*, não houve alterações significativas no índice de vazios máximo e massa específica do estéril. Portanto, considerou-se o peneiramento das frações granulométricas para realização dos ensaios, adequando o tamanho máximo dos grãos às normas e às dimensões do equipamento utilizado.

**Tabela 4.21 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.**

Amostras	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de umidade natural (%)	Índice de vazios máximo ( $e_{max}$ )
<i>Slimes</i>	3.0	35.04	-
<i>Shale01</i>	2.67	1.98	1.66
<i>Shale02</i>	2.68	1.98	1.69

Embora não tenham sido conduzidos ensaios específicos de distribuição granulométrica nos materiais em análise, uma relação de sua composição foi providenciada por especialistas que trabalharam com o material em questão. No contexto das amostras de *shale*, foi informado que uma proporção substancial do material é constituída por brita (> 2mm), pedregulho (> 6mm) e finos (< 75 $\mu$ m). Já no que concerne ao *slime*, os dados quantitativos referentes à distribuição granulométrica foram catalogados e estão disponibilizados na Tabela 4.22, oferecendo uma descrição detalhada das proporções individuais dos componentes do material.

**Tabela 4.22 – Distribuição granulométrica para as amostras de lama (*slimes*).**

Tamanho do material	<i>Slime 01</i>	<i>Slime 02</i>	<i>Slime 03</i>
	Porcentagem (%)	Porcentagem (%)	Porcentagem (%)
Pedregulhos (>6cm)	<1	<1	<1
Brita (>2mm)	<1	<1	<1
Areia (0.06-2.00 mm)	4	14	12
Silte (2-60 µm)	67	53	54
Argila (<2 µm)	28	32	33
Finos (<75 µm)	<1	<1	<1

Na Tabela 4.23 tem-se um resumo dos dados dos índices de consistência das amostras de *slime*, limites de liquidez (WL), plasticidade (WP) e contração (SL). Observa-se limites de liquidez bastante elevados para a amostra de *slime01*, com valores de 56%.

**Tabela 4.23 – Limites de consistência para as amostras de lama (*slimes*).**

Amostras	SL (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)
<i>Slime01</i>	10,5	56	22	34
<i>Slime02</i>	7,5	36	21	15
<i>Slime03</i>	9	42	22	20

#### 4.3.2. RAZÃO DA MISTURA (*SHALE E SLIME*)

A razão ótima da mistura ( $R_{ot}$ ) foi obtida utilizando as relações de massa e volume para o *shale* e *slime*, de acordo com a Equação 2.1, com base nas considerações dos resultados de caracterização. Assim como realizado anteriormente para os outros materiais, foram geradas as curvas de razão ótima da mistura em relação ao teor de sólidos das lamas, conforme ilustrado na Figura 4.66.

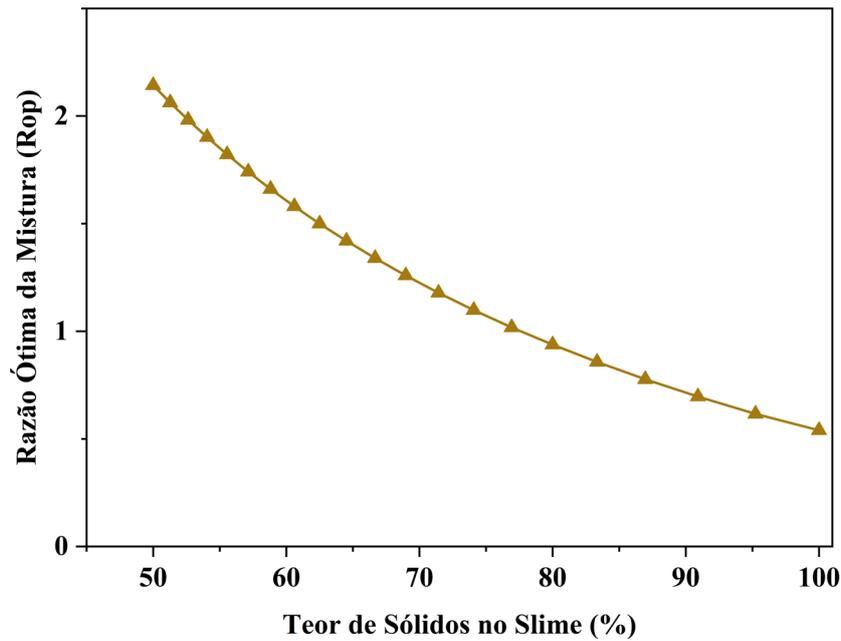


Figura 4.66 – Razão da mistura ótima ( $R_{ot}$ ) vs teor de sólidos nas lamas de fosfato.

No caso dos materiais provenientes da mineração de fosfato na Austrália, tem-se que o  $R_{ot}$  da mistura obtida é de 1,1:1, considerando um teor de umidade das lamas de 35%, correspondente a um teor de sólidos de 74%.

