

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

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE REJEITOS DE
MINÉRIO DE MANGANÊS**

PAULO VICTOR SANTOS FREIRE

ORIENTADORA: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-435/2026

BRASÍLIA – DF, 02 DE MARÇO DE 2026.

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

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE MANGANÊS**

PAULO VICTOR SANTOS FREIRE

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE.**

APROVADA POR:

**PROF^a. MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc. (UnB)
(ORIENTADORA)**

**PROF. JOSE WILSON DOS SANTOS, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PROF. ROBERTO AGUIAR DOS SANTOS D.Sc. (UFV)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 02 DE MARÇO DE 2026.

FICHA CATALOGRÁFICA

FREIRE, PAULO VICTOR SANTOS

Influência da Variação do Índice de Vazios no Comportamento Mecânico de Rejeitos de Minério de Manganês, 2026, 99p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2026).

Dissertação Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.;

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. Rejeito de manganês | 2. Preparação de Amostra Fofas |
| 3. Comportamento mecânico | 4. Fabric do rejeito |
| 5. Reconstituição de amostras em laboratório | |
| I. ENC/FT/UnB | Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FREIRE, P. V. S. (2026). **Influência da Variação do Índice de Vazios no Comportamento Mecânico de Rejeitos de Minério de Manganês**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-435/2026, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Paulo Victor Santos Freire.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO **Influência da Variação do Índice de Vazios no Comportamento Mecânico de Rejeitos de Minério de Manganês**

GRAU/ANO: Mestre/2026

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

Paulo Victor Santos Freire
paulovi125@hotmail.com

DEDICATÓRIA

“Ainda há muito trabalho a fazer

Porque sucesso é caminhada

E não a linha de chegada

Eu vou buscar onde for

Como for preciso

Eu preciso encontrar”

Kamau, [Equilíbrio]

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado forças para continuar mesmo quando não achava mais possível, agradeço a igreja por ter sido um porto-seguro e a minha comunidade pelas orações durante todo o mestrado.

Agradeço à minha professora orientadora por ter me auxiliado e incentivado a persistir na escrita deste trabalho. Além disso, agradeço a todo grupo de pesquisa do Laboratório dos Novos Materiais Geotécnicos pelo apoio, dicas, correções e momentos de descontração. Um agradecimento especial ao Bruno, Jessé, Gabi, Augusto, Guilherme, Lídia e Felipe.

Agradeço à Universidade de Brasília e a todos os professores que participaram da minha formação tanto na graduação quanto agora no mestrado, todos foram imensamente importantes e participaram da minha formação como profissional e como pessoa. Um agradecimento aos servidores técnicos, da limpeza e administrativos, em especial ao técnico de laboratório do PPGG, Rogério.

Um agradecimento em especial aos amigos da geotecnia que participaram comigo da difícil saga das matérias obrigatórias. Aos amigos que me suportaram e incentivaram a participar e continuar no mestrado. Especialmente ao Arthur, Kássio, Gabriel, Maeda, Reinan e Kellison.

Agradeço aos meus familiares, que me deram total apoio nessa jornada, sem vocês não teria chegado até aqui. Em especial a minha mãe, meu pai e meu irmão que mais me incentivaram.

Agradeço aos amigos do Clupo, mesmo entrando no modo caverna durante quase todo o mestrado não esqueceram de mim e cobravam minha presença. É sempre bom saber que somos queridos, mesmo que seja a base de ser cobrado. Aos amigos da graduação que mantivemos contato e continuamos a compartilhar das alegrias e dificuldades da vida, Cristiano, Gabriela e Clara, muito obrigado.

Um agradecimento especial ao meu amigo Luisão que me ajudou em todo processo de inscrição do mestrado, passou comigo, e depois deixou o lado geotecnia da força para seguir a hidrologia. À Ana Paola, por ter acreditado em mim na graduação, ter me coorientado na monografia e também ter me encorajado a me inscrever no mestrado.

RESUMO

Influência da Variação do Índice de Vazios no Comportamento Mecânico de Rejeitos de Minério de Manganês

Devido aos grandes acidentes da última década no país, fez-se necessário uma alteração nas práticas de disposição de rejeito no setor mineral. Somando-se a isso, houve uma busca por métodos alternativos que sejam mais seguros e adequados com as novas exigências legais que obrigam o setor mineral a descaracterizarem todas as minas construídas com alteamento à montante. Deste modo, há uma necessidade em aprofundar o entendimento da aplicabilidade de métodos alternativos, como disposição em cava ou empilhamento à seco (*dry-stacking*). Assim, para auxiliar no entendimento, o presente estudo investigou o comportamento mecânico sobre a ótica do efeito do índice de vazios na resposta mecânica de um rejeito de manganês, material que não possui muitas informações em literatura sob uma perspectiva geotécnica. Realizou-se a caracterização química por meio de Difração de Raio-X (DRX) e Fluorescência de Raio-X (FRX), além de ensaios de granulometria, Limites de Atterberg, densidade real dos grãos, compactação na energia Proctor Normal e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Na avaliação no comportamento de deformação volumétrica devido a carregamento e descarregamento, foram realizados 13 ensaios oedométricos com diferentes graus de compactação (GC) e condições iniciais ensaio. Para a avaliação do comportamento mecânico, foram executados ensaios triaxiais consolidados e drenados (CD) em amostras fofas e densas. Desenvolveu-se um método de moldagem para amostras fofas, que se mostrou satisfatório e replicável, permitindo a obtenção de parâmetros do estado crítico em condição drenada. Os parâmetros de resistência encontrados apresentaram influência limitada das condições iniciais de estado inicial das amostras: M_{tc} (*critical friction ratio in triaxial compression*) geral de 1,25 e analisando separadamente as amostras fofas e densas houve uma diferença pequena. Quanto à deformabilidade do rejeito, observou-se convergência entre os valores de λ , inclinação no plano e Vs. $\ln(p')$, para as linhas de compressão isotrópica (LCI), normal (LCN) e de estado crítico (LEC), indicando um paralelismo entre elas. A permeabilidade variou em uma ordem de grandeza entre as amostras fofas e as amostras densas, com 10^{-4} cm/s e 10^{-5} cm/s, respectivamente. Não foi identificado um comportamento transicional para as condições ensaiadas, indicando a existência de uma LCN única.

Palavras-Chave: rejeito de manganês; estado crítico; comportamento transicional; moldagem de amostras fofas; diferentes índices de vazios.

ABSTRACT

Influence of Void Ratio Variation on the Mechanical Behavior of Manganese Ore Tailings

Due to the major accidents that occurred in the country over the last decade, changes in tailings disposal practices in the mining sector became necessary. In addition, there has been a search for alternative methods that are safer and compatible with new legal requirements mandating the decommissioning of all upstream-raised tailings dams. Therefore, there is a need to deepen the understanding of the applicability of alternative methods, such as in-pit disposal and dry stacking. To contribute to this understanding, the present study investigated the mechanical behavior of a manganese tailings material from the perspective of the influence of void ratio on its mechanical response, a material for which limited geotechnical information is available in literature. Chemical characterization was carried out using X-ray Diffraction (XRD) and X-ray Fluorescence (XRF), along with grain-size distribution, Atterberg limits, specific gravity of solids, Standard Proctor compaction, and Scanning Electron Microscopy (SEM). To evaluate volumetric deformation behavior under loading and unloading, thirteen oedometer tests were performed with different degrees of compaction and initial test conditions. For the assessment of mechanical behavior, consolidated drained (CD) triaxial tests were conducted on loose and dense samples. A preparation method for loose specimens was developed and proved to be satisfactory and repeatable, allowing the determination of critical state parameters under drained conditions. The strength parameters showed limited influence from the initial state of the samples: an overall M_{tc} (critical friction ratio in triaxial compression) of 1.25 was obtained, with only a small difference between loose and dense specimens when analyzed separately. Regarding deformability, convergence was observed among the values of λ (slope in the v versus $\ln p'$ plane) for the isotropic compression line (ICL), normal compression line (NCL), and critical state line (CSL), indicating parallelism between them. Permeability varied by one order of magnitude between loose and dense samples, with values of 10^{-4} cm/s and 10^{-5} cm/s, respectively. No transitional behavior was identified under the tested conditions, indicating the existence of a single normal compression line.

Key words: Manganese tailings; critical state; transitional behavior; molding of loose specimens; different void ratios.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1.	OBJETIVO GERAL	2
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	MINERAÇÃO	3
2.2	ETAPAS DA ATIVIDADE MINERAL	4
2.2.1	LAVRA	5
2.2.2	BENEFICIAMENTO	5
2.2.3	DISPOSIÇÃO DE REJEITO	7
2.3	MÉTODOS DE MOLDAGEM DE AMOSTRAS	10
2.3.1	MÉTODO MOIST TAMPING	11
2.3.2	MÉTODO DE PLUVIAÇÃO A SECO (DRY PLUVIATION)	12
2.3.3	PLUVIAÇÃO ÚMIDA (WET PLUVIATION)	13
2.4	TEORIA DO ESTADO CRÍTICO	14
2.4.1	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	14
2.4.2	DEFINIÇÃO DO ESTADO CRÍTICO	18
2.4.3	PARÂMETRO DE ESTADO	20
2.4.4	DILATÂNCIA	22
2.4.5	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE AO FINAL DO ENSAIO	23
2.5	COMPORTAMENTO TRANSICIONAL	24
2.5.1	COMPORTAMENTO TRANSICIONAL NA LCN	25
2.5.2	COMPORTAMENTO TRANSICIONAL DA LEC	26
3	METODOLOGIA	27
3.1	MATERIAIS	27
3.1.1	ÁREA DE ESTUDO	28
3.2	MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	30
3.2.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	31
3.2.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA	32
3.2.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	33
3.2.4	OEDOMÉTRICO	34
3.2.5	ENSAI TRIAXIAL MONOTÔNICO	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	49
4.1.1	GRANULOMETRIA	49

4.1.2	LIMITES DE ATTERBERG	50
4.1.3	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	51
4.1.4	COMPACTAÇÃO	51
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA	52
4.2.1	DIFRAÇÃO DE RAIO-X	52
4.2.2	FLUORESCÊNCIA DE RAIO-X.....	53
4.3	OEDOMÉTRICOS	55
4.4	ENSAIOS TRIAXIAIS.....	62
4.4.1	PERMEABILIDADE.....	62
4.4.2	DETERMINAÇÃO DO ESTADO CRÍTICO DO REJEITO.....	63
5	CONCLUSÕES	76
5.1	SUGESTÕES DE PESQUISA FUTURA	77
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Panorama Histórico da Produção e da Reserva de Manganês no Mundo.....	4
Tabela 4.1: Tabela resumo com resultados da VALE.....	58
Tabela 4.2: Resumo das Condições do Ensaio Oedométrico Utilizados na Pesquisa.	61
Tabela 4.3: Tabela resumo com todas as informações gerais	62
Tabela 4.4: Compilado dos Parâmetros λ e Γ encontrados na LCI, LEC e LCN.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Faturamento e Participação do Setor Mineral no Brasil. (Fonte IBRAM 2025).....	3
Figura 2.2: Relação de Técnica de Transporte de Rejeito com a Consistência do Rejeito. (Adaptado de GOLDER, 2015).....	6
Figura 2.3: Variação na Permeabilidade com o Distanciamento da Origem do Lançamento. (Adaptado de Bilight 2009).....	6
Figura 2.4: Técnicas de Alçamento Barragens de Rejeito.	8
Figura 2.5: Barragem de Rejeito Alçada à Montante. (Fonte: Alves 2020)	9
Figura 2.6: Imagem de Tomografia Computadorizada dos 3 métodos de Moldagem de Amostra. (FONTE: Knudsen <i>et. al</i> , 2019).....	11
Figura 2.7: Moldagem de um Corpo de Prova Usando o Método <i>Moist Tamping</i> . (Fonte: LIU <i>et. a</i> , 2017).....	12
Figura 2.8: Representação Esquemática do Método de Pluviação a Seco (modificado de Gomes, 2022).....	13
Figura 2.9: Representação Esquemática do Método Pluviação Úmida. (adaptado de Gomes, 2022).....	14
Figura 2.10: Envoltória de Ruptura Mohr-Coulomb no plano τ Vs. σ . (Fonte: Adaptado Sousa Pinto, 2006).....	15
Figura 2.11: Comportamento Drenado Ideal de Solos Granulares Submetidos ao Cisalhamento; (a) Relação da Tensão desvio com a Deformação volumétrica; (b) Relação dos índices de vazios em relação a Deformação Axial. (Fonte: Ratton, 1993)	17
Figura 2.12: Comparativo entre as Deformações Volumétricas entre Amostras Fofas e Densas.	17
Figura 2.13: Envoltória de Ruptura do Estado Crítico.....	19
Figura 2.14: Deformação Volumétrica Durante um Ensaio de Cisalhamento. Figura 2.14-a: Deformação Volumétrica Durante a fase de Consolidação; Figura 2.14-b: Deformação Volumétrica Durante a Fase de Cisalhamento. (Fonte: do Autor).....	20
Figura 2.15: Trajetória de Tensões em Ensaios Não Drenados Normalizados. (Fonte: Jefferies & Been, 2016)	21
Figura 2.16: Ilustração do Comportamento de Deformação Volumétrica ao Longo do Cisalhamento.....	22
Figura 2.17: Relação de Dilatância e η com o Parametro M_{tc} de resistência (Fonte: Shuttle & Jefferies, 2019).....	23
Figura 2.18: Cálculo do Parâmetro de Convergência (m). Fonte Li&Coop (2019).....	25

Figura 2.19: Comportamento Transicional na LCN e Convencional na LEC.	26
Figura 3.1: Processo de Homogeneização do Rejeito; (a) Quarteamento no Recipiente; (b) Homogeneização Entre os Quartos Superiores e Inferiores; (c) Homogeneização das Metades; (d) Material Homogeneizado.	28
Figura 3.2: Fluxograma de beneficiamento da Mina do Azul, Paraupepas-Pará (Sampaio & Penna, 2001).....	29
Figura 3.3: Montagem das Amostras para o Ensaio Oedométrico: a) Moldagem e Talhagem da Amostra no Anel de Adensamento; b) Célula de Adensamento Montada.....	36
Figura 3.4: Equipamento mini-MCV e Utensílios para Moldagem das Amostras.	38
Figura 3.5: Ilustração de corpos de prova moldados para os Ensaio Triaxiais: a) Amostra moldada com Energia Proctor Normal; b) Amostra fofa.	40
Figura 3.6: Equipamento de Compressão triaxial.	41
Figura 3.7: Ajuste da Haste do Cisalhamento; a) Antes do Ajuste; b) Após o Ajuste.....	44
Figura 3.8: Comparativo da Tensões Desvio em Diferentes Metodologias de Cálculo de Área.	46
Figura 4.1: Curva Granulométrica do Rejeito de Manganês.....	49
Figura 4.2: Regressão Linear Usada Para o Limite de Liquidez.....	50
Figura 4.3: Carta de Casagrande Aplicada ao Rejeito de Manganês.	51
Figura 4.4: Curva de Compactação Proctor Normal.	51
Figura 4.5: Espectro de DRX do Rejeito de Manganês.	52
Figura 4.6: Espectro de Fluorescência de Raio-X do Rejeito Puro.....	53
Figura 4.7: Quantitativo dos Elementos Químicos do Rejeito Puro.	54
Figura 4.8: Quantitativo dos Elementos Químicos do Rejeito Lavado.....	55
Figura 4.9: Ensaio Oedométrico para amostras com GC de 80%;.....	56
Figura 4.10: Ensaio Oedométrico para GC de 90%.	57
Figura 4.11. Ensaio Oedométrico com GC de 100%.	58
Figura 4.12: Comparação da metodologia A entre UnB e Vale;	59
Figura 4.13: Comparação da metodologia B entre UnB e Vale.....	60
Figura 4.14: Cálculo do Parâmetro de Convergência nas amostras Inundadas	61
Figura 4.15: Relação Entre Deformação volumétrica e Tensão Desvio com a Deformação Axial.	66
Figura 4.16: Amostras Após o cisalhamento; (a) Amostra com Deformação Abaulada; (b) Amostra com deformação apresentado Banda de Cisalhamento.	67
Figura 4.17: Envoltória de Ruptura Analisando Todas as Trajetórias de Tensão.....	68

Figura 4.18: Envoltória de Ruptura Amostras Densas.	69
Figura 4.19: Envoltória de Ruptura Somente com as Amostra Fofas.	69
Figura 4.20. Gráfico q/p' vs Dilatância – Ensaios triaxiais drenados para o Rejeito de Manganês.	70
Figura 4.21: Comparativo do Parâmetro M_{tc} com Outros Rejeitos em Literatura.	71
Figura 4.22. Gráfico e vs $\log(p)$ – Identificação da Linha de Estados Críticos (LEC) e Linha de Compressão Isotrópica (LCI) para o Rejeito de Manganês.	72
Figura 4.23: Investigação sobre a Unicidade da LEC	73
Figura 4.24: Comparativo em do Parâmetro λ Com Outros Rejeitos Conhecidos na Literatura.	74

LISTA DE ABREVIACÕES

Abreviação	Significado
MT	<i>moist Tamping</i>
A	Apjohnita
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C	Caulinita
CD	Consolidado Drenado
CI	Condições Iniciais
CP	Corpo de Prova
CSL	<i>Critical state line</i>
D	dilatância
DNPM	Departamento Nacional de Pesquisa Mineral
DRX	Difracção de Raio-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
G	Gibbsita
GC	Grau de Compactação
H	Hematita
I	Ilita
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IG-UnB	Instituto de Geociências da Universidade de Brasília
IQ-UnB	Instituto de Química da Universidade de Brasília
LCN	Linha de Confinamento Normal
LEC	Linha de Estados Críticos
LGV	Laboratório de Geotecnia da Vale
LL	Limites de Liquidez
LP	Limites de Plasticidade
M	Maghemita
M_{tc}	<i>critical friction ratio in triaxial compression</i>
N	parâmetro Nova
NA	Normalmente Adensando
NBR	Norma Brasileira
PS	pluviação a seco
Q	Quartzo
SR	Saturação de água no Meio Moroso
δe	Incremento de ndice de vazios
e_i	ndice de vazios no instante i

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ρ_{crit}	densidade no estado crítico
p'	Tensão média efetiva
ψ	Variável de Estado
$\delta\varepsilon_v$	acréscimos de deformação volumétrica
D	dilatância
$\delta\varepsilon_q$	acréscimos de deformação cisalhante
N	parâmetro Nova
H	razão de tensões
m	índice de convergência
ΔV	variação de volume
V_b	Volume adicionado na linha de base durante a saturação
σ_3	tensão principal menor = tensão confinante
P_w	poropressão
S	deslocamento axial
F_c	força cisalhante
k_s	coeficiente de permeabilidade em amostras saturadas
W_f	umidade ao final do ensaio de cisalhamento
SR	Saturação de Água no Meio Moroso
B	parâmetro B de Skempton
V_v	volume de vazios
V_s	volume de sólidos
V_w	volume de água
ρ_s	densidade dos sólidos
M_s	massa de sólidos
V_f	volume final
V_i	volume contabilizado no determinado no instante “i”
e_{LEC}	índice de vazios a uma dada tensão efetiva na LEC
e_{LCN}	índice de vazios a uma dada tensão efetiva na LCN
e_{LCI}	índice de vazios a uma dada tensão efetiva na LCI
Γ_{LCI}	índice de vazios correspondente a tensão de 1 kPa da LCI
Γ_{LEC}	índice de vazios correspondente a tensão de 1 kPa da LEC
Γ_{LCN}	índice de vazios correspondente a tensão de 1 kPa da LCN
λ_c	índice de compressão da LEC
λ_i	índice de compressão da LCI
λ_{LCN}	índice de compressão da LCN
M_{tc}	<i>critical friction ratio in triaxial compression</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O setor mineral no Brasil representa uma importante relevância econômica e estratégica para o país, apresentando um potencial elevado na geração de riquezas e externalidades positivas para a região ao qual essa a prática mineral está inscrita. Entretanto, uma das principais externalidades negativas associadas a essa atividade é o grande volume de rejeito gerado durante a exploração e o beneficiamento na mineração. De modo geral, esse material é armazenado em estruturas de contenção, como as barragens de rejeito. Porém, quando ocorrem eventos de instabilidade nessas estruturas, como o fenômeno de liquefação, podem desencadear impactos negativos de grande magnitude nas esferas sociais, ambientais e econômicas.

Motivado por eventos catastróficos no setor mineral, houve um impulsionamento no cenário que levou um amadurecimento no senso de responsabilidade, levando um aprimoramento técnico e científico voltado à segurança dessas estruturas nas áreas de gestão e de risco. Nesse contexto, o advento da Lei Federal nº 14.066/2020 que exigiu a descaracterização de todas as barragens construídas com alteamento à montante.

Nesse cenário, diferentes alternativas de disposição vêm sendo estudadas e aplicadas pelas mineradoras, com destaque para o empilhamento a seco (*dry-stacking*) e a disposição em cavas já exauridas. Em ambas as soluções, há a necessidade de aprofundar no conhecimento do comportamento mecânico, seja em condições compactadas ou disposto com técnicas que resulte em rejeitos com elevados índices de vazios.

A viabilidade técnica e segurança da alternativa escolhida dependem dos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, de condutividade hidráulica do material e de deformabilidade.

O rejeito de manganês, objeto de estudo desta pesquisa, apresenta pouca literatura sob uma perspectiva geotécnica, desde uma caracterização básica até mesmo uma análise sob a perspectiva da teoria de estados críticos, deste modo mostra-se relevante a sua investigação.

Em vez disso, o estudo pretende fornecer um arcabouço experimental e analítico que subsidie uma tomada de decisão com segurança, com vistas a garantir a maior satisfação social e ambiental da região oriundo da área de estudo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é investigar o comportamento mecânico e de deformabilidade do rejeito de manganês, em diferentes graus de compactidade, gerando parâmetros geotécnicos do rejeito sob a ótica do estado crítico. Para que com eles, o seu comportamento seja descrito e possam contribuir para a tomada de decisão sobre metodologias de disposição de rejeito e de descaracterização.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que se cumpra o objetivo geral, foram estabelecidos como objetivos específicos:

- Construir uma caracterização física, química e mineralógica do rejeito de manganês, com ênfase na determinação dos parâmetros críticos na condição drenada;
- Analisar o efeito da variação no índice de vazios e grau de compactação afeta o comportamento mecânico, hidráulico e de compressibilidade;
- Avaliar a compressibilidade do rejeito de manganês em diferentes condições de ensaios, variando índices de vazios e presença de água durante os ensaios;
- Avaliar o potencial comportamento transicional na linha de compressão normal (LCN) no rejeito de manganês.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MINERAÇÃO

A mineração alimenta com matéria prima uma série de cadeias industriais, de forma direta ou indireta, desde objetos rudimentares até a mais alta tecnologia. Dentro desse cenário, o Brasil é um dos fornecedores fundamentais de material para as indústrias nacionais e internacionais, tornando esse segmento muito importante para a economia. O Instituto de Pesquisa Estatística Aplicada (IPEA) publicou em 2023 em estudo trazendo a reflexão que entre os anos de 2009 e 2019 a contribuição desse setor para a economia nacional girou em torno de 2,5% e 4%.

Segundo IPEA (2024), o setor mineral no Brasil obteve crescimento de 9,1% comparado com o ano de 2023, o ano de menor faturamento entre 2021 e 2024. Os minerais com maior importância no setor mineral em 2024 foram ferro, ouro e cobre, enquanto o manganês teve uma participação de 0,18% do montante total, conforme está ilustrado na Figura 2.1.

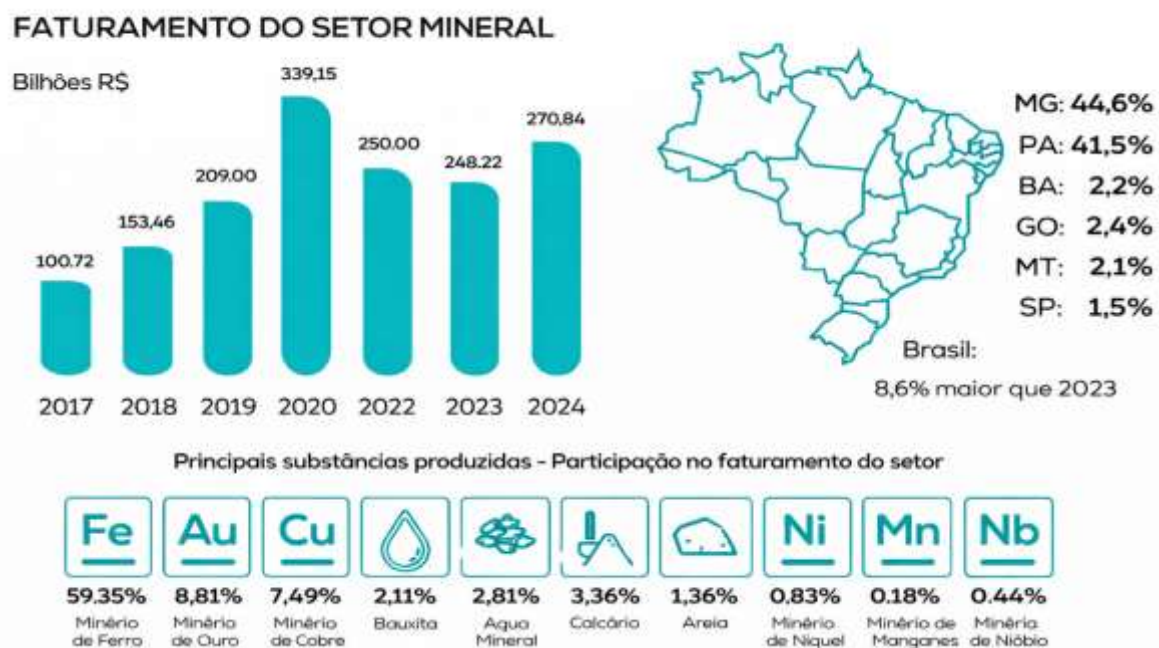


Figura 2.1: Faturamento e Participação do Setor Mineral no Brasil. (Fonte IBRAM 2025)

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2025), os estados com maior participação nessa atividade econômica são os estados de Minas Gerais e Pará, que tiveram uma participação 86% do faturamento do setor de no ano de 2024.

2.1.1 MINERAÇÃO DE MANGANÊS

O Brasil dispõe da maior reserva de manganês no mundo, com uma reserva de 272.567 milhões de toneladas, em segundo lugar está África do Sul com aproximadamente 200.000 milhões de toneladas em suas reservas. Apesar do Brasil possuir a maior reserva do minério no mundo, a sua participação na produção não reflete proporcionalmente a sua reserva. Historicamente, o país que detêm a principal participação na exploração desse minério é a África do Sul, com uma produção anual média nos últimos 4 anos de 7.400 toneladas ao ano, seguido do Gabão com 4.500 toneladas, enquanto a produção brasileira média no mesmo período é de 550 toneladas ao ano.

A Tabela 2.1 apresenta um panorama mundial das reservas e da produção do manganês ao longo dos últimos oito anos, permitindo contextualizar que a participação do Brasil vem diminuindo sem haver uma diminuição na demanda desse minério a nível global.

Tabela 2.1: Panorama Histórico da Produção e da Reserva de Manganês no Mundo.

Países	Reserva (10 ³ t*)	Produção (t)							
	2017	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Brasil	272567	1343	1311	1452	933	598,4	559	850	537
África do Sul	200000	5300	5800	5800	6500	7200	7300	7300	7400
Áustrália	91000	2200	3180	3180	3330	3260	3040	2860	2800
Gabão	22000	1600	2510	2510	3310	4340	4670	4490	4600
Gana	12000	550	1550	1550	637	940	844	818	820
China	43000	2500	1330	1330	1340	991	940	767	770
Outros	202000	2650	3219	3780	2850	750	2647	2515	3073

* toneladas

fontes: USGS-Mineral Commodity Summaries & Sumário Mineral (ANM)

No Brasil o beneficiamento e a extração do minério são concentrados em 3 estados: Pará, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. Historicamente o estado com maior produção é o Pará, porém sua participação na produção da matéria-prima vem sendo reduzido, ao passo que o estado do Mato Grosso do Sul aumenta sua participação na produção nacional. Esse aumento na produção ocorre pela atividade da mina do Urucum que está situada em uma região que concentra a maior parte do manganês presente no país (ANM, 2018; ANM, 2026).

2.2 ETAPAS DA ATIVIDADE MINERAL

Dentro da atividade minerária, estão algumas atividades que buscam extrair e agregar valor econômico a recursos minerais. Do ponto de vista geotécnico, destacam-se três processos: a lavra, o beneficiamento e a disposição do material sem valor econômico.

2.2.1 LAVRA

A lavra é o processo inicial da atividade que busca explorar o bem mineral, ele é responsável por promover o desmonte do veio mineral em fragmentos. A técnica usada para fragmentação pode depender de algumas condicionantes, tais como: aspectos topográficos, podendo ocorrer na superfície ou de forma subterrânea, estabilidade do maciço a vibrações e fraturamento do maciço rochoso (IBRAM, 2016).

Dentro das formas que a lavra pode ocorrer, está o método mecânico, que promove a fragmentação por uso de máquinas que fazem perfuração e escavação do material, e o uso de explosivos. Após esse momento é realizado uma separação do material que possui valor econômico, que é transportado por caminhões ou por esteiras até a planta de beneficiamento, e o estéril que não possui valor econômico (ANM, 2021).

2.2.2 BENEFICIAMENTO

Segundo Luz *et. al* (2018), o beneficiamento mineral consiste em um conjunto de operações que possuem o objetivo de promover uma concentração do mineral de interesse contido. O minério lavrado é submetido a etapas de moagem e britagem, que promovem uma alteração na granulometria. Em seguida, é aplicado processos de concentração, que são definidos de acordo com propriedades físico-químicas dos minerais, como a densidade ou propriedades magnéticas. Esses processos não alteram a composição química do material trabalhado.

O rejeito é o subproduto oriundo do processo de beneficiamento do minério, sendo a parcela que não possui valor comercial dessa etapa, que deve ser disposto de forma ambientalmente e socialmente segura. Esse material é um material particulado e pode ser visto, da perspectiva da engenharia geotécnica, como solos artificiais. (Fourie *et. al* 2022).

O método ao qual esse material é transportado até o local onde será disposto é diretamente relacionado com a consistência de saída da planta de beneficiamento, podendo ser transportado por caminhões ou por bombeamento hidráulico. A Figura 2.2 ilustra diferentes consistências de rejeito e o modo ao qual ele pode ser transportado.



Figura 2.2: Relação de Técnica de Transporte de Rejeito com a Consistência do Rejeito. (Adaptado de GOLDER, 2015)

Blight (2009), buscou caracterizar o comportamento de rejeitos ao longo das praias formadas pela disposição hidráulica. Com isso ele pode observar uma heterogeneidade nos parâmetros desse rejeito, porque a granulometria é alterada à medida que se afastava da origem de lançamento. Isso pode ser explicado pela relação de Stookes, que relaciona o diâmetro das partículas e sua densidade em processos de sedimentação em fluxo laminar. Na Figura 2.3 está ilustrado o efeito dessa heterogeneidade afetando o parâmetro de permeabilidade do rejeito.