#### 4.3.3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO *SHALE* E *SLIME* E MISTURAS

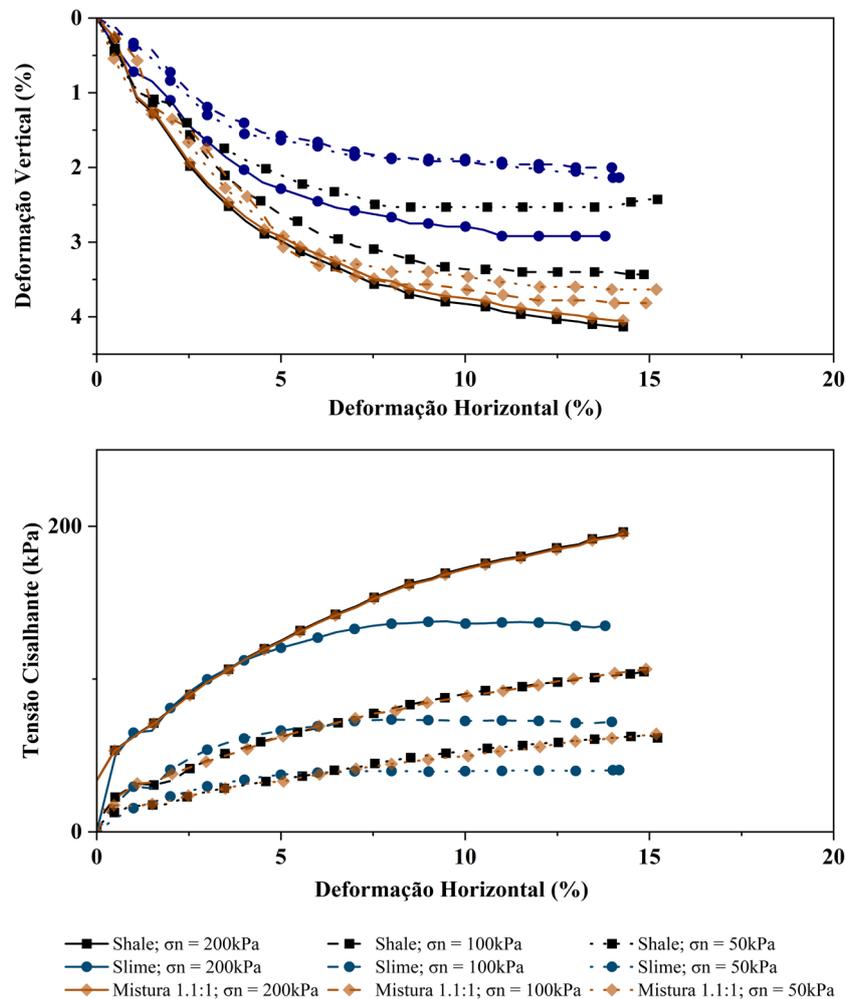
Para os ensaios de cisalhamento direto, os corpos de prova de *shale*, *slimes* e misturas foram moldados sem compactação, soltos, e na umidade natural, considerando análises nas dimensões de 100 mm x 100 mm x 30 mm. Todos os materiais foram ensaiados sob um mínimo de três tensões normais distintas: 50, 100 e 200 kPa.

Os corpos de prova cisalhados de todos os materiais podem ser observados na Figura 4.67.



Figura 4.67 – Amostras cisalhadas de resíduos de fosfato: a) *Slime*; b) *Shale*; c) Mistura 1,1:1.

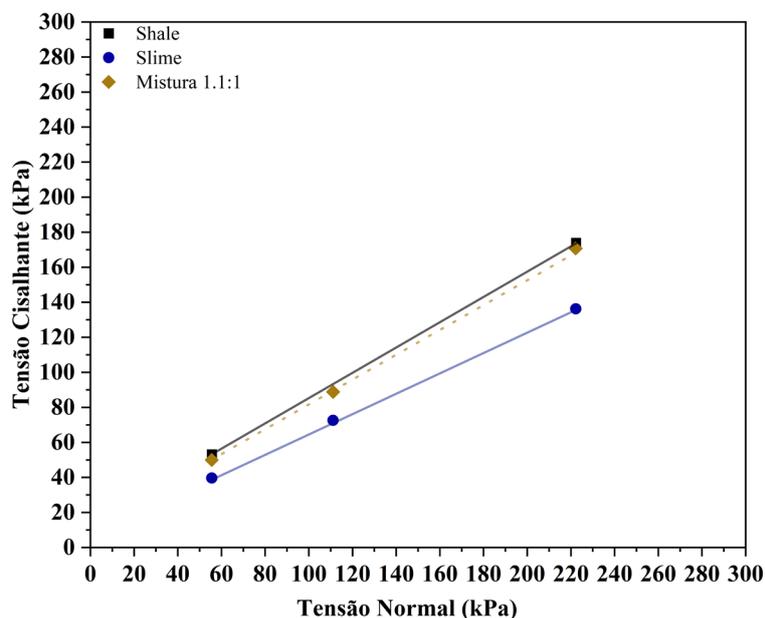
Na Figura 4.68, são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados no material proveniente da mineradora de fosfato, tanto de forma não misturada quanto em misturas na relação de um para um (*R<sub>ot</sub>*). Os gráficos ilustram as tensões cisalhantes e deformações verticais em relações à deformação horizontal.