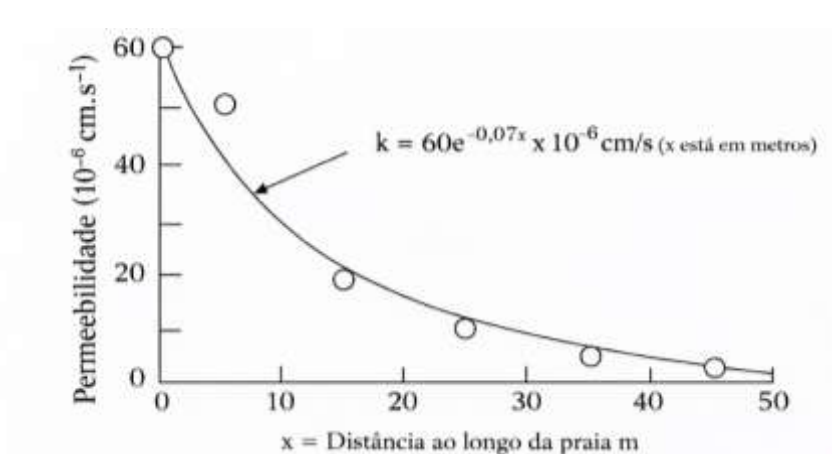


Figura 2.3: Variação na Permeabilidade com o Distanciamento da Origem do Lançamento. (Adaptado de Bilight 2009)

2.2.3 DISPOSIÇÃO DE REJEITO

Devido ao grande volume de material gerado de rejeito ao longo da exploração da atividade minerária, é necessário dispô-lo em locais que sejam seguros em relação a sua estabilidade e de forma a não prejudicar os sistemas sociais e ambientais vizinhos. O manual de gestão de Rejeitos de mineração do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2016) traz seis alternativas para a disposição dos rejeitos: minas subterrâneas, cavas exauridas de minas, pilhas, empilhamento a seco (método “*dry stacking*”) e barragens de contenção de rejeito.

Além disso, esse manual salienta que há cinco condições a serem observadas para a seleção do método de disposição de rejeito, que são: da natureza do processo de mineração; das condições geológicas e topográficas da região; das propriedades mecânicas dos materiais; do poder de impacto ambiental de contaminação dos rejeitos e das condições climáticas da região. Segundo Alvez (2020), ainda hoje o método mais usado para disposição desse material é na superfície por meio de estruturas de barramento e contenção.

A estrutura de contenção dessas barragens é construída utilizando solos, estéreis ou mesmo o próprio rejeito. Davies & Martin (2000) salientam que para o uso desses materiais para a construção é preciso de alguns cuidados, tais como: i) separação da fração grossa e fina (uma vez que as propriedades geotécnicas podem variar para as diferentes frações); ii) controle dos processos de separação (granulometria); iii) utilização de sistemas de drenagens eficientes, compactação dos rejeitos (aumento da densidade e da resistência), e iv) proteção superficial da barragem.

O processo de alteamento, segundo Gomes (2022), varia de acordo com o eixo de crescimento do barramento. Tais métodos são: à Jusante, à montante e linha de cento, a Figura 2.4 ilustra os três métodos mais usados para realizar o alteamento.

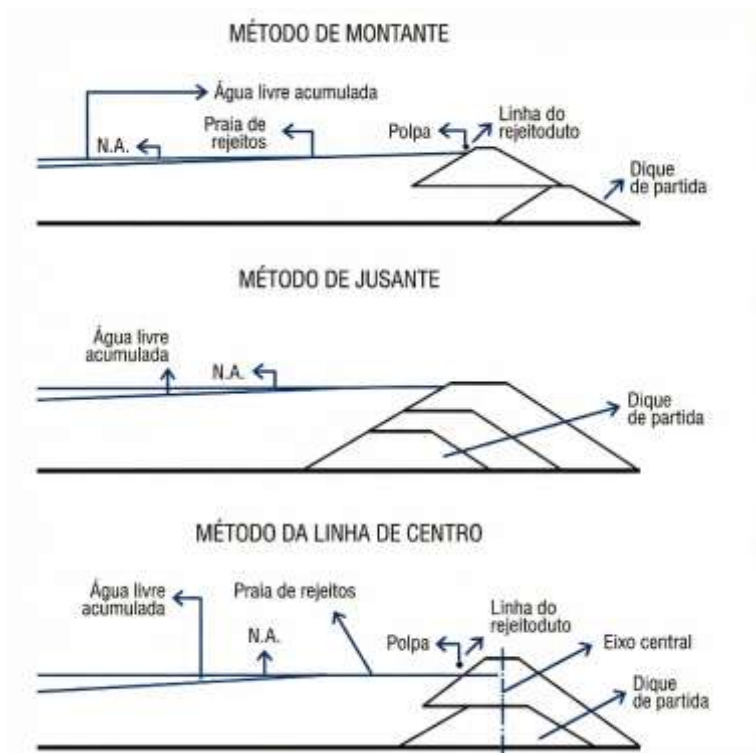


Figura 2.4: Técnicas de Alteamento Barragens de Rejeito.

2.2.3.1 Método de Alteamento à Montante

O método a Montante é uma técnica de alteamento das barragens de rejeito que possuem um eixo de crescimento à montante, para dentro da estrutura de contenção. Essa técnica de alteamento está proibida de ser adotada no Brasil em novas estruturas de contenção de rejeito pela **Lei Federal nº 14.066/2020**.

Art. 2º-A. Fica proibida a construção ou o alteamento de barragem de mineração pelo método a montante.

Nesse mesmo artigo, há o parágrafo segundo aponta que estruturas que haviam sido adotadas devem ser descomissionadas.

Essa técnica era adotada em rejeitos que possuíam um percentual significativo de areia (40% a 60%) e o método de transporte do rejeito até o ambiente de disposição era realizado por bombeamento hidráulico. Esse método permitia uma velocidade de alteamento maior do que outros métodos, como o alteamento a jusante e linha de centro. Porém, barragens que adotam esse método construtivo possuem desvantagens, dentre elas está a linha freática tende a ser elevado nos diques de contenção aumentando a suscetibilidade a liquefação e o *piping*. (Alves 2020; Lozano, 2006)

2.2.3.2 O Método de Alçamento à Jusante

No método de jusante, os alteamentos ocorrem seguindo o eixo de crescimento da estrutura à jusante do dique de partida. Pelo método construtivo desse alteamento reforçar a estrutura de contenção a cada etapa confere a esse método uma maior estabilidade e segurança nas barragens que adotam essa técnica. Para construção dos diques é possível usar o próprio rejeito como material construtivo, se atender as condições necessárias de projeto, ou mesmo usar uma área de empréstimo para executar os diques, além de inserir um sistema de drenagem na barragem que segue a mesma tendência de crescimento do dique de partida, conforme ilustrado na Figura 2.5 (Alves, 2020; Lozano, 2006; IBRAM 2016)

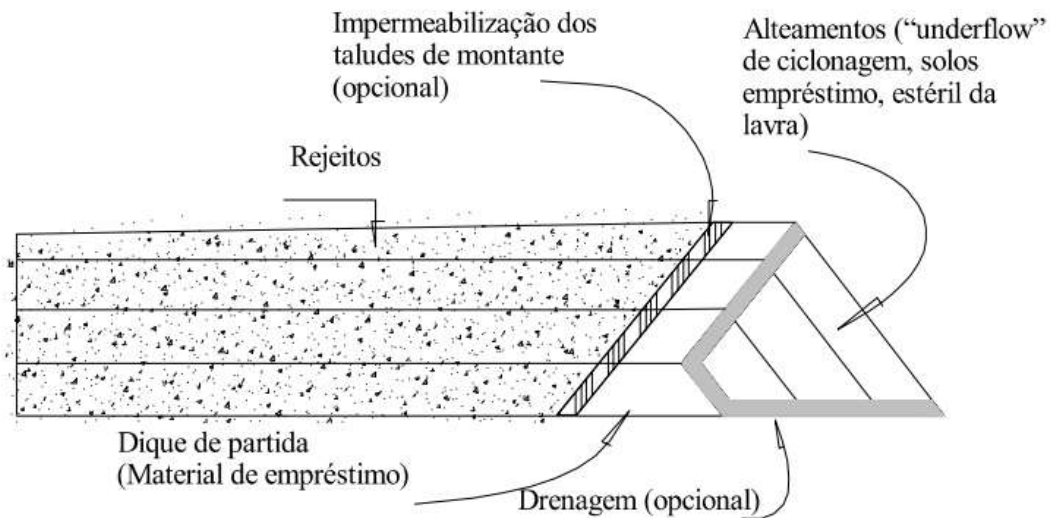


Figura 2.5: Barragem de Rejeito Alteada à Montante. (Fonte: Alves 2020)

Uma das vantagens desse método é o controle da linha freática do maciço das estruturas que contém o rejeito, isso possibilita uma redução das pressões internas de poropressão reduzindo o risco de *piping* e a suscetibilidade a liquefação. As desvantagens que podem ser elencadas é que esse método possui um custo maior para a sua construção e há uma redução do volume útil que pode ser armazenado dentro das barragens. (Lozano, 2006; CETEM, 2010)

2.2.3.3 Método de Linha de Centro

O método da linha de centro, caracterizado pela manutenção do eixo vertical da barragem durante as etapas de alteamento, é uma solução intermediária entre os métodos a montante e a jusante, incorporando aspectos de ambos. Entre suas vantagens, destaca-se um melhor controle

da linha freática, viabilizado por sistemas de drenagem internos que reduzem os riscos de ruptura por *piping* e aumentam a estabilidade global. Além disso, o método permite o lançamento direto do rejeito por bombeamento hidráulico sobre a praia e possibilita velocidades de alteamento mais elevadas. Entretanto, essa combinação de benefícios exige um maior controle operacional e investimentos mais altos em monitoramento e custos operacionais (IBRAM, 2016).

2.3 MÉTODOS DE MOLDAGEM DE AMOSTRAS

Um desafio já conhecido dentro da geotecnia é a representação das condições de campo através dos ensaios desenvolvidos nos laboratórios. Tendo o objetivo de obter respostas que sejam condizentes com as condições de campo e representem o comportamento dos materiais estudados.

Jefferies e Been (2016), apresenta três metodologias de construção de amostras que podem ser usadas no estudo da teoria do estado crítico e na avaliação da suscetibilidade à liquefação de um material. Os métodos apresentados pelos autores são: *Moist Tamping*, *dry pluviation* e *wet pluviation*.

Em seu trabalho, Knusden et. al (2019), apresenta um comparativo desses três métodos, onde demonstra através de imagens de tomografia computadorizada o arranjo das amostras moldadas. O método *Moist Tamping* e *Dry Pluviation* apresentam amostras mais homogêneas quando comparada com a amostra construída por *Wet Pluviation*, conforme fica evidenciado na Figura 2.6 .

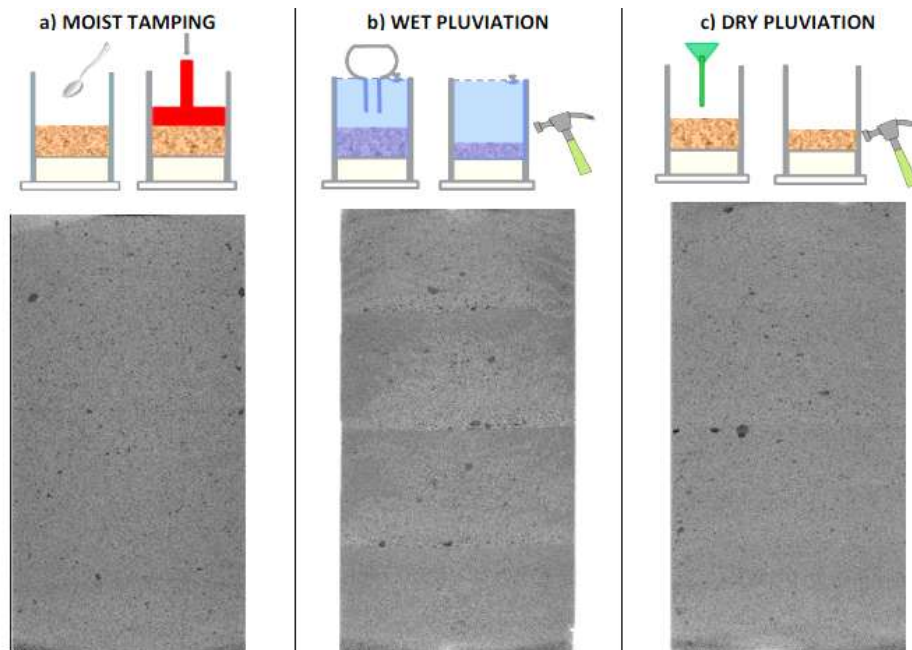


Figura 2.6: Imagem de Tomografia Computadorizada dos 3 métodos de Moldagem de Amostra. (FONTE: Knudsen *et. al*, 2019)

2.3.1 MÉTODO *MOIST TAMPING*

O método *moist Tamping* (MT) é um método de preparação de amostras que foi desenvolvido para solos granulares e é construído por camadas compactadas, para garantir que haja uma homogeneidade do Corpo de Prova (CP) moldado é necessário o controle das espessuras das camadas. Inicialmente o método foi desenvolvido fazendo um umedecimento das amostras referentes a 5% de umidade, para fornecer ao material uma coesão aparente dada pela sucção e facilitar o processo de moldagem. Porém, ao implementar o método para materiais mais finos observou-se a necessidade do aumento de umidade para a moldagem do CP (Gomes, 2022; Jefferies e Been, 2016; Ladd, 1978).

A Figura 2.7 ilustra o processo de preparação do CP moldado usando *moist tamping*. O método consiste em umedecer um material de modo que fique totalmente homogêneo (etapa 1), em seguida é transportado até o molde e lançado. Na etapa 3 o material é compactado com auxílio de um soquete, é nessa etapa deve-se controlar a densidade da compactação medindo a altura da camada para garantir o mesmo índice de vazios ao longo de toda a construção. Após essas 3 etapas é moldado a primeira etapa, para construir todo o CP repete-se as etapas 1, 2 e 3 para cada uma das camadas estimadas. Com isso é possível avançar para etapa 4, onde é realizado o controle do índice de vazios médio da amostra e montado o ensaio triaxial.

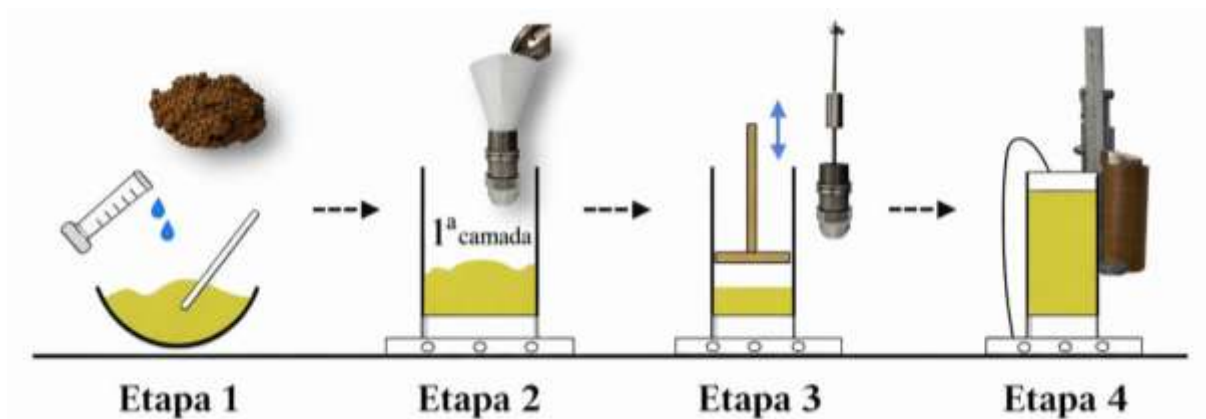


Figura 2.7: Moldagem de um Corpo de Prova Usando o Método *Moist Tamping*. (Fonte: LIU *et. a*, 2017).

Uma vantagem desse método é a simplicidade de sua execução quando se possui todos os aparatos para sua aplicação. Além disso, com o MT é possível construir uma variedade de amostras com diferentes índices de vazios, podendo ir de amostras densas ou amostra com índices de vazios mais elevados, amostras fofas, (Been e Jeffreis, 2016; Correa, 2018).

Viana da Fonseca *et al.* (2021), apresenta que uma das desvantagens do método é o arranjo estrutural produzido pelo método ao se analisar a suscetibilidade a liquefação. Uma vez que, o método possibilita a produção de amostra muito fofas com uma estrutura metaestável que favorece o processo de liquefação. Porém, ele salienta que esse é um dos métodos mais efetivos para o estudo do estado crítico.

Uma outra desvantagem do método, segundo Ladd (1978), salienta que as amostras produzidas pelo MT podem gerar camadas com índice de vazios distintos. Uma vez que, aplicada uma energia de compactação que garanta a espessura de controle da camada não significa que essa energia não será transferida para as camadas mais profundas aumentando o grau de compactação das mesmas. Para solucionar essa questão o autor sugere um uso crescente de energia para moldar a amostra, nas primeiras camadas usa-se uma quantidade menor de energia e vai aumentando a energia conforme aumentasse as camadas.

2.3.2 MÉTODO DE PLUVIAÇÃO A SECO (*DRY PLUVIATION*)

O método de pluviação a seco (PS), foi desenvolvido para materiais granulares que devem estar em uma condição seca na hora de aplicação do método. Onde o material é depositado no molde pela gravidade através de um funil e para garantia do método é necessário a manutenção da altura de queda das partículas constante. A forma de controlar o índice de vazios que o CP será

moldado deve-se pela altura de queda do material ou pela vazão das partículas que saem do funil alterando o diâmetro do bocal de saída do funil (Jefferies e Been, 2016).

Gomes (2022) descreve a relação do controle de índice de vazios do método com uma relação inversa com a energia disponível nas partículas; quanto mais energia menor o índice de vazios e quanto menor a energia maior o índice de vazios. A representação esquemática da preparação de uma amostra pela pluviação a seco está ilustrada na Figura 2.8. Nesse contexto, Correa (2018) destaca que a metodologia PS consegue representar o arranjo estrutural de solos que sofrem uma deposição eólica.

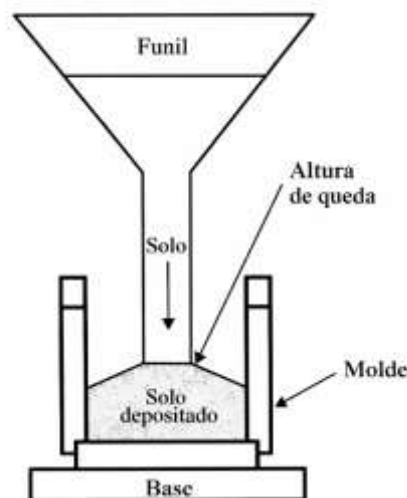


Figura 2.8: Representação Esquemática do Método de Pluviação a Seco (modificado de Gomes, 2022)

2.3.3 PLUVIAÇÃO ÚMIDA (*WET PLUVIATION*)

De acordo com Correa (2018), esse é um método que apresenta uma boa capacidade de reconstituir condições de campo onde a deposição natural é realizada por processos de sedimentação. A construção do CP por essa metodologia ocorre com a homogeneização de uma quantidade de material suficiente para uma camada, esse material homogeneizado é transportado para um balão de vidro com água. Em segui, esse material que foi novamente homogeneizado, agora no balão com água, é vertido em um molde que está cheio de água. Apresenta-se a ilustração desse procedimento na Figura 2.9.

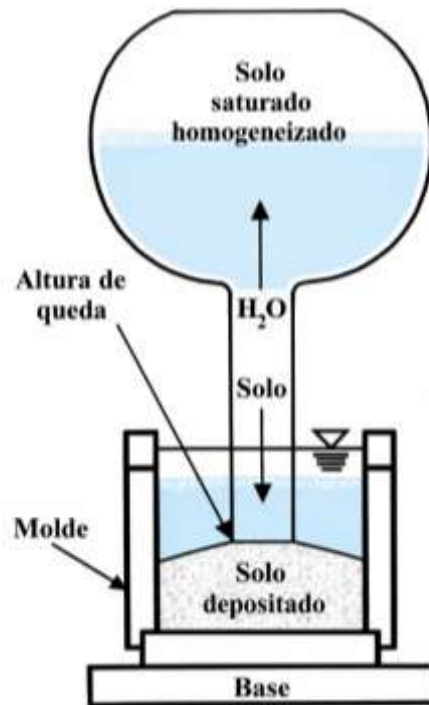


Figura 2.9: Representação Esquemática do Método Pluviação Úmida. (adaptado de Gomes, 2022).

Jefferies e Been (2016) salienta que a aplicação desse método deve ser cuidadosa. Pois, o material que possui em sua granulometria partículas com diferentes diâmetros e diferentes densidades, pode gerar uma amostra não homogênea. Isso ocorre devido a diferença de velocidade de sedimentação dessas partículas.

2.4 TEORIA DO ESTADO CRÍTICO

2.4.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

O estudo da resistência ao cisalhamento busca compreender a capacidade de materiais granulares resistirem a esforços internos ao longo de planos de ruptura. A compreensão da capacidade de um volume de massa resistir a esse esforço cisalhante mostra-se importante para diferentes problemas envolvendo a engenharia geotécnica, como estabilidade de taludes de barragens, aterros e encostas que sofreram cortes em sua geometria natural (Das, 2013; Caputo, 1998).

Mohr-Coulomb apresenta um critério de ruptura para os materiais granulares com um comportamento linear definido por:

$$\tau = c + \sigma \cdot \text{tg}(\phi) \quad \text{Equação 2.1}$$

onde (τ) é a tensão cisalhante, (σ) é tensão total, (c) é o intercepto coesivo em tensão total, (ϕ) é ângulo de atrito obtido usando as tensões totais.

A Figura 2.10 ilustra, no plano τ vs. σ , como os parâmetros de resistência (c e ϕ) podem ser obtidos a partir dos círculos de Mohr correspondentes a diferentes tensões de confinamento (σ_3). σ_1 representa a tensão principal maior, aplicada ao corpo de prova, enquanto σ_3 é a tensão principal menor. Nos ensaios convencionais de cisalhamento direto e triaxiais, σ_2 é considerado igual a σ_3 , pois há uma simetria geométrica e das condições de carregamento impostas aos corpos de prova ensaiados.

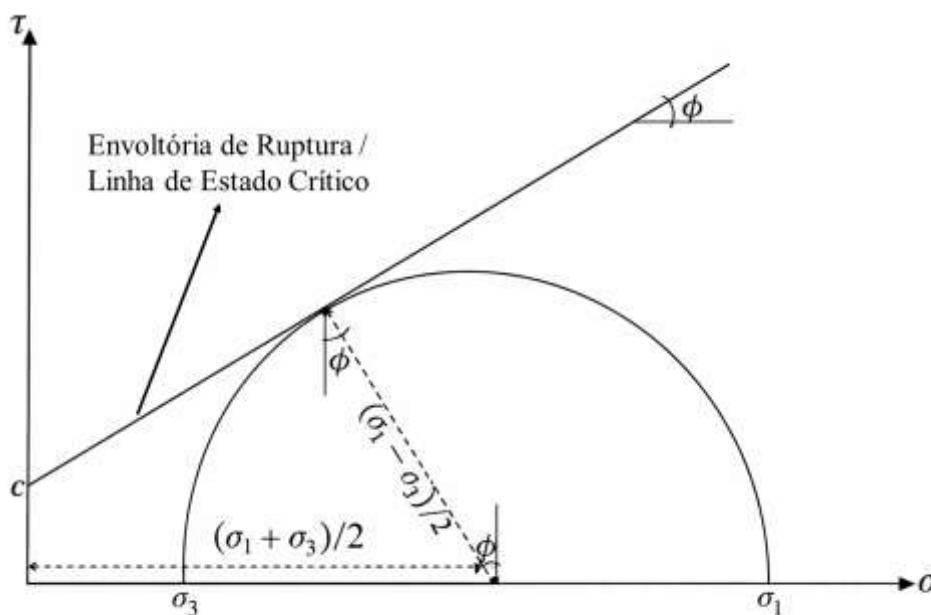


Figura 2.10: Envoltória de Ruptura Mohr-Coulomb no plano τ Vs. σ . (Fonte: Adaptado Sousa Pinto, 2006).

A

Figura 2.10, bem como a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, evidenciam a influência da tensão confinante com a resistência ao cisalhamento. Quanto maior a tensão de confinamento, maior será o esforço exigido para que as partículas que compõem essa massa de solos de rolar uma sobre as outras. Logo, há uma relação direta entre a tensão confinante e o esforço cisalhante exigido para esse material atingir a ruptura segundo o critério de ruptura.

Além do nível de tensões, outras características do material influenciam o comportamento, dentre eles estão: mineralogia e angularidade das partículas. A mineralogia afeta o coeficiente de atrito interparticular e o potencial de imbricamento entre os grãos, influenciando diretamente

o ângulo de atrito (ϕ). Partículas mais angulosas tendem a proporcionar maior intertravamento e, conseqüentemente, maiores ângulos de atrito, enquanto partículas arredondadas ou lamelares favorecem o deslizamento e reduzem a resistência.

Outras características também exercem uma participação na resistência de um material, como a presença de finos. Uma vez que, essas partículas podem preencher os vazios melhorando o imbricamento entre partículas resultando em um arranjo mais resistente. Já uma parcela fina argilosa pode influenciar em um ganho de resistência do conjunto oferecendo um ganho de resistência devido o incremento e coesão.

Por sua vez, a presença de água pode afetar a resposta da resistência ao cisalhamento pela influência da água na tensão efetiva que atua no maciço, a tensão efetiva (σ') é o resultado do alívio gerado na tensão total (σ) na estrutura do solo provocado pela poropressão (P_w), onde é equacionado por:

$$\sigma' = \sigma - P_w \quad \text{Equação 2.2}$$

$$\sigma' = H_{Solo} - \gamma_{Solo} - H_{Água} \cdot \gamma_{Água} \quad \text{Equação 2.3}$$

- H_{Solo} , Coluna de solo do ponto observado;
- γ_{Solo} , peso específico do solo observado;
- $H_{Água}$, Coluna de água do ponto observado;
- $\gamma_{Água}$, peso específico da água.

de modo que a resistência ao cisalhamento com os parâmetros efetivos é dada por

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \text{tg}(\phi') \quad \text{Equação 2.4}$$

onde c' é a coesão efetiva e ϕ' é o ângulo de atrito efetivo.

Segundo Oliveira Filho (1987), uma das principais propriedades que influenciam o comportamento da resistência em um material granular durante o cisalhamento é o índice de vazios inicial ao qual foi ensaiado. A Figura 2.11 apresenta um comparativo entre o cisalhamento de areia em estado fofo e estado denso em condições CD. A Figura 2.11-a ilustra o comportamento da tensão desvio em relação à deformação axial, observa-se que as amostras fofas apresentam um comportamento dúctil ao longo do cisalhamento. Por sua vez, as amostras densas apresentam um aumento da tensão desviadora logo no começo das deformações atingindo uma resistência de pico e, em seguida, há uma perda de resistência na zona pós-pico reduzindo até atingir patamares semelhante a resistência das amostras fofas.

A Figura 2.11-b apresenta o comparativo do índice de vazios ao longo da deformação axial, onde verifica-se a tendência das amostras atingirem índices de vazios semelhantes ao final do

cisalhamento, conforme especificado por Casagrande (1936). Sendo esse um dos indicativos que a amostra atingiu o estado crítico.

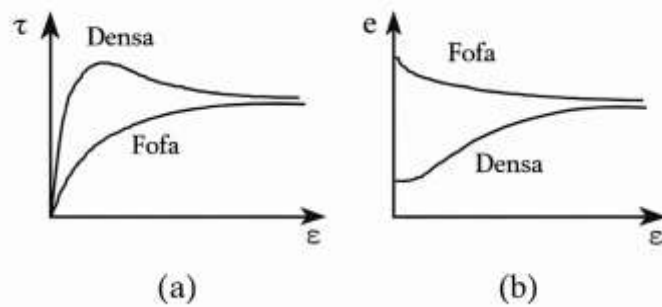


Figura 2.11: Comportamento Drenado Ideal de Solos Granulares Submetidos ao Cisalhamento; (a) Relação da Tensão desvio com a Deformação volumétrica; (b) Relação dos índices de vazios em relação a Deformação Axial. (Fonte: Ratton, 1993).

O comparativo entre variação volumétrica e a deformação axial é apresentada da Figura 2.12. Observa-se que as amostras fofas apresentam uma contração de volume ao longo de todo cisalhamento, atingindo um patamar onde não há mais variação volumétrica significativa. Em relação às amostras densas, inicialmente há uma contração do seu volume e, antes de atingir a sua resistência de pico, a amostra passa a apresentar uma expansão volumétrica (dilatando), apresentando ao final do ensaio um índice de vazios superior, conforme a Figura 2.11-b.

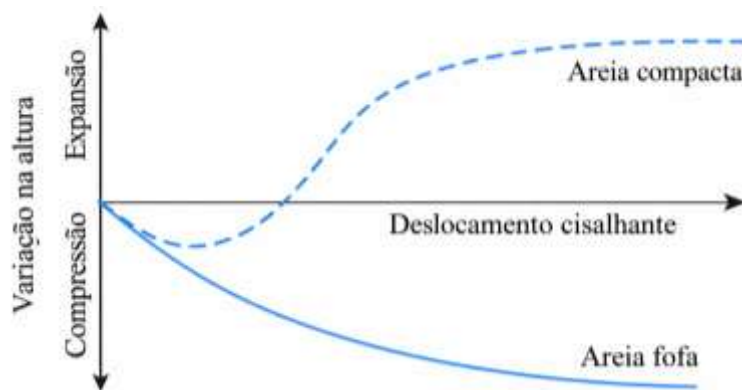


Figura 2.12: Comparativo entre as Deformações Volumétricas entre Amostras Fofas e Densas.

Esse comportamento não pode ser explicado pela teoria da elasticidade, na qual se baseia o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, pois o processo de endurecimento e de dilatação do solo ocorreria condicionado a um parâmetro de Poisson superior a 0,5; o que a teoria da elasticidade não contempla (Sousa Pinto, 2006).

2.4.2 DEFINIÇÃO DO ESTADO CRÍTICO

Wood (1990), apresenta uma definição que o estado crítico ocorre quando o material atinge um estado ao qual a amostra não apresenta mais variações de tensão média, tensão desvio e deformação volumétrica em relação à deformação cisalhante, ou seja, esses parâmetros devem atingir valores constantes ao atingir o estado crítico. Com isso, o autor sugere a seguinte relação:

$$\frac{\delta p'}{\delta \varepsilon_q} = \frac{\delta q}{\delta \varepsilon_q} = \frac{\delta V}{\delta \varepsilon_q} = 0 \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde:

- $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) / 3$, as quais $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ são as tensões principais e $\delta p'$ é a soma dos incrementos de cada uma das componentes das tensões principais; p' é a tensão média efetiva;
- $q = \sigma'_1 - \sigma'_3$; em casos em que $\sigma'_2 = \sigma'_3$ como ocorre em solos isotrópicos e em ensaios triaxiais;
- V é volume do corpo de prova;
- ε_q é a deformação cisalhante, possui relação com a deformação axial dada pela relação $\varepsilon_q = 1,5 \cdot \varepsilon_a$.