**Figura 4.68 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizadas para os materiais isolados e misturas para os resíduos de fosfato.**

Conforme observado em análises anteriores, a mistura entre o *shale* e as *slimes* na proporção ótima resulta em um material cujo comportamento é predominantemente influenciado pelo *shale* ou pelos materiais mais grosseiros. Uma observação relevante é que o *slime* apresenta valores de resistência ao cisalhamento semelhante ao *shale* para deformações horizontais menores, porém atinge um máximo de resistência para deformações maiores. Nota-se que os valores de resistência ao cisalhamento máximos do *slime* são consideravelmente inferiores aos observados para o *shale* e as misturas. No que diz respeito às deformações verticais, observa-se que as misturas apresentam valores maiores do que o *slime*.

A Figura 4.69 exibe as envoltórias de resistência para os materiais ensaiados. Os resultados dos interceptos coesivos e dos ângulos de atrito interno estão apresentados na Tabela 4.24.



**Figura 4.69 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto para os materiais isolados e misturas dos resíduos de fosfato.**

**Tabela 4.24– Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto dos resíduos de fosfato.**

Material	Ângulo de Atrito (°)	Intercepto Coesivo (kPa)
<i>Slimes</i>	30,2	6,3
<i>Shale</i>	35,8	13,0
Mistura 1.1:1	35.4	10,8

Os resultados das análises de cisalhamento direto corroboram com as observações anteriores, evidenciando a predominância do comportamento do estéril nas misturas com a razão ótima da mistura. Vale ressaltar que, embora os materiais investigados tanto neste estudo quanto no primeiro estudo provenham de depósitos de fosfato, tais depósitos apresentam distintas origens geológicas, o que resulta em diferentes características microestruturais e químicas dos materiais. Portanto, seria prudente realizar ensaios mais aprofundados para identificar possíveis disparidades nos comportamentos dos materiais em questão.

No entanto, diante das demandas atuais relacionadas à disposição de resíduos de mineração, é notável que houve um aumento na resistência dos materiais mais finos e alterados quando misturados. Isso ressalta a viabilidade da técnica de co-disposição como uma estratégia eficaz para a gestão mais eficiente desses resíduos.

## 5. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o comportamento mecânico e hidráulico de misturas compostas por resíduos de mineração, incluindo estéril, rejeitos e lamas, com foco na técnica de co-disposição desses materiais. Avaliou-se resíduos provenientes de três diferentes fontes: uma mina de fosfato no Brasil, uma mina de carvão mineral na Austrália e outra mina de fosfato na Austrália.

Os resultados obtidos a partir da caracterização geotécnica, química e microestrutural revelaram que os estéreis provenientes dessa mina apresentam características distintas daquelas normalmente associadas aos materiais estéreis utilizados para co-disposição, os quais geralmente são materiais rochosos de maior granulometria.

Os estéreis foram identificados como rochas altamente alteradas, com significativa proporção de finos, sugerindo uma organização estrutural dos grãos caracterizada pela aglomeração de grãos menores aderidos à superfície de partículas maiores, além da presença de argilominerais. Especificamente, observou-se que a relação entre o tamanho médio dos grãos do estéril ( $D_{50\text{estéril}}$ ) e o tamanho médio dos grãos do rejeito ( $D_{50\text{rejeito}}$ ) foi de 7,5, enquanto em materiais de estéril, usados para co-disposição em outros depósitos minerais, essa relação tende a ser igual ou superior a 20.

As características atípicas observadas no estéril durante o primeiro estudo levantaram a possibilidade de variações nas propriedades das misturas de co-disposição, incluindo a potencial desagregação de grãos finos do estéril quando expostos à água de processo ou a agentes químicos que possam influenciar nas interações entre as partículas.

Os estudos conduzidos com amostras de materiais provenientes de minas na Austrália representaram um avanço significativo no entendimento do comportamento mecânico e hidráulico desses materiais em diferentes proporções de mistura. Assim, além das misturas entre estéril com características granulométricas de solo e rejeitos arenosos não plásticos de uma mineradora no Brasil, foram consideradas misturas entre materiais com diversas características geotécnicas da Austrália. Isso incluiu a combinação de estéril de rocha alterada de granulometria grosseira com lamas de mineração compostas predominantemente por finos, como argilas e siltes de alta plasticidade, bem como a mistura entre estéril e materiais alterados de granulometria granular. Esse enfoque proporcionou uma compreensão mais abrangente do comportamento desses materiais em condições variadas de co-disposição.

Diferentes Razões Ótimas da Mistura ( $R_{ot}$ ) foram alcançadas entre os materiais analisados, expressas como uma relação de massa seca, variando desde razões de 4:1 até 1:1. Além disso,

foram considerados ensaios em corpos de prova com proporções de misturas diferentes da ótima. Os resultados revelaram um padrão de comportamento mecânico predominante, no qual o estéril ou os materiais de granulometria mais grossa exerceram uma influência dominante sobre os materiais mais finos, como os rejeitos e lamas. Essa tendência foi observada de forma consistente em todos os ensaios de cisalhamento direto e triaxial na condição drenada, independentemente das dimensões das partículas ou das configurações da caixa de cisalhamento direto utilizada nos ensaios.

Para as amostras provenientes de uma mineração de fosfato no Brasil, os ensaios triaxiais na condição não drenada revelaram um comportamento peculiar. O rejeito apresentou tensões de cisalhamento superiores em comparação com o estéril e as misturas, em contraste com os resultados dos outros ensaios. Esse efeito é provavelmente atribuído à poropressão negativa e sucção matricial, que contribuem para a coesão aparente nos ensaios não drenados, aumentando a resistência ao cisalhamento e a capacidade de suportar cargas. Esse fenômeno explica o comportamento plástico observado, sem a formação de um plano de ruptura evidente, acompanhado de aumento diametral do corpo de prova.

Quanto aos parâmetros geotécnicos desses materiais, foi observado que o intercepto coesivo pode ser influenciado exclusivamente pelo efeito de sucção, resultando em uma coesão aparente nos materiais em condições não saturadas, tendo em vista que a coesão verdadeira é nula. Essa observação é corroborada pelos ensaios de cisalhamento direto em condições inundadas e pela avaliação do intercepto coesivo dos materiais na Linha de Estado Crítico para os ensaios triaxiais.

Concluiu-se que as condições de preparação dos corpos de prova, incluindo compactação e teor de umidade, exercem uma influência significativa nos parâmetros de resistência dos rejeitos, enquanto as misturas e os estéreis mostram-se menos sensíveis a essas condições. Ao comparar os resultados dos ensaios de cisalhamento direto e triaxiais realizados em diferentes condições de compactação, observou-se que os estéreis e as misturas apresentam ângulos de atrito de aproximadamente  $40^\circ$  nas distintas condições avaliadas. Por outro lado, o rejeito exibe uma variação significativa nesse parâmetro, com uma diferença de cerca de  $8^\circ$  entre as condições de compactação. No entanto, em condições de preparação dos corpos de prova semelhantes, os rejeitos apresentam ângulos de atrito consistentes, em torno de  $31^\circ$ . Apesar da menor sensibilidade do estéril e das misturas à compactação, é essencial garantir a adequação dessa em pilhas de co-disposição, pois a compactação ideal contribui para a redução volumétrica das estruturas e para a melhoria nas propriedades geotécnicas.

Para os materiais provenientes de uma mineração de fosfato no Brasil, observou-se um comportamento hidráulico não convencional em relação ao esperado para os materiais típicos de co-disposição, compostos por estéril rochoso grosseiro e rejeitos finos. Nesse caso específico, o estéril demonstrou uma influência dominante na permeabilidade das misturas, visto que este material possui uma granulometria bem graduada, com presença de finos. Assim, o estéril assumiu um papel predominante tanto no comportamento mecânico quanto hidráulico das misturas, independentemente das razões de mistura testadas.

Os ensaios conduzidos em um consolidômetro de grandes dimensões para os materiais provenientes de uma mineração de carvão mineral na Austrália permitiram o aprofundamento do entendimento das propriedades hidráulicas das misturas. Essa abordagem permitiu a aplicação controlada de carga e a monitorização da resposta dos corpos de prova em relação à geração e dissipação das poropressões ao longo do tempo. Observou-se que, mesmo em misturas com elevado teor de umidade, houve geração de poropressões, as quais, no entanto, tenderam a se dissipar em um curto intervalo de tempo. Além disso, verificou-se que a condutividade hidráulica das misturas tendeu a diminuir, atingindo valores reduzidos após a consolidação.

A realização de simulações numéricas para uma pilha hipotética de co-disposição de estéril e rejeito também permitiu uma avaliação da capacidade de drenagem intrínseca de determinados materiais misturados. Para tanto, foi adotado o modelo constitutivo Norsand, o qual demonstrou uma concordância satisfatória entre os dados experimentais e os resultados simulados para ambos os tipos de ensaio triaxial, tanto nas condições drenadas quanto nas não drenadas.

A simulação numérica de uma pilha hipotética de co-disposição também investigou o impacto da velocidade de elevação na geração das poropressões na pilha, considerando diferentes taxas de construção: 155 cm/dia, 10 cm/dia, 5 cm/dia e 2,5 cm/dia. Os resultados da simulação indicaram que, mesmo com a utilização de uma elevada velocidade de construção, não houve geração de excesso de poropressão. Adicionalmente, foram realizadas análises simplificadas de estabilidade da pilha hipotética de co-disposição simulada, as quais demonstraram que o fator de segurança resultante foi superior ao fator de segurança mínimo exigido pelas normas aplicáveis, alcançando valores de  $FS = 2,3$ .

Apesar dos resultados favoráveis em termos de dissipação de poropressões e drenabilidade intrínseca do material de co-disposição, é fundamental reconhecer a existência de diversas abordagens e metodologias para a definição dessas modelagens numéricas. Portanto, uma

análise cuidadosa e criteriosa das metodologias adotadas, levando em consideração o material utilizado e as condições específicas de cada projeto, torna-se imprescindível. Nesse sentido, é importante a instrumentação de pilhas, cujos resultados do monitoramento corroborem para a validação da modelagem numérica.