O material ao atingir o estado crítico chega um estado de tensões ao qual a tensão efetiva média relaciona-se com a tensão desvio,

$$\eta = \frac{q}{p'} \quad \text{Equação 2.6}$$

onde η é a razão de tensões efetivas. Ao atingir o estado crítico, η assume o mesmo valor de M (parâmetro de resistência) pela seguinte relação:

$$\eta_{crítico} = \frac{q_{crítico}}{p'_{crítico}} = M_{tc} \quad \text{Equação 2.7}$$

O parâmetro M_{tc} possui uma relação direta com o ângulo de atrito, tal qual o ângulo de atrito esse parâmetro varia para cada material. Essa relação é dada por:

$$M_{tc} = 3 - \frac{6 \cdot \text{Sen}(\varphi'_{crit})}{3 - \text{Sen}(\varphi'_{crit})} \quad \text{Equação 2.8}$$

Para obter o valor de M_{tc} para um dado material é usado o plano p' vs q . A Figura 2.13 ilustra o como é realizado a linha de tendência para obter a LEC com ensaios com diferentes tensões confinantes, os pontos em vermelho representam os pares ordenados de tensões p' e q no estado crítico.

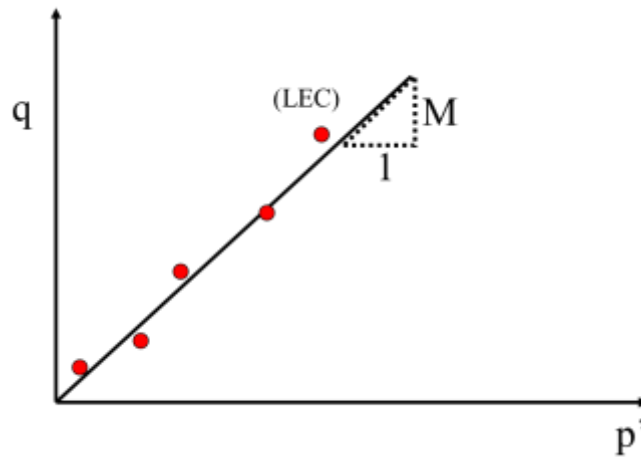


Figura 2.13: Envoltória de Ruptura do Estado Crítico.

Como observado por Taylor em 1948, o índice de vazios ao final do cisalhamento possui uma relação com a tensão efetiva, posteriormente foi proposto uma linha de tendência que projetava esse comportamento. Desse modo, avançou-se no entendimento do comportamento dos materiais granulares e foi possível definir que essa linha de tendência como a Linha de Estados Críticos (LEC), ou *Critical state line* (CSL).

A Figura 2.14 mostra o comportamento volumétrico em ensaios triaxiais ao longo das fases de adensamento e cisalhamento. A Figura 2.14-a ilustra a variação volumétrica no plano e Vs. $\ln(p')$ na fase de consolidação isotrópico da amostra, que foi submetida a uma determinada tensão confinante de consolidação. Essa amostra parte do índice de vazios ao qual foi finalizado a fase de saturação dessa amostra e parte, pela deformação volumétrica causada pela consolidação, para um estado de índice de vazios que tende a seguir um comportamento linear no plano e Vs. $\ln(p')$. Essa linha de tendência é chamada de Linha de consolidação isotrópica e possui uma formulação dada por:

$$e = \Gamma_{LCI} - \lambda_{LCI} \cdot \ln(p') \quad \text{Equação 2.9}$$

onde Γ_{LCI} é o índice de vazios correspondente a 1 kPa de tensão efetiva média da LCI; λ_{LCI} é o parâmetro de compressibilidade do material na LCI.

Destaca-se que para amostras fofas, com estrutura metaestável, pode haver uma variação do índice de vazios durante a fase saturação. Portanto, o índice de vazios que inicia o processo de adensamento não necessariamente é o índice de vazios ao qual a amostra foi moldada (Verdugo & Ishihara, 1996).

Na Figura 2.14-b ilustra o comportamento de variação volumétrica ao longo da fase de cisalhamento em um ensaio triaxial Consolidado Drenado (CD). No início do processo de cisalhamento a amostra apresenta um índice de vazios próximo a LCI, ao longo da fase de cisalhamento essa amostra sofre deformações atingindo um estado crítico onde não há mais variação de volume, conforme especificado por Casagrande (1936). Esse índice de vazios críticos varia com a tensão efetiva média podendo ser descrito por uma linha de tendência, a Linha de Estado críticos, dada por:

$$e = \Gamma_{LEC} - \lambda_{LEC} \cdot \ln(p') \quad \text{Equação 2.10}$$

onde Γ_{LEC} é o índice de vazios correspondente a 1 kPa de tensão efetiva média da LEC; λ_{LEC} é o parâmetro de compressibilidade do material na LEC.

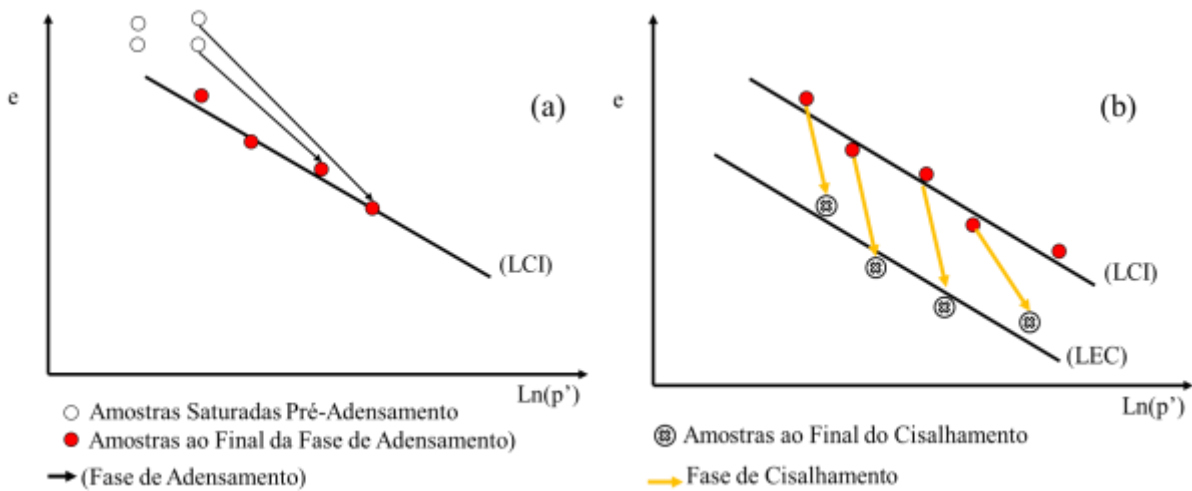


Figura 2.14: Deformação Volumétrica Durante um Ensaio de Cisalhamento. Figura 2.14-a: Deformação Volumétrica Durante a fase de Consolidação; Figura 2.14-b: Deformação Volumétrica Durante a Fase de Cisalhamento. (Fonte: do Autor)

2.4.3 PARÂMETRO DE ESTADO

Casagrande (1936), estudou o comportamento mecânico de areia, com diferentes densidades iniciais, durante um esforço cisalhante. O pesquisador observou que os Corpos de Prova (CP) tendiam a uma densidade crítica (ρ_{crit}), além de que amostras mais densas apresentavam uma deformação volumétrica de expansão ao longo do cisalhamento e as amostras menos densas de redução de seu volume.

Assim, foi definido dois possíveis comportamentos que um material granular pode apresentar durante o cisalhamento: contrativo e dilatante. O comportamento dilatante é visto quando há uma expansão de volume durante o cisalhamento, por outro lado, o comportamento contrativo é observado quando há uma perda do volume de vazios ao longo do ensaio.

Castro (1969, 1975), com base em seus resultados, propôs uma expansão no entendimento do comportamento mecânico de solos suscetíveis à liquefação, destacando que o índice de vazios crítico (e_c) não é uma característica constante do solo. Esse parâmetro varia em função da tensão confinante aplicada. Desta forma, foi possível relacionar o índice de vazios crítico com a tensão de tensão efetiva média (p') e encontrar a Linha de Estado Críticos (LEC), ou *Critical State Line* (CSL), de um material.

Por sua vez, Been & Jefferies (1985) contribuiu com o avanço no entendimento do comportamento desse fenômeno propondo uma variável de estado (ψ), onde

$$\Psi = e_{\text{atual}} - e_{\text{crítico}} \quad \text{Equação 2.11}$$

Diante da necessidade de uma variável de análise para agrupar de maneira mais assertiva o comportamento não drenado dos materiais. Antes disso, a variável de análise era a densidade do corpo de prova e com isso não era possível uma convergência dos resultados, como ilustrado na Figura 2.15.

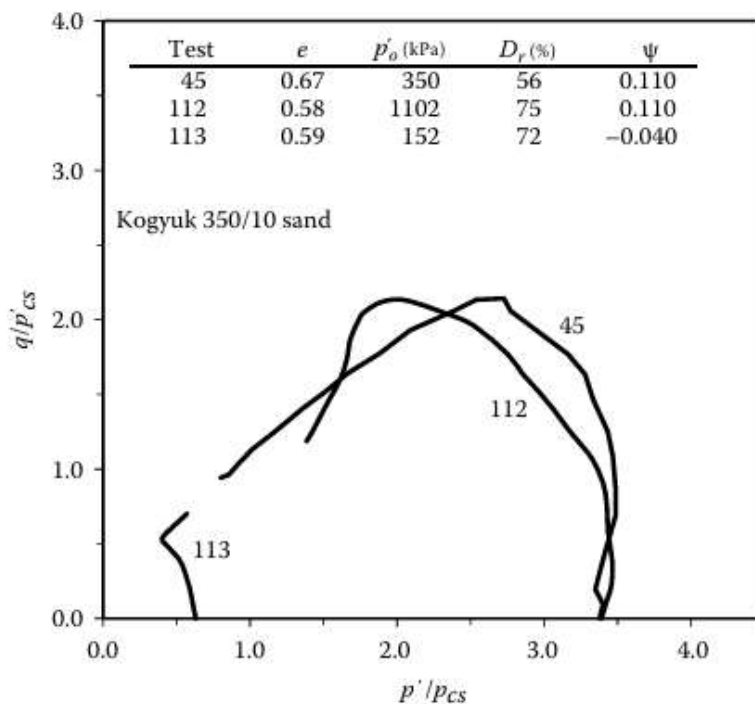


Figura 2.15: Trajetória de Tensões em Ensaio Não Drenados Normalizados. (Fonte: Jefferies & Been, 2016).

Na Figura 2.15, é observado que a trajetória de tensões normalizada com as tensões críticas. Nela estão 3 ensaios, 2 deles com índices de vazios similares e 2 delas com ψ similares, de modo que as amostra que possuem ψ semelhantes apresentam um comportamento similar mesmo com índice de vazios distintos e o mesmo não ocorre quando se analisa as trajetórias de tensão com mesmo índice de vazios e ψ distintos.

Portanto, levando as proposições de Been e Jefferies (1985) e Castro (1969, 1975) para o plano e Vs. $\ln(p')$ a separação do comportamento contrativo e dilatante é delimitada pela LEC, como ilustrado na Figura 2.16.

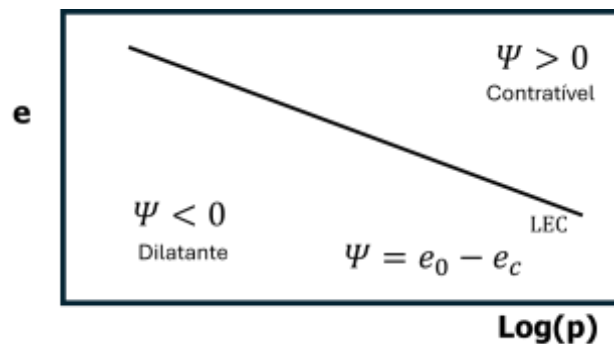


Figura 2.16: Ilustração do Comportamento de Deformação Volumétrica ao Longo do Cisalhamento.

2.4.4 DILATÂNCIA

A dilatância (D) pode ocorrer durante a fase de cisalhamento em uma amostra. Esse parâmetro relaciona-se com a variação da deformação volumétrica ($\delta\epsilon_v$) e com a variação da deformação cisalhante ($\delta\epsilon_q$). Desse modo, a dilatância expressa, em um dado incremento de deformação, se a amostra está apresentando uma expansão volumétrica (dilatância negativa) ou uma contração volumétrica (dilatância positiva).

Esse é um comportamento similar ao descrito por Casagrande (1936), que identificou a tendência de expansão volumétrica em areias densas e contração em areias fofas durante o cisalhamento. A diferença é que o autor analisava a variação volumétrica ao longo de todo o processo de ruptura, e não em termos incrementais como a dilatância é definida.

Matematicamente a dilatância (D) é representada pela razão entre os acréscimos de deformação volumétrica ($\delta\epsilon_v$) e os acréscimos de deformação cisalhante ($\delta\epsilon_q$). Sendo expressa por:

$$D = \frac{\dot{\epsilon}_v}{\dot{\epsilon}_q} = \frac{\delta \epsilon_v}{\delta \epsilon_q} \quad \text{Equação 2.12}$$

Shuttle & Jefferies (2019), apresentam uma metodologia que usa a dilatância para determinar parâmetros do estado crítico como M_{tc} , inclinação da Linha de Estados Críticos (LEC), e o parâmetro Nova (N). A Figura 2.17 ilustra a relação entre a dilatância (D) e a razão de tensões (η). Os pontos experimentais, obtidos ao longo do ensaio triaxial, formam uma tendência linear quando lançados neste plano. A reta ajustada a esses pontos segue a equação proposta por Nova (1982):

$$\eta = M - N \cdot D \quad \text{Equação 2.13}$$

onde

- η é a razão de tensões (q/p');
- M_{tc} é o parâmetro de resistência no estado crítico, obtido quando a dilatância é zero;
- N é o parâmetro de Nova, está relacionado com a dissipação de energia interna durante o cisalhamento em deformações plásticas.

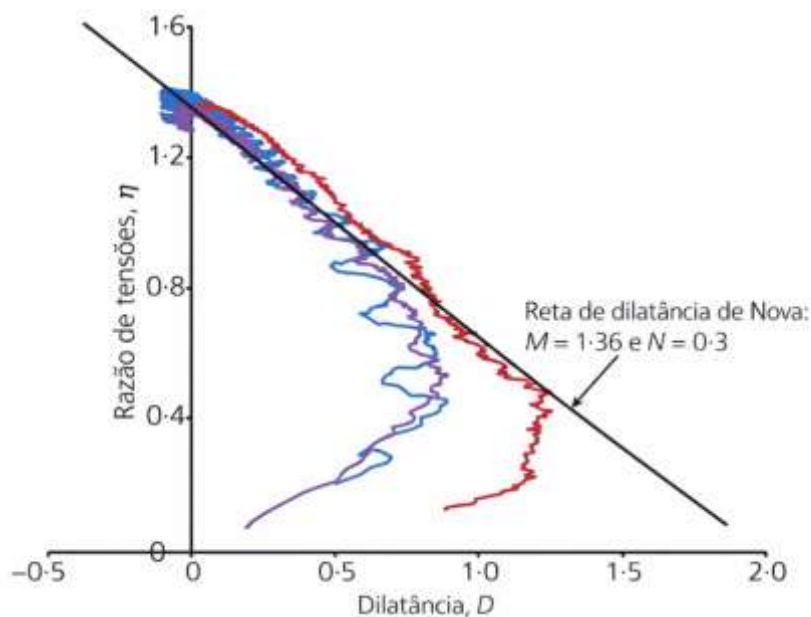


Figura 2.17: Relação de Dilatância e η com o Parametro M_{tc} de resistência (Fonte: Shuttle & Jefferies, 2019).

2.4.5 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE AO FINAL DO ENSAIO

A deformação volumétrica ao longo de um ensaio de cisalhamento é uma variável de interesse e, em geral, esse comportamento é demonstrado pela variação do índice de vazios durante as

fases do ensaio triaxial, como consolidação e cisalhamento. Portanto, a determinação dessa variável é relevante para o entendimento do estado crítico.

Verdugo & Ishihara (1996) apresentam dois métodos para determinação do índice de vazios em ensaios triaxiais. O primeiro método avalia o índice de vazios a partir das dimensões geométricas do corpo de prova antes da montagem do ensaio triaxial. Esse método não é indicado, pois amostras que possuem uma estrutura frágil podem variar o volume na fase de saturação, alterando o índice de vazios previamente obtido, sem possibilidade de quantificar essa deformação.

A segunda metodologia sugere que, ao final do cisalhamento seja aplicada uma tensão de consolidação na amostra rompida e contabiliza a variação volumétrica correspondente. Deste modo, o corpo de prova (CP) ensaiado apresenta uma consistência mais resistente para desmontagem do equipamento, evitando a perda de material em estado fluído. Ao desmontar, retira-se a umidade do corpo de prova ensaiado e determina-se a umidade da amostra, somando-se a parcela de água retirada pelo ressecamento e expulsão devido a consolidação. Os autores salientam que essa é uma metodologia alternativa ao congelamento.

Jefferies & Been (2016), sugerem a realização do congelamento da amostra ao final do ensaio para avaliar o índice de vazios do material após o cisalhamento, sendo esse o método mais adequado para amostras frágeis que apresentaram liquefação.

Marinho *et. al* (2025), corroboram com a ideia de que a técnica de congelamento é necessária em amostras liquefeitas e apresentam uma metodologia de congelamento utilizando gelo seco em um suporte adaptado para comportá-lo. Os autores ressaltam é necessário cuidado ao acompanhar o congelamento, pois pode haver um congelamento da água que fica na interface membrana-amostra, ao ponto de aderir à membrana, dificultando sua remoção e minimizando perturbações no CP para ser determinado a umidade da amostra.

2.5 COMPORTAMENTO TRANSICIONAL

Materiais que apresentam comportamento transicional são aqueles que não possuem uma unicidade da LEC ou da LCN. O Mmbando *et. al* (2023) relatam que o estudo das causas desse comportamento começou recentemente e as suas causas ainda não são bem definidas.

Uma das tentativas de explicar a causa do comportamento transicional foi testada por Carrera *et al.* (2011), que apresentam um estudo com a análise de transicionalidade em diferentes

misturas de areia e silte. Porém, os autores encontraram apenas um leve comportamento transicional das misturas com 50% silte e 50% areia, a dispersão foi pequena. Portanto, os autores não puderam afirmar que o comportamento transicional ocorre pela distribuição granulométrica, mas há um pequeno indício de correlação.

2.5.1 COMPORTAMENTO TRANSICIONAL NA LCN

A metodologia usada para entender a presença de transicionalidade no comportamento de deformação unidimensional foi desenvolvida Ponzoni *et al.* (2014). Os autores introduzem o parâmetro de convergência (m), que apresenta um parâmetro quantitativo do grau de convergência da LCN de um material, esse parâmetro pode variar entre 0 e 1. Quando (m) assume valor igual a zero o material converge para uma única LCN, já quanto mais próximo de 1, maior a transicionalidade.

Dentro da metodologia de descrita em Ponzoni *et al.* (2014), são necessárias pelo menos 3 condições iniciais distintas para avaliar a convergência do material em ensaio oedométrico. A partir dos resultados desses ensaios, constrói-se um gráfico com o volume específico em duas tensões de confinamento distintas e traça-se uma linha de tendência onde o coeficiente angular da regressão linear é o parâmetro (m), assim como ilustrado na Figura 2.18.

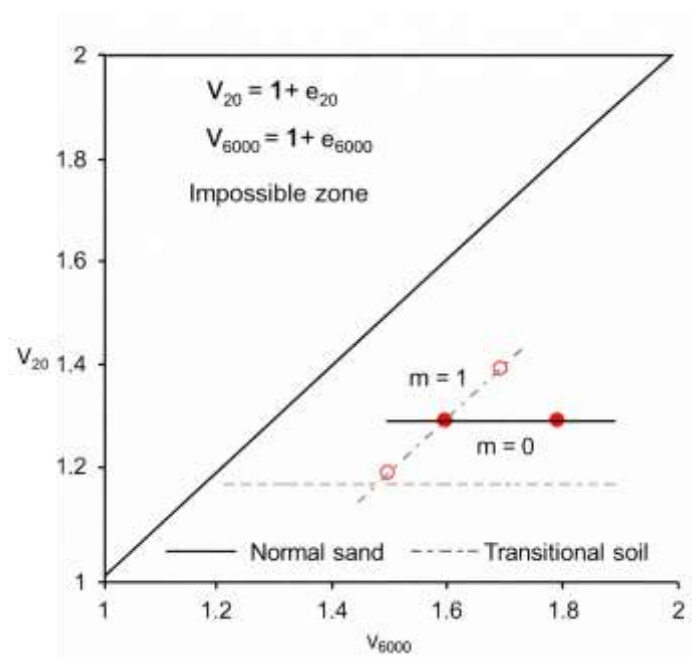


Figura 2.18: Cálculo do Parâmetro de Convergência (m). Fonte Li & Coop (2019).

Por sua vez Li & Coop (2019) apresenta diversos ensaios em rejeitos, com diferentes composições granulométricas e com diferentes métodos de moldagem de corpos de prova, tanto para ensaios oedométricos quanto de cisalhamento em triaxiais. No estudo constatou-se a unicidade da LCN, porém esse comportamento só foi observado após atingir tensões elevadas (em uma das amostras por volta de 7 MPa e em outras 2 próximo de 10 MPa).

2.5.2 COMPORTAMENTO TRANSICIONAL DA LEC

Em casos de materiais que apresentam o comportamento transicional, observa-se que métodos de moldagem podem alterar o comportamento de deformabilidade de uma amostra ao longo do cisalhamento, como observado por Mmbando *et. al* (2023) e Nayanthara *et. al* (2024), onde foram obtidas diferentes LEC. Os resultados dos ensaios triaxiais com amostras moldadas por diferentes métodos apresentaram diferentes valores de λ para a LEC. Em ambos os trabalhos o material de estudo foi rejeito, os métodos de moldagem dos corpos de prova foram os mesmos, *Moist Tamping* e *Slurry Deposition*, e as amostras foram levadas a tensões efetivas médias por volta de 1000 kPa.

Mmbando *et. al* (2023), em seu trabalho, apresentam a LEC no plano p' Vs. q e é possível observar que, mesmo com comportamento transicional no plano e Vs. $\log p'$, a envoltória de ruptura foi única nos dois métodos moldagem de CP, apresentando o mesmo parâmetro de resistência M_{tc} . A Figura 2.19-a apresenta o comportamento transicional no espaço e - $\log(p')$ e a Figura 2.19-(b) ilustra que a envoltória de ruptura independe do método de moldagem do corpo de prova.

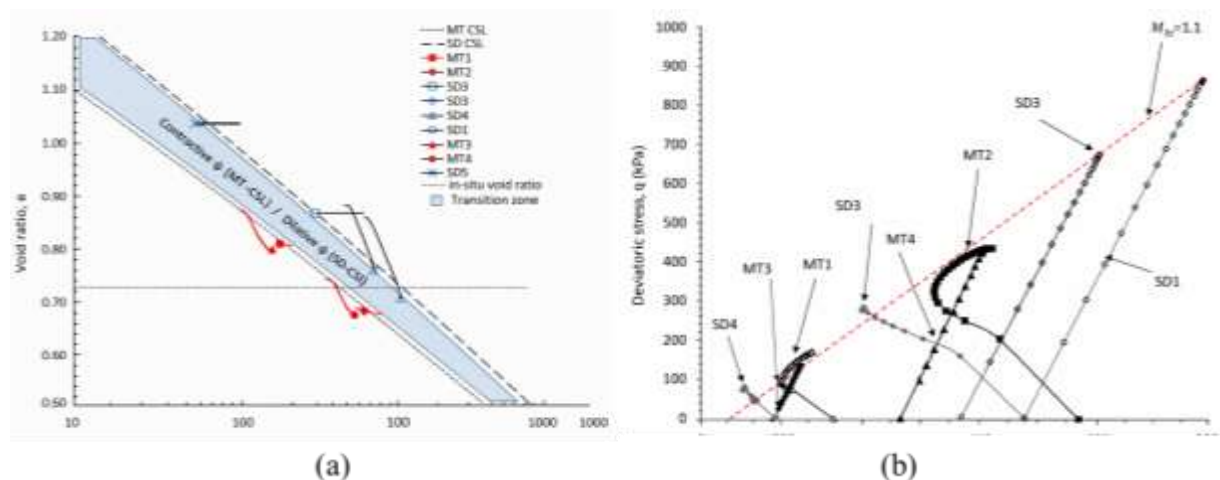


Figura 2.19: Comportamento Transicional na LCN e Convencional na LEC.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado a área de estudo, o material objeto de estudo e ensaios que foram realizados ao longo desta pesquisa.

3.1 MATERIAIS

O material de estudo deste trabalho é um rejeito oriundo da atividade minerária do manganês de uma mina situada na região norte do país. Esse material passou por um processo de beneficiamento puramente físico, com moagem e filtragem. É um resíduo que foi acondicionado após o beneficiamento sem nenhum aditivo químico para ganho de resistência ou mitigação de impacto ambiental.

Foi realizada a coleta amostras diretamente da barragem em condições úmidas. O rejeito foi transportado até o Laboratório de Geotecnia da Vale, lá foi seco e homogeneizado. Em seguida o rejeito foi armazenado em sacos, com aproximadamente 10 kg cada, e transferido para tonéis plásticos.

Uma fração desse material, aproximadamente 200 kg, foi transportado até o Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos na UnB e armazenados em dois tonéis, devidamente fechados para preservar a integridade do material, mesmo que o rejeito estivesse protegido pelo ensacamento.

Para evitar qualquer efeito de estratigrafia devido a vibração durante o traslado do Laboratório da Vale até Brasília, e pelo manuseio para armazenar o material dentro do laboratório, foi adotada uma nova etapa de homogeneização, sendo feita uma saca por vez, à medida que o material era usado nos ensaios.

O procedimento de homogeneização, ilustrado na Figura 3.1, consistiu em realizar um quarteamento manual do rejeito. A etapa (a) consistiu em depositar o rejeito em recipientes e dividi-lo em quatro partes, em seguida, (b) foi homogeneizado as duas porções superiores e depois as outras duas porções inferiores, resultado em (c) onde as duas metades foram novamente homogeneizadas entre si. Essa etapa se repetiu 3 vezes, uma para cada recipiente (d), o material contido nos 3 recipientes foi novamente homogeneizado. Ao final do processo, eram retiradas 3 amostras de rejeito para determinar a umidade higroscópica.

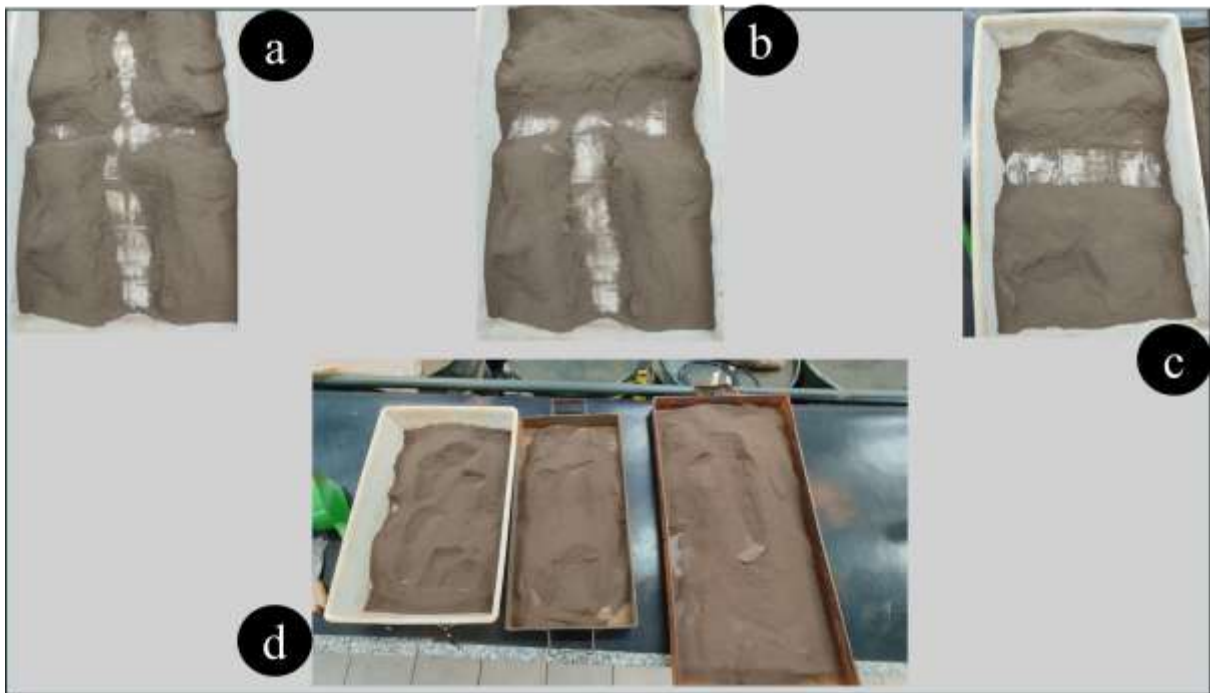


Figura 3.1: Processo de Homogeneização do Rejeito; (a) Quarteamento no Recipiente; (b) Homogeneização Entre os Quartos Superiores e Inferiores; (c) Homogeneização das Metades; (d) Material Homogeneizado.

3.1.1 ÁREA DE ESTUDO

O depósito de manganês do presente estudo está na formação Geológica de Águas Claras, que pertence ao Domínio Carajás. Na porção que está situada é encontrada uma formação sedimentar composta por argilitos, siltitos, arenitos e conglomerados (Araujo *et. al*, 1988; Araujo Filho, 2018).

O domínio Carajás, segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2005), possui uma altitude que varia de 600 a 800 metros em relação ao nível do mar, além de possuir cerca de 4.800 km². Já a formação de Águas Claras ocupa quase toda a área da mina, com aproximadamente 900 km².

Dentro desse domínio, rico em veios minerais, foram instaladas plantas de operação para explorar o bem mineral. Para gerir essa atividade, foram instaladas estruturas de contenção do rejeito gerado, e a área de estudo abriga duas delas, que acondicionam rejeito de manganês. A estrutura mais antiga operou até o ano de 1998, posteriormente, o rejeito produzido pelo beneficiamento do manganês passou a ser direcionado à nova estrutura, de onde o rejeito estudado foi retirado. Um dos fatores que diferenciam os materiais dispostos em cada uma dessas estruturas, é a implementação da segunda planta de beneficiamento, pois quando esta foi

implementada a primeira estrutura já se encontrava no final de sua vida útil (ICMBIO, 2016; Sampaio et al., 2001).

Conforme Nogueira (1995) e Araujo Filho (2018), a estratigrafia do domínio pode ser dividida em dois grupos principais: a porção superior, composta por arenitos e conglomerados fluviais, a porção inferior, é constituída por argilitos e siltitos depositados em sistemas marinhos. Essas diferentes camadas de formação podem gerar diferentes estereis, com concentrações do minério alvo diferentes e com uma composição distinta para um rejeito da mesma mina.