Ao considerar as implicações práticas da disposição de misturas em pilhas de co-disposição, a combinação de diferentes materiais, como rejeitos e estéreis, pode resultar em melhorias significativas nas propriedades geotécnicas em comparação com materiais mais finos e alterados. Notavelmente, para os materiais provenientes de uma mineração de fosfato no Brasil, além da obtenção de razões ótimas de misturas condizentes com a proporção de resíduos gerados no empreendimento mineiro, observou-se um comportamento mecânico e hidráulico predominantemente influenciado pelos materiais estéreis de maior granulometria. Os resultados derivados de análises mecânicas, hidráulicas e numéricas realizadas nestes materiais evidenciam essa conclusão, sugerindo que a prática da co-disposição pode ser uma abordagem promissora para abordar os desafios enfrentados na gestão de resíduos na indústria de mineração.

É importante ressaltar que há uma grande variabilidade geológica e geotécnica dos resíduos nas minerações, visto que cada jazida mineral é única, assim, resíduos de jazidas de um mesmo bem mineral podem apresentar comportamentos geotécnicos completamente diferentes. Logo, deve-se reconhecer que não existe um padrão uniforme para o comportamento dos resíduos. Para cada empreendimento de mineração é essencial que seja realizada uma investigação geotécnica abrangente dos materiais que permita avaliar a viabilidade da aplicação da técnica de co-disposição em detrimento de outra solução de engenharia.

## **5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

De forma a complementar os estudos até agora realizados e aprimorar o entendimento sobre a co-disposição de resíduos na mineração, as sugestões para pesquisas e trabalhos futuros são:

- Investigar os efeitos da variação das proporções de estéril e rejeito nas propriedades geotécnicas das misturas resultantes, considerando uma ampla gama de razões de mistura para refletir diferentes práticas industriais;
- Avaliar o impacto da granulometria do estéril e da mistura na estabilidade e no comportamento mecânico e hidráulico das pilhas de co-disposição, utilizando

equipamentos de maiores dimensões sem que seja necessário fazer a seleção granulométrica para adequar o tamanho dos grãos às dimensões dos equipamentos;

- Realizar estudos de campo para validar os resultados obtidos em laboratório e investigar o desempenho das estruturas de co-disposição em condições reais, levando em consideração os aspectos práticos e operacionais das instalações de mineração e os resultados de instrumentações instalados nas pilhas de co-disposição;
- Avaliar o impacto da utilização de água de processo nos estéreis. É importante explorar como a água de processo, comumente empregada no beneficiamento mineral, influencia as propriedades dos estéreis destinados à co-disposição. Isso inclui investigar possíveis alterações na curva granulométrica, comportamento mecânico e hidráulico das misturas;
- Investigar o comportamento das misturas sob diferentes condições de carregamento, incluindo ciclos de umedecimento e secagem, para entender como esses fatores podem influenciar a estabilidade e a durabilidade das estruturas de co-disposição ao longo do tempo;
- Avaliar o comportamento das misturas considerando tensões normais e de confinamento mais elevadas. Isso garantirá uma compreensão mais abrangente e precisa do comportamento das estruturas em condições que se assemelham mais às encontradas em escala real, onde futuramente serão construídas pilhas com dimensões de centenas de metros;
- Investigar por meio de modelos numéricos o comportamento das pilhas de co-disposição em condições operacionais diversas e otimizar o projeto e a gestão dessas estruturas.

## REFERÊNCIAS

- ABNT (2017a). Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. NBR 13.029, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 7p.
- ABNT (2017b). Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - requisitos. NBR 13.028. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 16p.
- ABNT (2021). Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. NBR 14545:2021. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABOUZEID, A-Z. M. (2008). Physical and thermal treatment of phosphate ores - An overview, *International Journal of Mineral Processing*, v.85, p. 59-84.
- ALVES, F. M. R. B. (2017). Suscetibilidade à liquefação de solos arenosos portugueses: caracterização in situ e em laboratório. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal. 144 p.
- ALVES, P. I. A. (2020). Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- ANM (2023). Report Trimestral. Descaracterização de Barragens a Montante. Dezembro 2023. Agência Nacional de Mineração. Brasília. 21p. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/report\\_trimestral\\_dez\\_2023\\_descaracterizacao\\_final.pdf](https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/report_trimestral_dez_2023_descaracterizacao_final.pdf). Acesso em: [15/02/2024].
- ANTONAKI, N. & ABDOUN, T. (2016). Centrifuge modeling of mine tailings and waste rock co-disposal, consolidation, and dynamic loading. *Geo-Chicago 2016*, G&P 270. Chicago. P. 245 – 254.
- ARAÚJO, P. N. G. (2022). Modelo Constitutivo Norsand Aplicado à Areia de Duna de Natal. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, RN.
- AS 1289.3.5.2 (2002), ‘Methods of testing soils for engineering purposes Soil classification tests - Determination of the soil particle density of combined soil fractions - Vacuum pycnometer method’, in *Standards Australia*, Sydney: Standards Australia Limited.
- AS 1289.6.6.1 (1998), ‘Methods of testing soils for engineering purposes - Soil strength and consolidation tests - Determination of the one-dimensional consolidation properties of a soil - Standard method’, in *Standards Australia*, Sydney: Standards Australia Limited.
- ASTM International. (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions (Tech. Rep. No. D3080). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2014). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer (Tech. Rep. No. D854-14). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2016). Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. (Tech. Rep. No. D5298-16). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2016). Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density (Tech. Rep. No. D4254-16). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2017a). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system) (Tech. Rep. No. D2487-17e1). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2017b). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils (Tech. Rep. No. D4318-17e1). West Conshohocken, PA.