A lavra realizada na mina alvo do estudo ocorre a céu aberto, de modo mecanizado, com uso de maquinários que fazem a fragmentação, carregamento e transporte feito por caminhões. O uso de explosivos não é necessário devido a característica de formação dos veios minerais, pois são friáveis sendo possível essa separação mecânica (Sampaio et. al, 2008).

O beneficiamento de manganês ocorre com processos de britagem e moagem, em seguida esse material é lavado e peneirado. Sampaio & Penna (2001) esquematizaram o sistema de beneficiamento em um fluxograma que pode ser observado na Figura 3.2.

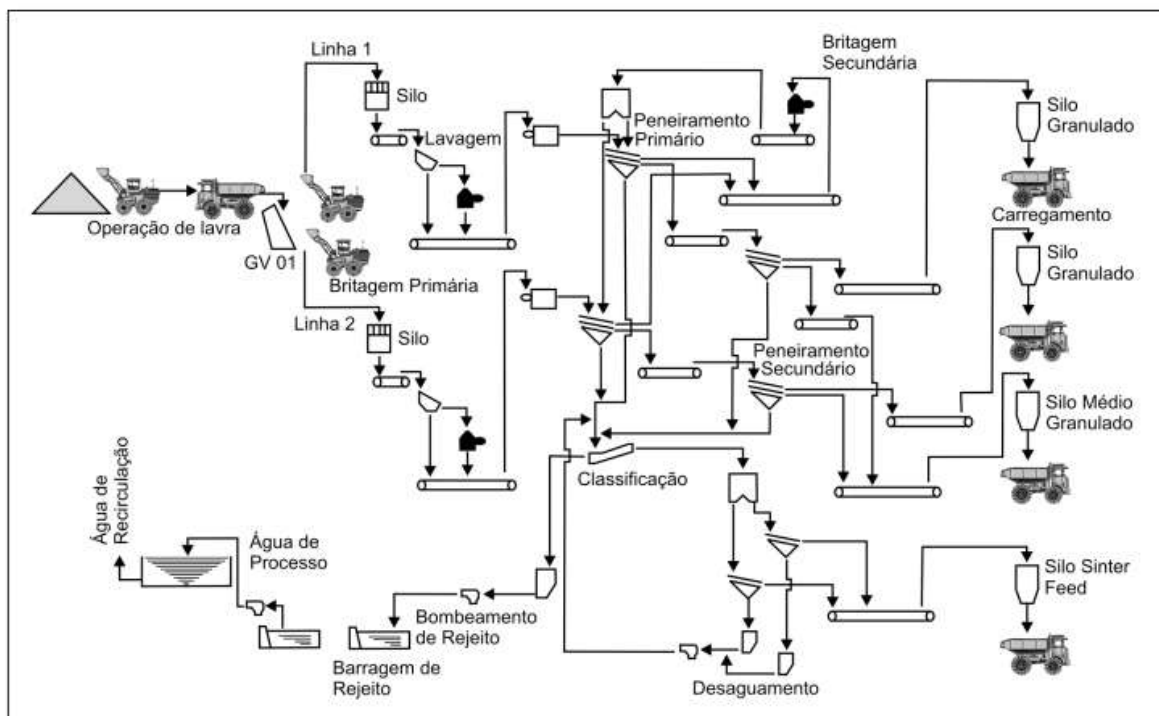


Figura 3.2: Fluxograma de beneficiamento da Mina (Sampaio & Penna, 2001).

Como pode ser observado na Figura 3.2 o material é extraído e transportado por uma carregadeira que possui um sistema de gradeamento, onde é realizada a separação prévia do material que

passa na grade. Esse material é armazenado e alimenta a Linha 1 de beneficiamento, o que fica retido na grade alimenta a Linha 2 de beneficiamento.

A Linha 1 não funciona de forma contínua, quando há um determinado volume para alimentar o sistema, a produção se inicia. Nela, há uma lavagem do material e peneiramento, a parte aproveitada vai para a pilha de minério granular e o que não foi aproveitado entra em uma das etapas de beneficiamento da Linha 2.

Por sua vez, a linha 2 é responsável pelo beneficiamento da fração retida na separação prévia, onde há a britagem e lavagem do material. Na etapa seguinte, o material é transportado para um peneiramento primário, e o material retido é somado ao material aproveitado granular da Linha 1 de beneficiamento. Já o passante segue para a etapa de britagem.

Em seguida, o material moído é encaminhado para um segundo peneiramento, no qual a fração retida é aproveitada como um material granular médio. O passante é movido para um separador aspiral onde a parcela mais granular é aproveitada, a granulometria desse material aproveitado é menor do que as que as demais, sendo denominado de *Sinter Feed*. O passante é recirculado para a centrifuga aspiral e a parcela fina é descartada na barragem de rejeito.

3.2 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

O procedimento dos ensaios realizados nesta pesquisa é apresentado neste tópico, bem como as duas metodologias realizadas nesta pesquisa para moldagem dos corpos de prova ensaiados no triaxial sobre a condição Consolidada e Drenada (CD). Dentre as duas metodologias, está exposto a metodologia desenvolvida para moldar amostras na condição fofa, índice de vazios maiores, que serão usadas no triaxial.

Em diversas metodologias de ensaio que foram adotadas nesta pesquisa, a determinação da umidade gravimétrica (w) foi necessária e seguiu o mesmo procedimento, com exceção da umidade das amostras ensaiadas no triaxial, pois essa umidade foi determinada com o uso da massa total do CP. A determinação de umidade padrão ocorria em triplicatas, onde as cápsulas eram devidamente pesadas, em seguida preenchidas com o material úmido e novamente pesadas. Em seguida, as cápsulas com rejeito úmido eram levadas para secarem em uma estufa com temperatura mantida entre 105°C e 110°C e após um tempo superior a 16 horas eram novamente pesadas e calculada e determinada a umidade.

3.2.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

3.2.1.1 Granulometria

Para realizar caracterização granulométrica do material estudado foi usado um processo de peneiramento fino e sedimentação do material, a metodologia usada está exposta na norma NBR 7181 da ABNT/2016. O rejeito estudado não apresentou fração retida na peneira #10, portanto, não foi realizado a etapa de peneiramento grosso. Os procedimentos adotados são correspondentes as etapas de sedimentação e peneiramento fino.

Posteriormente, foram separadas duas amostras de 70 gramas em dois béqueres distintos, um com defloculante e outro sem defloculante. O primeiro ficou submerso em água destilada e outro ficou submerso com uma solução com ação defloculante.

No próximo dia, foi realizado o procedimento de sedimentação nos tempos determinados em norma e o material foi lavado na peneira #200, postos para secar na estufa por 24 horas e posteriormente realizado o peneiramento fino.

3.2.1.2 Limites de Atterberg

Já na confecção dos ensaios de Limites de Liquidez (LL) e Limites de Plasticidade (LP), foi seguido o método descrito pela norma ABNT NBR 6459/2016 e ABNT NBR 7180/2016 para os ensaios de LL e LP, respectivamente.

Para execução do ensaio, o rejeito foi passado na peneira #40, o material passante foi usado para realizar os ensaios. Por características intrínsecas do material, não foi necessário a etapa de destorroamento manual.

Para a determinação do LL utilizou-se o aparelho de Casagrande, no qual o material passante foi misturado com água destilada para moldá-lo na cunha do equipamento, a estratégia usada durante o ensaio foi começar pelo ramo seco, maior número de golpes, aumentando progressivamente o teor de umidade. São necessários pelo menos 2 pontos com mais de 25 golpes e ao menos outros 2 com menos de 25, sendo necessários no mínimo 5.

Nessa metodologia, avalia-se o número de golpes necessários para o fechamento da ranhura padrão, quando isso acontece retira-se a umidade do material. O LL é definido com auxílio da de uma linha de tendência entre o número de golpes e a umidade respectiva a cada um desses pontos, com base nessa equação da reta define-se a umidade correspondente a 25 golpes.

Por sua vez, o material apresentou plasticidade sendo possível aplicar a metodologia descrita na ABNT NBR 7180/2016. Logo o excedente usado para o ensaio de LL foi usado para moldar tubos de 3 mm de diâmetro em uma superfície de vidro padronizada até que apresentasse uma desagregação, em seguida foi retirada a umidade desse material e com a média dessa umidade foi definido o LP.

Salienta-se que há uma relação conhecida como Índice de Plasticidade que é dada pela subtração do valor de umidade referente ao LP do LL.

3.2.1.3 Densidade Real dos Grãos

A determinação de densidade real dos grãos foi obtida usando picnômetros convencionais de vidro, seguindo a metodologia proposta na NBR 6508 da ABNT (2014), em triplicata. Para isso, foram colocados 70 gramas do rejeito em cada um dos três béqueres, deixando-os submerso em água destilada por 12 horas.

No dia seguinte, as amostras foram levadas ao agitador, onde permaneceram por 15 minutos. Logo depois, essa solução foi transferida para os respectivos picnômetros, onde foi retirado o ar dissolvido com auxílio de uma bomba de sucção. Após essa etapa, completou-se com água destilada até a marcação estimada.

A leitura de massa do conjunto dos picnômetros foi realizada após a estabilização da temperatura, a leitura foi realizada no dia seguinte a fase de retirada de bolhas, em balança com três casas decimais e aferida a temperatura posteriormente. Com isso foi possível obter a densidade do material, com uma curva de calibração disponibilizada pelos técnicos do laboratório.

3.2.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

3.2.2.1 Fluorescência de Raio-X

Para fazer uma análise da composição dos elementos químicos do rejeito estudado, foi realizado um ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX). Essa análise foi realizada no Instituto de Química da Universidade de Brasília (IQ-UnB), utilizando um espectrofotômetro de fluorescência de raios X modelo EDX-720HS, fabricada pela Shimadzu.

A preparação deu-se de 2 formas diferentes, com o objetivo de gerar diferentes análises. A primeira consistiu no rejeito puro, a segundo utilizou o rejeito retido na peneira #200, após o peneiramento, foi lavado em água corrente até que todo material fino fosse lixiviado. Em seguida, o material foi ressecado com auxilia da mesma estuda usada para determinar a umidade. A seguir, ambas as amostras foram levadas ao laboratório da Central Analítica do Instituto de Química da UnB.

3.2.2.2 Difração de Raio-X

A caracterização dos minerais presentes no rejeito de manganês foi realizada através do ensaio de Difração de Raio-X (DRX). O ensaio e a análise foram conduzidos no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG-UnB), utilizando um difratômetro de raios X modelo *Ultima IV*, desenvolvido pela Rigaku, que é equipado com tubo de cobre.

A preparação da amostra deu-se da seguinte forma, o rejeito foi homogeneizado e peneirado na peneira #40, o passante foi levado ao transportado ao IG. Conforme a metodologia de execução do ensaio, o rejeito foi levado à estufa para seu total ressecamento e moído para adequar a granulometria com as condições necessárias para execução do ensaio.

A aquisição e processamento dos dados foram realizados pelo *software* JADE 9. Com base nesses resultados, com auxílio do técnico do laboratório foi possível fazer as análises necessárias para identificar as estruturas cristalinas do rejeito.

3.2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

3.2.3.1 Compactação

O ensaio de compactação foi realizado pelo laboratório da Vale seguindo a metodologia proposta pela norma ABNT NBR 7182 (2020). Foi usada energia normal e não houve reuso de material.

Devido a limitação na quantidade de material para esta pesquisa, e pesquisas futuras que utilizarão o mesmo material, este ensaio não foi replicado, porém foi realizado o ensaio de compactação com reuso a fim de poupar o máximo de rejeito possível, usando a metodologia descrita pela norma ABNT NBR 7182 (2020).

No ensaio de compactação com reuso foi iniciado com a homogeneização do rejeito determinação da umidade higroscópica. Posteriormente, foi acrescentado água destilada até que o rejeito atingisse a uma umidade próxima ao ramo seco da curva de compactação sem reuso, que o Laboratório de Geotecnia da Vale (LGV) disponibilizou para o grupo de pesquisa.

Para cada um dos pontos da curva, o rejeito foi compactado em um molde cilíndrico padrão e sua moldagem ocorreu em 3 camadas. A energia de compactação utilizada foi a Proctor Normal, que correspondeu a 26 golpes com soquete de 2,5 quilos a cada camada. Após a compactação, o conjunto molde cilíndrico e rejeito compactado era pesado, desmoldado e seccionado retirando-se uma porção de material do centro do cilindro para a determinação da umidade.

Na sequência, o rejeito compactado seccionado era totalmente destorroado e homogeneizado com o restante do material, assim foi acrescentado água para obter os pontos seguintes da curva de compactação.

A curva obtida nesse ensaio foi usada para definir a umidade de moldagem dos corpos de prova que foram ensaiados no equipamento triaxial na condição CD.

3.2.4 Oedométrico

Para essa pesquisa foram analisados 13 ensaios oedométricos ao todo, 9 desses ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Vale (LGV) e sua equipe, posteriormente disponibilizado pela Vale para compor essa pesquisa. Os outros 4 ensaios foram realizados nos laboratórios da Universidade de Brasília por este pesquisador.

Os 9 ensaios conduzidos pelo LGV foram submetidos a tensões de carregamento de 12,5 kPa até 2400 kPa e tensões de descarregamento de 1600 kPa até 12,5 kPa.

Esses ensaios diferem entre si pelas Condições Iniciais (CI) de cada ensaio:

1. Inundado ou não inundado;
2. Amostras recém moldadas ou amostras ressecadas;
3. Com índices de vazios inicial para cada ensaios correspondentes a Graus de Compactação (GC) de 80%, 90% e 100%.

Nesta pesquisa foram realizados 4 ensaios com índice de vazios alvo o correspondente a densidade máxima seca da curva de compactação Proctor Normal. Essas amostras foram

ensaiadas com duas variações, a primeira foi a condição de inundação durante o ensaio (inundada ou não inundada), já a segunda foi observada se a Metodologia A e a Metodologia B descrita na ASTM – D2435 (2020). Essa é uma norma desenvolvida para solos, porém por não haver uma norma nacional ou internacional própria para rejeito ela foi usada como base.

A Metodologia A é correspondente a metodologia descrita na ABNT NBR 16853/2020, onde indica-se que o avanço de cada etapa de carregamento e descarregamento devem ocorrer com tempo mínimo de 24 horas de duração. Já na metodologia B, o avanço das etapas está vinculado ao valor de $T(100)$, que é o tempo necessário para que 100% do processo de consolidação ocorra para uma dada tensão. Para garantir a estabilidade da leitura de $T(100)$, adotou-se que o avanço de etapa ocorreria após 90 minutos do tempo estimado de $T(100)$ pelo *software* do equipamento.

Ressalta-se que as tensões nos 4 ensaios foram limitadas a 1600 kPa, uma vez que um dos equipamentos possui limite de 1,8 Mpa. Para permitir a comparação entre os ensaios, foram usadas as mesmas tensões em todos os outros ensaios. As tensões de carregamento de 12,5 kPa até 1600 kPa e descarregamento de 800 kPa até 12,5 kPa.

Dois ensaios foram realizados no Laboratório Geofluxe usando a Metodologia A, no equipamento da *Owntec* modelo Ms-102, outros dois foram realizados no laboratório dos Novos Materiais Geotécnicos após da aquisição do equipamento do *ShearTrac II direct simple shear* (DSS) da empresa *Geocomp*.

A moldagem dos corpos de prova, para o ensaio de adensamento, foi realizada com a compactação do rejeito no cilindro Proctor de 1000 cm³ utilizando a energia normal de compactação com a sua densidade seca máxima e umidade ótima.

Após a compactação, foi usado o anel de adensamento para cravar e ir, pouco a pouco, pressionando o anel no corpo compactado e retirando o excedente por talhamento ao redor do anel, Figura 3.3. Com a completa inserção do anel de adensamento no corpo de rejeito compactado, tendo um excedente na parte superior e inferior, foi realizado um ajuste fino no anel de adensamento até que as duas fases ficassem regulares para montar o anel de adensamento na célula de adensamento, Figura 3.3.

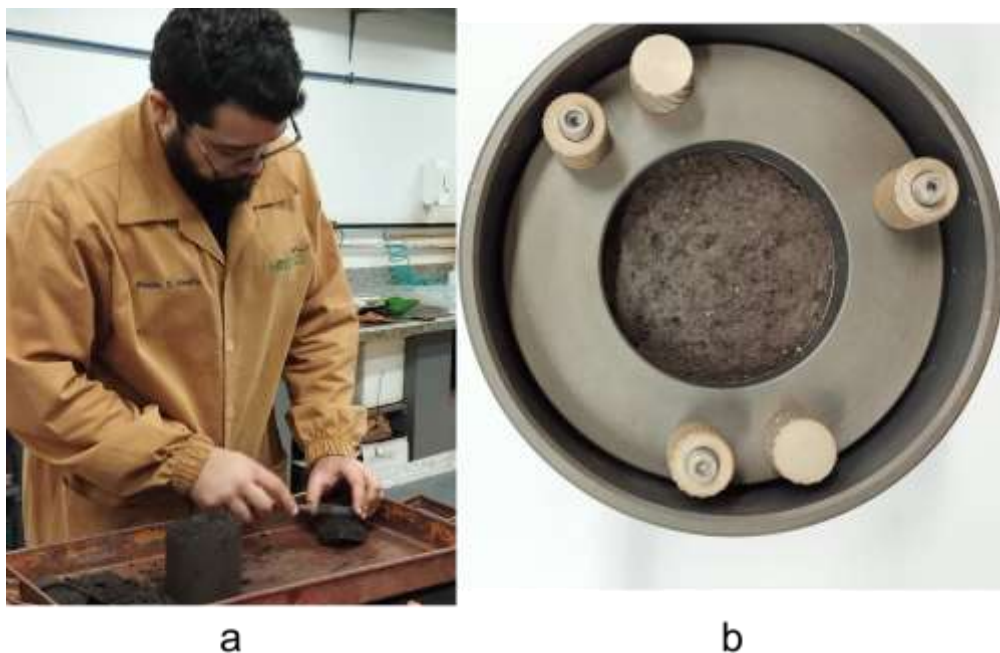


Figura 3.3: Montagem das Amostras para o Ensaio Oedométrico: a) Moldagem e Tallagem da Amostra no Anel de Adensamento; b) Célula de Adensamento Montada.

A metodologia descrita por Ponzoni *et. al* (2014), sobre comportamento transicional, foi utilizada neste estudo. Foi possível avaliar o comportamento transicional de um rejeito na LCN usando os ensaios que foram realizados no LGV, as tensões analisadas foram de 50 kPa, 400 kPa, 800 kPa, 1600 kPa e 2400 kPa.

Pelo método descrito por Ponzoni *et. al* (2014), que também foi aplicado por Li & Coop (2019), foi observado o comportamento transicional na LCN por meio do coeficiente angular da linha de tendência, nomeados como índice de convergência (m). Se o material ao final do ensaio apresentar valor de (m) igual a 1, o material apresenta um comportamento transicional, quando apresenta valor zero o material não apresenta comportamento transicional.

3.2.5 TRIAXIAL MONOTÔNICO

3.2.5.1 Moldagem dos Corpos de Prova para Ensaio Triaxiais

A moldagem dos corpos de prova deste trabalho deu-se de duas formas, a primeira as amostras foram moldadas em um estado mais denso com energia Proctor Normal e amostras fofas com índice de vazios alvo de 1,5. Tendo como objetivo uma variação do índice de vazios que permitisse o estudo do comportamento do rejeito obtendo a Linha de Estados Críticos (LEC).

As dimensões das amostras foram de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro, com uma margem de 5 mm de erro, as amostras que ultrapassassem essa margem foram descartadas.

O processo de moldagem das amostras densas foi realizado com base na curva de compactação desenvolvida na pesquisa, que foi construída com o reuso de material no ensaio de compactação. As amostras densas e fofas foram moldadas com auxílio do mini-MCV e de componentes auxiliares ilustrados na Figura 3.4.

Ressaltasse que a umidade adotada para a compactação de ambos os índices de vazios foi a umidade ótima da curva de compactação com energia Proctor Normal de 30,75%. Para moldar os corpos de prova densos foi adotada a umidade ótima estipulado que eles seriam confeccionados com 3 camadas e a definição de 6 golpes por camada foi obtida pela relação dada por:

$$E = \frac{P \cdot n \cdot N \cdot h}{V} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde E é a energia de compactação 6 kgf.cm.cm⁻³; P é o peso do soquete com 2,5 kg; h é a altura de queda do soquete de 30,5 cm; n é o número de camadas; N é o número de golpes e V é o volume para um corpo de prova de 100 mm de altura para 50 de diâmetro.

Para confeccionar os corpos de prova com índice de vazios elevado foi necessária uma investigação sobre qual método seria adotado na pesquisa. Uma vez que, não havia um conhecimento do comportamento de consistência do rejeito de manganês no momento de sua moldagem e se os equipamentos disponíveis no laboratório seriam o suficiente para a execução das metodologias conhecidas.

A primeira tentativa foi realizada usando o método *moist tamping* diretamente na célula do triaxial usando um molde tripartido. Porém, observou-se que o molde não permitia a construção do corpo de prova e seria necessário ajustes ao molde para a correta aplicação da metodologia, então abandonou-se a ideia do uso do molde tripartido, pois houve um receio do tempo necessário para confeccionar os ajustes não encaixassem na agenda disponível para realização dos ensaios triaxiais.

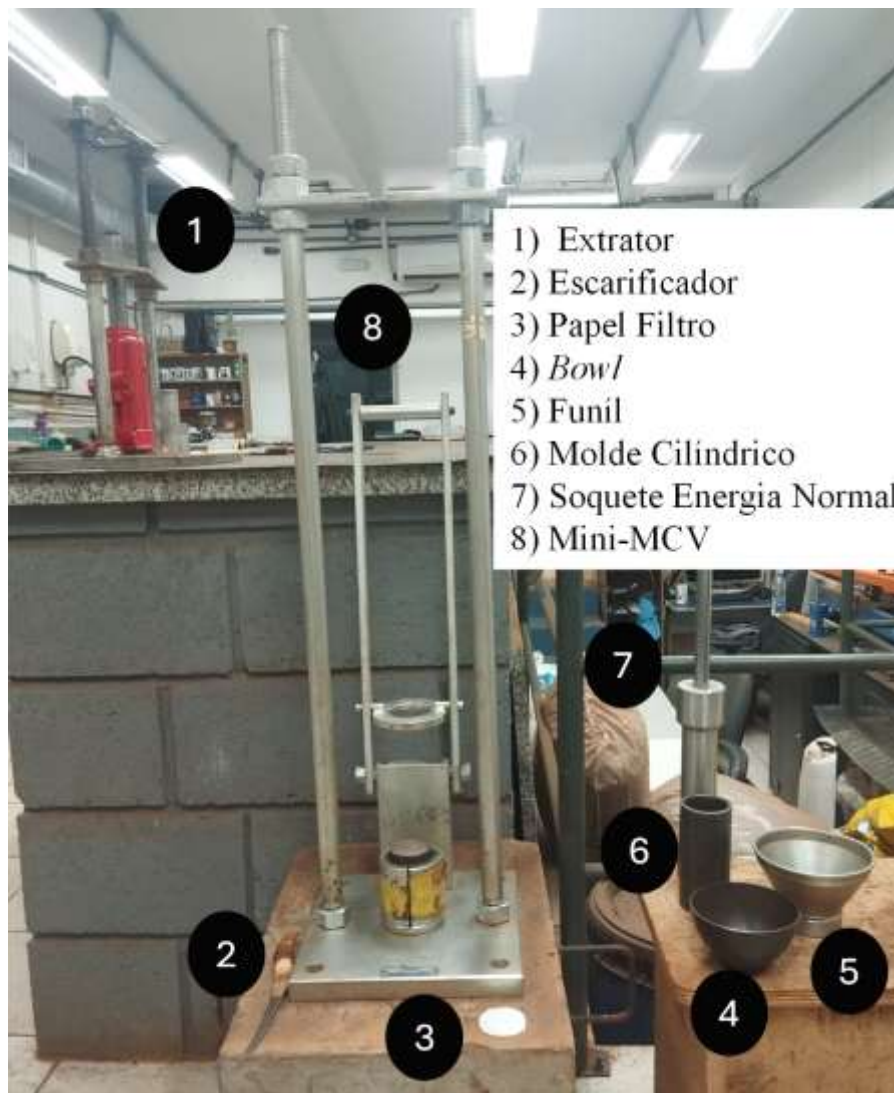


Figura 3.4: Equipamento mini-MCV e Utensílios para Moldagem das Amostras.

Buscou-se um método alternativo para a moldagem de amostras fofas inspirada no *moist tamping* utilizando os equipamentos disponíveis no laboratório. Em uma das tentativas de moldar um corpo de prova com índice de vazios superior a 1,8 foi suado um molde cilíndrico compactando camadas que tiveram seus índices de vazios controlados pedindo a altura de cada uma das camadas, entretanto, ao desmoldar a amostra, o corpo de prova não apresentava resistência suficiente para ser transportado, uma vez que na tentativa de manuseá-lo os corpos de prova moldados rompiam-se.

Então, para que a resistência das amostras permitisse o manuseio das amostras após a sua moldagem, foi estabelecido que o índice de vazios alvo para as amostras fofas seriam de 1,5. Para moldar essas amostras foi testado usar o equipamento mini-MCV, assim como nas amostras densas, para moldagem das amostras fofas. Para encontrar uma combinação de

número de camadas e número de golpes que fosse possível obter amostras com o índice de vazios alvo, foram necessárias algumas tentativas até chegar à combinação de 1 golpe por camada com a altura máxima do soquete construída em 3 camadas.

No entanto, com essa combinação as amostras, visivelmente, não estavam homogêneas. Pois as regiões de interface entre camadas apresentavam um aspecto mais compacto e fora dessa região o aspecto era diferente.

Para contornar essa problemática foram adotadas 6 camadas com uma redução da altura de queda, adotando-se uma altura de 152 mm, com a finalidade de manter a mesma energia e o mesmo índice de vazios ao final da moldagem que permitiu moldar a amostra com índice de vazios de 1,5.

Ressalta-se que foram realizadas medições de altura para cada uma das 6 camadas nos primeiros corpos de prova moldados, tendo o intuito verificar se as camadas produzidas apresentavam o índice de vazios desejado o que se mostrou. Esse procedimento, que foi inspirado nos cuidados necessários na metodologia *moist tamping*, foi aplicada apenas na fase inicial de investigação. Uma vez que, ao constatar um comportamento consistente, o controle da altura das camadas foi descontinuado, mantendo-se a verificação do índice de vazios global das amostras.

Dessa maneira a Figura 3.5 apresenta um comparativo entre as amostras moldadas na Energia Proctor Normal (a) e a amostra na condição fofa (b).

Ao final da fase de moldagem dos corpos de prova, as medidas geométricas das amostras eram retiradas e a amostra era envolta em plástico filme para proteção e manutenção da umidade. Em seguida, o corpo de prova era identificado e encaminhados para a câmara úmida do laboratório do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG), as amostras foram reservadas nesse local com objetivo de preservar o máximo possível a umidade e a estrutura dos corpos de prova que posteriormente foram ensaiados.

Como eram moldadas bateladas de 5-8 corpos de prova por vez, o critério de escolha da amostra a ser ensaiada foi o que apresentava melhor homogeneidade aparente e em segundo critério foi a proximidade com o índice de vazios alvo do ensaio.



Figura 3.5: Ilustração de corpos de prova moldados para os Ensaios Triaxiais: a) Amostra moldada com Energia Proctor Normal; b) Amostra fofa.

3.2.5.2 Equipamentos Usados e Descrição Geral do Sistema de Captação de Dados

O equipamento triaxial utilizado nesta pesquisa foi modelo de baixas e médias tensões da empresa *Fulltest*. Esse equipamento apresenta uma configuração convencional na etapa de cisalhamento triaxial, onde o deslocamento da prensa que é controlado. A velocidade usada para os ensaios foi de 0,04 mm/min e a tensão máxima do equipamento é de 3,2 MPa.

A câmara do triaxial é equipada com 5 válvulas, uma para a transdutor de poro-pressão, os outros 3 para são conectados com pressurizadores da empresa *Fulltest* com capacidade máxima de 3,0 MPa. O primeiro pressurizador é responsável pela válvula confinante, o segundo pela válvula da base do corpo de prova, o terceiro é pela válvula do topo. Por fim, uma quinta válvula que serve no topo da câmara para entrada e saída de ar. Os principais componentes usados no equipamento triaxial estão expressos na Figura 3.6.

O equipamento triaxial utilizado possui um sistema automatizado de aquisição de dados. O conjunto conecta os pressurizadores, responsáveis pela variação volumétrica e pelo controle de pressão. Esses pressurizadores estão conectados nas linhas de base, de tensão confinante, de e linha de topo, a linha de poropressão é conectada a um sensor de poropressão. Os sensores da prensa estão conectados a uma célula de carga e a um transdutor de deslocamento (LVDT), que permite o monitoramento da força aplicada e das deformações ao longo do ensaio.

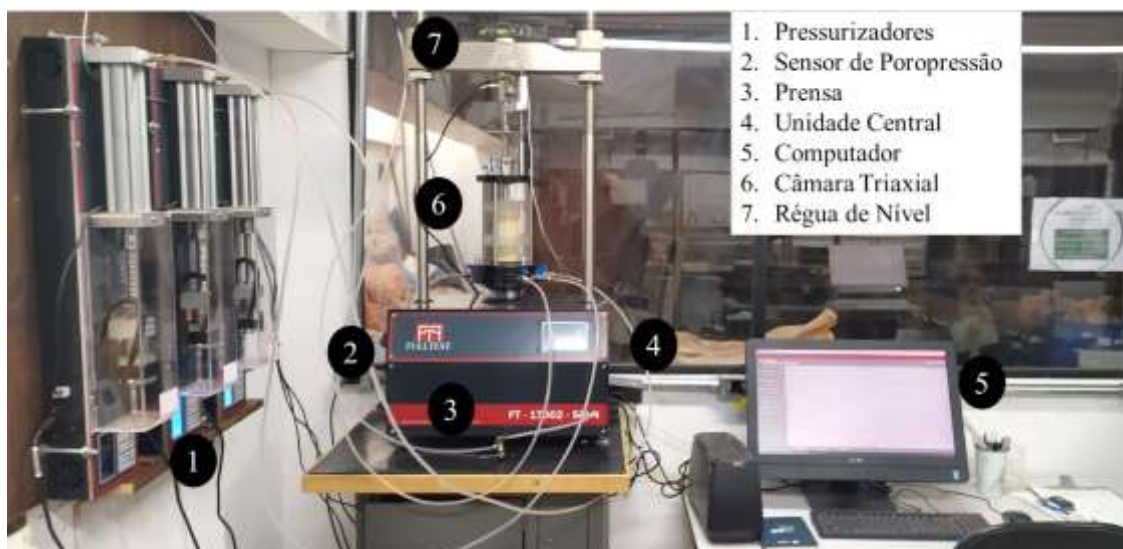


Figura 3.6: Equipamento de Compressão triaxial.

Todos esses sensores estão conectados a uma unidade central responsável pela leitura, aquisição, armazenamento e processamento dessas informações de maneira contínua. O controle do ensaio e o tratamento inicial dos dados são realizados pelo *software* do fabricante, que disponibiliza dados brutos em formato de planilhas eletrônicas para análise.