- ASTM International. (2017c). Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis (Tech. Rep. No. D6913-17e1). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2021a). Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using sedimentation (hydrometer) analysis (Tech. Rep. No. D7928-21e1). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2021b). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (Tech. Rep. No. D698-12). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2021c). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading (Tech. Rep. No. D2435/D2435M-21). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2022). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (Tech. Rep. No. D2434-22). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- BAREITHER, C. A., GORAKHKI, J., SCALIA J. & JACOBS M. (2018). Compression Behaviour of Filtered Tailings and Waste Rock Mixtures: Geowaste. Tailings and Mine Waste 2018. Keystone, CO.
- BIOT, M. A. (1941). General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12, p. 155-164.
- BOBEI, D. C., LO, S. R., WANATOWSKI, D., GNANENDRAN, C. T., RAHMAN, M. M. (2009). Modified state parameter for characterizing static liquefaction of sand with fines. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(3).
- BROOKS, R. H., & COREY, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers*, Colorado State University, 3, 1-27.
- BURDEN, R. (2020). Using Co-Disposal Techniques to Achieve Stable “Dry-Stacked” Tailings: Geotechnical Properties of Blended Waste Rock and Tailings in Oil Sands and Metal Mining Doctoral dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.
- CARNEIRO, A. & FOURIE, A. B. (2018). A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia. *Paste 2018*. Australian Centre of Geomechanics, Perth. p. 439-454.
- CARNEIRO, J. J. V. (2021). Characterization and Behaviour of Iron Ore Tailings: The Effect of Compaction and Stresses. *Dissertação de mestrado*, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Viçosa, Minas Gerais.
- CASAGRANDE, A. (1936). Characteristic of cohesionless soils affecting the stability of slope and earth fill. *Journal of the Boston Society of Civil Engineering*.
- CASTILHO, B. de. M. (2017). Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da barragem do Germano. *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, NUGEO, Ouro Preto. 116 p.
- CASTILLO, R. N. B. (2019). Undrained shear behavior and critical state analysis of mixed mine waste rock and tailings. *MSc Thesis*. Department of Civil & Environmental Engineering, Colorado State University, Colorado, USA. 88 p.
- CASTRO, G. & POULOS, S.J. (1977). Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(GT6), 501-516.
- CASTRO, G. (1969). Liquefaction of sand. *Harvard Soil Mechanics Series 87*. Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- CAVALCANTE, A. L. B. & ZORNBERG, J. G. (2017). Efficient approach to solving transient unsaturated flow problems. I: Analytical solutions. *International Journal of Geomechanics*, 04017013.

- CHAVES, A.P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Flotação - O Estado da Arte no Brasil. São Paulo, Ed. Signus, 2006. v.4, p. 73-82.
- CUNHA, C. L. S. (2012). Estudo das características de compressibilidade unidimensional e plasticidade de misturas de argila e areia. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo.
- DANIEL, D. E. (1993). Geotechnical practice for waste disposal. Springer Science & Business Media. London, UK, 683 p.
- DARLING, P. (2011). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME). Mining Engineering Handbook. Third version. 1840 p.
- DAVIES, M. (2011). Dewatered tailings practice – trends and observations. Tailings and Mine Waste 10. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-61455-9.
- DAVISON, LR & ATKINSON, JH (1990), ‘Continuous loading oedometer testing of soils’, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, vol. 23, no. 4, pp. 347–355.
- EUROPEAN COMMISSION. (2009). Reference Document in Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. Publications Office of the European Union.
- FIGUEIREDO, M. M. (2007). Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, NUGEO, Ouro Preto. 100 p.
- FLSMIDTH (2019). Tailings management Sustainable and complete dewatering solutions. Minerals Technology Center FLSmidth and Goldcorp. Disponível em: <https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-solutions/2019/fls-tailings-management-brochure-web-20190503.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2024.
- FRASER, H. J. (1935). Experimental study of the porosity and permeability of clastic sediments. Journal of Geology, 43: 910–1010.
- FREIRE NETO, J. P. (2009). Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, NUGEO, Ouro Preto. 154 p.
- FURNAS, C. C. (1928). Relations between specific volume, voids, and size composition in systems of broken solids of mixed sizes. US Bureau of Mines, Report of Investigations 2894, Vol. 7, pp. 308–314.
- GARDNER, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil science, 85(4), 228-232.
- GHRABAGHI, M., IRANNAJAD, M., & NOAPARAST, M., (2010), “A review of the beneficiation of calcareous phosphate ores using organic acid leaching,” Hydrometallurgy, Vol. 103, No. 1, pp. 96–107.
- GORAKHKI, M. H., BAREITHER, C. A., SCALIA J. & JACOBS M. (2019). Hydraulic Conductivity and Soil Water Retention of Waste Rock and Tailings Mixtures. Geo-Congress 2019: Geoenvironmental Engineering and Sustainability, American Society of Civil Engineers Reston, VA.
- GUILLÉN, J. L. C. (2008). Modelagem elasto-plástica da liquefação dinâmica de solos. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rj.
- HABTE, K. & BOCKING, K. (2012). Co-disposal Practices in Mine Waste Management. Technical Memorandum, February 8, 2012.
- HAMADE, M. M. P. (2017). Undrained shear behavior of mixed mine waste rock and tailings. MSc Thesis. Department of Civil & Environmental Engineering, Colorado State University, Colorado, USA. 83 p.