Dessa forma, ao longo das fases o sistema permitiu obter os parâmetros de variação de volume (ΔV), Volume adicionado na linha de base durante a saturação (V_b), tensão confinante (σ_3), poropressão (P_w), deslocamento axial (S), força cisalhante (F_c). Esses parâmetros foram captados pelo conjunto de captação de dados e disponibilizados por uma planilha tipo .csv exportada pelo *software* da fornecedora do equipamento.

3.2.5.3 Etapa Preparatória e Fase de Montagem do Equipamento

Uma das atividades preparatórias antes da montagem do ensaio era o enchimento dos reservatórios dos pressurizadores, com cuidado para não haver entrada de ar, e o enchimento do reservatório responsável pelo enchimento da câmara triaxial, quando necessário.

Para dar início a montagem do ensaio era necessário pegar o corpo de prova previamente selecionado na câmara úmida do laboratório e levar até a sala onde fica o equipamento triaxial, onde todo o ambiente de montagem estava organizado.

O primeiro passo da montagem consistiu na saturação das linhas de base das válvulas responsáveis pela tensão confinante, transdutor de poro-pressão e base da amostra. Em seguida,

foi posicionada uma pedra porosa associada a papel filtro sobre o pedestal da célula triaxial, servindo de apoio ao corpo de prova de rejeito, que foi cuidadosamente colocado sobre esse conjunto. Posteriormente, instalou-se um novo conjunto de papel filtro e pedra porosa na parte superior da amostra, permitindo o adequado apoio do *top cap*.

Na sequência, realizou-se a vedação da amostra com uma membrana de látex e, em seguida, conectou-se a mangueira que liga o *top cap* à linha de base que leva ao pressurizador responsável pela pressão e variação volumétrica do top da amostra. Posteriormente, a câmara montada foi devidamente fechada e transportada até o pedestal da prensa triaxial, onde foi inundada tomando cuidado para remoção das bolhas no interior da câmara.

Para evitar que a amostra sofresse cisalhamento durante a finalização da montagem e durante a fase de saturação, foi utilizado um dispositivo de travamento da haste de transferência de carga axial na amostra.

Em seguida os pressurizadores, bem como o transdutor de poro-pressão foram devidamente conectados a câmara triaxial e foi ajustada a pressão confinante com a pressão interna do corpo de prova para que a pressão confinante fosse 20 kPa maior do que a pressão interna da amostra.

3.2.5.4 Saturação

A fase de saturação das amostras ocorria imediatamente após o final da fase de montagem, onde a saturação ocorria aplicando uma contrapressão na amostra. Esse aumento da pressão interna e da pressão confinante ocorreu de maneira gradual, com incrementos de pressão em uma taxa de 50 kPa por hora, até o momento que o ensaio apresentasse um parâmetro B de Skempton de superior a 0,95. Durante todo o processo de saturação tomou-se o cuidado para que a diferença entre a pressão confinante e a pressão interna mantivesse uma média de 20 kPa.

O parâmetro B de Skempton foi calculado de maneira manual e utilizando o software do próprio equipamento. Ele foi usado para avaliar a saturação do material e o valor acima de 0,95 é justamente para garantir essa condição, esse parâmetro determinado por meio de um incremento de carga na confinante ($\Delta\sigma_3$) e avaliasse o incremento de poropressão (ΔP_w) gerada. O equacionamento desse parâmetro se dar por:

$$B = \frac{\Delta P_w}{\Delta\sigma_3} \quad \text{Equação 3.2}$$

De modo geral, as amostras moldadas em um estado mais denso apresentaram um tempo médio de 22 horas pra saturarem, $B > 0,95$; enquanto as amostras em estado fofo levaram demandaram, em média, 10 horas para atingirem o estado saturado. Apenas o ensaio realizado com tensão confinante de 200 kPa na amostra mais densa apresentou um parâmetro B que não seguiu o critério, uma vez que após mais de 26 horas de saturação o valor máximo alcançado foi de 0,94.

Ao final da etapa de saturação, foram realizados os ensaios de permeabilidade que seguiu o método descrita pela ABNT NBR 13292/2021, que corresponde a metodologia para obter o coeficiente de permeabilidade em amostras saturadas (k_s) por meio de carga constante. As medições foram obtidas com auxílio dos pressurizadores, que possuem a capacidade de computar variação de volume e pressão aplicada. A diferença de carga nas linhas de topo e de base foi de 2 a 8 kPa com um tempo de percolação de 5 minutos por leitura, sendo feitas 5 leituras por ensaio, adotou-se o seu valor médio das leituras para cada ponto.

3.2.5.5 Fase de Consolidação

As tensões de adensamento usados no ensaio desta pesquisa foram de 200, 400, 800 e 1600 kPa. O processo de adensamento durou, em média, para estabilização do processo de adensamento primário de 30 a 50 minutos.

Durante esse processo foi medido a variação volumétrica do corpo de prova, grandeza necessária para fazer a correção da geometria do corpo de prova durante essa etapa seguindo a metodologia descrita em Head (1998) e Boszczowski *et al* (2023), pois as amostras apresentaram uma variação volumétrica significativa, ao ponto das dimensões geométricas alteradas, se não corrigidas, alterarem os valores de tensão na fase de cisalhamento.

A formulação da correção geométrica na fase consolidação é dada por:

$$H_{a,i} = H_0 \left(1 - \frac{1 \cdot \varepsilon_{v,i}}{3}\right) \quad \text{Equação 3.3}$$

$$A_{a,i} = A_0 \left(1 - \frac{2 \cdot \varepsilon_{v,i}}{3}\right) \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

- $H_{a,i}$ é a altura do CP ao final da fase de consolidação (cm);
- H_0 é a altura inicial do CP (cm);
- $\varepsilon_{v,i}$ é a deformação volumétrica durante a fase de consolidação;

- $A_{a,i}$ é a área do corpo de prova ao final da fase de consolidação (cm^2).

e a deformação volumétrica é calculado pela razão entre a variação volumétrica (ΔV) na fase de consolidação com o volume total (V) no início da fase de consolidação, dado por

$$\varepsilon_{v,i} = \frac{\Delta V}{V} \quad \text{Equação 3.5}$$

3.2.5.6 Cisalhamento

Após a fase de consolidação, as amostras avançaram para a fase de cisalhamento, onde foram ensaiadas sobre condições drenadas.

As amostras fofas e as amostras com tensão confinante de 800 kPa e 1600 kPa correspondentes às amostras mais densas sofreram deformações significativas. Por isso, se fez necessário um ajuste manual da haste de aplicação de carga com o top-cap, pois além do deslocamento significativo também houve um desalinhamento axial entre o top cap e a haste. O resultado desse ajuste pode ser observado na Figura 3.7, onde a Figura 3.7-a é o momento antes do ajuste e a Figura 3.7-b é a amostra após o ajuste.

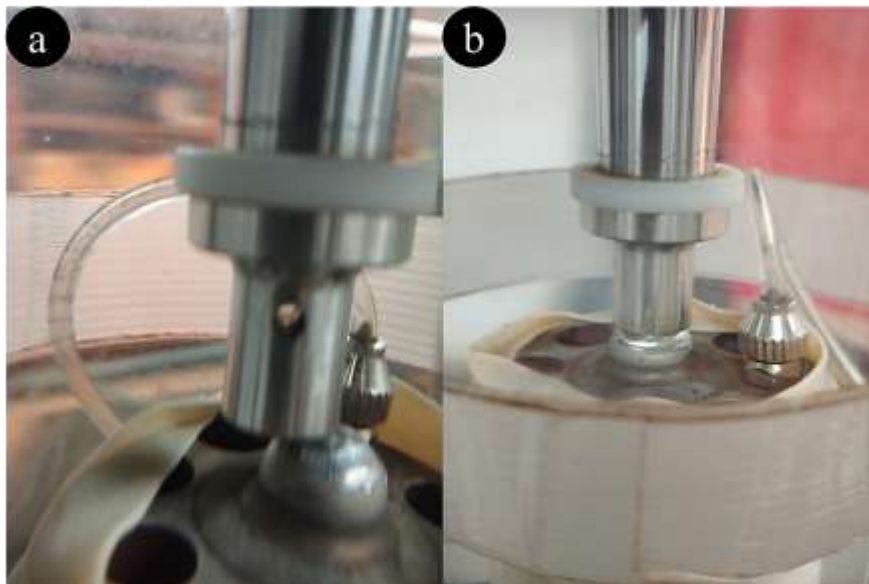


Figura 3.7: Ajuste da Haste do Cisalhamento; a) Antes do Ajuste; b) Após o Ajuste.

Isso foi realizado para que no início da fase de cisalhamento a variação volumétrica apresentada durante o ensaio fosse correspondente apenas a deformação da amostra. Ao final do ajuste a carga, poropressão e deslocamento foram zerados e a válvula de drenagem permaneceu aberta,

a fim de não haver geração de poropressão durante o andamento do ensaio. Assim, pode-se dar início ao cisalhamento da amostra ligando a prensa.

Para realizar o ensaio de cisalhamento foi fixado deformações de até 30%, porém houve problemas com o software do equipamento. Desta forma, as deformações mínimas para esse ensaio foram de 20%. Esse valor mostrou-se efetivo, a deformação axial de 20% contemplou a resistência de pico e a estabilização da deformação volumétrica das amostras, permitindo assim avaliar o comportamento mecânico e algumas características do estado crítico do rejeito de manganês.

Assim como no caso do adensamento, aplicou-se a correção das dimensões geométricas ao longo do ensaio de cisalhamento, mesmo o *software* fornecendo as dimensões corrigidas dentro do seu próprio programa. A dimensão geométrica corrigida foi a dá área, pois a altura ao longo do cisalhamento foi calculada pela diferença da altura da amostra ao final da fase de consolidação e o deslocamento axial.

Para determinar a área corrigida foram testadas duas metodologias, a primeira exposta nos trabalhos de Lade (2016) e Boszczowski *et al* (2023), expressa por

$$A_{c,i} = A_a \left(\frac{1 - \varepsilon_{v,i}}{1 - \varepsilon_{ax}} \right) \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde,

- $A_{c,i}$ é a área ao longo do cisalhamento (cm²);
- A_a é a área ao final do adensamento (cm²);
- ε_{ax} é a deformação axial;
- $\varepsilon_{v,i}$ é a deformação volumétrica durante a fase de cisalhamento;

A segunda metodologia foi expressa por Been & Jeffreys (2016), com formulação

$$A_{c,i} = A_a \left(\frac{1 - \varepsilon_{v,i}}{1,5 - \varepsilon_{ax}} \right) \quad \text{Equação 3.7}$$

A escolha foi pelo primeiro método, após determinar as tensões efetivas usando as áreas corrigidas das duas metodologias foi realizado um comparativo para determinar qual área corrigida seria usada no estudo. A magnitude de tensões encontradas que usaram a área corrigida foi muito similar, porém divergiu da tensão desvio fornecida pelo software, chegando a uma diferença superior a 20% nas amostras em estado denso e 10% nas de estado fofo. Um exemplo gráfico da comparação está expresso da Figura 3.8.

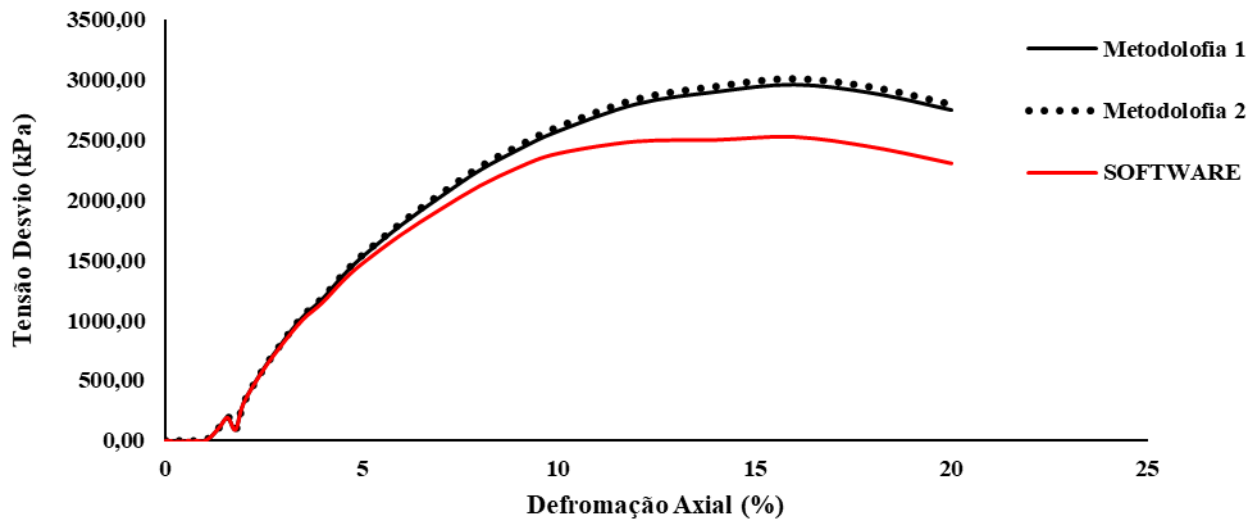


Figura 3.8: Comparativo da Tensões Desvio em Diferentes Metodologias de Cálculo de Área.

3.2.5.7 Desmonte do Ensaio e Obtenção da Umidade ao Final do Ensaio

Após o final da fase de cisalhamento o equipamento triaxial foi desmontando. Descendo a prensa, fechando e desconectando as válvulas da câmara do triaxial e esvaziando a água da câmara. Em seguida, desmontava-se o corpo de prova retirando o *top cap* com os *o-rings* e o conjunto pedra porosa com papel filtro.

A retirada da membrana látex foi realizada dobrando-a de cima pra baixo, de maneira muito cuidadosa, para preservar a estrutura da amostra e reduzir a perda de material ao mínimo. A membrana foi abaixada até a base do suporte da célula, desse modo foi possível retirar a amostra cisalhada completamente do pedestal da base. A amostra foi usada por inteiro para determinar a umidade ao final do cisalhamento.

Essa umidade foi chamada de umidade final (w_f), e foi usada para determinação do índice de vazios pela relação:

$$e = \frac{G_s \cdot w_f}{S_r} \quad \text{Equação 3.8}$$

onde G_s representa a razão entre a o peso específico real dos grãos (ρ_s) e o peso específico da água (ρ_w). Deste modo, pôde-se simplificar a equação, uma vez que a amostra passou pela fase de saturação e atingiu um parâmetro B acima de 0,95. Essa nova relação e dada por:

$$e_f = \frac{G_s \cdot w_f}{1} \quad \text{Equação 3.9}$$

3.2.5.8 Trajetória do Índice de Vazios ao Longo do Cisalhamento

Para acompanhar o comportamento do índice de vazios ao longo do cisalhamento, foi desenvolvido uma formulação partindo da relação clássica de índice de vazios (e), que é a razão entre o volume de vazios (V_v) com volume de sólidos (V_s) dada por:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{Equação 3.10}$$

É considerado que todos os vazios da amostra ensaiada estão totalmente preenchidos com água durante o cisalhamento, parâmetro $B > 0,95$. Logo, o V_v é igual ao volume de água (V_w) mudando a relação para:

$$e = \frac{V_w}{V_s} \quad \text{Equação 3.11}$$

Para acompanhar os incrementos de variação volumétrica da amostra foi aplicada a derivada na Equação 3.11, resultando em:

$$\delta e = \frac{\delta V_w \cdot V_s - V_w \cdot \delta V_s}{V_s^2} \quad \text{Equação 3.12}$$

Como durante o ensaio triaxial não há variação de volume de sólidos, pois não pode haver carreamento de partículas, a derivada desse parâmetro é igual a zero.

$$\delta e = \frac{\delta V_w}{V_s} \quad \text{Equação 3.13}$$

Sabendo que o volume de sólidos se relaciona com a densidade dos sólidos (ρ_s) e a massa de sólidos (M_s) e substituindo essa relação na Equação 3.13.

$$\delta e = \frac{\delta V_w \cdot \rho_s}{M_s} \quad \text{Equação 3.14}$$

Como houve um controle da densidade das amostras na fase de moldagem dos corpos de prova ensaiados, pode-se obter o valor de M_s por uma relação dos índices físicos, onde usa-se a massa total (M_t) do CP moldado e sua umidade de moldagem para obter o valor da massa seca da amostra, com a seguinte relação:

$$M_s = \frac{M_t}{1 + w} \quad \text{Equação 3.15}$$

Fazendo a substituição de M_s na equação 2 acima, a variação de índice de vazios é dada por:

$$\delta e = \frac{\delta V_w \cdot (1 + w) \cdot \rho_s}{M_t}; \delta e = \delta V_w \cdot c1 \quad \text{Equação 3.16}$$

Os valores de umidade de moldagem, massa total na moldagem e densidade dos grãos são constantes em relação ao índice de vazios e variação de volume de água. Para facilitar a manipulação da equação todas essas constantes foram agrupadas em uma única constante chamada “c1”. Desse modo, aplicou-se uma operação integral definida na Equação 3.16 que resultou em:

$$\int_{e_f}^{e_i} \delta e = c1 \cdot \int_{V_i}^{V_f} \delta V_w \quad \text{Equação 3.17}$$

Deste modo o índice de vazios em um determinado instante (e_i) é dado pela relação do volume final (V_f) contabilizado na última etapa do cisalhamento, da constante ($c1$) e do volume contabilizado no determinado no instante “i” (V_i) dado por

$$e_i = c1 \cdot (V_f - V_i) + e_f \quad \text{Equação 3.18}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.1.1 GRANULOMETRIA

Para a determinação da distribuição granulométrica do rejeito, foi executado os procedimentos de sedimentação e peneiramento fino.

Na sedimentação, já se observou que um comportamento destoante entre das amostras ensaiadas com uso de defloculante e sem uso de defloculante, uma vez que a variação de densidade na amostra sem defloculante foi muito maior.

Desse modo foram realizados os devidos cálculo e traçada a curva granulométrica do rejeito de manganês nos dois cenários. Onde ficou evidenciado a capacidade das menores partículas que compõe o rejeito de se aglomerarem em coloides. Os coloides, em sua maioria, apresentam dimensões correspondentes a siltes, uma vez que, a concentração de siltes na amostra sem uso do defloculante foi próximo de 80%, com composição de finos de 83,3%; e a amostra com uso de defloculante apresentou em sua composição uma concentração próxima de finos, 78,5%, porém houve 44,9% de siltes nesse cenário.

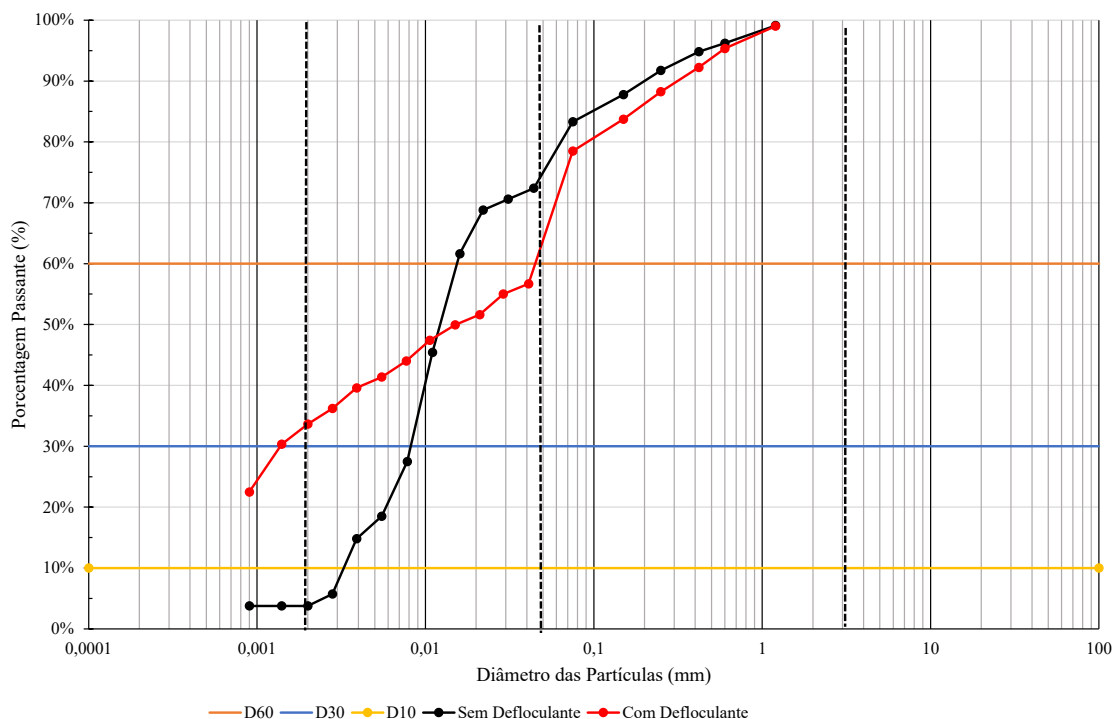


Figura 4.1: Curva Granulométrica do Rejeito de Manganês.

O defloculante promove um destorroamento químico dos coloides, portanto essas partículas foram desagregadas levando a uma distribuição a qual a curva granulométrica com uso de defloculante e sem não apresentam a mesma tendência. Fazendo sentido com o que foi encontrado na caracterização química que será discutido mais à frente.

4.1.2 LIMITES DE ATTERBERG

O cálculo do Limite de Plasticidade deu-se pela determinação da umidade do material moldado em formato de tubo quando esse começou a apresentar trincas devido o ressecamento.

Por sua vez, o limite de liquidez foi determinado com auxílio da regressão linear de 5 pontos com que possuem uma relação de umidade com número de golpes. Desses 5 pontos, 2 estão no ramo inferior a 25 golpes e outros 3 estão no ramo superior. Deste modo foi construída a regressão linear, a figura apresenta a equação usada para obter a umidade no vigésimo quinto golpe, portanto o Limite de Liquidez encontrado foi de 43,6%.

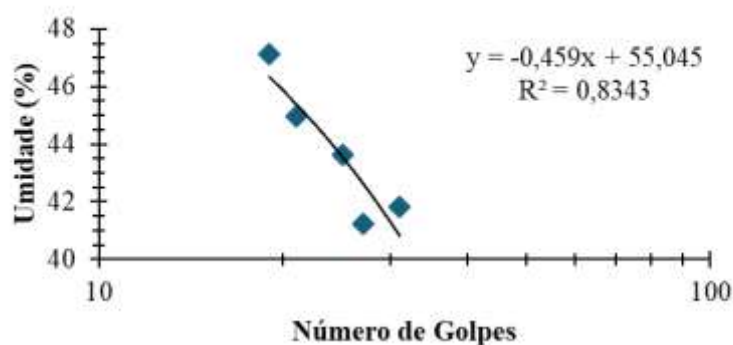


Figura 4.2: Regressão Linear Usada Para o Limite de Liquidez.

Conseqüentemente, o índice de plasticidade, que relaciona LL e LP, apresentou um valor de 14,7%, e com isso foi possível usar a carta de Casagrande. A Figura 4.3 apresenta a classificação do rejeito de manganês como um silte de baixa plasticidade (ML), o que vai de encontro com o que foi observado na curva granulométrica.

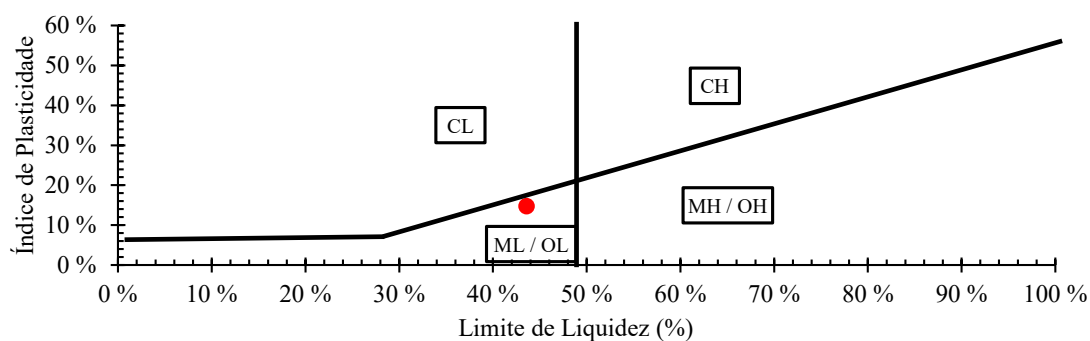


Figura 4.3: Carta de Casagrande Aplicada ao Rejeito de Manganês.

4.1.3 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

A densidade real dos grãos foi determinada por meio de ensaio em triplicata. Dois ensaios apresentaram um valor convergente com média de $3,07 \text{ g/cm}^3$ ($3,069 \text{ g/cm}^3$ e $3,080 \text{ g/cm}^3$), e a terceira apresentou um valor de $3,17 \text{ g/cm}^3$, descartou-se o divergente e foi adotado na pesquisa o valor médio dos ensaios convergentes.

4.1.4 COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação do rejeito foi realizado com reuso de material. O resultado da curva de compactação na energia Proctor Normal está ilustrado na Figura 4.4 o valor da densidade máxima seca do rejeito é $1,535 \text{ g/cm}^3$, com correspondente umidade ótima de $30,75\%$.

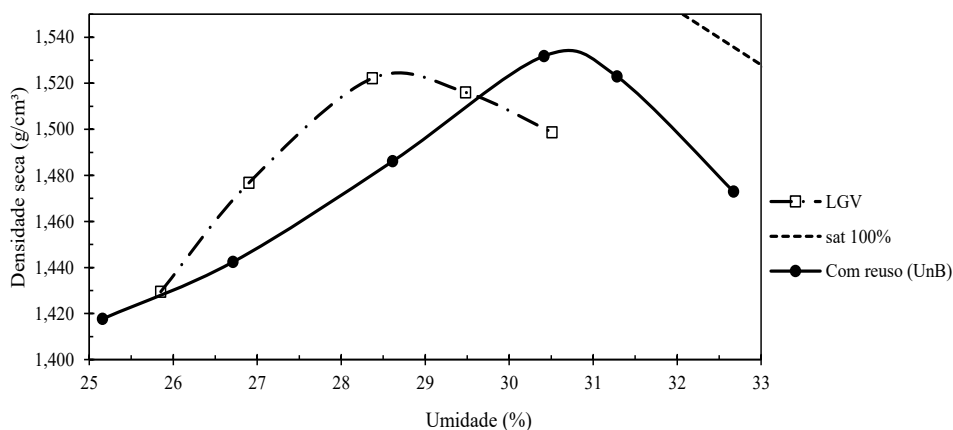


Figura 4.4: Curva de Compactação Proctor Normal.

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

4.2.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Segundo Sampaio *et. al* (2008), as principais formações cristalinas que há na região ao qual o minério de manganês foi extraído são: Braunita; Criptomelana; Hausmannita; Jacobsita; Manganita; Nsutita; Psilomelana; Pirolusita; Rodocrosita; Rodonita; Todorokita

Para identificar a estrutura cristalina do rejeito do manganês estudado foi realizado um ensaio de DRX no IG-UnB. O espectro obtido está apresentado na Figura 4.5, com ele observa-se que, com exceção da Todorokita, nenhuma outra formação cristalina que contenha manganês em sua composição foi identificada. Os outros minerais encontrados no ensaio foram Caulinita (C), Quartzo (Q), Ilita (I), Gibbsita (G), Hematita (H), Maghemita (M) e Apjohnita (A).

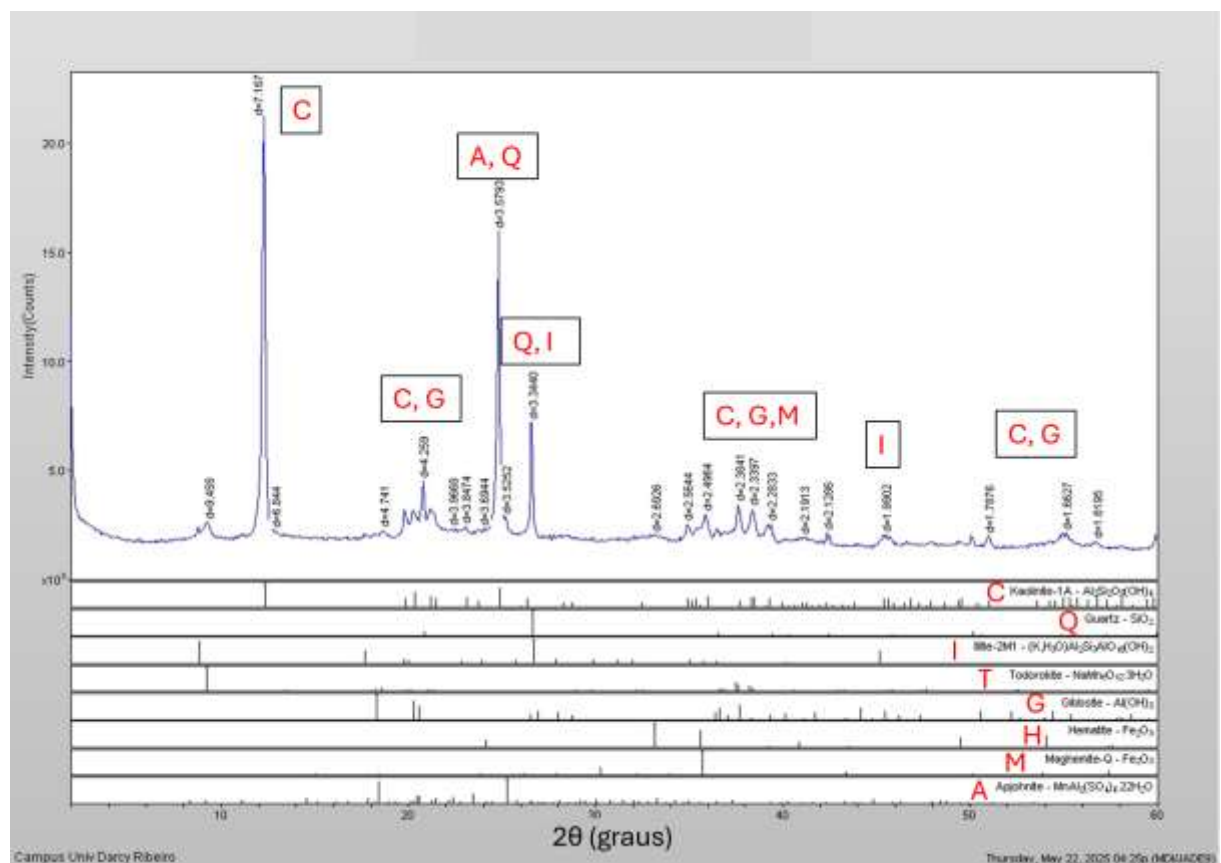


Figura 4.5: Espectro de DRX do Rejeito de Manganês.

4.2.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

Com o ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX) foi possível identificar a composição elementar do rejeito de manganês. A Figura 4.6 apresenta o espectro FRX obtido da amostra com o rejeito puro e o rejeito lavado e peneirado que ficou retido na peneira #200, ao qual observa-se picos bem definidos associados aos elementos de manganês (Mn), alumínio (Al), ferro (Fe), silício (Si) e térbio (Tb).