- HARTMAN, H. L., & MUTMANSKY, J. M. (2002). *Introductory Mining Engineering* (2<sup>a</sup> ed.). John Wiley & Sons. 592 p.
- HAWLEY, M., & CUNNING, J. (2017). *Guidelines for mine waste dump and stockpile design*. CSIRO Publishing.
- HUMPHREY, J. D. (1984). *The Fundamentals of the Dragline*, 29 p (Marion Division-Dresser Ind. Inc: Marion).
- IBRAM (2016). *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração*. Instituto Brasileiro de Mineração. Brasília, 2016. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em: [10/01/2022].
- IBRAM (2019). *Relatório anual de atividades: julho de 2018 – junho de 2019*. Instituto Brasileiro de Mineração. 45 p.
- IBRAM (2023). *Infografico: Mineracao em Números*. Instituto Brasileiro de Mineração. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes>. Acesso em: [01/02/2024].
- INAP (2009). *The GARD Guide. The Global Acid Rock Drainage Guide. The International Network for Acid Prevention (INAP)*. <http://www.gardguide.com>
- JEFFERIES, M. (1993). Nor-Sand: a simple critical state model for sand. *Geotechnique*, 43(1), 91-103. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1993.43.1.91>.
- JEFFERIES, M.G. & BEEN, K. (2016). *Soil liquefaction: critical state approach*. 2<sup>a</sup> Edição, CRC Press, Boca Raton, 690p.
- JEHRING, M. M. (2014). *Effect of tailings composition on the shear strength behavior of mine waste rock and tailings mixtures*. MSc Thesis. Department of Civil & Environmental Engineering, Colorado State University, Colorado, USA. 138 p.
- JEHRING, M. M., & BAREITHER, C. A. (2016). Tailings composition effects on shear strength behavior of co-mixed mine waste rock and tailings, *Acta Geotechnica*, 1-20.
- KAWATRA, S. KOMAR, & CARLSON, J.T. (2014). (Eds.). *Beneficiation of Phosphate Ore*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- KHALILI, A. (2009). *Mechanical response of highly gap-graded mixtures of waste rock and tailings (paste rock)*. PhD Thesis, University of British Columbia.
- KHALILI, A., WIJEWICKREME, D., & WILSON, W. (2010). Mechanical response of highly gap-graded mixtures of waste rock and tailings. Part I: Monotonic shear response, *Canadian Geotechnical Journal*, 47(5).
- KRAMER, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, 1996.
- LEDUC, M. & SMITH, M.E. (2003). *Tailings Co-Disposal™. Innovations for Cost Savings and Liability Reduction*. The Latin America Mining Record, July/Aug. 2003.
- LEDUC, M. BACHENS, M, & SMITH, M.E. (2004). *Tailings Co-Disposal™ & Sustainable Development*. Proceedings of the annual meeting of SME, Denver, February, 2004.
- LI, A., ANDRUCHOW, B., WISLESKY, I., & OLSON, E. (2011). Filed testing of co-disposal techniques for acid generating tailings and waste rock at Cerro de Maimón Mine. *Proceedings Tailings and Mine Waste 2011*. Vancouver, BC.
- LOTTERMOSER, B. G. (2010). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer, 3th edition. Berlin, London.
- MCLEOD, H. & A. BJELKEVIK. (2017). *Tailings dam design: technology update (ICOLD Bulletin)*. Proceedings of the 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams. Prague, Czech Republic: Czech National Committee on Large Dams.

- MEND. (2017). MEND Report 2.50.1 - Study of Tailings Management Technologies. Mine Environment Neutral Drainage Project. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC), Canadá.
- MENESES, B. R. C. de. (2023). Estabilização de Pilhas de Rejeito Mineiros com Bermas Cimentadas. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, mês de maio de 2023.
- MUALEM, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, Washington, DC., v. 12, n. 3, p. 513-522.
- NI, Q., TAN, T. S., DASARI, G. R., HIGHT, D. W. (2004). Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils. *Géotechnique*, 54(9).
- PEIXOTO, C. L. (2012). Nova Metodologia de Desaguamento de Rejeitos em Polpa. Dissertação de Mestrado. NUGEO – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 93p.
- PEREIRA, A. (2013). Comportamento Mecânico Saturado e Não Saturado de um Solo Coluvionar de Arenito. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 305.
- PEREIRA, D. (2005). A. Previsão de Poropressão Construtiva em Barragens Via Simulação Numérica. (Dissertação de Mestrado), Publicação G.DM-134/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112 p.
- PERES, A.E.C. & ARAUJO, A.C. (2007). A flotação como operação unitária no tratamento de minérios. In:
- PITMAN, T.D., ROBERTSON, P.K., SEGO, D.C. (1994). Influence of Fines on the Collapse of Loose Sands. *Can. Geotech. J.*31, 728-739.
- POULOS, S. J. (1981). The steady state of deformation. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, volume 107, n. GT5, 553-562.
- PULLUM, L., BOGER, D. V. & SOFRA, F. (2018). Annual Review of Fluid Mechanics - Hydraulic Mineral Waste Transport and Storage.
- RAHMAN, M. M., LO, S. R. & GNANENDRAN, C. T. (2008). On equivalent granular void ratio and steady-state behavior of loose sand with fines. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(10).
- ROCHA, S. S. (2017). Análise comparativa dos benefícios econômicos, operacionais e ambientais do método terrace mining na mineração de gipsita do polo gesseiro do Araripe. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.
- ROWE, P. W. (1962). The stress dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 269, 500-527.
- SANTOS, M. A. (2010). Estudo da influência e íons contaminantes na flotação de apatita em coluna. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- SHOKOUHI, A. & D. J. WILLIAMS (2015). Settling and consolidation behaviour of coal tailings slurry under continuous loading. *Tailings and Mine Waste 2015*. Vancouver, BC.
- SHUTTLE, D., & JEFFERIES, M. (2010). Norsand: Description, Calibration, Validation and Application. ResearchGate.
- SHUTTLE, D., & JEFFERIES, M. (2016). Determining silt state from CPTu. *Geotechnical Research*, v. 3, n. 3, p. 90–118.