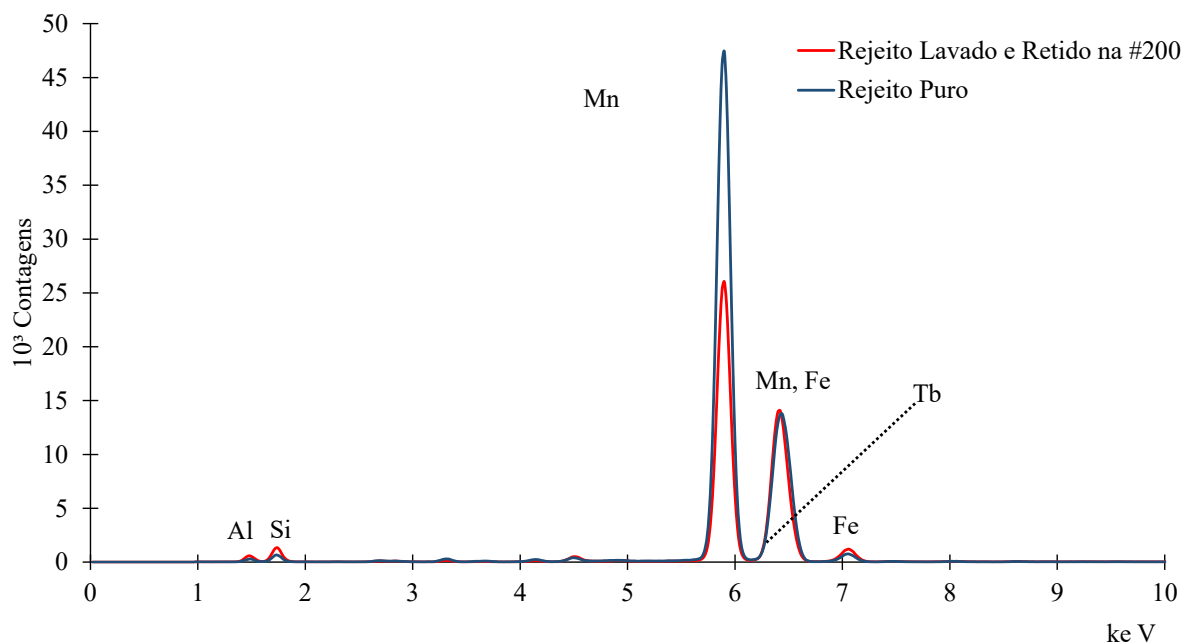


Figura 4.6: Espectro de Fluorescência de Raios-X do Rejeito Puro.

O espectro de Fluorescência apresenta os principais elementos químicos que compõem o material ensaiado, a distribuição quantitativa dos elementos presentes do rejeito bruto é apresentada na Figura 4.7. É destacado a presença dos elementos como bário (Ba), titânio (Ti) e que corresponde a aproximadamente 1% cada. No total, esses elementos somam 99,7% do total dos elementos presentes do rejeito puro de manganês.

Com esse quantitativo observa-se que não houve um aproveitamento de uma parcela significativa do Mn presente na jazida, apresentando após o beneficiamento uma concentração superior a 35% do elemento.

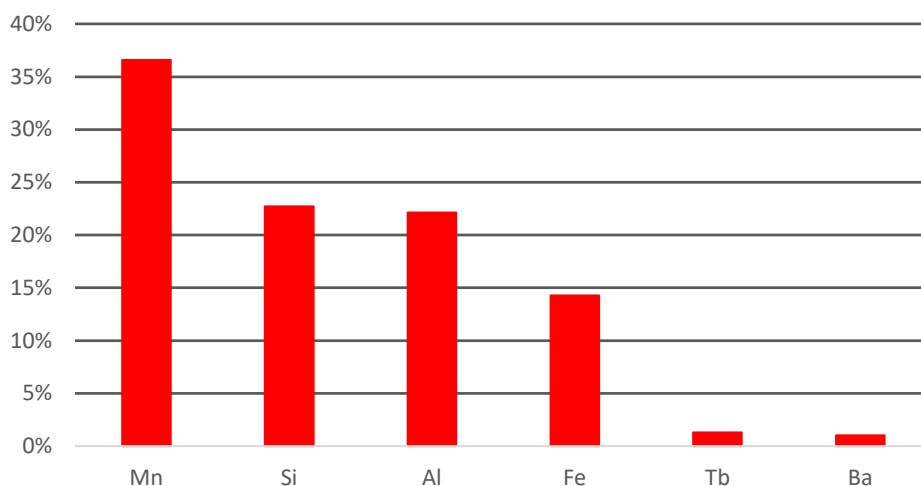


Figura 4.7: Quantitativo dos elementos químicos do rejeito de manganês.

Ao analisar os ensaios FRX e DRX ao mesmo tempo, observa-se que a maior parte do manganês presente nesse rejeito está em uma forma não cristalina. O que leva a pensar que quando a planta de beneficiamento foi instalada forma de manganês não era economicamente interessante para a empresa como plano de negócio.

A quantificação dos elementos presentes nas partículas está apresentada na Figura 4.8. É observada a participação majoritária do elemento de manganês nas partículas do rejeito, seguido do ferro, alumínio e silício, que somados representam 96% do todo. Os elementos de potássio, térbio e bário representam uma representação do todo de 1% cada, os outros materiais não apresentaram um quantitativo significativo.

Ao conectar os resultados obtidos no FRX e no DRX, o rejeito estudado parece apresentar uma parcela significativa de manganês, porém ele está em uma estrutura com forma onde não é possível que o ensaio DRX o detecte. Uma vez, que não houve nenhuma outra formação cristalina, com exceção da Todorokita, que é abundante na região, segundo Sampaio *et. al* (2008) elas são a Braunita; Criptomelana e Hausmannita.

Além disso, ao incorporar a distribuição granulométrica na análise, observa-se uma relação dos argilominerais Caulinita e da Ilita, pois eles possuem uma capacidade de se agruparem em coloide e eles foram destorroadas quimicamente pelo defloculante alterando a distribuição granulométrica do rejeito ao usar ou não usar o dispersante.

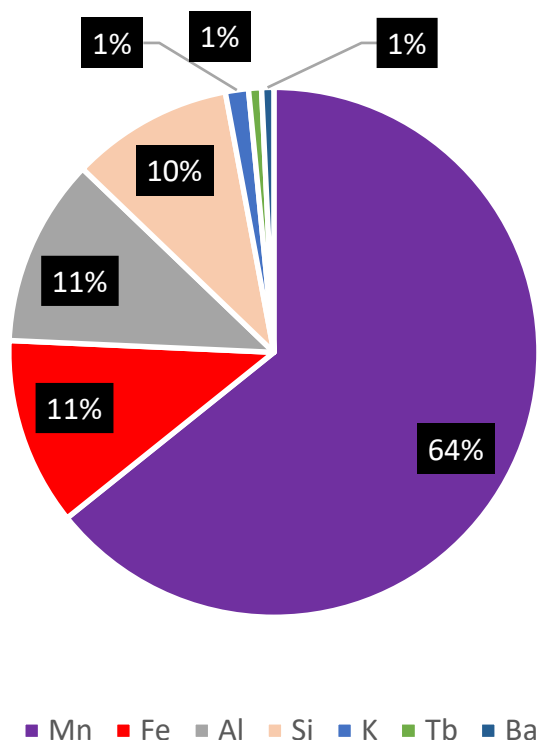


Figura 4.8: Quantitativo dos Elementos Químicos do Rejeito Lavado.

Somado a isso, o resultado do FRX da amostra que continha a porção granular do rejeito corrobora com essa análise, uma vez que houve uma diminuição do elemento de alumínio ao analisar o rejeito puro com a porção particular, porque esses dois argilominerais possuem alumínio em sua composição e pelo próprio método de preparação da amostra esses argilominerais foram lixiviados, justificando assim a diminuição da concentração nos dois cenários de FRX.

4.3 OEDOMÉTRICO

Os ensaios oedométricos realizados no laboratório da Vale foram agrupados seguindo o padrão de GC de 80%, 90% e 100% representados pela Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, respectivamente, e classificados de acordo com suas Condições Iniciais (CI) de ensaio:

1. Ressecadas, são as que ficaram 3 dias no dessecador e ensaiado na condição não inundada
2. Não-Inundadas, não passaram pelo processo de secagem e foi ensaiada na condição não inundada;
3. Inundada, não passaram por processo de secagem e foi ensaiada na condição inundada.

A Figura 4.9 apresenta a influência da sucção nas amostras moldadas na condição de GC de 80% no comportamento de deformação volumétrica ao longo de um carregamento. Uma vez que, se correlaciona a tensão em que as amostras transicionam entre o comportamento sobreadensado e normalmente adensado.

A Figura 4.9 demonstra que o comportamento de compressibilidade do rejeito analisado tem uma relação com sucção presente no material. Pois, quando as amostras com GC de 80%, Ressecadas e Não-Inundadas, apresentam uma tensão de pré-adensamento bem maior comparado com a amostra inundada, que estaria saturada e com influência praticamente nula da sucção, entrando na zona que o material está Normalmente Adensando (NA) com tensões de 25 kPa. Pertencendo a maior tensão antes do material atingir a zona NA, a amostra Ressecada, seguida da amostra ensaiada na condição Não-Inundada e a menor a amostra Inundada.

Esse comportamento observado ressalta um ponto de observação, caso aplicado algum método de disposição com rejeito compactado. Pois, se não há um controle da compactação de campo e entra água no maciço, pode haver deformações significativas. Visto que, o ganho de rigidez dado pela sucção é dissipado em condições de saturação do material.

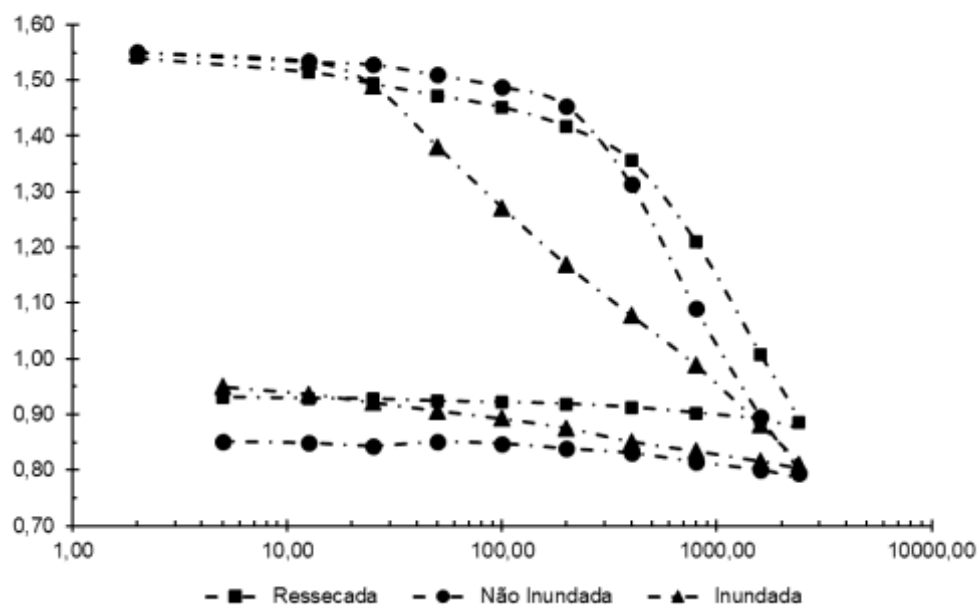


Figura 4.9: Ensaio Oedométrico para amostras com GC de 80%.

A Figura 4.10 avalia o resultado dos ensaios oedométricos das amostras com GC de 90%. Nela ainda se observa a influência da sucção, porém há uma maior influência da condição inicial de

compactação quando comparada com as amostras com GC de 80%. A amostra Inundada demora um pouco mais para atingir a zona NA, seguida da amostra Não-Inundada e Ressecada.

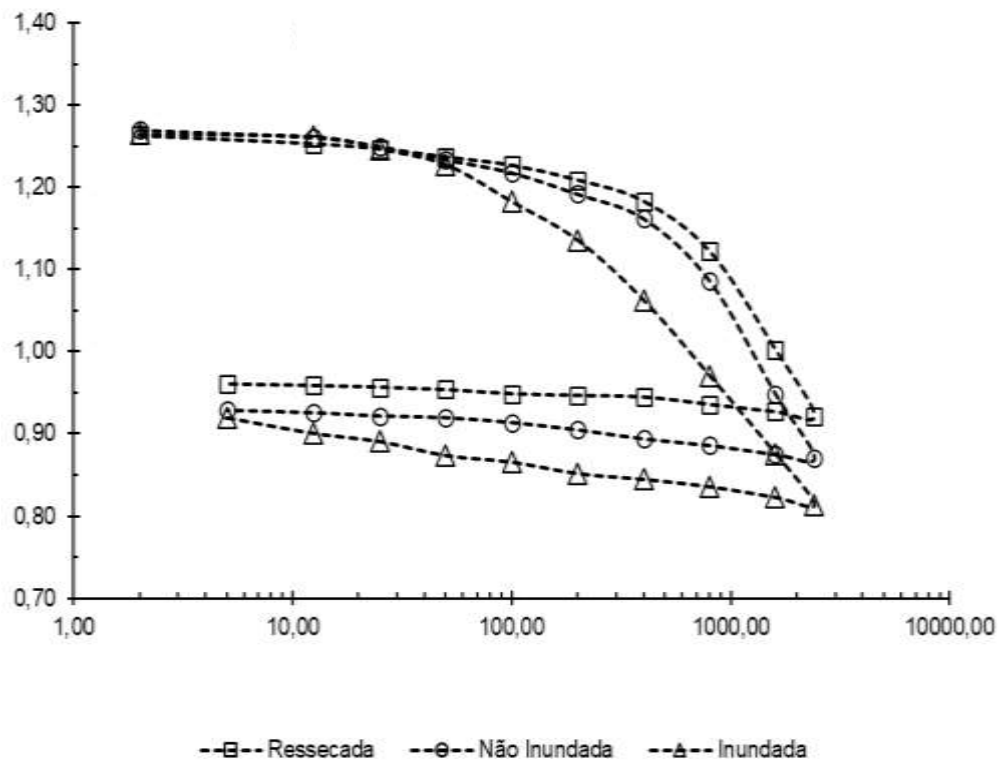


Figura 4.10: Ensaio Oedométrico para GC de 90%.

Deste modo, caso seja aplicado algum método de disposição com rejeito compactado, como empilhamento a seco, o controle do GC em campo mostra-se de relevante importância para evitar recalques na estrutura que acondiciona o rejeito. Uma vez que, se essas estruturas passarem por algum fenômeno de saturação, o ganho de rigidez dado pela parcela de resistência da sucção é dissipado gerando deformações rápidas no maciço. O que pode atuar como um mecanismo de instabilidade na gestão da pilha.

Já os ensaios com GC de 100%, apresentado na Figura 4.11, demonstram que a influência da sucção não é perceptível. Isso demonstra, que possíveis pilhas compactadas com um GC muito próximo de 100% não apresentaria os riscos observados de recalque na estrutura por um fenômeno de saturação do maciço.

Desta maneira, foi observado uma relação deformabilidade em ambiente confinado e o arranjo estrutural obtido para os diferentes GC's. Bem como, foi constatado ao longo a relação da sucção nas amostras menos densas, tendo sido as amostras mais afetadas aquelas que passaram por um processo de ressecamento antes de serem ensaiadas.

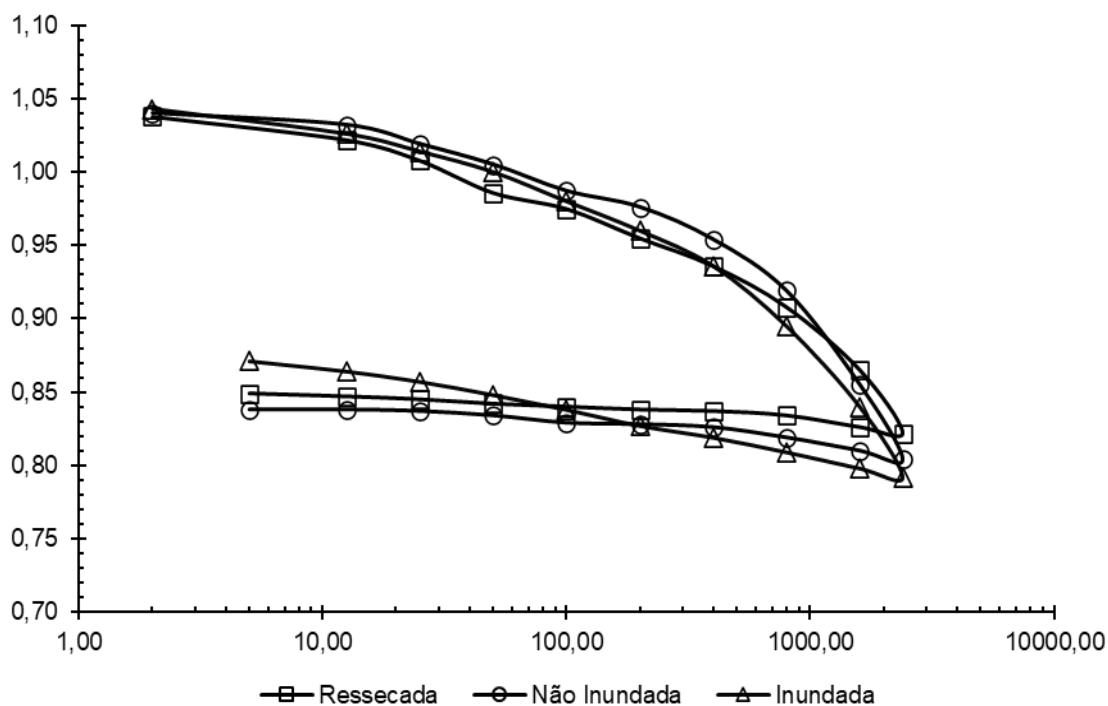


Figura 4.11. Ensaio Oedométrico com GC de 100%.

Foi realizada uma análise para descobrir a inclinação da reta (λ_{LCN}) no plano e Vs. $\text{Log}(p')$, de todos os ensaios desenvolvidos pelo LGV. Logo, foi determinado graficamente os valores de λ e de Γ para todas as amostras, os valores de tensão usados para esse cálculo foram de 1600 kPa, 800 kPa e 400 kPa.

Essas tensões foram escolhidas para comparar os valores de λ obtidos pelos ensaios do LGV e os desenvolvidos nesta pesquisa, que possuíam a limitação de tensão máxima de 1600 kPa. Os resultados estão expressos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Tabela resumo com resultados da VALE

GC	80%	80%	80%	90%	90%	90%	100%	100%	100%
CI	1	2	3	1	2	3	1	2	3
λ	0,251	0,301	0,142	0,147	0,154	0,135	0,051	0,071	0,069
$\Gamma(1\text{kPa})$	2,87	3,11	1,93	2,08	2,10	1,87	1,25	1,39	1,35

***Legenda:** 1) Amostras ressecadas; 2) Amostras não-inundadas; 3) Amostras inundadas.

No grupo com GC de 80% não houve uma convergência do parâmetro λ nas três condições iniciais, pois a amostra inundada divergiu das amostras Ressecada e Não-Inundada. Quando observado o grupo de GC de 90%, os valores de λ convergiram para um valor médio de 0,145,

valor que não foi muito diferente da amostra Inundada com GC de 80%, que possui um valor de λ de 0,142.

Por sua vez, o GC de 100% os valores para as amostras que não foram ressecadas apresentaram valores de λ muito próximos, com média de 0,070, a amostra ressecada apresentou uma compressibilidade menor do que os do mesmo GC, porém a ordem de grandeza não do valor de λ não foi tão significativo quanto para os ensaios com GC de 80% e 90%.

Para efeito de comparação entre os resultados da Vale e UnB, será usado o ensaio com Grau de Compactação de 100% ensaiado de forma inundada executado pela Vale. Essa escolha foi adotada pelas similaridades das condições de ensaio realizadas no aparelho triaxial, amostras consolidadas com saturação aproximada de 100%.

Os resultados dos ensaios de adensamento estão expostos na Figura 4.12 e Figura 4.13, onde foi adotada a Metodologia A e Metodologia B descritos na ASTM – D2435/2020, respectivamente. A Figura 4.12 apresentou valores semelhantes para λ nas três condições, com uma pequena diferença um pouco maior na condição de ensaio Não Inundada por efeito da sucção na compressibilidade do material. Já nas condições em que as amostras foram ensaiadas na condição inundada houve uma convergência nos valores, ao ponto de que as retas apresentadas nas duas condições são paralelas.

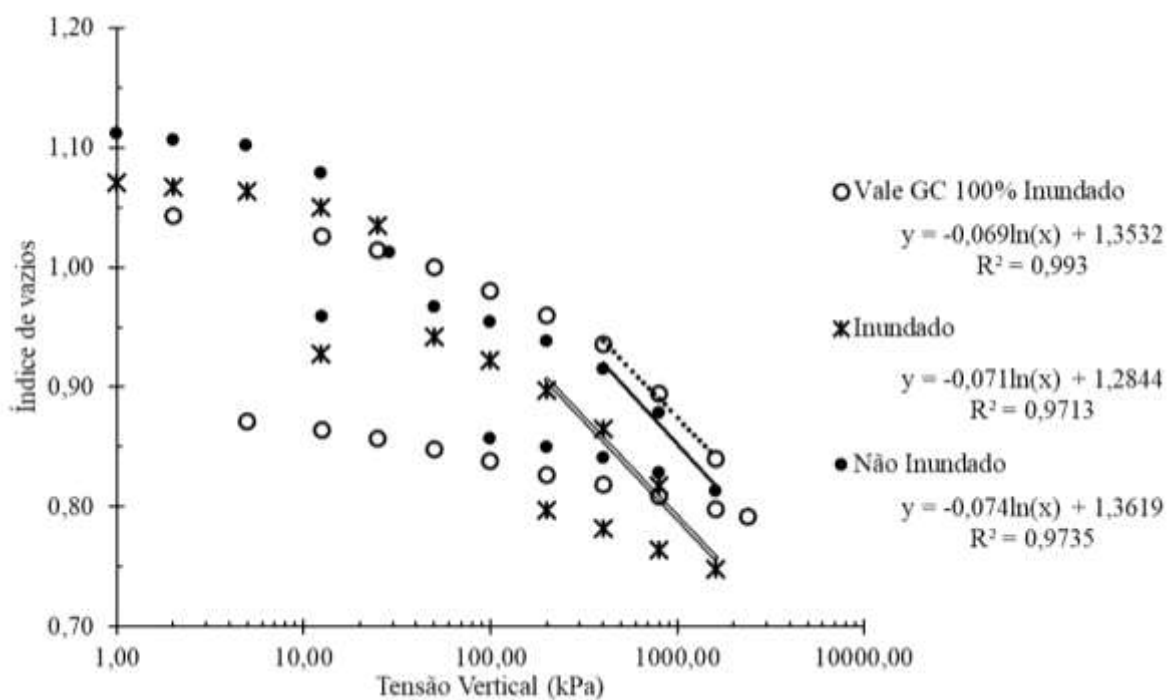


Figura 4.12: Comparação da metodologia A entre UnB e Vale.

Os ensaios realizados seguindo a Metodologia B estão expostos na Figura 4.13. Nela é possível observar que o tempo menor que 24 horas para mudar de fase não foi satisfatório para determinar o parâmetro λ do estado crítico. Uma vez que a Metodologia B apresentou um valor para λ de 0,36 e 0,4 para as condições inundadas e não inundadas, respectivamente.

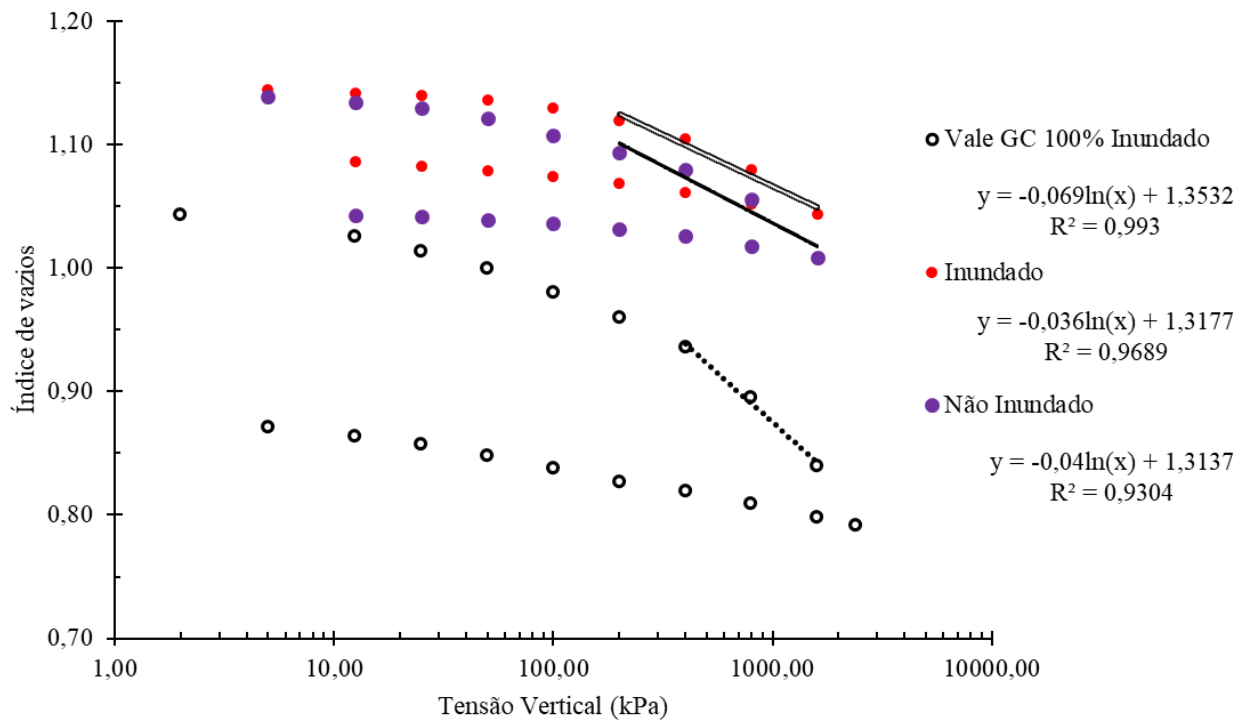


Figura 4.13: Comparação da metodologia B entre UnB e Vale

A Tabela 4.2 apresenta um resumo das condições das amostras submetidas ao ensaio oedométrico, tanto na fase inicial quanto na fase final de ensaio. Onde ele informa quais foram os índices de vazios, umidades e saturação (SR) das amostras e, ao final, apresenta os parâmetros de deformabilidade, λ e Γ , para todas as Linhas de Compressão Normal. Todas as LCNs foram calculadas usando as tensões 1600 kPa, 800 kPa e 400 kPa.

Com os dados da Tabela 4.2, observa-se uma convergência nos valores nos valores de λ e Γ para os ensaios 9 e 7 do LGV e os ensaios 10 e 11 seguindo Metodologia A apresentando valores médios de 1,35 para Γ e 0,71 para λ . Os ensaios realizados usando a metodologia B apresentaram valores de índice de compressibilidade destoantes em relação a todos os outros ensaios, mesmo comparando graus de compactação similares.

Esse comportamento não foi observado nem nas amostras com GC de 90% e nem as de 100%, uma das justificativas para o comportamento observado é que a influência do adensamento secundário na compressão oedométrica.

Tabela 4.2: Resumo das Condições do Ensaio Oedométricos Utilizados na Pesquisa.

	LGV									METODO. A		METODO. B	
	1	8	2	3	4	5	6	9	7	10	11	12	13
GC	80%	80%	80%	90%	90%	90%	100%	100%	100%	100%	94%	92%	92%
CI	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3	2	3	2
wi (%)	27,7	28,16	28,1	27,85	28,7	27,96	27,93	28,02	28,23	30,7	29,9	31,1	29,6
ei	1,54	1,551	1,55	1,263	1,27	1,265	1,038	1,04	1,043	1,02	1,11	1,15	1,14
SR (%)	56,2	56,7	56,7	68,9	70,6	69,1	84,1	84,2	84,6	92,4	82,7	83,0	79,7
wf (%)	23,96	27,89	34,35	24,77	27,67	34,01	25	22,19	32,31	X	13,98	31,9	28,5
ef	0,931	0,852	0,95	0,961	0,929	0,92	0,849	0,836	0,871	0,93	0,96	1,086	1,043
SR (%)	80,4	SAT	SAT	80,5	93,1	SAT	92,0	82,9	SAT	SAT	44,7	90,2	83,9
λ^*	0,251	0,301	0,142	0,131	0,154	0,135	0,051	0,071	0,069	0,071	0,074	0,036	0,040
Γ (LCN)	2,87	3,11	1,93	1,98	2,10	1,87	1,25	1,39	1,35	1,28	1,36	1,32	1,31

* Índice de compressibilidade Calculado com tensões de 1600, 800 e 400 Kpa.

Os resultados obtidos pela metodologia descrita por Ponzoni *et al* 2014, para o comportamento transicional, foram separados em 3 grupos da forma com que as amostras foram ensaiadas: inundadas, não-inundadas e ressecadas. A Figura 4.14 apresenta o resultado para as amostras inundadas.

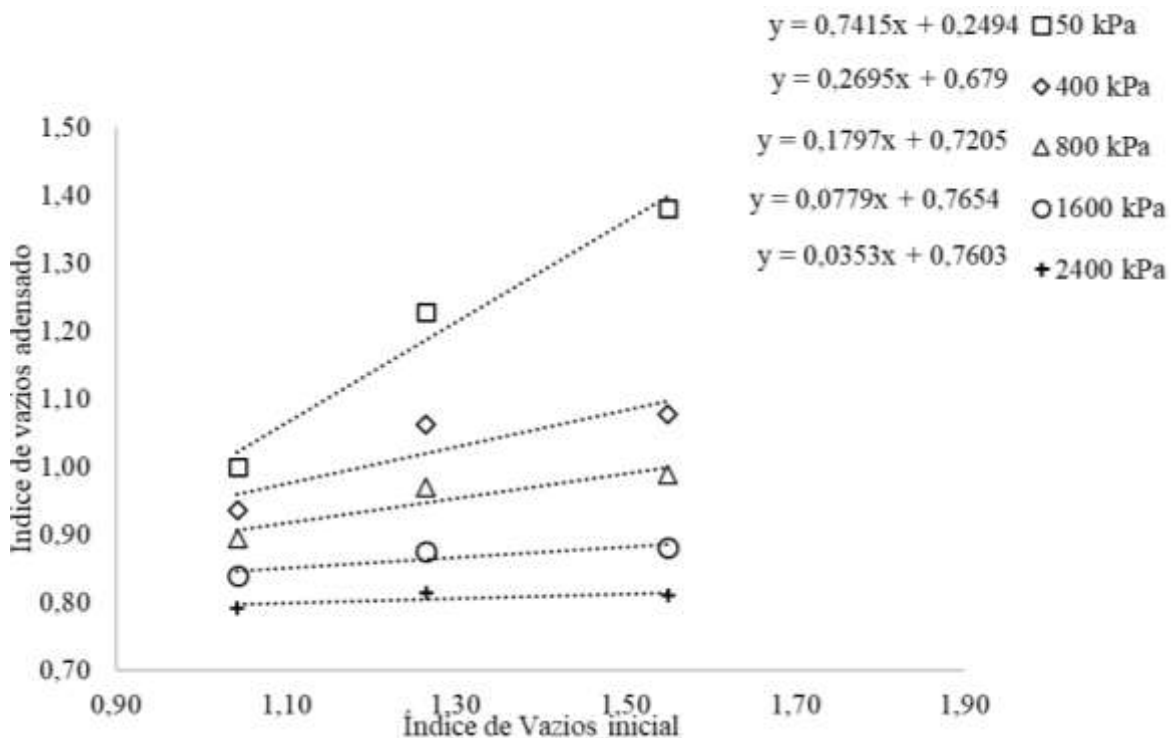


Figura 4.14: Cálculo do Parâmetro de Convergência nas amostras Inundadas

De acordo com a Figura 4.14 é observa-se uma forte tendência de convergência dos ensaios oedométricos nas condições inundadas para uma única LCN. Uma vez que, os índices de convergência (m) possuem uma tendência ao zero nas maiores tensões analisadas, na tensão de 2400 kPa o valor de (m) foi de 0,035.

Vale ressaltar que alguns trabalhos que analisaram esse mesmo comportamento, Todisco & Coop (2019) e Li & Coop (2019), que avaliam o comportamento transicional usaram ensaios com tensões de adensamento de 6 MPa, 7 MPa e 20 MPa. Logo, esperasse que o rejeito de manganês estudado atinja valores ainda mais próximos a zero em tensões maiores. Não categorizando um comportamento transicional, ou apenas uma transicionalidade moderada.

4.4 ENSAIOS TRIAXIAIS

Neste tópico será apresentado os resultados dos ensaios triaxiais, onde foi trabalhado o comportamento hidráulico do material em diferentes índices de vazios. Além disso, expões o comportamento do rejeito de manganês nas fases de adensamento isotrópico e cisalhamento.

A Tabela 4.3 expõe os principais dados dos ensaios triaxiais realizados nesta pesquisa contendo os dados da fase de moldagem dos corpos de prova, da fase de saturação, de adensamento e de cisalhamento da amostra.

Tabela 4.3: Tabela resumo com todas as informações gerais

Amostra	Moldagem					Adensamento			Cisalhamento			
	σ_3' (kPa)	w (%)	δd (g/cm ³)	e_0	Massa (g)	B	k.s (cm/s)	e_{aden}	e_{final}	σ_1' _pico (kPa)	σ_1' _final (kPa)	ϵ_{ax} (%)
CP_OT_200	200	30,0	1,51	1,03	390,014	0,94	$9,7 \cdot 10^{-06}$	1,09	1,06	652	642	20,0
CP_OT_400	400	30,5	1,48	1,08	388,73	0,96	$1,2 \cdot 10^{-05}$	1,03	1,03	1160	1076	20,0
CP_OT_800	800	29,7	1,47	1,09	389,946	0,95	$1,8 \cdot 10^{-05}$	1,0	0,96	2244	1867	30,0
CP_OT_1600	1600	30,2	1,50	1,05	393,342	1	$2,4 \cdot 10^{-05}$	1,0	0,9	4131	3911	20,0
CP_FOFO_200	200	30,9	1,22	1,52	310,743	0,98	$1,7 \cdot 10^{-04}$	1,07	1,07	559	501	31,2
CP_FOFO_400	400	30,4	1,22	1,53	306,667	1	$1,5 \cdot 10^{-04}$	1,02	1,04	1071	971	26,5
CP_FOFO_800	800	30,6	1,17	1,63	305,689	0,98	$2,2 \cdot 10^{-04}$	0,98	0,98	2203	2129	27,9
CP_FOFO_1600	1600	30,1	1,18	1,6	306,951	0,95	$6,8 \cdot 10^{-04}$	0,96	0,91	3794	3263	27,9

4.4.1 PERMEABILIDADE

O comportamento hidráulico do rejeito demonstra uma influência do índice de vazios na condutividade hidráulica em meio saturado, atingindo um comportamento típico de materiais

naturais como siltes e argilas siltosas. O rejeito apresentou uma diferença de uma ordem de grandeza ao comparar nos dois diferentes índices de vazios ensaiados neste trabalho, com valor de 10^{-5} e 10^{-4} , para as amostras compactadas na Proctor Normal ($e \approx 1$) e amostras moldadas na condição fofa ($e \approx 1,5$), respectivamente.

4.4.2 DETERMINAÇÃO DO ESTADO CRÍTICO DO REJEITO

4.4.2.1 Dados Para Obtenção do Estado Crítico

Para a análise do estado crítico do rejeito de manganês, nesse momento, foram usados os ensaios triaxiais Consolidados e Drenados (CD) que atingiram o estado crítico.

Este trabalho focou na realização de ensaios triaxiais drenados, além disso foram usados os ensaios do pesquisador Vasconcelos (2026) para completar algumas das análises realizadas para o estado crítico drenado do rejeito de manganês. O trabalho do pesquisador usa o mesmo material desta pesquisa e possui o foco em trabalhar com uma energia de compactação Intermediária, porém nesta pesquisa foram incorporadas nas análises somente as amostras fofas realizadas por Vasconcelos (2026) com tensões confinantes de 25, 50, 100 e 200 kPa.

O Quadro 4.1 apresenta o resumo confeccionado para expor quais foram os ensaios usados para as análises do estado críticos nesta pesquisa. Onde a p'_{ad} e e_{ad} correspondente a tensão média efetiva ao final da fase de adensamento e o índice de vazios ao final da fase de adensamento, respectivamente. Assim como o p_{Pico} é a tensão média efetiva na tensão de pico do ensaio de cisalhamento, bem como q_{Pico} e e_{Pico} são a tensão desvio e o índice de vazios no momento do pico do ensaio de cisalhamento.

No Quadro 4.1 está exposto quais foram os dados usados para definir a LEC e LCI plano e vs. $\log(p')$. Com auxílio desse plano foi obtido λ o índice de compressibilidade do material e τ que está associado ao índice de vazios na tensão de 1 kPa, tanto para a LEC quanto para LCI.

Para estabelecer a trajetória do índice de vazios ao longo de todo o cisalhamento, foi necessário estimar esse parâmetro para cada incremento de deformação. Com isso definido é possível obter a LEC e LCI e obter os parâmetros de estado crítico, Γ_{LCI} (o índice de vazios correspondente a tensão de 1 kPa da LCI), e Γ_{LEC} (o índice de vazios correspondente a tensão de 1 kPa da LEC).

Quadro 4.1: Quadro Resumo para Determinar Parâmetros Críticos no Plano e vs. $\log(p')$.

	LCI		LEC			Ψ_0
	p'_{ad}	e_{ad}	p'_{Pico}	q_{Pico}	e_{Pico}	
CP_OT 200	201	1,096	356	468	1,063	-0,014
CP_OT 400	400	1,110	673	818	1,037	0,048
CP_OT 800	801	1,076	1897	1611	0,968	0,063
CP_OT 1600	1600	1,013	2587	2965	0,908	0,048
CP_FOFO 25	25	1,314	61	107	1,206	0,059
CP_FOFO 50	50	1,270	105	154	1,146	0,063
CP_FOFO 100	100	1,230	183	248	1,113	0,072
CP_FOFO 200	200	1,164	335	415	1,063	0,054
CP_FOFO 200	200	1,155	329	394	1,069	0,045
CP_FOFO 400	400	1,116	676	724	1,020	0,055
CP_FOFO 800	800	1,118	1434	1580	0,986	0,105
CP_FOFO 1600*	1600	1,004	2710	2351	0,915	0,040

* Essa amostra não foi usada para a análise do estado crítico

Ao analisar a LEC e LCI apresentaram um comportamento no plano e Vs. $\log(p')$ que é possível descrevê-lo com uma linha de tendência logarítmica que se assemelha muito a uma equação da reta. A formulação da LEC é dada por:

$$e_{LEC} = \Gamma_c - \lambda_c \cdot \ln(p') \quad \text{Equação 4.1}$$

onde λ_c é o índice de compressão da LEC; p' é a tensão média efetiva; e_{LEC} é o índice de vazios a uma dada tensão efetiva na LEC.

Por sua vez, a Linha de Compressão Isotrópica, no mesmo plano, é expressa por:

$$e_{LCI} = \Gamma_i - \lambda_i \cdot \ln(p') \quad \text{Equação 4.2}$$

onde λ_i é o índice de compressão da LCI; p' é a tensão média efetiva; e_{LCI} é o índice de vazios a uma dada tensão efetiva na LCI.

Para determinar o parâmetro de resistência do rejeito nas diferentes condições de estado inicial do rejeito foi usada a tensão média efetiva e o invariante de tensão desvio desenvolvida durante o cisalhamento das amostras. Desse modo, foi utilizado a resistência de pico dos ensaios triaxiais CD para determinar o parâmetro M do estado crítico, inclinação da LEC no plano q Vs. p' .

4.4.2.2 Comportamento de Resistência ao Cisalhamento

A caracterização da resistência ao cisalhamento do rejeito de manganês deu-se com uso de ensaios triaxiais na condição Consolidada Drenada (CD), condicionando diferentes condições de moldagem: amostra compactadas na energia Proctor Normal, amostras fofas com índice

superior a 1,5 e amostras fofas moldadas e ensaiadas por Vasconcelos (2026), com índice de vazios próximo a 1,3. Este tópico apresenta os resultados desses ensaios analisando a influência dos diferentes índices de vazios na resposta mecânica nas diferentes tensões confinantes.

A Figura 4.15 apresenta a relação da deformação axial com a tensão desvio e a deformação volumétrica do rejeito de manganês estudo. Nesta imagem os círculos contínuos representam os ensaios das amostras compactadas na energia Proctor Normal, simbolizada com (D), e as amostras fofas moldadas com índices de vazios maiores, simbolizada como (F), são representadas com círculos vazados.

Observa-se que o rejeito de manganês nas amostras ensaiadas em tensões confinantes menores apresentou um comportamento dúctil, não tendo uma resistência de pico com grande diferença da resistência ao final da fase de cisalhamento.

Já ao comparar o comportamento das amostras ensaiadas com tensões confinantes de 400 a 1600 kPa, observou-se uma mudança. Essas amostras sofreram um processo de consolidação maior e começaram a apresentar um comportamento no espaço tensão-deformação axial parecido com amostras densas.

O amolecimento ficou evidenciado nas amostras de 1600 kPa, com destaque na amostra moldada na condição fofa. Por isso, essa amostra não será usada para fazer as análises do rejeito na ótica do estado crítico posteriormente.

Esse comportamento pode ser explicado pela geração de bandas de cisalhamento nas amostras durante o cisalhamento gerando um plano preferencial onde as partículas deslizam com maior facilidade umas sobre as outras. Esse plano de ruptura gera uma menor resistência sobre efeito de uma solicitação, pois o imbricamento entre as partículas é reduzido. Desse modo, a resistência global do rejeito diminui por uma falha estrutural, fazendo com que a resistência observada ao final do ensaio não represente o comportamento esperado do rejeito ao atingir o estado crítico. Por isso, para a análise do comportamento crítico posteriormente será usado a resistência de pico para o estudo.

Por sua vez, a relação de deformação volumétrica das amostras ensaiadas possui uma relação estável com a deformação volumétrica, sendo esse um dos critérios a serem analisados na escolha das amostras para o estudo do estado crítico. Pois, em sua definição a derivadas de tensão desvio e deformação axial em função da deformação cisalhante devem estar próximas de zero, e a deformação cisalhante possui uma relação direta com a deformação axial.

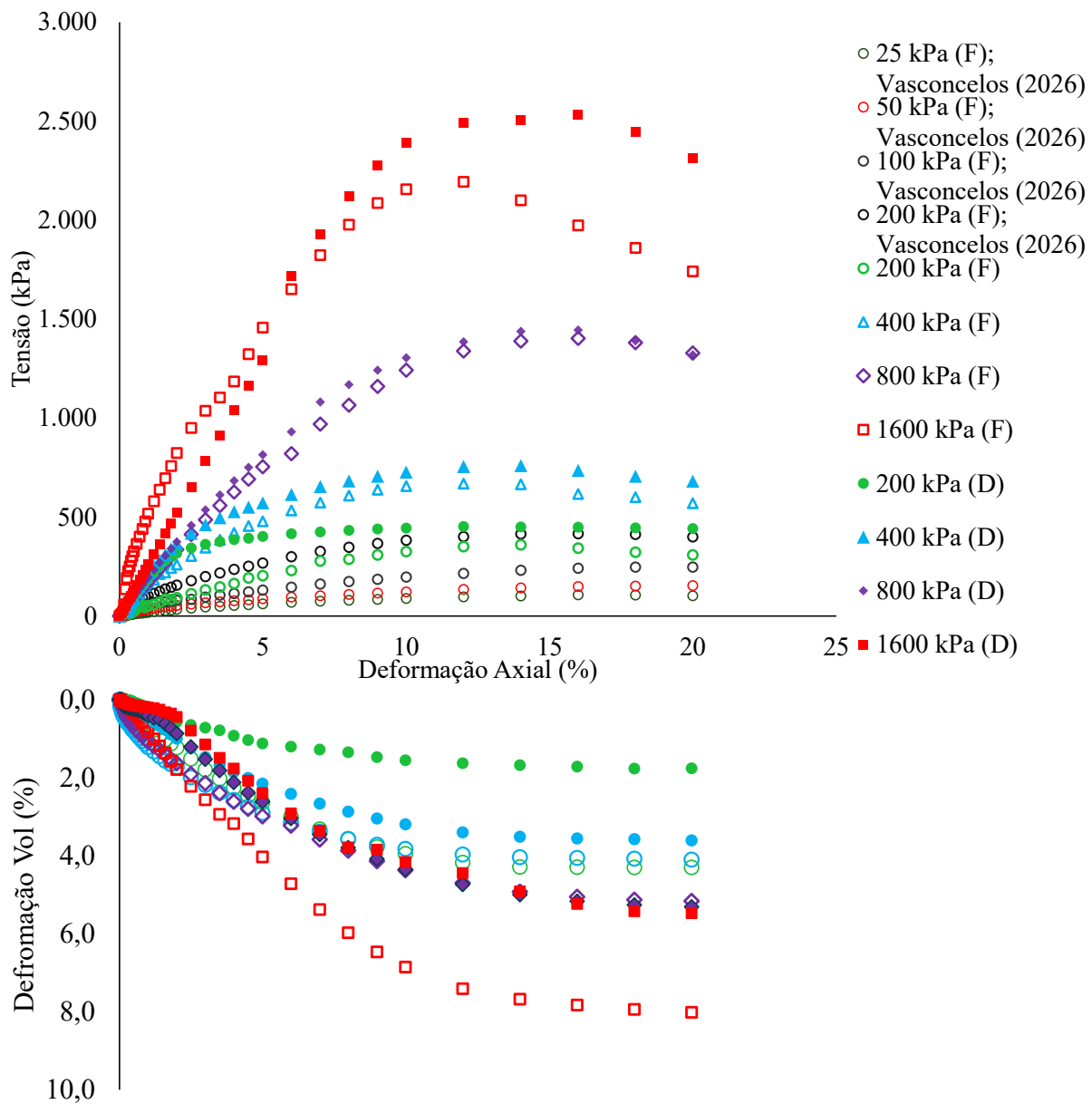


Figura 4.15: Relação Entre Deformação volumétrica e Tensão Desvio com a Deformação Axial.

Logo, conforme observado na Figura 4.15, as amostras apresentaram uma estabilização da deformação volumétrica nas fases finais do cisalhamento, ao ponto da derivada da deformação volumétrica com a deformação cisalhante nas deformações próximas a 20% serem próximas a zero, cumprindo um dos requisitos necessários para definir que uma amostra atingiu o estado crítico.

A Figura 4.16 apresenta dois exemplos de amostras do rejeito de manganês após cisalhamento, na amostra (a) há um corpo de prova que não gerou uma banda de cisalhamento e resultou em

uma amostra com deformação abaulada. Por sua vez, a amostra (b) representa um CP que gerou uma banda de cisalhamento bem definida

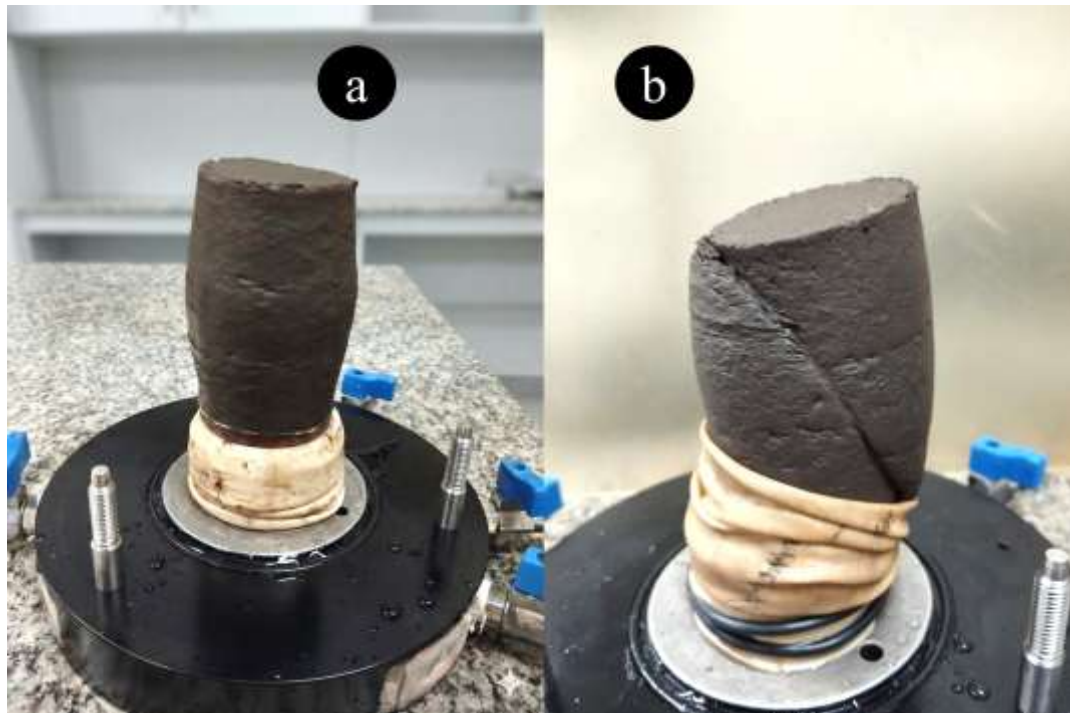


Figura 4.16: Amostras Após o cisalhamento; (a) Amostra com Deformação Abaulada; (b) Amostra com deformação apresentado Banda de Cisalhamento.

Uma das causas possíveis para as amostras gerarem bandas de cisalhamento é a excentricidade durante o cisalhamento, causada pelo desalinhamento entre o top-cap e a haste. Uma das práticas de laboratório retratadas em literatura para evitar esse fenômeno é o uso de um top-cap com guia. Isso evita que ensaios em amostras fofas, que geram maiores deformações geométricas na fase de adensamento da amostra, prévia ao cisalhamento, não perca a centralização com o top-cap e o eixo de aplicação de carga.

4.4.2.1 Parâmetros de Resistência

O parâmetro de resistência do rejeito de manganês foi determinado através das trajetórias de tensão no plano p' Vs. q , deste modo o parâmetro de resistência associado a esse plano é o M_{TC} . Esse parâmetro define a envoltória de ruptura do material e possui uma relação direta com o ângulo de atrito, parâmetro de resistência mais usado na literatura geotécnica.

Para a determinação do parâmetro de resistência foram usadas as amostras que atingiram o estado crítico, logo a amostra ensaiada na tensão confinante de 1600 kPa na condição fofa não

foi incorporado nas análises. No primeiro momento, todas as amostras serão analisadas em conjunto para traçar uma única envoltória de ruptura. Em seguida, foram traçadas envoltórias de ruptura usando somente as amostras densas e as amostras fofas.

Deste modo, a Figura 4.17 apresenta a envoltória de ruptura analisando a trajetória de tensões de todas as amostras, determinando M_{tc} para essa condição um valor de 1,15. O equivalente a um ângulo de atrito de 28,85°.

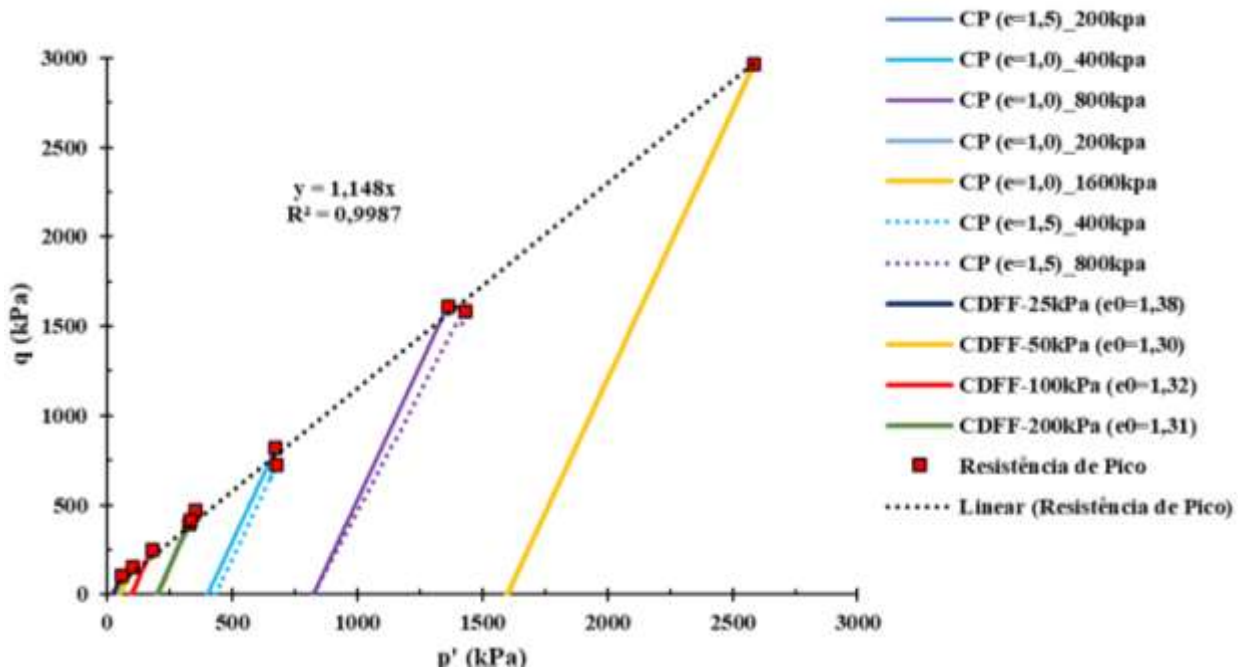


Figura 4.17: Envoltória de Ruptura Analisando Todas as Trajetórias de Tensão.

Já ao analisar o comportamento de resistência somente das amostras densas foi observado um pequeno ganho de resistência, atingindo um valor de M_{tc} de 1,16. O equivalente a 29,2° de ângulo de atrito, o que é esperado já que a resposta da tensão desvio gerada por essas amostras, conforme observado na Figura 4.15. As trajetórias de tensão para determinar a resistência nessa condição está ilustrada na Figura 4.18.

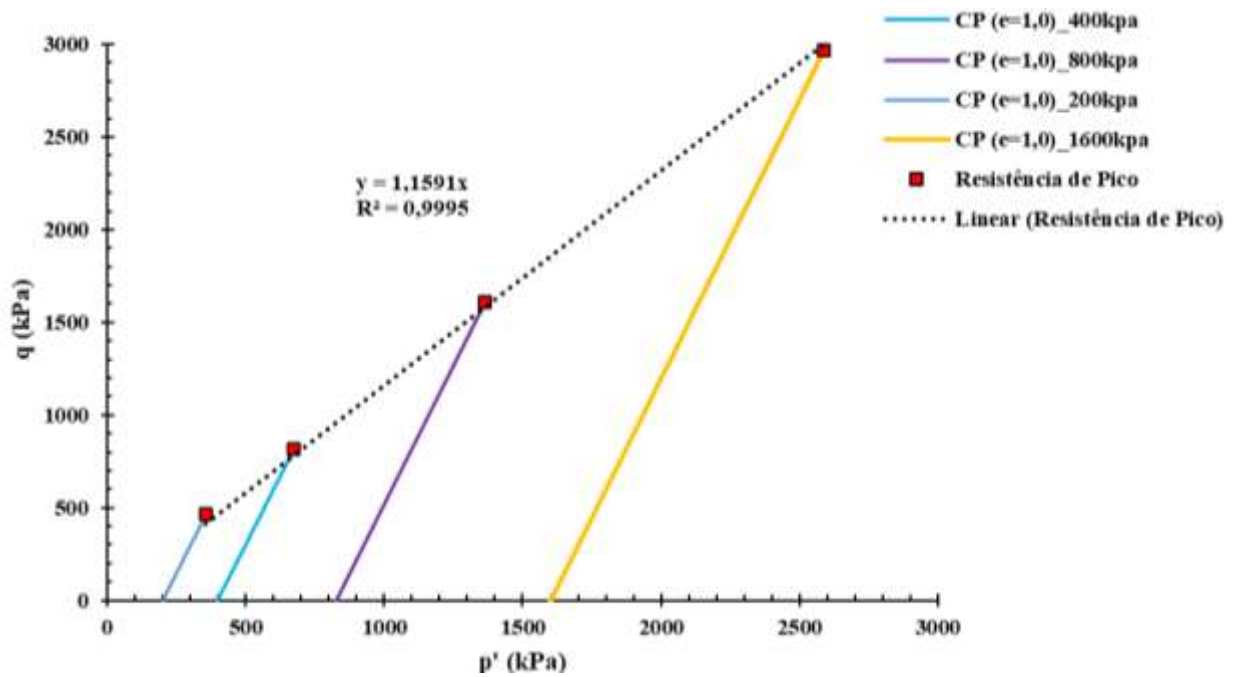


Figura 4.18: Envolvória de Ruptura Amostras Densas.

As amostras fofas apresentaram a menor resistência, atingindo um valor de M_{tc} de 1,115; o equivalente a um ângulo de atrito de $28,1^\circ$. Uma diferença de $1,1^\circ$ comparando o ângulo de atrito do estado fofo para o estado denso, essa diferença ainda diminui quando comparado com a resistência encontrada analisando o conjunto de todas as amostras. A envoltória de ruptura das amostras fofas está ilustrada na Figura 4.19.

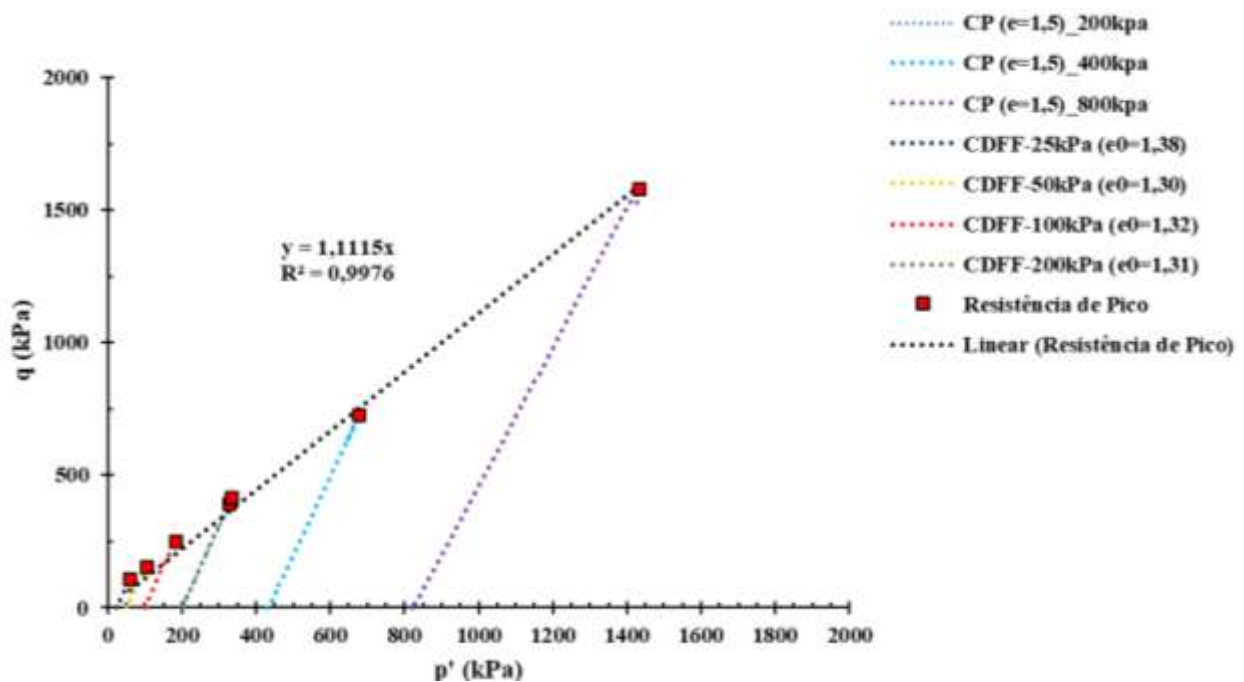


Figura 4.19: Envolvória de Ruptura Somente com as Amostra Fofas.

Um outro método para determinar o parâmetro M_{tc} das amostras é o apresentado por Shuttle & Jefferies (2019). Por meio da metodologia empregada pelos autores, é possível determinar o parâmetro N de Nova (1982).

A Figura 4.20 ilustra a trajetória da dilatância de 4 amostras, a amostra densa apresentou o maior valor de dilatância comparada com as outras amostras que estão em um estado contrativo. Com base na figura foi realizado o ajuste da dilatância medida durante a fase de cisalhamento dos ensaios triaxiais CD e a equação de dilatância, deste modo determinou-se o parâmetro N com valor de 0,35 e o parâmetro M_{tc} nesse método apresentou um valor de 1,25.

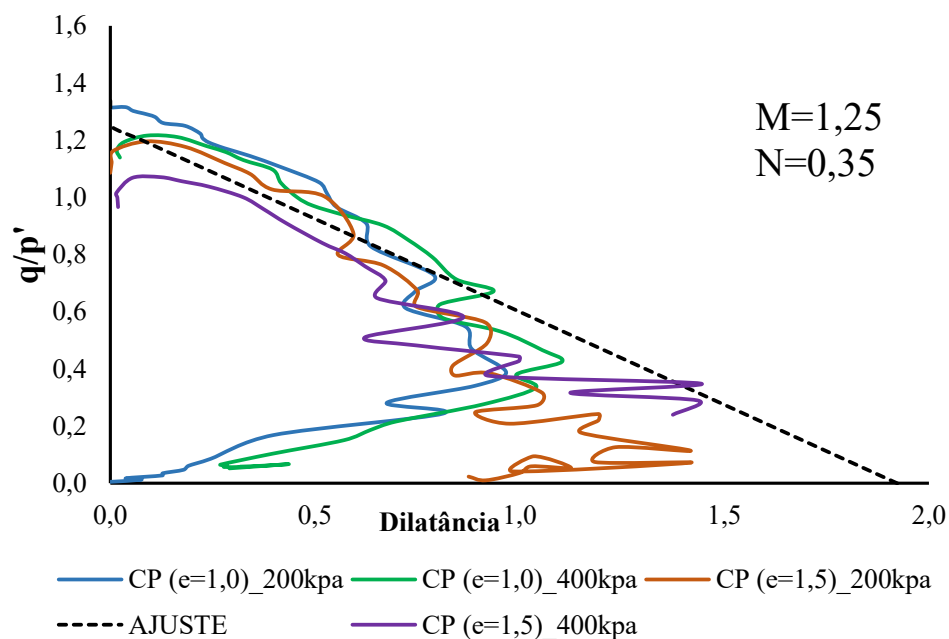


Figura 4.20. Gráfico q/p' vs Dilatância – Ensaios triaxiais drenados para o Rejeito de Manganês.