- SILVA, P. H. A. da. (2020). Simulação numérica das poropressões em aterros construídos com resíduo da produção de alumina desaguado por filtros prensa. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SILVA, W. P. da. (2010). Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001). Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, NUGEO, Ouro Preto. 120 p.
- SIMMONS, J (1995). Slope stability for open pit coal mining, in *Australian Geomechanics*, pp. 45–57.
- SIMMONS, J. & MCMANUS, D. A. (2004) Shear strength framework for design of dumped spoil slopes for open pit coal mines. In *Proceedings, Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference*, London, March 2004. (Eds R J Jardine, DM Potts, KG Higgins). Vol. 2, pp. 981–991. Thomas Telford Limited, London.
- SIMMONS J., & YARKOSKY R., (2017). Dragline Spoils. In: *Guidelines for mine waste dump and stockpile design*. Organizadores: HAWLEY, M., & CUNNING, J..
- SOUZA, W. A. R. (2020). Análise Numérica do Comportamento de Pilhas de Rejeito Filtrado e Co-Disposição durante a Construção. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília.
- TAYLOR, D. (1948). *Fundamentals of soil Mechanics*. New York: John Wiley& Sons.
- THEVANAYAGAM, S. & MOHAN, S. (2000). Intergranular state variables and stressstrain behaviour of silty sands. *Geotechnique* 50 (1), 1–23.
- THEVANAYAGAM, S. (1998). Effect of fine and confining stress on undrained shear strength of silty sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(6).
- THEVANAYAGAM, S. (2007). Intergrain contact density indices for granular mixes I – Framework. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibrations*, 6(2).
- THEVANAYAGAM, S., SHENTHAN, T., MOHAN, S., LIANG, J. (2002). Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(10).
- TOLEDO, A. P., RIBEIRO, J. C. J. & THOMÉ, R. (2016). *Acidentes com barragens de rejeitos da mineração e o princípio da prevenção: de Trento (Itália) a Mariana (Brasil)*. Rio de Janeiro: Lumen Juris.
- VALLEJO, L. E. & MAWBY, R. (2000). Porosity influence on the shear strength of granular material clay mixtures, *Engineering Geology*, 58: 125-136.
- VAN GENUCHTEN, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.
- VANGSNESS, T. A. (2020). Shear strength characterisation of in-pit mud to ensure lowwall stability. Tese de doutorado. Universidade de Queensland, Escola de Engenharia Civil, Centro de Engenharia Geotécnica.
- WICKLAND, B. & WILSON, G.W. (2005). Research of Co-Disposal of Tailings and Waste Rock. *Geotechnical News*, September 2005, 35-38.
- WICKLAND, B. E. (2006) Volume change and permeability of mixtures of waste rock and fine tailings. PhD Thesis. University of British Columbia.
- WICKLAND, B. E., WILSON, G. W. & WIJEWICKREME, D. (2010). Hydraulic conductivity and consolidation response of mixtures of mine waste rock and tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(4): 472-485.

- WICKLAND, B. E., WILSON, G. W., FREDLUND, D. G., & WIJEWICKREME, D.. (2006a). Unsaturated Properties of Mixtures of Waste Rock and Tailings. Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soils, ASCE, Carefree, Arizona, Vol. 1, pp. 883-893.
- WICKLAND, B. E., WILSON, G. W., WIJEWICKREME, D. & KLEIN, B. (2006b). Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings. Canadian Geotechnical Journal, 43: 928-945.
- WILLS, B. A. & FINCH, J. A. (2016). Wills' Mineral Processing Technology, Eighth Edition: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.
- XU, Y., WILLIAMS, D. J., SERATI, M., & VANGSNESS, T. (2018). Effects of Scalping on Direct Shear Strength of Crusher Run and Crusher Run/Geogrid Interface. Journal of Materials in Civil Engineering, 30(9), 04018206
- ZHANG, L. M & LI, X. (2010). Microporosity Structure of Coarse Granular Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, No. 10