Como não foi possível encontrar outros trabalhos para comparar o comportamento do rejeito de manganês com o parâmetro de estado crítico foram usados dados disponíveis no trabalho de Been e Jeffreys (2016) para confeccionar a Figura 4.21.

Com auxílio da Figura 4.21 observa-se que o rejeito estudado apresenta o menor diâmetro média em comparação com outros rejeitos e o parâmetro de resistência apresentou um valor baixo, mas quando comparado com outros materiais está dentro de uma margem que faz sentido, como por exemplo a resistência encontrada no rejeito de barragem de rejeito de zinco na cidade de Faro no Canadá que está representado por “Faro lead-zinc” na imagem comparativa.

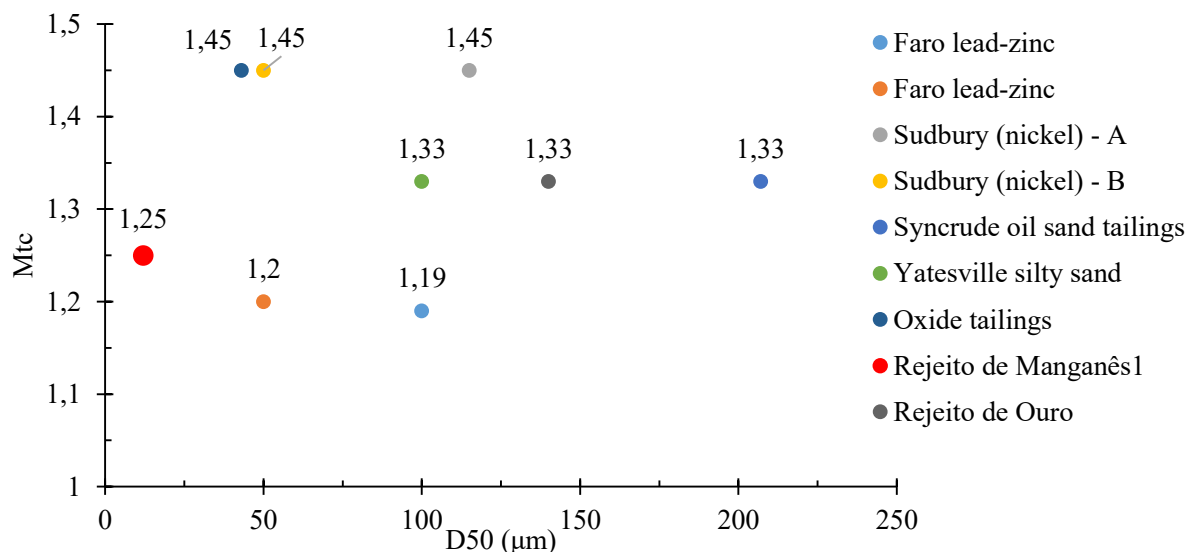


Figura 4.21: Comparativo do Parâmetro Mtc com Outros Rejeitos em Literatura.

Um dos fatores que pode influenciar na baixa resistência, quando comparados com outros rejeitos que apresentam um valor de Mtc de 1,45, é a interação entre as partículas e os colóides formados pelos argilominerais presentes no rejeito estudado.

4.4.2.2 Compressibilidade e Linhas de Compressão no Espaço e Vs. $\ln(p')$

Para definir a LEC e a LCI foi preciso saber as condições inicial e ao final do ensaio do índice de vazios, e_i e e_f , respectivamente. Além disso, a tensão média efetiva (p') nas mesmas condições. Dessa forma, com auxílio do Quadro 4.1, definiu-se a LEC e LCI.

A Figura 4.22 apresenta a LEC e a LCI no plano e Vs. $\log(p')$. Com ela é possível observar os valores de λ são muito próximos ao ponto de ser possível supor um paralelismo entre as duas linhas. A LCI apresentou um λ de 0,071 e a LEC um valor de 0,070, os siltes apresentam valores de λ similares aos encontrados nessa pesquisa.

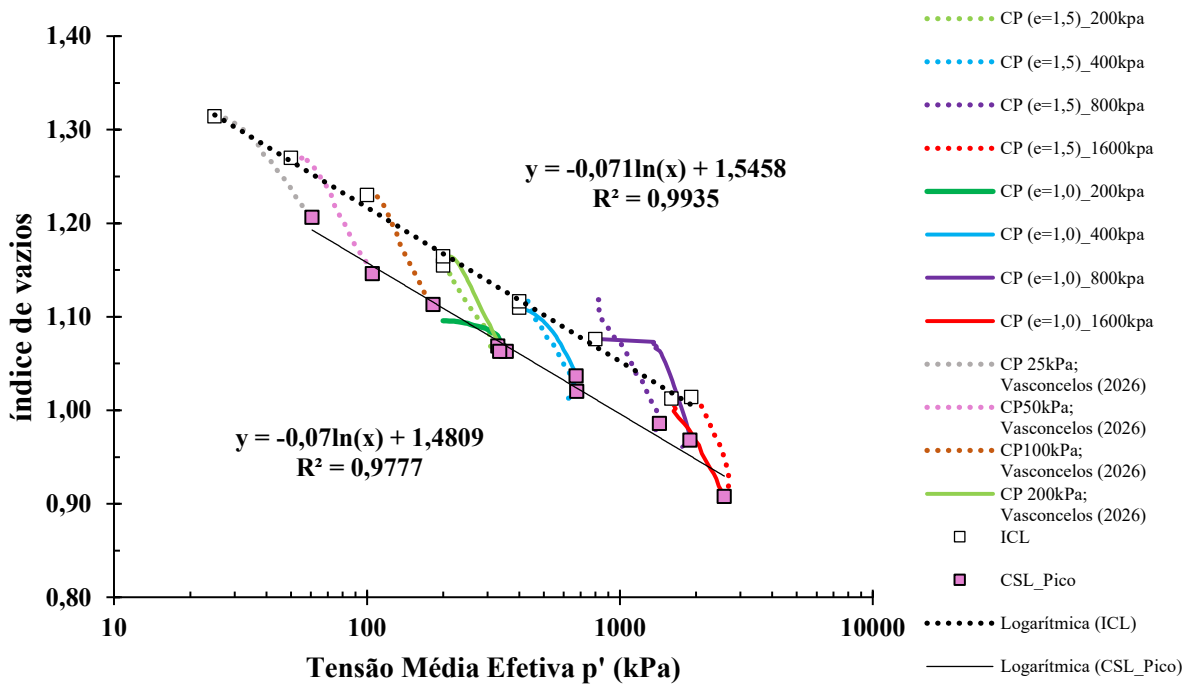


Figura 4.22. Gráfico e vs log (p) – Identificação da Linha de Estados Críticos (LEC) e Linha de Compressão Isotrópica (LCI) para o Rejeito de Manganês.

Destaca-se que, entre as amostras analisadas há 3 condições de moldagem distintas, resultando em 3 índices de vazios iniciais distintos. A tensão confinante de 200 kPa foi a única tensão confinante em que 3 amostras com condições iniciais distintas foi ensaiada, onde duas dessas amostras em estado fofo, $\Psi > 0$, apresentaram um comportamento contrativo. Por sua vez, a amostra com menor índice de vazios, $\Psi < 0$, apresentou um leve comportamento dilatante, depois estabilizou em sua deformação volumétrica e, em seguida, contraiu convergindo em sua trajetória de índice de vazios com as outras duas amostras. Esse comportamento está ilustrado na Figura 4.23.

Além disso, a Figura 4.23 ilustra o comportamento das trajetórias de índice de vazios das amostras ensaiadas na tensão confinante de 400 kPa. Essas amostras apresentaram uma trajetória de índice de vazios ao longo do cisalhamento que convergiu tanto o índice de vazios ao final da fase de consolidação, e início da fase de cisalhamento, quanto o índice de vazios ao final da fase de cisalhamento. Deste modo, o comportamento observado corrobora com o entendimento de uma única LEC, portanto não foi observado um comportamento transicional no rejeito referente a LEC.

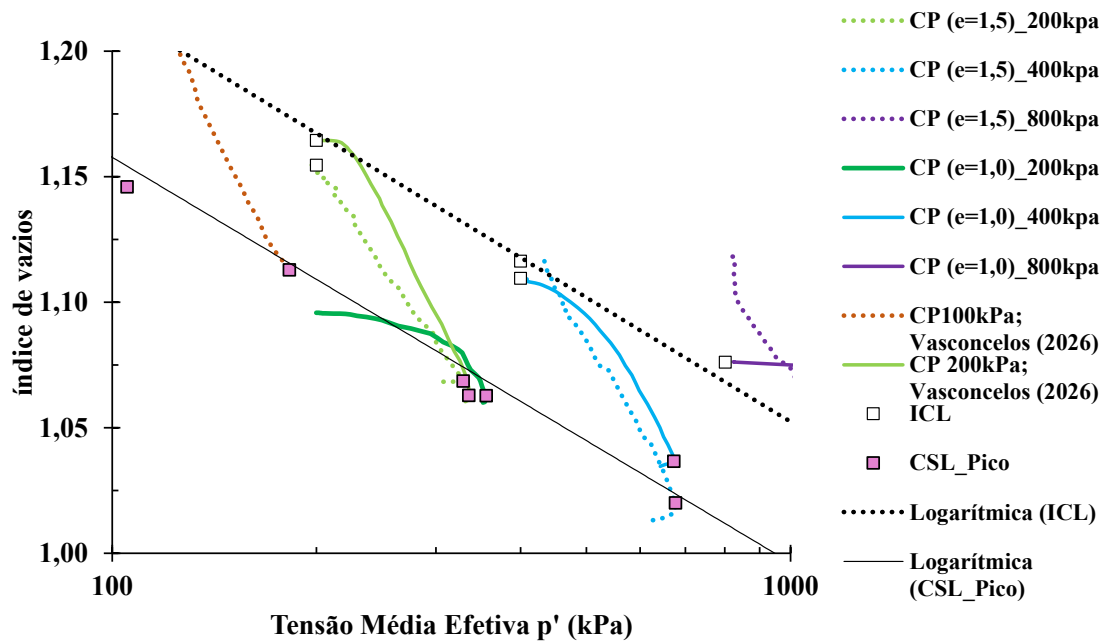


Figura 4.23: Investigação sobre a Unicidade da LEC

Com exceção da amostra densa ensaiada com 200 kPa e a mostra fofo de 800 kPa, todas as outras amostras saíram de um estado fofo e foram consolidadas isotopicamente de modo que foi possível determinar a LCI.

Deste modo, é possível observar os que os valores encontrados de compressibilidade (λ) no rejeito de manganês apresentaram um comportamento onde elas são paralelas entre si, já que os valores de λ são praticamente iguais. A Tabela 4.4 os valores de λ e Γ referentes a cada linha de compressão. Salienta-se que o valor de Γ calculado para a LCN a tensão está em função da tensão vertical, uma vez que não foi possível calcular a tensão efetiva média.

Tabela 4.4: Compilado dos Parâmetros λ e Γ encontrados na LCI, LEC e LCN

	LCI	LCN*	LEC
λ	0,71	0,7	0,7
Γ	1,55	1,35	1,48

* O valor Γ da LCN foi calculado para σ_v

Assim como no parâmetro de resistência que não foi possível encontrar um trabalho de rejeito de manganês para fazer um comparativo com o material deste estudo, foi usada a base de dados disponível no trabalho de Been e Jeffreys (2016) para confeccionar um comparativo.

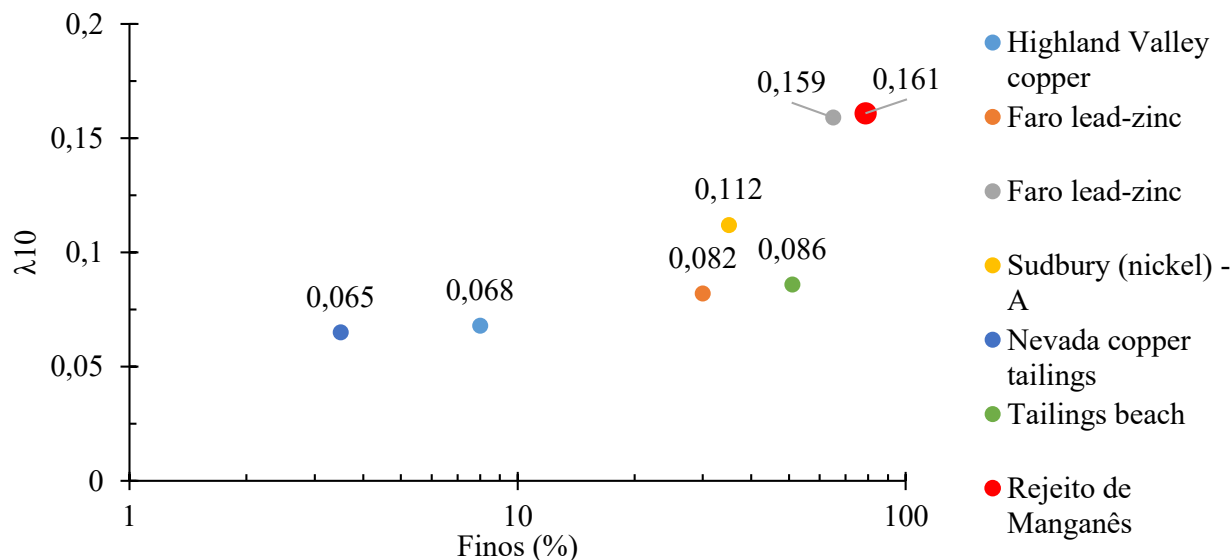


Figura 4.24: Comparativo em do Parâmetro λ Com Outros Rejeitos Conhecidos na Literatura.

Com base na Figura 4.24 observa-se que o rejeito estudado apresenta uma quantidade de finos predominante e, assim como no caso do parâmetro M_{tc} , o comportamento do rejeito de manganês tem uma forte similaridade com o rejeito de zinco da cidade de Faro. Apresentando um índice de compressibilidade e um teor de finos muito similares, isso contrapõe um pouco o que seria esperado na classificação ML do sistema de classificação unificada de solos que categoriza em um grupo que seria esperado uma baixa compressibilidade do material, o que foi observado justamente o contrário.

4.4.2.3 Desempenho da Moldagem das Amostras fofas

O modo de moldagem desenvolvido para corpos de prova em estado fofo mostrou-se capaz de caracterizar adequadamente o comportamento no estado crítico em condições drenadas, no rejeito de manganês. Uma vez que, os resultados demonstrados pelas amostras fofas convergiram para valores semelhantes aos encontrados nas amostras densas de parâmetros λ das Linhas de Compressão Intrínseca (LCI) e do Estado Crítico (LEC).

Em relação a resistência mecânica, a diferença encontrada entre amostras fofas e densas foi pequena, na ordem de 1° de ângulo de atrito. Essa diferença pode ser associada ao uso de tensões de pico na interpretação dos resultados, uma vez que a resistência ao final do ensaio não foi usada motivado pelo amolecimento pós-pico, que pode ter decorrido do desenvolvimento de bandas de cisalhamento. Além disso, a maior energia empregada na moldagem das amostras densas pode ter acarretado alterações no arranjo estrutural afetando o imbricamento entre as

partículas, o que levaria a um ganho de resistência. Fatores esses que independem do índice de vazios em que a amostra foi moldada.

Destaca-se que as amostras densas e fofas apresentaram um parâmetro de estado muito semelhante nas tensões confinante 200 kPa à 1600 kPa (com exceção da amostra densa ensaiada à 200 kPa). Já que, o índice de vazios inicial dessas amostras após a fase de adensamento colocou-as próximas a LCI e como há um paralelismo entre LCI e LEC, coloca essas amostras com um valor de Ψ próximos.

Esses resultados reforçam a ideia de que o método de moldagem possibilitou a produção de CPs que representaram o estado crítico. Somado a isso, o método possui uma fácil replicabilidade e, para a sua execução, não há a necessidade de nenhum outro acessório, a não ser os do Mini-MCV e um extrator de corpos de prova.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento desta pesquisa procurou entender a influência da variação do índice de vazios no comportamento mecânico de um rejeito de minério de manganês. Apresentam-se as principais conclusões:

- Foi desenvolvido uma caracterização do rejeito de manganês sobre uma ótica geotécnica que não foi possível encontrar em literatura nacional e internacional. O rejeito estudado é um rejeito siltoso classificado com ML na classificação SUCS com 78,7% de finos sendo 74,9% correspondente a diâmetro de siltes;
- A composição mineralógica de manganês apresentada nos ensaios FRX e DRX mostram que há uma concentração alta de Mn para um rejeito e a forma preponderante do rejeito é manganês em forma não cristalina;
- O parâmetro de resistência para o estado crítico encontrado foi de $M_{tc_{geral}} 1,25$. Ao analisar separadamente o parâmetro de resistência das amostras fofas e densas não foi observado significativa no plano q Vs. $\text{Log}(p')$;
- Em relação ao adensamento em ensaios oedométricos, o rejeito apresentou uma convergência do valor médio de λ para LCI, LCN e LEC, quando observado o horizonte de tensões do estudo;
- O rejeito apresentou uma compressibilidade alta quando comparado com outros rejeitos em literatura, com um valor médio de λ de 0,07;
- Constatou-se que o rejeito de manganês não apresenta um comportamento transicional. O parâmetro de convergência para as amostras ensaiadas na condição inundado foi de 0,03, portanto, pela metodologia desenvolvida por Ponzoni *et. al* (2014) o material apresenta uma única LCN, nas tensões observadas;
- Observou-se a influência da sucção nos ensaios oedométricos com GC de 80% e 90%, sendo essa influência dissipada nas amostras moldadas com GC de 100%. Essa influência afeta diretamente na aplicação de técnicas de disposição com rejeito compactado, visto que amostras fofas saturadas apresentaram deformações muito mais velozes do que as amostras não-saturadas;
- Ao comparar as Metodologia A e Metodologia B para ensaios oedométricos, observou-se que o uso da Metodologia B divergiu do valor de λ encontrado nos ensaios usando a Metodologia A. Porém, é necessário um aprofundamento no estudo referente a Metodologia B para ver a sua aplicabilidade no rejeito estudado;

- A permeabilidade apresentou uma diferença de uma ordem de grandeza entre os dois índices de vazios, com valores na ordem de 10^{-5} cm/s para amostras densas e 10^{-4} cm/s para amostras fofas;
- O método de moldagem de amostras fofas apresentou resultados satisfatórios para o estudo do estado crítico, de modo que foi possível obter parâmetros do estado críticos na condição drenada do rejeito de manganês.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- A variação do índice de vazios não apresentou uma diferença significativa na resistência, porém uma forte influência no comportamento hidráulico. Isso pode trazer implicações importantes ao avaliar estruturas geotécnicas sujeitas a carregamentos rápidos. Sendo assim, sugere-se que haja uma continuidade do estudo do rejeito em condições não drenadas para avaliação da suscetibilidade à liquefação;
- Realizar ensaios em amostras densas, em estado contrativo, para avaliar a dilatância do material e com isso determinar o parâmetro crítico χ . Tensões confinantes sugeridas: de 25 kPa-200 kPa, pois as amostras densas realizadas nesta pesquisa não apresentaram dilatância significativa, com exceção da amostra densa ensaiada a 200 kPa;
- Testar o método de moldagem de amostras fofas desenvolvido em outros rejeitos e observar se o método de moldagem é satisfatório para o estudo do estado crítico. Somado a isso, avaliar por meio de imagens de microtomografia para avaliar se os CPs moldados apresentam uma boa homogeneidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16853: Solo – Determinação do comportamento de solos sob condições não saturadas – Método de ensaio de adensamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6508: Grãos de solo – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3ec95f52-d294-4102-807f-e71c56959fde>>. Acesso em: 24 mar. 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas – ano base 2020. Brasília: ANM, 2021. 23 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Sumário mineral 2018. Brasília: ANM, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral>. Acesso em: 17 fev. 2026.
- ALVES, P. I. A. Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. 2020. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2020.
- ARAÚJO FILHO, Roberto Costa. *O Grupo Águas Claras da Serra dos Carajás, Paleoproterozoico do Cráton Amazônico: fácies, litoestratigrafia e sequências deposicionais*. 2018. 67 f. il. color.

- ARAÚJO, O. J. B.; MAIA, R. G. N.; JORGE-JOÃO, X. S.; COSTA, J. B. S. A megaestruturação da folha Serra dos Carajás. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, 1988, Anais... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. ASTM D5550-14: Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer. West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- BALBINO, Jonathas de Brito. Caracterização geotécnica de um rejeito clay-like do Quadrilátero Ferrífero. 2022. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2022.
- BEEN, K.; JEFFERIES, M. G. A state parameter for sands. *Géotechnique*, v. 35, n. 2, p. 99–112, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1985.35.2.99>
- BLIGHT, G. *Geotechnical engineering for mine waste storage facilities*. London: CRC Press, 2009.
- BOSZCZOWSKI, Roberta B. *Laboratório de Mecânica dos Solos: ensaios especiais*. Oficina de Textos, 2023.
- BRITO, G. Q. (2020). *Desempenho de Mistura Asfáltica do Tipo Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) com a Inserção de PET (Polietileno Tereftalato) Micronizado*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 69p.
- CAPUTO, H. P. *Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos*. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. v. 1.
- CARRERA, Alessandro; COOP, M. R.; LANCELLOTTA, Renato. Influence of grading on the mechanical behaviour of Stava tailings. *Géotechnique*, v. 61, n. 11, p. 935-946, 2011.
- CASAGRANDE, A. (1975). Liquefaction and cyclic deformation of sands-a critical review. Pro of the Fifth Pan American Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buens Aires, Argitina,
- CASAGRANDE, A. (1936). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of earth fills. *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 23: 257-276
- CASTRO, G. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 101, n. 6, p. 551–569, 1975.

- CASTRO, G. Liquefaction of sands. 1969. Thesis (Doctor of Science) – Harvard University, Cambridge, MA, 1969.
- CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Coordenação: Adão Benvindo da Luz, João Alves Sampaio, Silvia Cristina Alves França.
- CORRÊA, M. M. *Impacto da reconstituição de amostras de laboratório na avaliação do potencial de liquefação em depósitos de rejeito*. 2018. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) — Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Ouro Preto, 2018.
- DAS, B. M. Fundamentos de engenharia geotécnica. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2006.
- DAVIES, M. P.; DAWSON, B. D.; CHIN, B. G. Static liquefaction slump of mine tailings – A case history. In: PROCEEDINGS OF THE 51st CANADIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, Edmonton, Canada. v. 1, p. 123–131, 1998.
- DAVIES, M. P.; MARTIN, T. E. Mine tailings dams: when things go wrong in proceedings of tailing dams. Las Vegas: Association of State Dam Safety Officials, U.S. Committee on Large Dams, 2000. p. 261-273.
- DNPM. O depósito de manganês do Azul, Carajás. In: COSTA, Marcondes Lima da; ANGEIRAS, Agenor G. (Orgs.). Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia. Belém: ADIMB, 2005. p. 228-331.
- FOURIE, A. Geotechnics of mine tailings: a 2022 state of the art. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 20., 2022. Proceedings [...]. Australian Geomechanics Society, 2022. p. 121–183.
- GOLDER ASSOCIATES LTDA., Tailings Storage Facility Life of Mine Feasibility Design. Mount Polley Mine. Vancouver, BC, Canadá, 2015.
- GOMES, A. (2022). Análise de gatilhos de liquefação estática em barragem de rejeito. Dissertação de Mestrado, Publicação (377/2022), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91 p.
- HAZEN, A. Hydraulic fill dams. Transactions, American Society of Civil Engineers, (1920), 83: 1713-1745.

- HEAD, Kenneth H. Manual of soil laboratory testing. Volume 3: effective stress tests.. ed. 2. 1998.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). *Dados do IBRAM*. Brasília: IBRAM, 2025. Disponível em: <https://ibram.org.br/dados-do-ibram/>. Acesso em: 17 fev. 2026.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). *Gestão e manejo de rejeitos da mineração*. 1. ed. Brasília: IBRAM, 2016. 128 p. ISBN 978-85-61993-10-8.
- ISHIHARA, K. et al. Cyclic strength characteristics of tailings materials. *Soils and Foundations*, v. 20, p. 127–142, 1980.
- IWASAKI, Toshio. Soil liquefaction studies in Japan: state-of-the-art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 5, n. 1, p. 2-68, 1986.
- KNUDSEN, S. et al. Effect of reconstitution techniques on the triaxial stress-strength behaviour of a very dense sand. *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019, Reykjavik, Iceland*, p. 1-6, 2019.
- LADD, R. S. Specimen preparation and liquefaction of sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, v. 100, n. 10, p. 1180–1184, 1974.
- LADE, P. V. *Triaxial testing of soils*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. *Soil mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1969.
- LEÃO, Rafael; RABELO, Rodrigo. A Extensão da cadeia produtiva da economia mineral no PIB brasileiro. Rio de Janeiro : Ipea, dez. 2023. 88 p. : il. (Texto para Discussão, n. 2950). DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td2950-port>.
- LI, W.; COOP, M. R. Mechanical behaviour of Panzhihua iron tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 56, n. 3, p. 420–435, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0032>
- LIU, Y.; LIU, E.; YIN, Z. Constitutive model for tailing soils subjected to freeze–thaw cycles based on meso-mechanics and homogenization theory. *Acta Geotechnica*, v. 15, p. 2433–2450, 2020.
- LIU-ZENG J, Wang P, Zhang Z et al (2017) Liquefaction in western Sichuan basin during the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, China. *Tectonophysics* 694:214–238. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.001>

- LOZANO, Fernando Arturo Erazo. Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. doi:10.11606/D.3.2006.tde-14122006-123702. Acesso em: 2026-01-14.
- LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. In: Tratamento de minérios, 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.1. p.3-23.
- MARINHO, F. A. M.; GONÇALVES, F. P.; SERAFIM, R.; LEMOS, M. B. A simple procedure for freezing triaxial test specimens and determining the final moisture content after liquefaction. *Geotechnique Letters*, Londres, v. 15, n. 1, p. 8–11, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1680/jgele.24.00019>.
- MMBANDO, E.; FOURIE, A.; REID, D. Mechanics of an iron ore tailings exhibiting transitional behaviour. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 41, n. 3, p. 2211–2220, 2023.
- NAYANTHARA, Pahalage Nishadi et al. Laboratory investigation on the transitional behaviour of tailings from a gold mine site in Australia. *Results in Engineering*, v. 24, p. 103481, 2024.
- MMBANDO, R.; ISHIHARA, K. The steady state of sandy soils. *Soils and foundations*, v. 36, n. 2, p. 81-91, 1996.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (U.S.). Committee on Earthquake Engineering. Liquefaction of soils during earthquakes. Washington, D.C.: National Academy Press, 1985. 250 p. Relatório n. PB86-163110.
- NAYANTHARA, P. N. Laboratory investigation on the transitional behaviour of tailings from a gold mine site in Australia. *Results in Engineering*, v. 24, p. 103481, 2024.
- NOGUEIRA, A. C. R. Análise faciológica e aspectos estruturais da formação Águas Claras, região central da Serra dos Carajás-PA. Orientador: Werner Truckenbrodt. 1995. 168 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1995. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11488>. Acesso em: 16/02/2026 .
- NOVA, R. A. Constitutive model for soil under monotonic and cyclic loading. In: PANDE, G. N.; ZIENKIEWICZ, O. C. (ed.). *Soil mechanics – transient and cyclic loads*. Chichester: Wiley, 1982. p. 343–373.

- OLIVEIRA FILHO, W. L. *Considerações sobre ensaios triaxiais em areias (Rio de Janeiro)*. 1987. 266 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1987.
- PONZONI, E.; NOCILLA, A.; COOP, M. R.; COLLESELLI, F. Identification and quantification of transitional modes of behaviour in sediments of Venice lagoon. *Géotechnique*, v. 64, n. 9, p. 694–708, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.13.P.166>
- RAD, N. S.; TUMAY, M. T. Factors affecting sand specimen preparation by raining. *Geotechnical Testing Journal*, v. 10, n. 1, p. 31–37, 1987.
- RATTON, R. B. 1993. *Ensaio Triaxiais em Areia Saturada*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- ROBERTSON, P. K. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 136, n. 6, p. 842–853, 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000286](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000286)
- ROBERTSON, P. K. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test: an update. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 59, n. 4, p. 620-624, 2022.
- SAMPAIO, J. A.; PENNA, M. T. M. (2001). Manganês – CVRD/Mina do Azul. In: *Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil*. Sampaio, J. A.; Luz, A. B. da e Lins, F. (Editores). Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT, p. 49-60.
- SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B.; PENNA, M. T. M.; LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (Ed.). *Rochas & minerais industriais: usos e especificações*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.
- SEED, H. B. et al. Re-evaluation of the slide in the Lower San Fernando Dam in the earthquake of February 9, 1971. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1988. (Report UCB/EERC-88/04).
- SEED, H. B.; LEE, K. L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v. 92, n. 6, p. 105-134, 1966.
- SHUTTLE, D.; JEFFERIES, M. Determining silt state from CPTu. *Geotechnical Research*, v. 3, n. 3, p. 90–118, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1680/jgere.16.00008>

- SOUSA PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- SOUZA, T. C. *Metodologia de avaliação de liquefação em barragens de rejeito: uma abordagem probabilística*. 2018. xxii, 269 f., il., enc. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – UFMG, Escola de Engenharia, BH, 2018.
- TSAI, P.-H. et al. Effect of content and plasticity of fines on liquefaction behaviour of soils.
- TSUCHIDA, H. Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits. In: SEMINAR IN THE PORT AND HARBOR RESEARCH INSTITUTE. Proceedings [...]. 1970. p. 3.1–3.33.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Mineral commodity summaries 2026*. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3133/mcs2026>. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries> Acesso em: 17 fev. 2026.
- VAID, Y. P.; NEGUSSEY, D. Relative density of pluviated sand samples. *Soils and Foundations*, v. 24, n. 2, p. 101–105, June 1984.
- VICK, S. G. (1990). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd. Vancouver, Canadá, 369 p.
- VASCONCELOS, G. C. Avaliação do comportamento mecânico de rejeito de minério de manganês à luz da teoria dos estados críticos. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, UnB, 2026.
- WIJEWICKREME, D.; SRISKANDAKUMAR, S.; BYRNE, P. Cyclic loading response of loose air-pluviated Fraser River sand for validation of numerical models simulating centrifuge tests. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 42, n. 2, p. 550–561, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1139/t04-119>
- WOOD, David Muir. *Soil behaviour and critical state soil mechanics*. Cambridge university press, 1990.